УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

приоритет2030^
лидерами становятся

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ
Том 1

Материалы
XX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 12 – 15 мая 2026 г.)

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 1

Материалы
XX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.)

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа
Уфимский университет
2026

УДК 629.7+621.1+531/532+33.055
ББК 39.5+31.36+22.2+65.290
М12

Публикуется по решению заседания ФАДЭТ УУНиТ.
Протокол № 12 от 29.06.2026 г.

Редакционная коллегия:
канд. техн. наук **О. Н. Иванова** *(отв. редактор)*;
старший преподаватель **А. Х. Рахимов** *(секция 1.1, 1.2)*;
канд. техн. наук, доцент **Р. Д. Каримов** *(секция 1.3)*;
канд. техн. наук, доцент **Р. Ю. Сакулин** *(секция 1.4)*;
старший преподаватель **Р. И. Шайхутдинов** *(секция 1.5)*;
канд. техн. наук **Д. В. Целищев** *(секция 1.6)*;
канд. техн. наук **П. В. Петров** *(секция 1.6)*;
ассистент **К. В. Конева** *(секция 1.7)*;
инженер кафедры ПГМ **Е. Э. Бикмухаметова**

Мавлютовские чтения: материалы XX Всероссийской молодёжной научной конференции (г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.) / отв. ред. О. Н. Иванова. В 9 т. Т. 1 [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2026. – 581 с. – URL: https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2026/207.pdf – Загл. с титула экрана.
ISBN 978-5-7477-6446-0
Том 1: ISBN 978-5-7477-6469-9

В 1-й том сборника материалов конференции вошли статьи секций 1.1–1.7.
Сборник предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей.
Все материалы представлены в авторской редакции.

УДК 629.7+621.1+531/532+33.055
ББК 39.5+31.36+22.2+65.290

ISBN 978-5-7477-6469-9 (том 1) © Уфимский университет, 2026
ISBN 978-5-7477-6446-0

СЕКЦИЯ 1.1. КОНСТРУКЦИЯ, ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 519.248

А.С. АЙСИН
azataisin01@mail.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. кафедры АД А.В. ЗЫРЯНОВ

Уфимский университет науки и технологий

МЕТОД ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ БАЛКИ ФЮЗЕЛЯЖА БЛИЖНЕМАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

Аннотация: проводится анализ повреждаемости скуловой балки самолета Ан-24. Вычисляются нагрузки, действующие на фюзеляж самолета и подкладной лист скуловой балки, и рассчитывается усталостная прочность подкладного листа.
Ключевые слова: самолет Ан-24, скуловая балка, подкладной лист, усталостная прочность.

Одним из наиболее востребованных самолетов для перевозки грузов и пассажиров в северных регионах России остается Ан-24. Особенно они нужны в местах, где самолет является единственным видом транспорта. Благодаря высокорасположенным двигателям, мощному шасси высоким взлетно-посадочным качествам данные воздушные суда имеют возможность круглый год эксплуатироваться на грунтовых, травяных, галечных, песчаных, заснеженных и размокших аэродромах относительно малых размеров, а из-за установки на его борту трапа и вспомогательной силовой установке могут работать на неподготовленных аэродромах [2].

По предварительным оценкам назначенный ресурс Ан-24 закончится в 2030 года, и на данный момент им замены нет, так как ТВРС-44 «Ладога» находится на этапе создания, а Ил-114 на стадии испытаний. Серийное производство данных летательных аппаратов будет налажено в ближайшие годы, но производственные мощности авиапредприятий не смогут сразу заменить все старые самолеты, поэтому в ближайшие лет 5 Ан-24 останется актуальным воздушным судном особенно на аэродромах со сложными условиями эксплуатации.

Из-за большого возраста и воздействия на самолет циклических знакопеременных нагрузок и нагрузок, выходящие за эксплуатационные нормы, накапливаются трещины в его конструкции. Особо слабым местом Ан-24 является скуловая балка (рис. 1).

В 2019 году КБ Антонов утвердило бюллетень, согласно которой необходимо выполнять рентген-контроль фюзеляжа в районе скуловой балки в

гермозоне при наработке самолета с начала эксплуатации более 12000 полетов и при достижении наработки после последнего капитального ремонта 5000 и 10000 полетов [1].

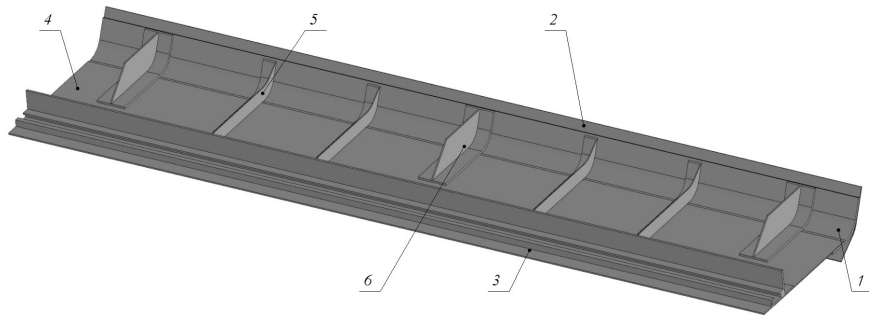


Рис. 1. Скуловая балка:
1 - наружный пояс, 2 - подкладной лист, 3 - рельса, 4 - стенка, 5 - стойки, 6 - фитинг

В ходе исследовательской работы были проанализированы акты о выполнении неразрушающего контроля, из которых следует, что основным местом возникновения трещин является подкладной лист скуловой балки. Данные из этих актов были сведены в график, который отражает, где чаще всего образуются трещины (рис. 2). Исходя из графика можно сделать вывод, что трещины скуловой балки образуются по всей ее длине, но чаще всего встречается слева и справа по борту между 24 и 29 шпангоутами и по правому борту между 34 и 35 шпангоутами (на 5 воздушных судах). В указанных местах между каждыми шпангоутами образуется по несколько трещин небольшой длины. Исходя из выводов для исследования необходимо рассмотреть подкладной лист с 24 по 29 шпангоут, но для расчётов был выбран отрезок фюзеляжа с 26 по 28 шпангоуты, так как он имеет малое количество стыков и накладок в конструкции.

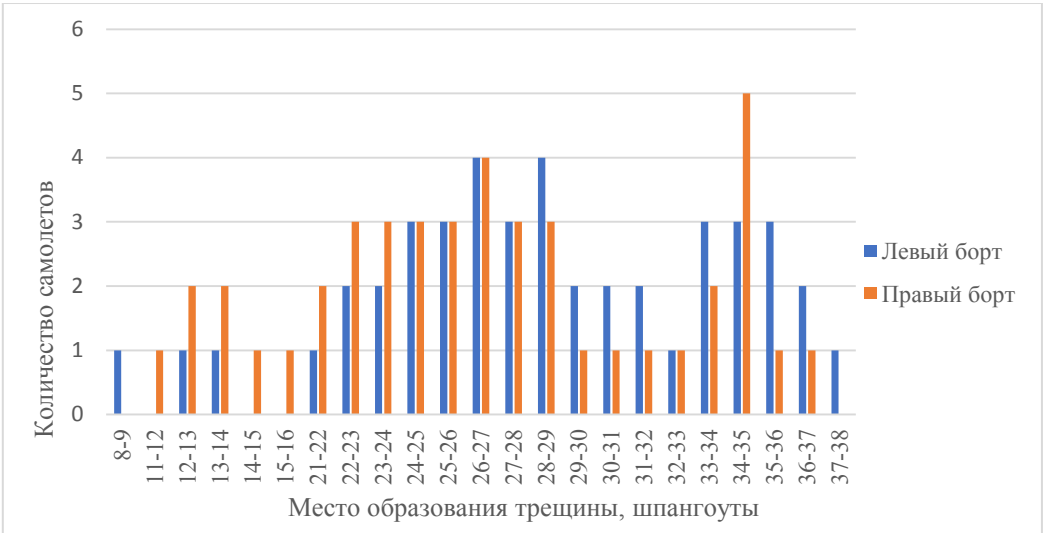


Рис. 2. График распределения трещин

На подкладной лист воздействуют силы, передающиеся от обшивки фюзеляжа. Основными внешними нагрузками, воздействующими на фюзеляж, являются силы, передающиеся от прикрепленных к нему частей самолета (крыльев, оперения, шасси, силовой установки). Кроме того, на фюзеляж действуют сосредоточенные массовые силы от масс грузов и агрегатов, расположенных внутри фюзеляжа, распределенные массовые силы от собственной конструкции фюзеляжа. Но самым главным фактором, который влияет на ресурс подкладного листа является перепад давления, создаваемый в гермокабине в полете, так как он располагается на пересечении дуг поперечного сечения фюзеляжа, где возникает концентрат напряжения.

Для определения сил, действующих на подкладной лист, необходимо произвести расчет отсека фюзеляжа в программном комплексе *Ansys*. Для расчета используется один типовой полет самолета Ан-24, который разбивается на несколько этапов, по каждому из которых рассчитываются нагрузки, действующие на фюзеляж.

Для моделирования циклических нагрузок в турбулентной атмосфере и при маневрах были заданы перегрузки для каждого момента (табл. 1).

Таблица 1

Перегрузки действующие в полете на самолет

Высота, м	Перегрузка	Количество циклов перегрузки
1	2	3
Отрыв (0)	1,1	1
500	0,9-1,1	1
1000	0,9-1,1	1
1500	0,9-1,1	1
2000	0,9-1,1	1
2800	0,9-1,1	1
3500	0,9-1,1	1
4000	0,9-1,1	1
4500	0,9-1,1	1
5000	0,9-1,1	30
5000	0,8-1,2	10
5000	0,7-1,3	2
5000	0,6-1,4	1
4500	0,9-1,1	1
4000	0,9-1,1	1
3500	0,9-1,1	1
2800	0,9-1,1	1
2000	0,9-1,1	1
1500	0,9-1,1	1

1000	0,9-1,1	1
500	0,9-1,1	1
Посадка (0)	1,4	1

Изгибающие моменты для каждого момента полета были помножены с перегрузками из таблицы 1. Полученные нагрузки приложены к торцу обшивки со стороны 28 шпангоута. Также к внутренней поверхности обшивки был приложен перепад давления, а со стороны 26 шпангоута торец обшивки был зафиксирован с деформацией.

Были сняты силы, действующие на подкладной лист для каждого случая полета, и приложены при отдельном расчете подкладного листа. Далее полученные результаты расчетов были импортированы в *Ansys nCode DesignLife,* где уже производился расчет на усталостную прочность (рис. 3).

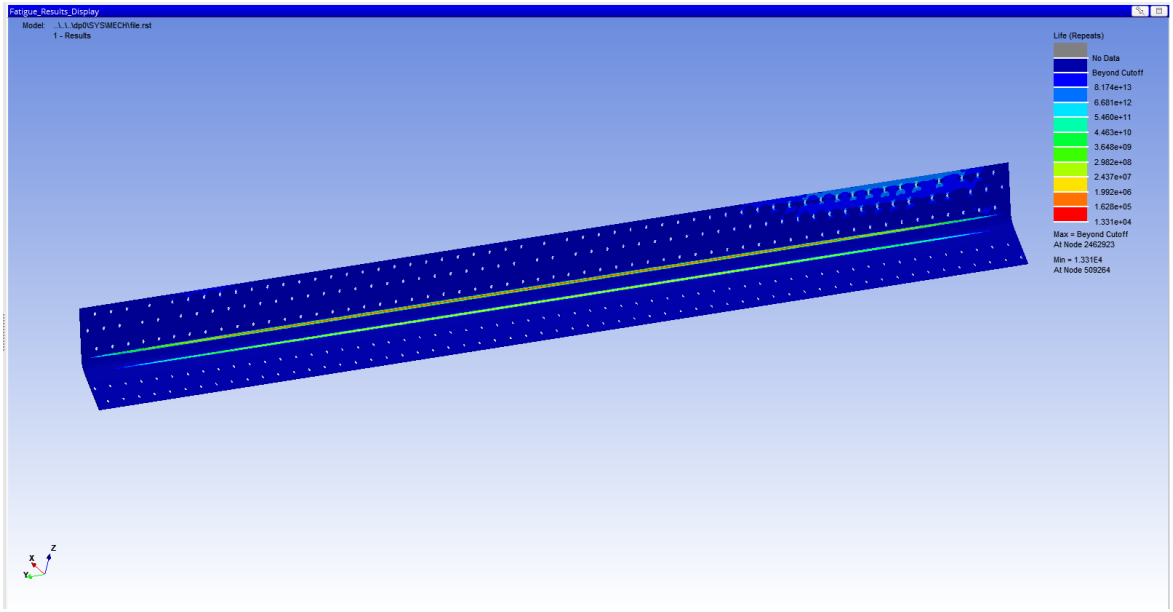


Рис. 3. Усталостная прочность подкладного листа

Из полученных результатов следует, что зарождение первого усталостного повреждения подкладного листа скуловой балки прогнозируется через 13310 полетов с начала эксплуатации. Указанное значение хорошо согласуется с бюллетенью, требующий выполнение рентген-контроля скуловой балки при наработке самолета с начала эксплуатации более 12000 с начала эксплуатации [1].

Библиографический список

1. Самолет Ан-24 (всех модификаций). Бюллетень №1530-БЭ-Г.

2. Самолет Ан-24. Техническое описание. Книга I. Летно-технические характеристики самолета.

© Айсин А.С., 2026

УДК 629.7.036

А.Р. АККУЧУКОВ
inur86reg2004@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Б.Р. АБДУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ ЗВЕНА ПОДКОСА ШАССИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯ *ANSYS STATIC STRUCTURAL*

Аннотация: проведён расчёт прочности звена подкоса шасси одновинтового вертолёта с заданными эксплуатационными нагрузками при пробеге с торможением, используя численное моделирование в *Ansys Static Structural,* и выявлены потенциально опасные зоны концентрации напряжений.
Ключевые слова: шасси, элемент конструкции, звено подкоса, расчет на прочность, нагрузка на шасси, *Ansys*.

Безопасность и надёжность авиационной техники напрямую зависят от прочности её конструктивных элементов, в том числе и от шасси. Звено подкоса шасси испытывает значительные нагрузки при взлёте, посадке и рулении, поэтому его расчёт на прочность является особо важной задачей.

Традиционные аналитические методы расчёта не всегда позволяют учесть сложную геометрию и неоднородные нагрузки. В таких случаях эффективным решением становится компьютерное моделирование методом конечных элементов (МКЭ), реализованным в программных комплексах типа *Ansys*.

Цель данной работы: оценка прочности звена подкоса шасси при эксплуатационных нагрузках с помощью модуля *Ansys Static Structural* и выявить потенциально опасные зоны концентрации напряжений.

Назначение элемента конструкции шасси. Пирамидальная схема состоит из трёх стержней (рис. 1). Два нижних жёстких стержня шарнирно прикрепляются к силовым элементам нижней части фюзеляжа. Они воспринимают лобовые и боковые нагрузки от колеса, а также работают на сжатие и растяжение. Третий стержень с амортизатором поглощает кинетическую энергию вертолёта при посадке.

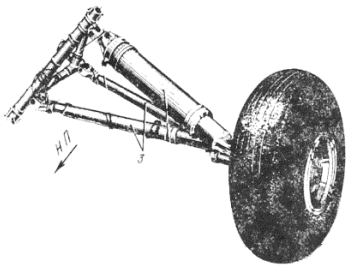


Рис. 1. Конструкция шасси

В качестве детали берётся передний подкос на рис. 1, под позицией 3.

Подкос – это сварной элемент трубчатой конструкции, выполненный из высокопрочной легированной стали 30ХГСА. 3*D*-модель детали представлена на рис. 2.

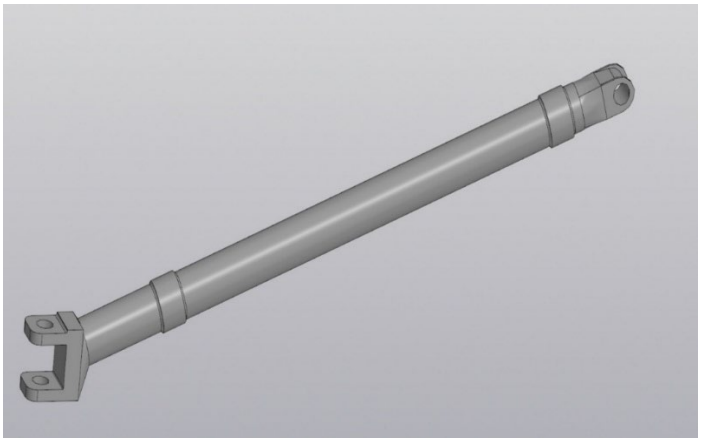


Рис. 2. 3*D*-модель детали

В качестве материала используется сталь 30ХГСА. По ГОСТ 4543-2016 химический состав и механические свойства материала приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства стали 30ХГСА

Химический состав стали 30ХГСА					
C	*Si*	*Mn*	*Cr*		
0,28-0,34	0,90-1,20	0,8-1,1	0,8-1,1		
Механические свойства стали 30ХГСА					
σ_T, МПа	$\sigma_{ВР}$, МПа	σ_5, %	ψ, %	*KCU*, Дж/см^2	*HB* (не более)
835	1080	10	45	49	229

Нагрузки, действующие на шасси. При стоянке вертолёта на его опоры действуют стояночные усилия от силы тяжести вертолёта и являются реакциями земли. Эти усилия определяются разнесением от центра тяжести вертолета его веса G на колеса передней стойки $a = 2820$ мм и колёса основных стоек шасси $b = 1580$ мм (*Рис. 3*).

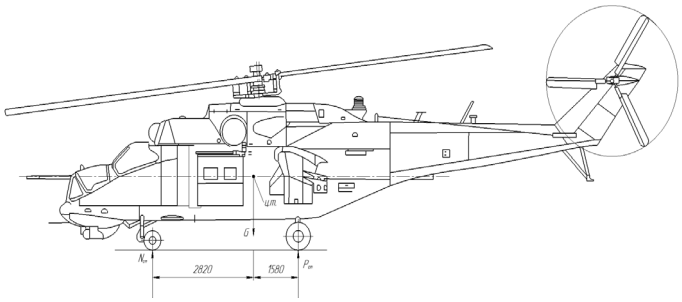


Рис. 3. Силы, действующие на шасси при стоянке

Сумма этих реакций по условию статического равновесия равна весу вертолёта:

$$2P_{\text{ст}} + N_{\text{ст}} = mg,$$

где $P_{\text{ст}}$ – стояночное усилие на главное колесо;

$N_{\text{ст}}$ – стояночное усилие на переднее колесо.

Величины усилий $P_{\text{ст}}$ и $N_{\text{ст}}$ зависят от расстояния между рассматриваемой опорной точкой и центром тяжести вертолёта и равны:

$$P_{\text{ст}} = 0{,}5 \cdot \frac{a}{a+b} \cdot mg = 0{,}5 \cdot \frac{2820}{2820+1580} \cdot 11000 \cdot 9{,}8 = 34549{,}9 \text{ Н};$$

$$N_{\text{ст}} = \frac{b}{b+a} \cdot mg = \frac{1580}{1580+2820} \cdot 11000 \cdot 9{,}8 = 38709{,}9 \text{ Н}.$$

В нормах прочности вертолёта для каждого расчётного случая нагружения шасси задаются: величина коэффициента эксплуатационной перегрузки $n^э = 1{,}33$, коэффициент безопасности $f = 1{,}5$ и направление действия силы.

Характерными случаями нагружения являются: посадка на главные опоры, посадка на все опоры, движение по неровностям аэродрома, посадка со сносом и т. п.

Эксплуатационная сила, действующая на стойку:

$$P^э = n^э \cdot P_{\text{ст}} = 1{,}33 \cdot 34549{,}9 = 45951{,}367 \text{ Н}$$

Расчёт элементов конструкции ведётся на разрушающие нагрузки:

$$P^p = n^э \cdot P_{\text{ст}} \cdot f = 1{,}33 \cdot 34549{,}9 \cdot 1{,}5 = 68927{,}1 \text{ Н}.$$

Расчет шасси на прочность сводится к определению внешних сил и моментов, действующих в элементах конструкции (*Рис. 4*).

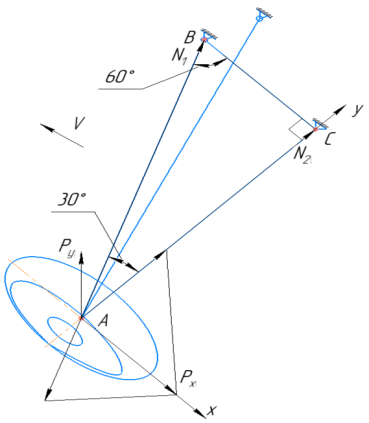


Рис. 4. Силы, действующие на конструкцию при пробеге

При пробеге с торможением конструкция стойки шасси должна быть спроектирована таким образом, чтобы она выдерживала в точке касания земли каждым заторможенным колесом лобовую нагрузку, равную по величине вертикальной нагрузке, умноженной на коэффициент трения, равный 0,8.

$$P_x = P^э \cdot 0{,}8 = 45951{,}367 \cdot 0{,}8 = 36761{,}1 \text{ Н}.$$

Запишем уравнение равновесия:

$$P_x \cdot \frac{AB}{2} - N_2 \cdot \cos 30° \cdot AB = 0.$$

Отсюда

$$N_2 = P_x \cdot \frac{\text{AB}}{2 \cdot \cos 30° \cdot AB} = \frac{P_x}{\sqrt{3}} = \frac{36761{,}1}{\sqrt{3}} = 21224{,}03 \text{ Н},$$

$$N_1 = \sqrt{N_2^2 + P_x^2} = \sqrt{21224{,}03^2 + 36761{,}1^2} = 42448{,}06 \text{ Н}.$$

Расчёт детали на прочность в модуле Ansys. На *Рис. 5* представлены результаты расчёта полной деформации с максимальным значением 0,1927 мм.

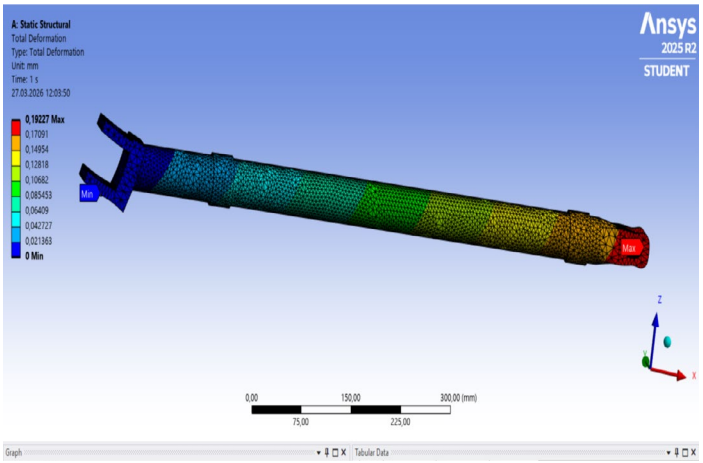


Рис. 5. Полные деформации

Из *Рис. 6* видно, что наибольшие эквивалентные напряжения 171,77 МПа возникают в районе проушины.

Максимальные эквивалентные напряжения в более чем 2,85 раза меньше, чем предел выносливости $\sigma_{-1} = 490$ МПа, что должно обеспечивать надёжную работу узла при циклическом режиме нагружения.

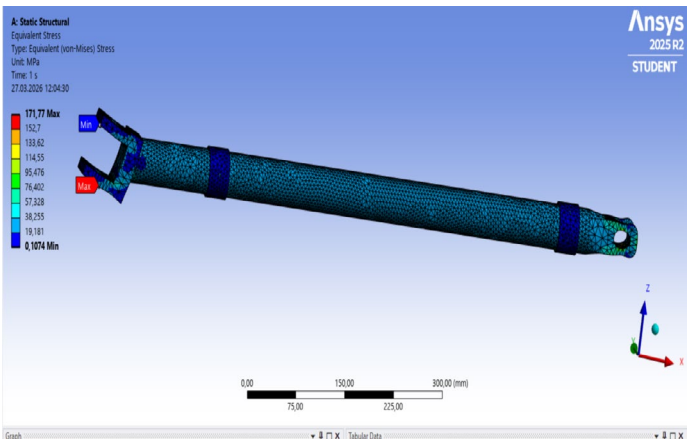


Рис. 6. Эквивалентные напряжения

По *Рис. 7* видно, что минимальный запас прочности для детали обеспечивается и равен 4,8111.

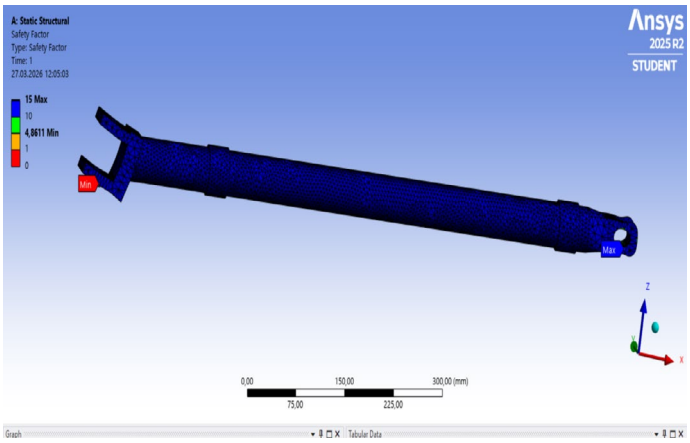


Рис. 7. Коэффициент запаса прочности

Проведённый анализ позволяет сформулировать итоговые выводы, подчёркивающие значимость дальнейших исследований в области совершенствования конструкции шасси и модернизации технологий изготовления их деталей.

Расчёты на прочность отдельных компонентов шасси показали, что их характеристики соответствуют нормативным и проектным требованиям, выдерживая заданные нагрузки без критических деформаций.

Библиографический список

1. Шульженко, М. Н., Мостовой, А. С. Курс конструкций самолета: Учебное пособие. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1965. - 445 с.

2. Братухин, И. П. Проектирование и конструкции вертолетов. Учебное пособие для вузов. – М.: Оборонгиз, 1955. – 357 с.

© Аккучуков А. Р., 2026

УДК 519.248

М.Х. ИСРАФИЛОВ
israfilov.mukhamet@mail.ru
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Б.Р. АБДУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТА ПЕДАЛЕЙ ВЕРТОЛЕТА НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЁСТКОСТЬ

Аннотация: выполняется прочностной анализ вала педалей соосного вертолёта с целью подтверждения соответствия требованиям НЛГВ по прочности и жёсткости конструктивного элемента.
Ключевые слова: соосный вертолёт, вал, прочность, жёсткость, педали.

На рисунке 1 приведено схематичное изображение педалей управления соосным вертолётом.

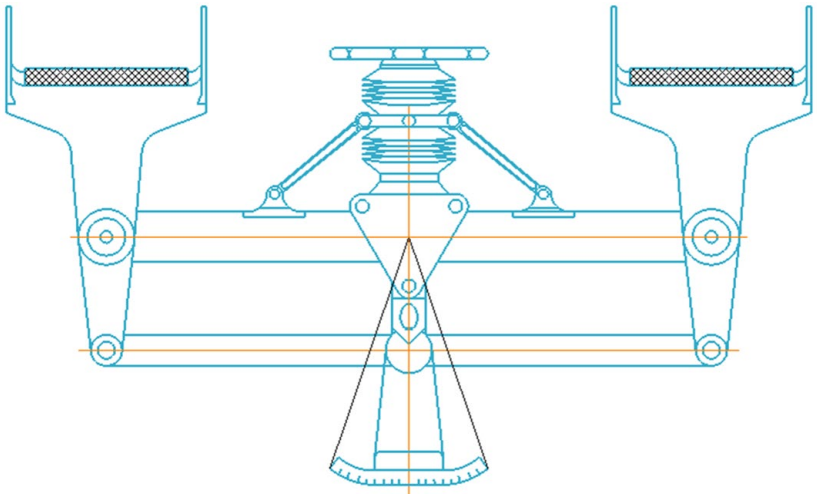


Рис. 1. Схематичное представление педалей управления вертолёта

Вал расположен в центральной зоне между педалями, вследствие чего на него воздействуют крутящие моменты, обусловленные работой педального механизма.

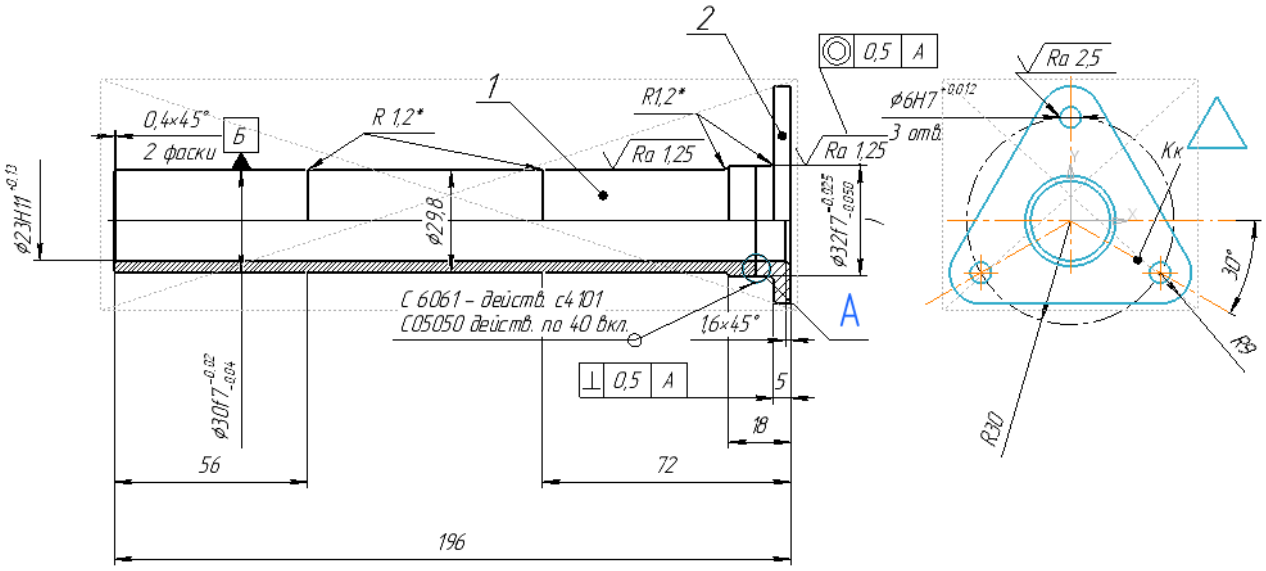
Вал выступает в качестве промежуточного звена: он воспринимает крутящие моменты, возникающие в системе, и транслирует их далее по кинематической цепи проводки путевого управления.

В рассматриваемой схеме отчётливо просматривается наличие параллелограммного механизма в конструкции педального узла.

Параллелограммный механизм – это вид четырёхзвенного механизма, звенья которого составляют параллелограмм. Применяется для реализации поступательного движения шарнирными механизмами. Параллелограммный

механизм может преобразовывать движение одного элемента в движение других, сохраняя при этом их относительное положение.

На рис. 2 приведён эскиз рассматриваемой детали.



1 – вал; 2 – фланец

Рис. 2. Эскиз изделия

Данная деталь входит в механизм путевого управления, она разделена на два элемента: вал (поз. 1, рис. 2) и фланец (поз. 2, рис. 2), соединённых сварным швом (А, рис. 2). Изделие выполнено из титанового сплава ВТ3-1. Вал нагружается силой, передающейся от пилота в размере не более 60 кгс по НЛГВ [1], вал работает на кручение.

Механические свойства титана ВТ3-1. Предел текучести σ_T = 800 МПа и предел временного сопротивления $\sigma_{ВР}$ =900 МПа.

По чертежу (рис. 2) была создана модель, приведённая на рис. 3.

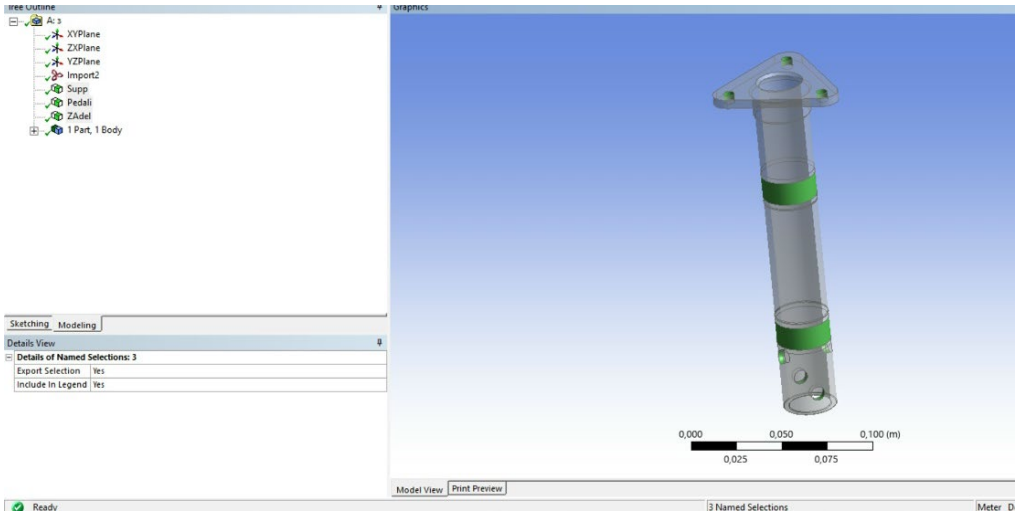


Рис. 3. 3D-модель вала по чертежу с опорами

Выделены опорные поверхности, обеспечивающие фиксацию вала.
Для расчета создается сетка (рис. 4).

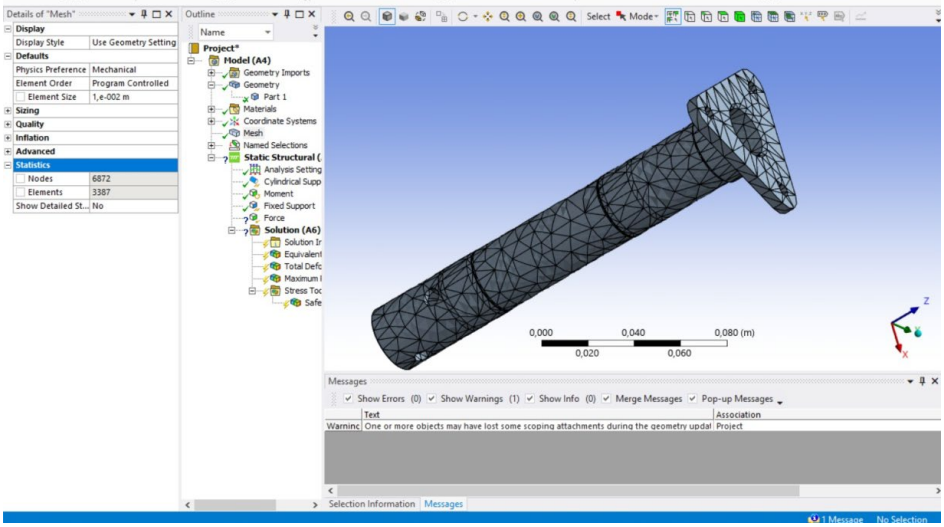


Рис. 4. Сетка Mesh

Количество элементов сетки 3387.

Соединение фланца с валом выполнено сварным швом второй категории. Такой шов применяется там, где его разрушение вызовет отказ отдельных систем, но не приведёт к катастрофическим последствиям для всего летательного аппарата. Обоснованность выбора подтверждается тем, что вертолёт способен совершить посадку даже при потере управления в путевом канале.

После того как сделана сетка, задаются условия: *Cylindrical Support* – имитирует опоры вала. *Cylindrical Support* – позволяет ограничивать перемещения в радиальном, осевом и окружном направлениях, имитирует гайку. *Fixed Support,* который является жесткой заделкой для предотвращения ошибок, при этом он не влияет на напряженно-деформированное состояние модели.

Прикладывается нагрузка, указанной в нормах лётной годности [1] $F = 60$ кгс ≈ 588 Н. Момент рассчитывается по формуле:

$$T = F \cdot L \cdot n_б = 588{,}6 \cdot 0{,}24 \cdot 1{,}5 = 211{,}896 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где F – нагрузка от пилота на педали, (Н); L – расстояние от педали до центра вращения (м); $n_б$ – коэффициент безопасности;

Рычагом будет расстояние от педали до центра вращения равное L = 0,24 м. Данный рычаг равен максимальному значению в среднем положении.

Если не оговорено иное, то необходимо использовать коэффициент безопасности, равный 1,5 [1]. Для гарантирования необходимого запаса

прочности все расчётные нагрузки подлежат увеличению путём умножения на указанный коэффициент безопасности.

Расчет вала на жёсткость предполагает определение деформаций (прогибов и углов поворота сечений) и сравнение их с допустимыми значениями.

Угол закручивания вала на участке длиной L под действием крутящего момента T [2]:

$$\varphi = \frac{T \cdot L}{G \cdot Ip} = \frac{141{,}264 \cdot 0{,}191}{45 \cdot 10^{9} \cdot 5{,}204 \cdot 10^{-8}} = 17{,}28 \cdot 10^{-3} \text{ рад},$$

где φ – угол закручивания (рад); T – крутящий момент (Н·м); L – длина участка вала (м); G – модуль сдвига, для титана марки ВТ3-1 $G = 45$ ГПа [3]; Ip –полярный момент инерции сечения (м^4), для кольцевого сечения:

$$Ip = \frac{\pi d^4 (1 - a^4)}{64} = \frac{\pi \cdot 0{,}03^4 (1 - 0{,}767^4)}{64} = 5{,}204 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

В итоге угол закручивания равен $\varphi = 17{,}28 \cdot 10^{-3}$ рад $= 0{,}99^{o}$.

На рис. 5 приведены рассчитанные эквивалентные напряжения.

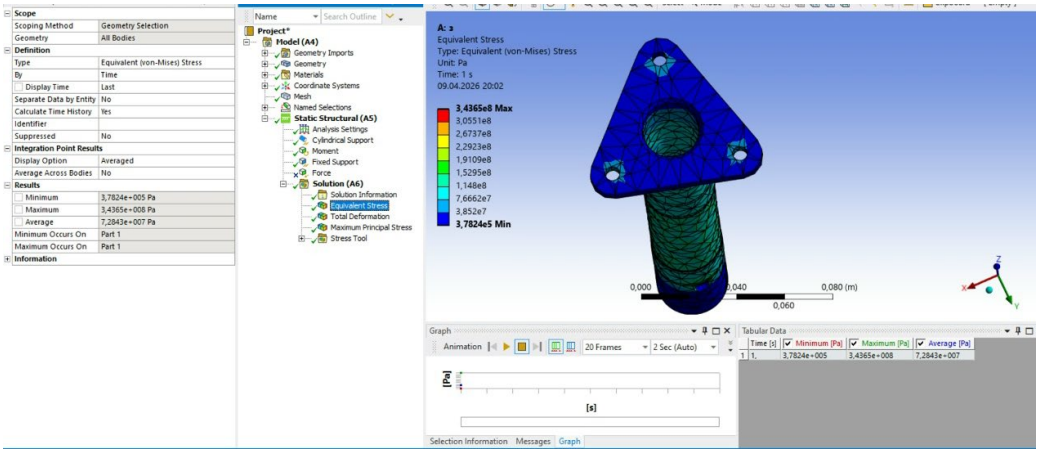


Рис. 5. Эквивалентные напряжения

Максимальное значение эквивалентных напряжений равно 343,65 МПа.

На рис. 6 приведены результаты расчёта коэффициента запаса прочности.

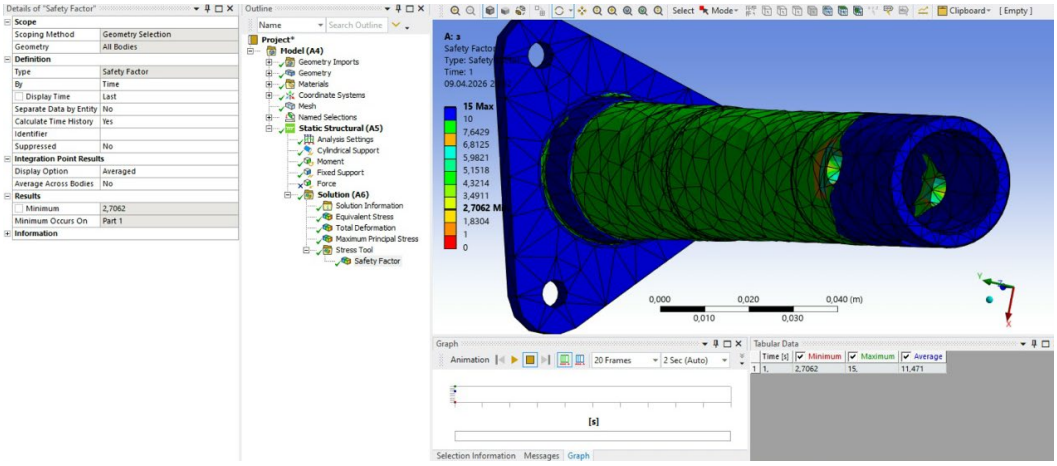


Рис. 6. Коэффициент запаса прочности на наиболее нагруженном участке

Минимальный коэффициент запаса прочности составляет 2,706 в самых уязвимых местах и превышает нормированное значение, равное 1,5.

На рис. 7 показаны расчёты полной деформации.

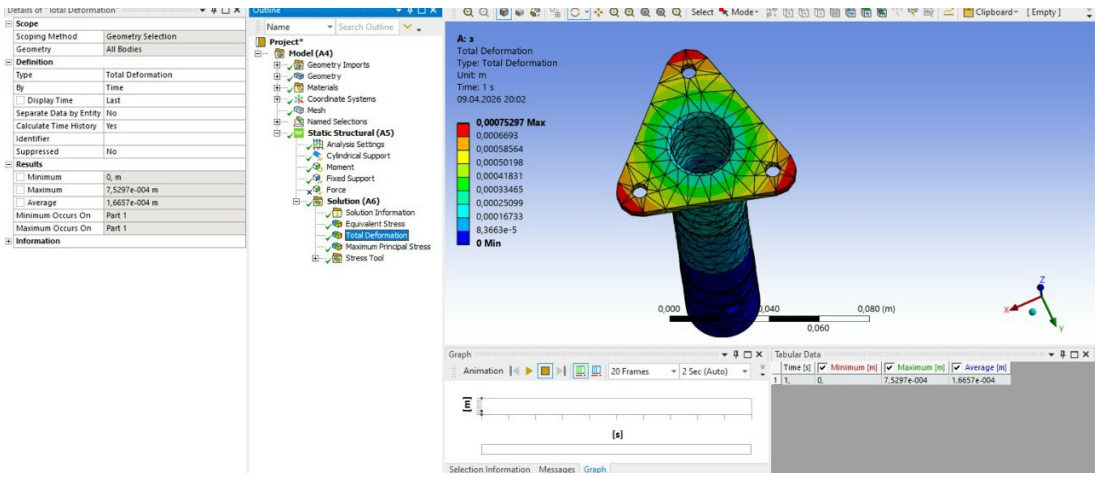


Рис. 7. Полные деформации

Полная деформация имеет среднее значение 0,166 мм и максимальное значение 0,753 мм.

Расчёты на прочность и жёсткость вала педалей показали, что он соответствует соответствуют нормативным требованиям и выдерживает заданные нагрузки без опасных деформаций.

Библиографический список

1. Нормы лётной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории НЛГ 29. – М.: «АВИАИЗДАТ», 2014. – 123 с.

2. Феодосиев, В. И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

3. ОборонСпецСплав / Страница: Титан ВТ3-1: характеристики, свойства и применение жаропрочного сплава / URL: https://oboronspecsplav.ru/marochnik/titanovyy-deformiruemyy-splav/vt3-1/

© Исрафилов М.Х., 2026

УДК 519.248

Н.С. МУРАШОВ
murashovnik@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. А.В. ЗЫРЯНОВ

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПРИ РЕМОНТЕ СИЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА ФЮЗЕЛЯЖА

Аннотация: рассматривается проблема трещин в критически важном элементе конструкции *Boeing* 737 *NG* — вилке «*pickle fork*», соединяющей крыло с фюзеляжем самолёта. Детальный анализ процесса ремонта повреждённых элементов. Усталостный расчёт на прочность, а также его анализ.
Ключевые слова: *Boeing* 737 *NG*; «*pickle fork*»; трещины в конструкции; ремонт самолётов; авиационная безопасность; техническое обслуживание; простои воздушных судов; внеплановые инспекции; затраты на ремонт.

Проблема с силовым элементом «*pickle fork*» (огуречная вилка) в конструкции самолётов *Boeing* 737 *Next Generation* (*NG*), к которому относится модель 737-800, связана с появлением трещин в этих деталях раньше ожидаемого срока службы.

Что такое «*pickle fork*»? Описание силового элемента конструкции

Pickle fork — это элемент конструкции, который соединяет фюзеляж самолёта с крылом и передаёт нагрузки: крутящий момент и аэродинамические силы, которые изгибают соединение между крыльями и корпусом. Деталь получила название из-за внешнего сходства с вилкой для закусок: она крепится к обеим сторонам фюзеляжа, а два зубца простираются вниз, где крепятся к лонжерону крыла. На каждом самолёте 737 *NG* установлено четыре таких элемента — по два спереди и сзади, слева и справа (рис. 1, 2).

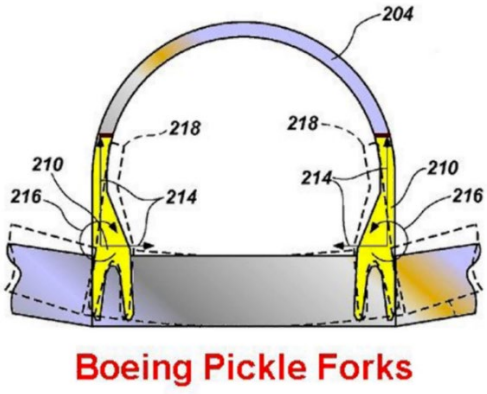


Рис. 1. Расположение на фюзеляже

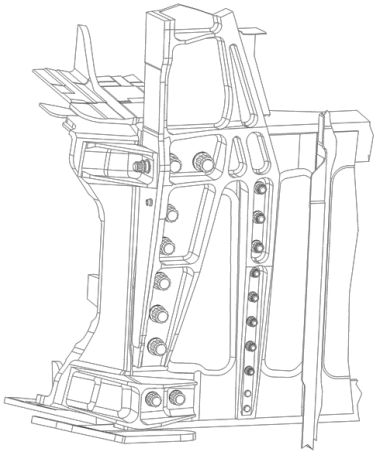


Рис. 2. «Pickle fork»

Проблема с трещинами

«*Pickle fork*» проектировались так, чтобы служить весь срок эксплуатации самолёта — около 90 000 полётных циклов (цикл — один взлёт и посадка) без появления трещин. Однако в конце 2019 года при конверсии нескольких самолётов 737 *NG* в грузовые лайнеры в Южной Корее в нижних частях задних *«pickle fork»* были обнаружены трещины длиной около 2,5 сантиметров (рис. 3).

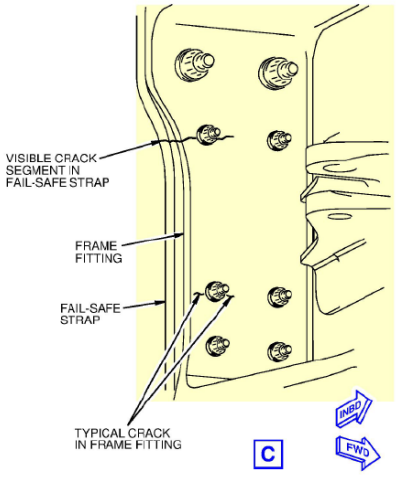


Рис. 3. Типичная трещина

Проблема вызвала обеспокоенность, так как трещины появлялись на самолётах с гораздо меньшим количеством циклов, чем предполагалось. Например, у некоторых самолётов *Lion Air* трещины обнаружили при менее чем 22 600 циклах, а у двух самолётов *Qantas* — при 27 000 циклах.

Если трещины не обнаружить и не устранить, это может нарушить структурную целостность самолёта и привести к потере управления.

Также высказывались предположения, что при испытаниях на усталость могла быть использована недостаточно репрезентативная модель фюзеляжа (без крыльевого бокса — основной несущей части крыльев, где они соединяются с фюзеляжем, — и шасси, которое передаёт значительные нагрузки на фюзеляж при каждой посадке).

Последствия

Из примерно 1000 осмотренных самолётов около 5% имели трещины, требующие ремонта. По оценкам, проблема затронула до 50 самолётов. Операторы самолётов с трещинами работали с *Boeing* над разработкой плана ремонта и получением необходимых деталей и технической поддержки.

Проблема не затрагивала самолёты 737 *MAX* и *P*-8 *Poseidon*.

Процесс ремонта

Замена повреждённых элементов «*pickle fork*» является сложной процедурой. На момент обнаружения проблемы официальные инструкции от *Boeing* отсутствовали. Процесс включал несколько этапов:

1. Обнаружение трещин. Трещины выявлялись при инспекциях, которые проводились в соответствии с директивой *FAA*. Осмотры часто выполнялись в рамках плановых проверок (например, *C-Check*);
2. Демонтаж повреждённых деталей. При обнаружении трещин требовалось снять повреждённые элементы с обеих сторон самолёта;
3. Замена деталей. Устанавливались новые элементы конструкции. Например, компания *Israel Aerospace Industries* (*IAI*) успешно заменила «pickle fork» на *Boeing* 737-800 в 2020 году на своём предприятии *BEDEK MRO*;
4. Участие высококвалифицированных специалистов. В работе были задействованы команды специалистов по работе с листовым металлом, а также инженеры уровней *B*1 и *B*2;
5. Координация с *Boeing*. Ремонт выполнялся в тесном взаимодействии с производителем самолёта;
6. Длительные сроки выполнения. Процесс был очень трудоёмким, мог занимать до 3 недель и требовал работы в несколько смен.

Расчёт на прочность

В обоснование целесообразности ремонта был проведён расчёт «*pickle fork*» на прочность в программном комплексе *ANSYS Workbench*.

Для определения нагрузок, действующих на крыло во время полёта произведён аэродинамический расчёт профиля крыла *Boeing* 737-800 (рис. 4).

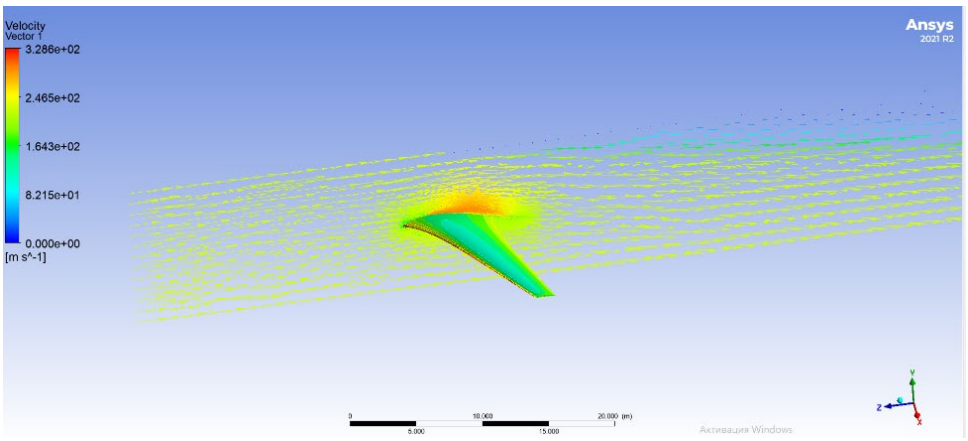


Рис. 4. Аэродинамический расчёт профиля крыла

По результатам расчёта была получена подъёмная сила, действующая на крыло. Также для определения нагрузок на «*pickle fork*» составлена упрощённая схема распределения нагрузок на силовую конструкцию крыла (рис. 5).

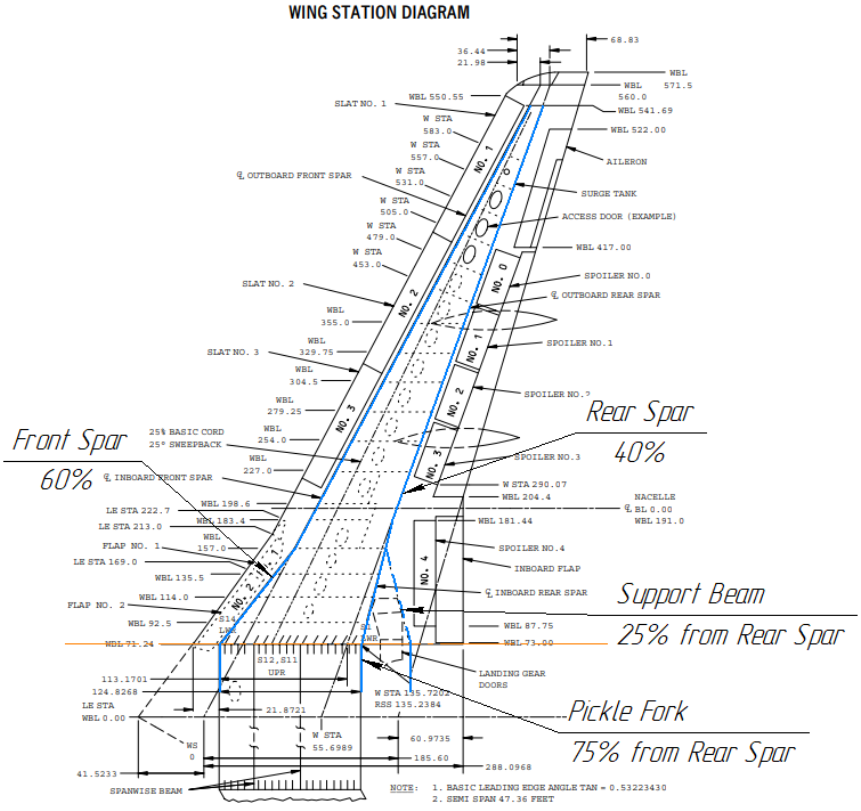


Рис. 5. Схема распределения нагрузок

Произведён усталостный расчёт «*pickle fork*» на прочность (рис. 6, 7).

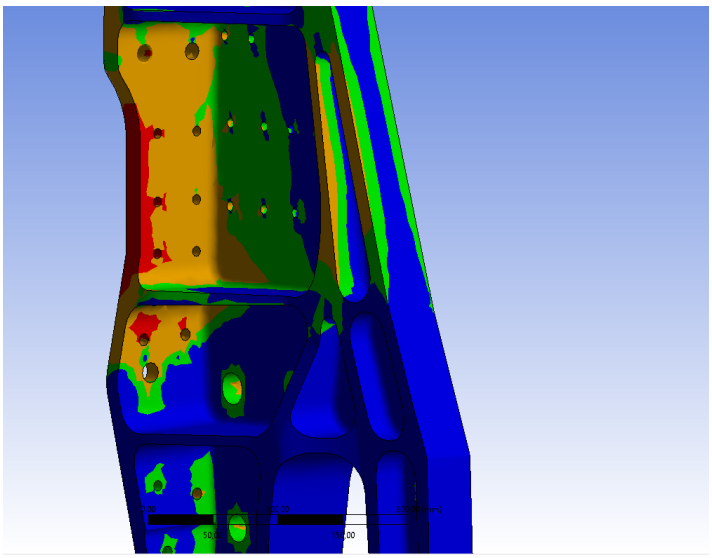


Рис. 6. Показатели коэффициента запаса прочности

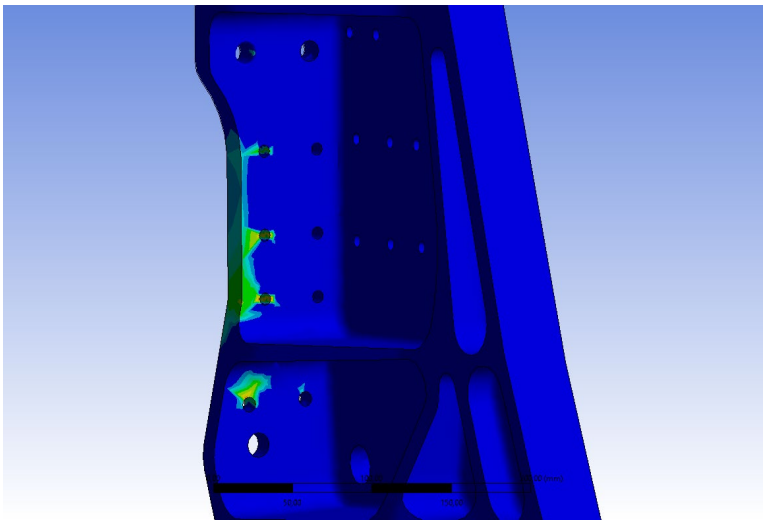


Рис. 7. Показатели усталостной долговечности

Анализ расчётов

Результаты усталостных расчётов «*pickle fork*» показывают соответствие мест появления трещин и минимального значения коэффициента запаса прочности, что требует дальнейшего анализа возможности увеличения запаса прочности конструкции, для обеспечения требуемой долговечности.

Библиографический список

1. Конструкция и прочность самолётов: В. Н. Зайцев, В. Л. Рудаков; Под общ. ред. проф. В. Н. Зайцева. — М.: Транспорт, 1978. —547 с.

2. Нормы прочности гражданских самолётов 1961 г. – М.: БНИ ЦАГИ, 1962. – 139 с.

3. Решение задач усталости в условиях циклического нагружения в *ANSYS Fatigue Tool*: Нерсисян Д.А., магистрант гр. КТм - 211, II курс Научный руководитель: Блюменштейн В.Ю., доктор тех. наук, профессор Кузбасский

государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева г. Кемерово. *URL*: *https://science.kuzstu.ru/wpcontent/Events/Conference/RM/2023/RM23/pages/Articles/042310.pdf*

4. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: Учеб. для вузов / Н. Н. Смирнов, Н. И. Владимиров, Ж. С. Черненко и др.; Под ред. Н. Н. Смирнова. — М.: Транспорт, 1990. — 423 с.

© Мурашов Н.С., 2026

УДК 629.7.036

А.С. ПАВЛЫЧЕВА
anna.pavlycheva.03@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. А.И. ЖУК

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КРОНШТЕЙНА КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОПАССАЖИРСКОЙ КАБИНЫ ВЕРТОЛЕТА КА-226

Аннотация: в статье рассматривается прочностной анализ кронштейна крепления подвесной кабины вертолета Ка-226 для подтверждения соответствия его прочности, а также анализ долговечности узла при циклических нагрузках, характерных для модульной эксплуатации.
Ключевые слова: вертолет Ка-226; кронштейн крепления; прочность; долговечность; модульная конструкция.

Вертолет Ка-226 является современным легким многоцелевым вертолетом соосной схемы, разработанным холдингом «Вертолеты России». Ключевой особенностью данного вертолета является модульная конструкция, позволяющая быстро заменять транспортную кабину на специализированные модули (медицинский, патрульный, спасательный). Надежность узлов крепления таких модулей критически важна, так как их отказ может привести к потере полезной нагрузки, нарушению центровки и, как следствие, к аварийной ситуации.

Анализ статистики авиационных происшествий с легкими вертолетами показывает, что значительная часть инцидентов, связанных с технической неисправностью, приходится на элементы планера и системы крепления внешних грузов. Основными причинами отказов подобных узлов являются усталостные разрушения от вибрационных нагрузок и превышение предельных перегрузок при маневрировании или порывах ветра.

Кронштейны подвесных систем, испытывают сложный комплекс нагрузок: растяжение, изгиб и кручение, вызванные динамическим характером полета и колебаниями подвешенного груза. Конструкция узла крепления, включая расположение силовых элементов и технологию монтажа с использованием направляющих конусов, подробно описана в предыдущей работе [4]. Именно геометрия и условия закрепления, предложенные в указанном способе монтажа, были положены в основу расчетной модели.

Был проведен расчет на статическую прочность и усталостную долговечность изделия «Кронштейн крепления подвесной кабины». Эскиз детали представлен на рис. 1.

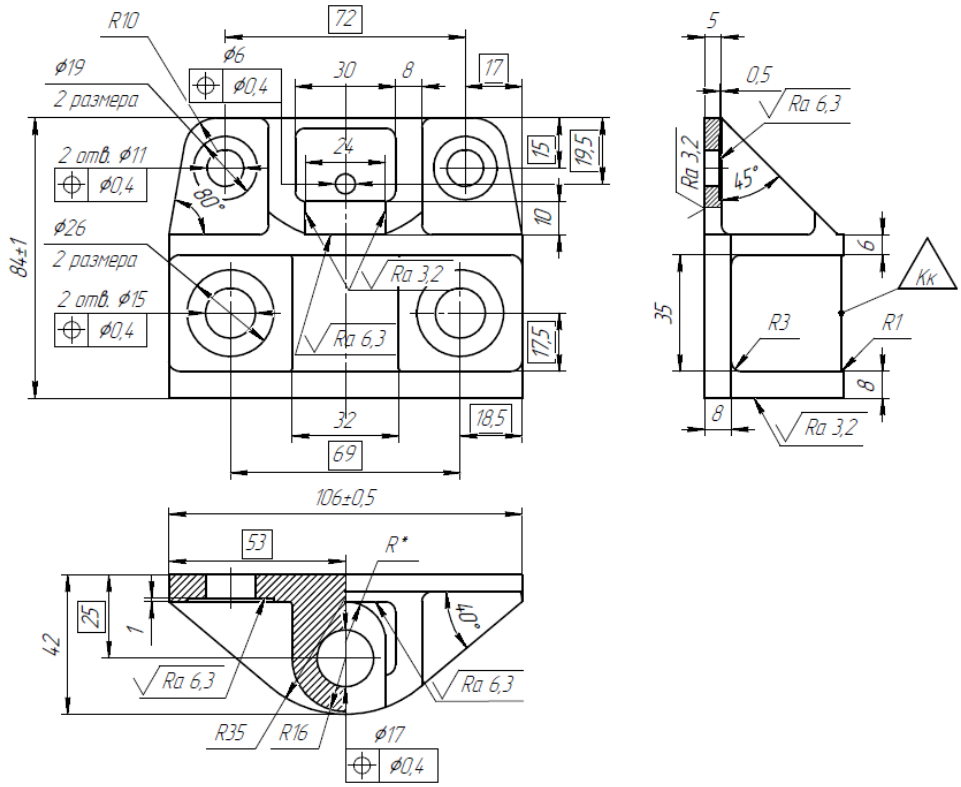
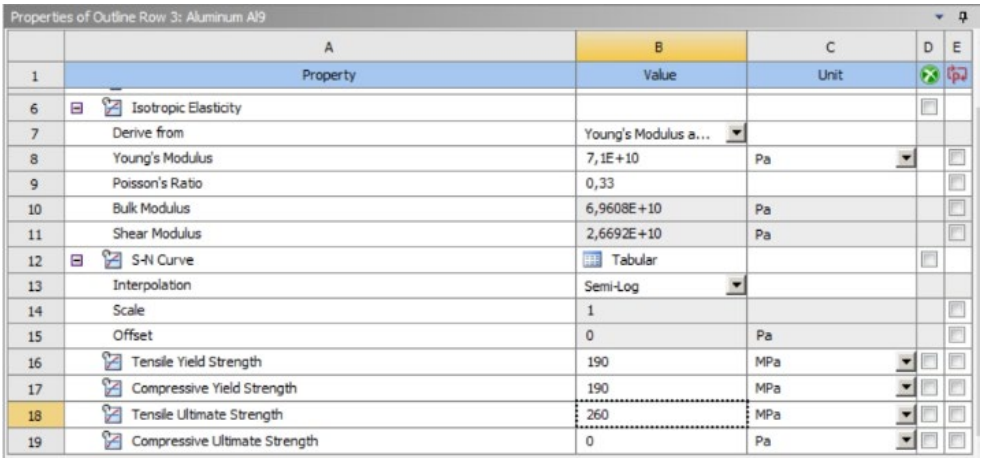


Рис. 1. Эскиз «кронштейна крепления подвесной кабины»

Данная деталь входит в систему внешней подвески. По технологическим причинам основная несущая часть (кронштейн) изготавливается литьем из алюминиевого сплава АЛ9, а силовой болт подвески – из высокопрочной конструкционной стали 30ХГСА.

Механические свойства сплава АЛ9 соответствует ГОСТ 1583 – 93 (*Рис.*): предел текучести $\sigma_т = 190$ МПа, предел временного сопротивления $\sigma_в = 260$ МПа.

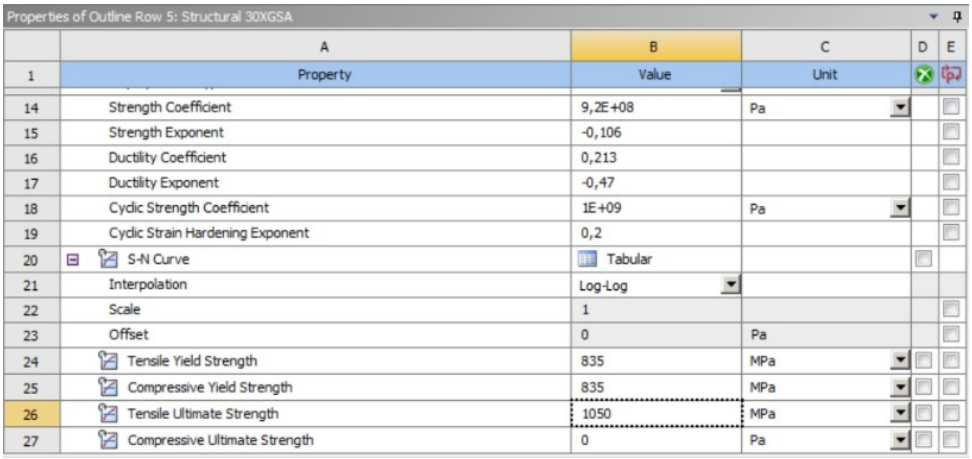


Properties of Outline Row 3: Aluminum Al9

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus a...			
8	Young's Modulus	7,1E+10	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,33			
10	Bulk Modulus	6,9608E+10	Pa		
11	Shear Modulus	2,6692E+10	Pa		
12	S-N Curve	Tabular			
13	Interpolation	Semi-Log			
14	Scale	1			
15	Offset	0	Pa		
16	Tensile Yield Strength	190	MPa		
17	Compressive Yield Strength	190	MPa		
18	Tensile Ultimate Strength	260	MPa		
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

Рис. 2. Механические свойства сплава АЛ9

Механические свойства стали 30ХГСА соответствуют ГОСТ 4543-2016 (*Рис.*): предел текучести $\sigma_т = 835$ МПа, предел временного сопротивления $\sigma_в = 1050$Мпа.



Properties of Outline Row 5: Structural 30XGSA

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
14	Strength Coefficient	9,2E+08	Pa		
15	Strength Exponent	-0,106			
16	Ductility Coefficient	0,213			
17	Ductility Exponent	-0,47			
18	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		
19	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2			
20	S-N Curve	Tabular			
21	Interpolation	Log-Log			
22	Scale	1			
23	Offset	0	Pa		
24	Tensile Yield Strength	835	MPa		
25	Compressive Yield Strength	835	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	1050	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

Рис. 3. Механические свойства стали 30ХГСА

Расчетная модель нагружалась силой веса подвесной кабины с учетом эксплуатационной перегрузки $n_{эксп}$ = 1,33. Условия закрепления и нагружения в конечно-элементной модели (*Рис.*) имитировали реальные условия работы:

1. *Fixed Support* – жесткая заделка в местах крепления кронштейна к силовому набору фюзеляжа, имитирует продолжение стенки;

2. *Bolt Pretension* – нестандартная затяжка болта подвески с усилием $F_{зат}$ = 2000 Н;

3. *Force* – вертикальная нагрузка, передаваемая через болт на кронштейн, соответствующая расчетному случаю «Максимальная взлетная масса с перегрузкой».

По чертежу (*Рис.*) была создана трехмерная модель, внешний вид которой представлен на рисунке 4.

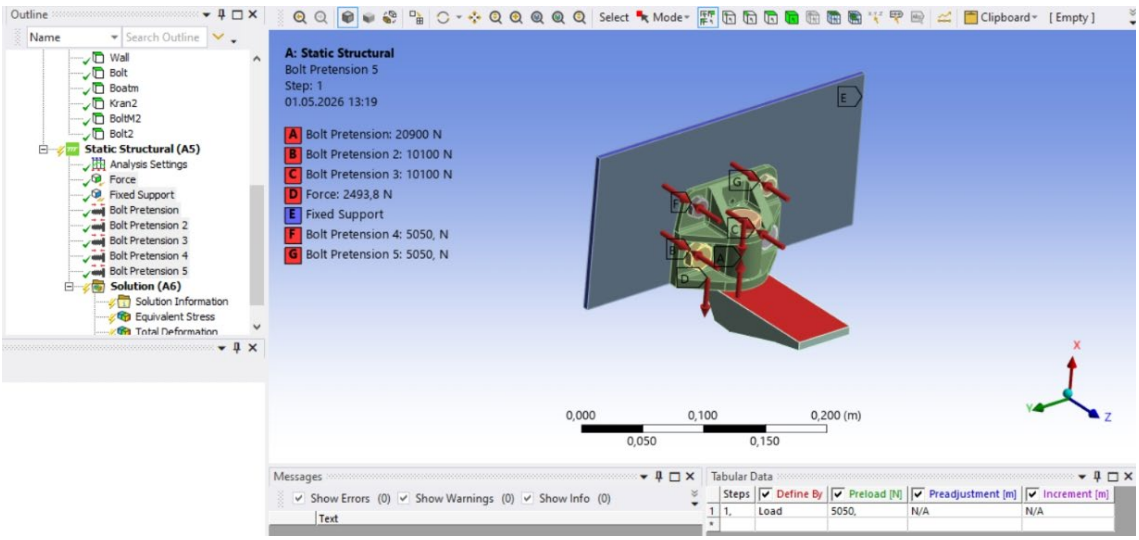


Рис. 4. Граничные условия и нагрузки в модели

Для обеспечения точности результатов модель была разбита на конечно-элементную сетку с локальным сгущением в зонах концентрации напряжений (отверстия). Количество элементов сетки составило 12991. Вид сетки представлен на *Рис.*.

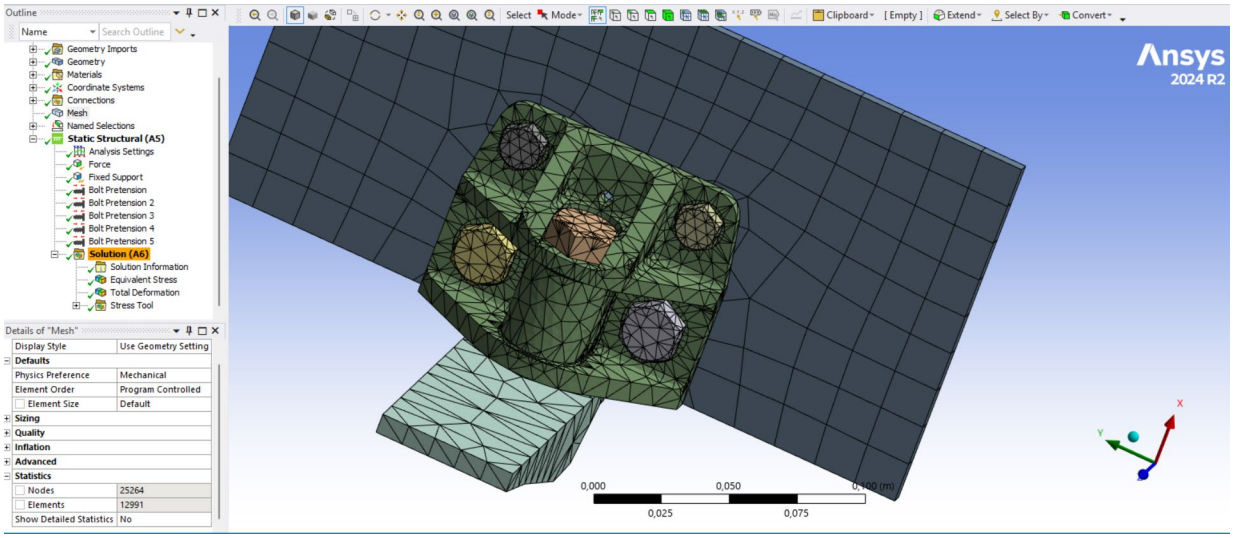


Рис. 5. Сетка модели кронштейна

При прикладывании нагрузки, равной расчетной массе подвесной кабины с коэффициентом безопасности, получены результаты, показанные на *Рис.* -8.

По рис. 6 видно, что максимальные перемещения носят локальный характер и не превышают допустимых значений, что исключает нарушение геометрии соединения или заклинивание подвесного устройства в процессе эксплуатации.

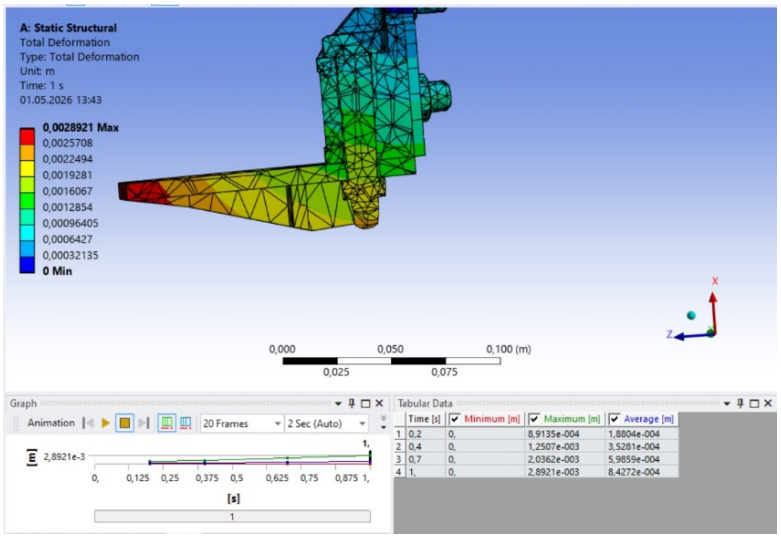


Рис. 6. Полные деформации

Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 7) демонстрирует, что зона максимальной нагруженности локализована в теле силового болта из стали 30ХГСА в месте приложения вертикальной нагрузки. Максимальные значения напряжений в материале кронштейна (сплав АЛ9) значительно ниже предела текучести материала.

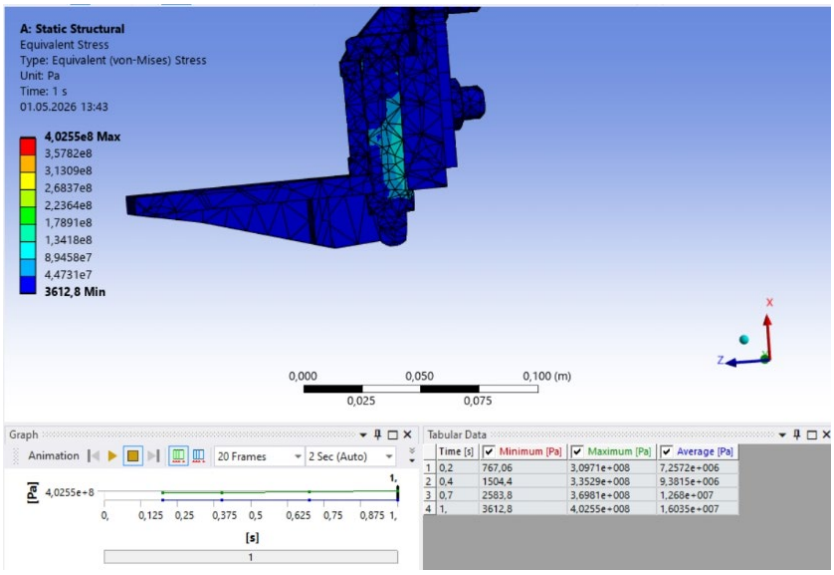


Рис. 7. Эквивалентные напряжения

Расчетный коэффициент запаса прочности (рис. 8) во всех элементах узла превышает единицу, что подтверждает обеспечение статической прочности конструкции при заданном эксплуатационном случае нагружения (перегрузка $n = 1{,}33$).

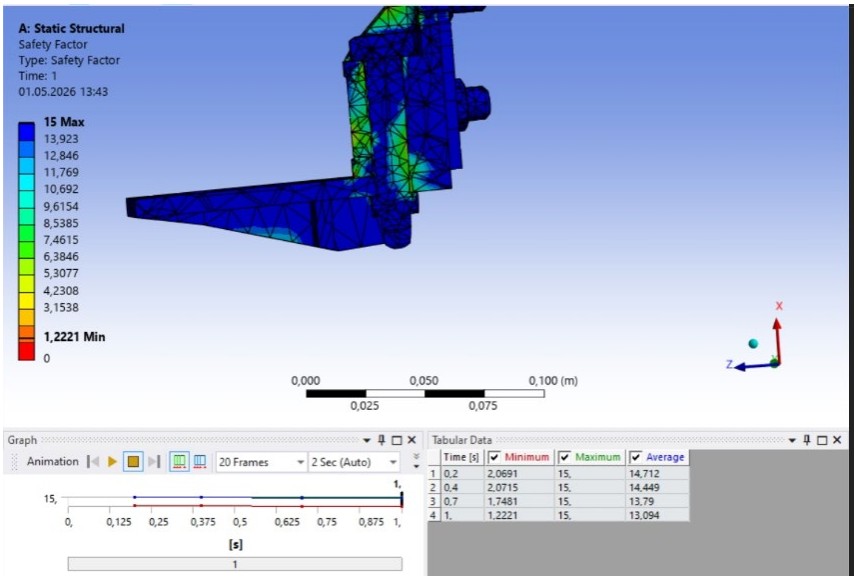


Рис. 8. Запас прочности изделия

Оценка усталостной долговечности проводилась на основе полученных амплитудных напряжений. Поскольку максимальные эквивалентные напряжения в наиболее нагруженных зонах (болт и отверстия кронштейна) составляют менее 0,25 от предела выносливости материалов (стали 30ХГСА и сплава АЛ9), можно утверждать, что ресурс детали превышает назначенный срок службы вертолета. Разрушение вследствие усталости при соблюдении регламента технического обслуживания маловероятно.

Таким образом, проведенный расчет подтверждает, что конструкция кронштейна подвесной кабины вертолета Ка-226 удовлетворяет требованиям НЛГВ-27 по критериям статической прочности и усталостной долговечности».

Библиографический список

1. Многоцелевой вертолет [Электронный ресурс]. https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU41701U1_20041110 (Дата обращения: 13.04.26)

2. Грузопассажирская кабина летательного аппарата [Электронный ресурс].https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU42023U1_20041120 (Дата обращения: 13.04.26)

3. Вертолет Ка-26 /Н. Ф. Суриков, Г. И. Иоффе, А. А. Дмитриев, Е. Г. Пак. - М.: Транспорт, 1982-221 с.

4. Павлычева А. С. Способ монтажа грузопассажирской кабины вертолета Ка-226 // Материалы Всероссийской науч. - техн. конф. - Уфа: УУНиТ, 2025.

© Павлычева А.С., 2026

УДК 629.7.036

А.А. ТЯПТИНА
anastasya.tiaptina@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. А.И. ЖУК

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНО-ДЕМПФИРУЮЩЕГО БУКСИРОВОЧНОГО УЗЛА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В *ANSYS*

Аннотация: в статье приведены результаты моделирования и расчетной оценки предохранительно-демпфирующего узла крепления буксировочного водила к носовой стойке шасси.
Ключевые слова: буксировочный узел, предохранительный элемент, срезной элемент, деформация, напряжения.

В штатных условиях буксировка воздушного судна должна обеспечивать управляемое перемещение самолета без повреждения носовой стойки шасси. Однако при резком старте, торможении, повороте на предельный угол могут возникать нагрузки, превышающие допустимые значения, поэтому в конструкции целесообразно применять предохранительные элементы, которые разрушаются раньше дорогостоящих деталей шасси [3].

Расчетная задача предохранительно-демпфирующего устройства состоит в разделении двух видов воздействия: линейной буксировочной силы и крутящего момента, возникающего при повороте стойки [2]. Центральный предохранительный элемент воспринимает продольную нагрузку, а боковые элементы предназначены для работы при передаче момента. Такая схема необходима для определения вероятности ложного срабатывания, поскольку каждый предохранитель работает только в своем нагрузочном пути.

Конструктивно узел включает пластину, основание, горизонтальный штифт для зацепления буксировочного водила, центральный предохранительный элемент и боковые предохранительные элементы, расположенные в дугообразных пазах. Схематичное изображение узла представлено на рис. 1. В качестве расчетных порогов приняты: предельная линейная нагрузка F = 94 250 Н и предельный крутящий момент M = 8 260 Н·м. Эти значения используются как целевые уровни защитного срабатывания: при их достижении предохранительные элементы должны начать разрушаться или превысить уровень пластической деформации, тогда как основные детали узла должны остаться работоспособными.

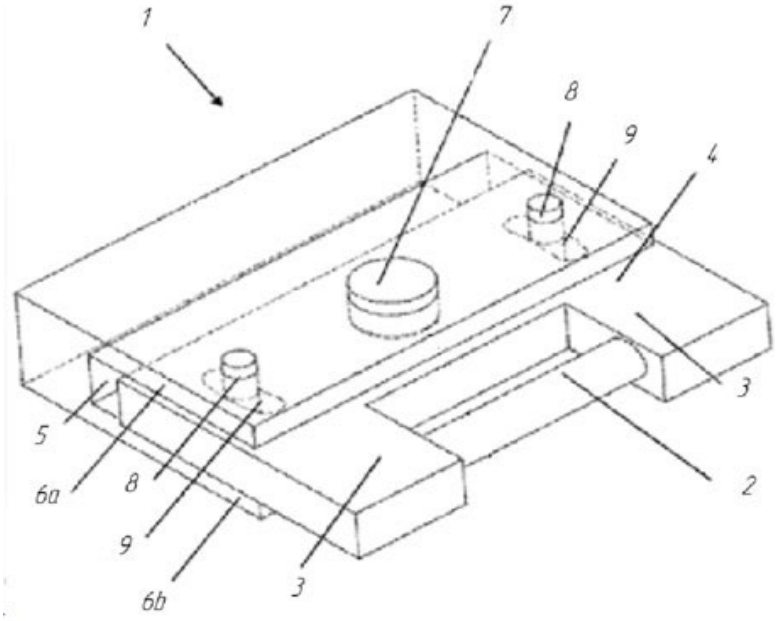


Рис. 1 Кронштейн буксировочного водила:
1 – кронштейн буксировочного водила; 2 – стержень; 3 – два кронштейна; 4 – пластина; 5 – канал для пластины; 6*a* – верхняя часть основания; 6*b* – нижняя часть основания; 7 – первый предохранительный элемент; 8 – второй предохранительный элемент; 9 – паз

Оценка напряженно-деформированного состояния узла выполнялась методом конечных элементов [1], позволяющих определить распределение напряжений, деформации и контактных параметров в деталях. В качестве основного критерия оценки прочности использовались эквивалентные напряжения по Мизесу *Equivalent Stress*, так как этот показатель позволяет сопоставлять сложное напряженное состояние с пределом текучести материала. При этом отсутствие *Equivalent Plastic Strain* принималось как признак упругой работы элемента, а появление пластической деформации в зоне шейки – как начало контролируемого срабатывания предохранителя.

В модели учитывались основные элементы, участвующие в передаче нагрузки: центральный предохранитель, боковые штифты, пластина, основание и горизонтальный штифт.

Первый расчетный случай соответствует достижению порога срабатывания центрального предохранителя при линейной нагрузке 94 250 Н. Диаметр шейки предохранителя принят равным 18 мм. Суммарная деформация узла составила 0,27 мм. Такое перемещение является малым относительно габаритов конструкции и указывает на достаточную жесткость узла при достижении расчетного порога срабатывания. Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу составило 777,7 МПа, показанное на рис. 2, а максимальное касательное напряжение – 432 МПа. Наиболее важным результатом является то, что зона максимальных напряжений относится к центральному предохранительному элементу.

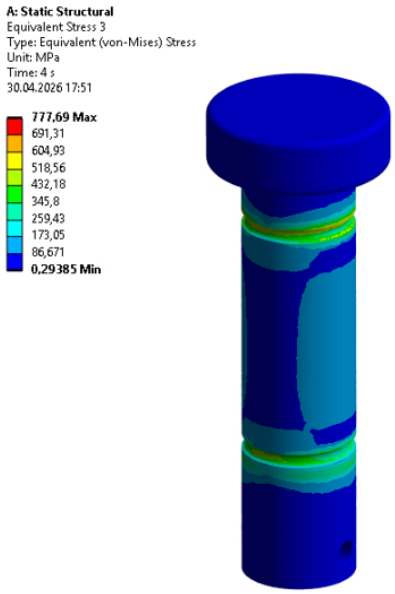


Рис. 2. Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу центрального предохранителя

Эквивалентная пластическая деформация центрального предохранителя, изображенная на рис. 3 составила 0,00166. При этом *Equivalent Plastic Strain* основания, пластины и горизонтального штифта равна нулю. Следовательно, при достижении предельной линейной нагрузки пластическая деформация возникает в сменном предохранителе, а основные детали узла остаются в упругой области.

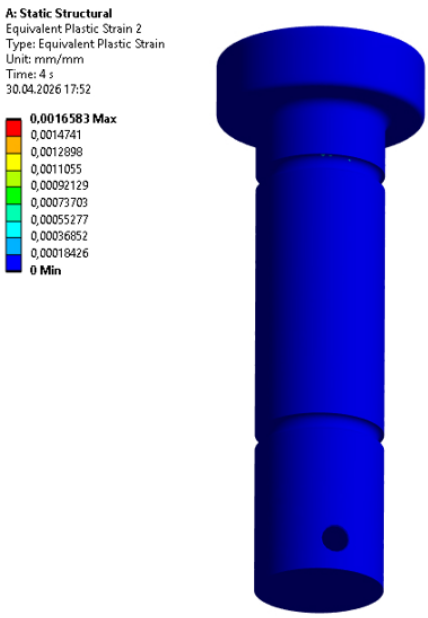


Рис. 3. Эквивалентная пластическая деформация центрального предохранителя при F = 94 250 Н

Дополнительно в ANSYS был рассмотрен случай действия линейной нагрузки F = 60 682 Н. Данная нагрузка соответствует режиму страгивания воздушного судна на уклоне и относится к штатным эксплуатационным

режимам буксировки. В отличие от расчета при нагрузке F = 94 250 Н, данный случай не должен приводить к разрушению центрального предохранительного элемента. По результатам расчета максимальная полная деформация узла составила 0,175 мм, следовательно, конструкция сохраняет достаточную жесткость при действии эксплуатационной нагрузки. Максимальные эквивалентные напряжения составили 626 МПа и показаны на рис. 4, а максимальные касательные – 344 МПа. Таким образом, предохранитель не разрушается, так как эквивалентное напряжение ниже предела текучести стали 40Х.

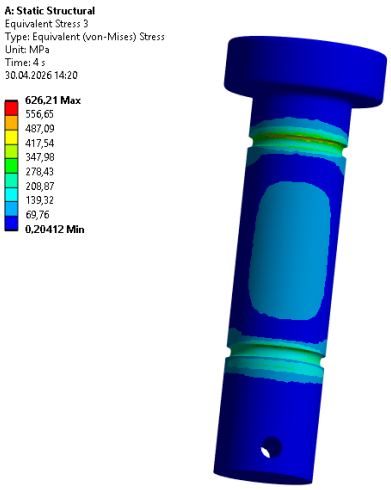


Рис. 4. Максимальные эквивалентные напряжения центрального предохранителя при F = 60 682 Н

При этом значение *Equivalent Plastic Strain,* показанное на рис. 5, равно 0, то есть пластические деформации отсутствуют.

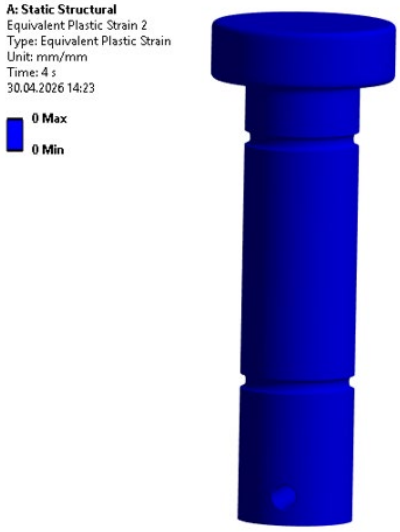


Рис. 5. Пластические деформации центрального предохранителя при F = 60 682 Н

Отдельно проведенная работа боковых предохранительных элементов показала, что в контакте «паз – боковой предохранитель» получены следующие значения: *Pressure* = 0, *Penetration* = 0. Результат представлен на рис. 6.

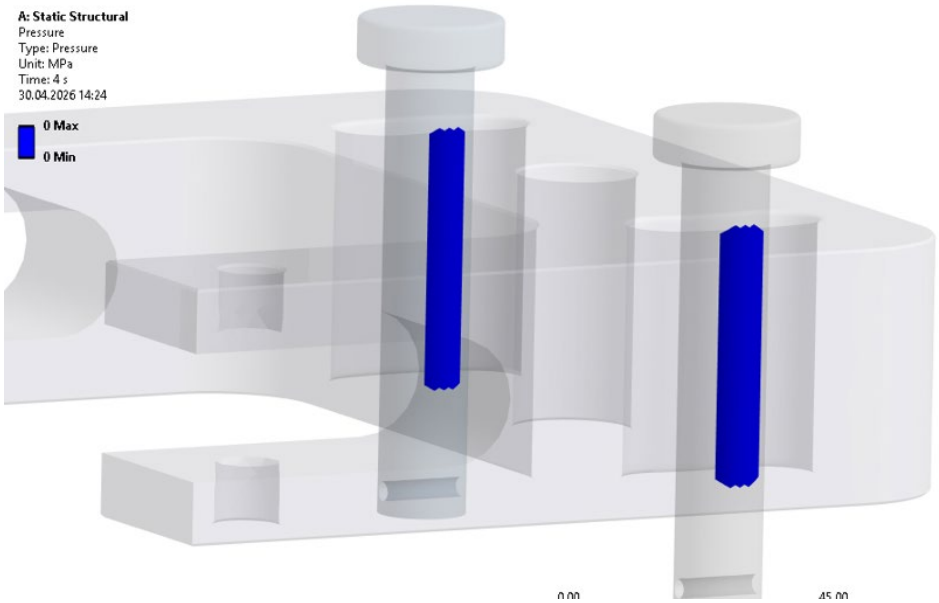


Рис. 6. Контактное давление в зоне «паз – боковой предохранитель» при *F* = 60 682 Н

Это показывает, что при действии только линейной нагрузки боковые штифты не включаются в работу.

Таким образом, подтверждается разделение нагрузочных путей: при прямолинейной буксировке нагрузка передается через центральный предохранитель, а боковые элементы остаются ненагруженными и предназначены для восприятия крутящего момента.

Библиографический список

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.

2. Крепление фаркопа [Электронный ресурс]. https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/US20230373627A1_20231123?q=IC%3D%20(B64C1%2F00%20OR%20B64C3%2F00%20OR%20B64C5%2F00%20OR%20B64C7%2F00%20OR%20B64C9%2F00%20OR%20B64C25%2F00)&from=search_advanced&hash=-1985994019 (Дата обращения: 11.03.26)

3. Проблемы эксплуатации аэродромных буксировщиков и пути их решения [Электронный ресурс]. https://science-education.ru/article/view?id=12123 (Дата обращения: 15.04.26)

© Тяптина А.А., 2026

УДК 629.7.036

Э. Бакгалов
erkin.bakgalov@mail.ru
Науч. руководитель – старший преподаватель А.Х. Рахимов

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ОБШИВКИ ФЮЗЕЛЯЖА СРЕДНЕМАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ

Аннотация: в статье рассматривается технология восстановительного ремонта обшивки фюзеляжа среднемагистральных узкофюзеляжных воздушных судов после ударных повреждений посторонними предметами (FOD). Проведён анализ типичных эксплуатационных дефектов, классифицированных в соответствии с отраслевыми стандартами Structural Repair Manual (SRM). Выполнен прочностной расчёт участка обшивки с учётом комбинированного нагружения от избыточного давления в гермокабине и изгибающих моментов.
Ключевые слова: ремонт фюзеляжа; обшивка; технологический процесс; расчёт прочности; заклёпочные соединения; структурный ремонт; SRM; неразрушающий контроль; лётная годность.

Введение

Обшивка фюзеляжа подвергается воздействию посторонних предметов (*FOD*): камни, птицы, град, наземная техника. Ежегодно фиксируется более 5000 случаев столкновений, 47% приходится на взлёт и посадку. Повреждения приводят к нарушению герметичности и требуют значительных затрат на восстановление. На рис. 1 представлены источники повреждения фюзеляжа посторонними предметами.

Рис. 1. Источники повреждения фюзеляжа посторонними предметами

Цель работы – разработка технологии восстановительного ремонта обшивки фюзеляжа среднемагистрального самолёта после ударных повреждений.

Анализ повреждений

Конструкция фюзеляжа выполнена по схеме полумонокока из алюминиевых сплавов В95-Т2 (σв=520 МПа) и Д16Т. Обшивка воспринимает избыточное давление (Δр≈0,06–0,08 МПа), изгибающие и крутящие моменты.

По классификации SRM 53-11-00 повреждения делятся на:

Class 1 – допустимые дефекты;

Class 2 – локальные повреждения, устраняемые накладкой;

Class 3 – критические разрушения.

Характерным примером эксплуатационного повреждения является пробой обшивки фюзеляжа при столкновении с посторонними предметами на взлётно-посадочной полосе или в процессе наземного обслуживания (рис. 2) [1,2].

Рис. 2. Повреждение обшивки посторонним предметом

Рассматривается ремонт Class 2. Оптимальный метод – установка внешней ремонтной накладки с заклёпочным соединением и герметизацией.

Прочностной расчёт

Для построения эпюр внутренних силовых факторов фюзеляж моделируется как балка переменного сечения, нагруженная системой сосредоточенных и распределённых сил. Суммарные значения перерезывающей силы Q_Y^P и изгибающего момента M_z^P в расчётном сечении определяются путём алгебраического суммирования вкладов от всех приложенных нагрузок [3]:

$$Q_{Yi}^P = \sum_{i=0}^{20} \left(P_{\Phi i} + P_{\text{сосрi}}\right); \quad (1)$$

$$M_z^P = \sum_{i=0}^{20} M_{zi}; \quad (2)$$

где $P_{\Phi i}$ – массовая сила i-го отсека фюзеляжа, Н; $P_{\text{соср }i}$ – сосредоточенная сила от реакции крыла или оперения, Н; Mzi – изгибающий момент от нагрузки

i-го участка, Н·м. Построение эпюр поперечных сил и изгибающих моментов выполнено путём дискретизации распределённой массовой нагрузки. Полученные эпюры (рис. 3) демонстрируют характер распределения внутренних усилий по длине конструкции.

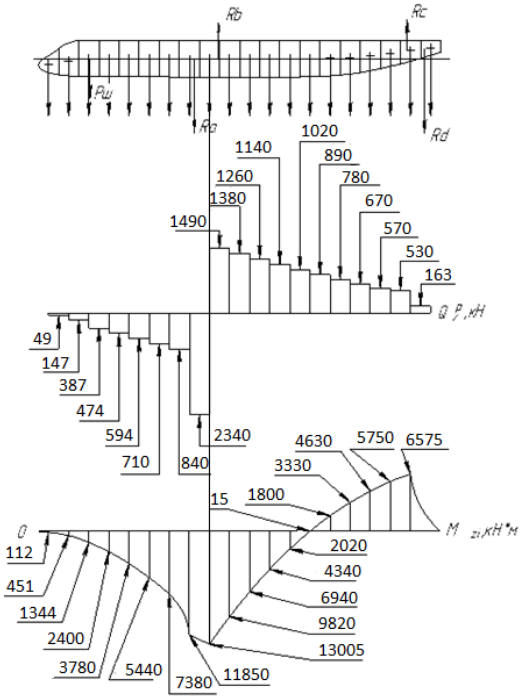


Рис. 3. Эпюры перерезывающих сил и моментов

Толщина обшивки δ боковин и сводов фюзеляжа в расчетном сечении определяется из соотношения:

$$\delta \geq \frac{T}{\tau_p}\ , \tag{3}$$

где τ_p – разрушающее касательное напряжение, принимаем равным

$$\tau_p = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{3}\right) \cdot \sigma_{в,} \tag{4}$$

где T – расчетное погонное касательное усилие в боковинах и сводах фюзеляжа, $\sigma_в$– предел прочности фюзеляжа обшивки.

Расчет на герметичность и прочность при избыточном давлении

Поскольку ремонт выполняется на участке герметичной кабины, конструкция дополнительно нагружается внутренним избыточным давлением Δp. На крейсерской высоте перепад давления составляет $\Delta p \approx 0{,}061$ МПа. Это давление создает в цилиндрической оболочке фюзеляжа окружные (кольцевые) напряжения σ_1, которые действуют совместно с продольными напряжениями от изгиба σ_{Mz}.

Суммарное нормальное напряжение в наиболее нагруженных волокнах обшивки определяется по принципу суперпозиции:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{Mz} \pm \sigma_1, \quad (5)$$

где σ_{Mz} — продольное напряжение от изгибающего момента M_z, рассчитанное ранее; σ_1— окружное напряжение от избыточного давления, определяемое по формуле для тонкостенной оболочки:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta p \cdot f \cdot R}{2\delta} \quad (6)$$

где R — радиус кривизны фюзеляжа, δ — толщина обшивки.

Знак «+» принимается для наиболее нагруженной нижней части фюзеляжа. Для обеспечения герметичности стыка применяется полу твердеющий герметик BMS 5-95.

Определение суммарного напряжения с учетом выреза на фюзеляже после ремонта (рис. 4).

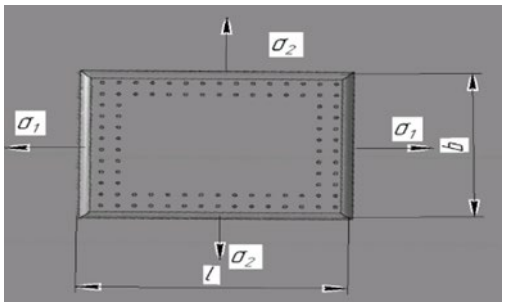


Рис. 4. Схема нагружения вырезанной части фюзеляжа

Расчет параметров заклепочного соединения

Заклепочные соединения относятся к категории неразъемных. При выполнении ремонтных работ диаметр используемых заклепок должен соответствовать диаметру заклепок на ремонтируемом участке или рассчитываться исходя из толщины пакета. Для заклепок с выступающими головками диаметр стержня d определяют по формуле:

$$d = 2\sqrt{\delta_1 + \delta_2}, \quad (7)$$

где δ_1, δ_2– толщины соединяемых листов.

Диаметр отверстия под заклепку do определяется с учетом допуска:

$$d_0 = d + 0{,}1 \text{ мм}, \quad (8)$$

Длина стержня заклепки l при образовании замыкающей головки с полукруглой формой рассчитывается как:

$$l = s + (1{,}2 \ldots 1{,}5)d, \quad (9)$$

где s – толщина склепываемых листов.

Расчет заклепок могут проводить:

- на срез;
- при смятии;
- при растяжении (отрыв головок).

Условия прочности на срез определяют по формуле:

$$\tau_{ср} = \frac{4 \cdot F}{z \cdot k \cdot \pi d^2}, \quad (10)$$

где k– число одновременно срезающихся сечений;

d – диаметр отверстий под заклепку,

$\tau_{ср}$ – допустимое напряжение на срез,

Отсюда количество заклепок в шве z будет равно:

$$z = \frac{4 \cdot F}{\tau_{ср} \cdot k \cdot \pi d^2}. \quad (11)$$

Шаг заклепочного соединения t (расстояние между осями соседних заклепок в ряду) выбирается исходя из условия прочности и герметичности шва:

$$t = (4 \dots 5) \cdot d. \quad (12)$$

Расстояние оси заклепки от края листа:

$$c_1 = 2 \cdot d + 2. \quad (13)$$

А расстояние между рядами по формуле:

$$c_2 = (0{,}6 \dots 0{,}8) \cdot t. \quad (14)$$

Габаритные размеры ремонтной накладки a и b определяются исходя из размеров вырезанного участка (a_0, b_0) и параметров крепления:

$$a = a_0 + (c_1 + c_2 + t) \cdot 2. \quad (15)$$

$$b = b_0 + (c_1 + c_2 + t) \cdot 2. \quad (16)$$

Проведенный расчет позволяет определить оптимальные геометрические параметры крепежа, обеспечивающие равномерное распределение нагрузок и предотвращение концентрации напряжений в зоне ремонта. Схема расположения заклепок на ремонтной накладке с указанием основных размеров представлена на рис. 5.

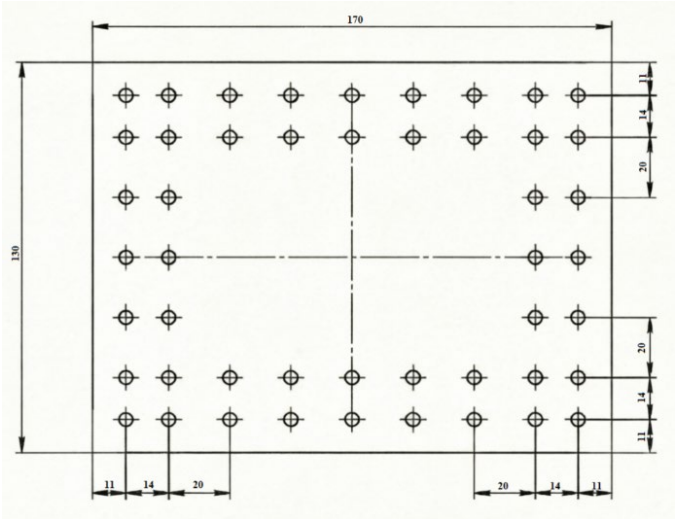


Рис. 5. Схема отремонтированного места, заплатка

Заключение

В работе выполнен прочностной расчет участка с учетом избыточного давления и изгибающих моментов, определены параметры заклепочного

соединения и габариты ремонтной накладки также выполнен расчет на герметичность и прочность при избыточном давлении

Библиографический список

1. Structural Repair Manual (SRM) для узкофюзеляжных среднемагистральных воздушных судов. – Разделы 51, 53: Обшивка фюзеляжа – допустимые повреждения и ремонт.

2. Нормы лётной годности гражданских самолётов (АП-25 / CS-25). – М.: Межгосударственный авиационный комитет (МАК) / Европейское агентство по безопасности полётов (EASA), 2022.

3. Кудрявцев, А. В. Неразрушающий контроль в авиаремонтном производстве : учебное пособие / А. В. Кудрявцев, С. И. Петров. – Санкт-Петербург : Политехника, 2020. – 245 с.

© Бакгалов Э., 2026

СЕКЦИЯ 1.2. ДВИГАТЕЛИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.452.3

В.Н. БАЙБУРИН, А.Д. ХАНМУРЗИН
baiburin.vadim@mail.ru, x4n-art@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. М.А. Мураева

Уфимский университет науки и технологий

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ГОРЕЛОЧНОМ МОДУЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ТРДД

Аннотация: в работе рассматриваются особенности процесса горения водородного топлива за фронтовым устройством гражданского ТРДД. Анализируется влияние скорости, угла конуса подачи топлива и количество точек подвода топлива на характеристики факела пламени, включая распределение температуры, которое напрямую влияет на температурное состояние фронтового устройства (ФУ).
Ключевые слова: водородное топливо, горение.

Введение

Одно из направлений развития авиационных газотурбинных двигателей связано с поиском альтернативных видов топлива, способных обеспечить снижение выбросов и повышение экологической эффективности [1]. Одним из наиболее перспективных направлений является использование водорода, обладающего высокой удельной теплотой сгорания и отсутствием углеродсодержащих продуктов при горении, а также высокой скоростью химических реакций, широкими пределами воспламеняемости и значительной диффузионной способностью, что приводит к интенсивному и быстрому протеканию процесса горения. С одной стороны, это способствует повышению эффективности сгорания, а с другой — создает условия для возникновения локальных перегревов и резких температурных градиентов в зоне пламени.

В этой связи одной из ключевых задач при разработке камер сгорания для водородного топлива является формирование температурного поля в зоне горения с точки зрения снижения температуры и управления диаметральными размерами.

В настоящей работе проведен анализ горения водорода в горелочном модуле камеры сгорания ТРДД с использованием программного комплекса ANSYS CFX.

Расчетная модель и постановка задачи

Для формирования сеточной модели в расчетной области выделена секторная модель, соответствующая работе одного горелочного модуля, что позволило существенно снизить вычислительные затраты при сохранении физической достоверности процесса.

Для проведения численного моделирования геометрия горелочного модуля и характерные размеры ее элементов были приняты с сохранением основных конструктивных и аэродинамических особенностей двигателя-прототипа ПД-14. Геометрическая модель разбита на тетраэдрическую сетку в 883646 элемента.

Особое внимание при формировании модели уделено условному моделированию ввода воздуха зоны разбавления. Площадь отверстий в данной зоне подбиралась эквивалентной площади, приходящейся на одну форсунку, что обеспечивало адекватное воспроизведение процессов подвода вторичного воздуха и формирования температурного состояния рабочей области.

Граничные условия (ГУ) по расходу топлива задавались на основе предварительных расчетов термодинамических расчетов камеры сгорания в составе расчетной модели ТРДД на керосине и водородном топливе с одинаковой тягой, выполненных в программном комплексе DVIGwT.

Для моделирования процесса горения керосина и водорода использовалась модель Eddy Dissipation Model, основанная на предположении о том, что скорость химической реакции определяется скоростью турбулентного перемешивания реагентов. Выбор данной модели обусловлен ее простотой, высокой реакционной способностью водорода и доминирующей ролью турбулентного смесеобразования в рассматриваемых условиях.

Расчетная модель с заданными ГУ представлена на рисунке 1.

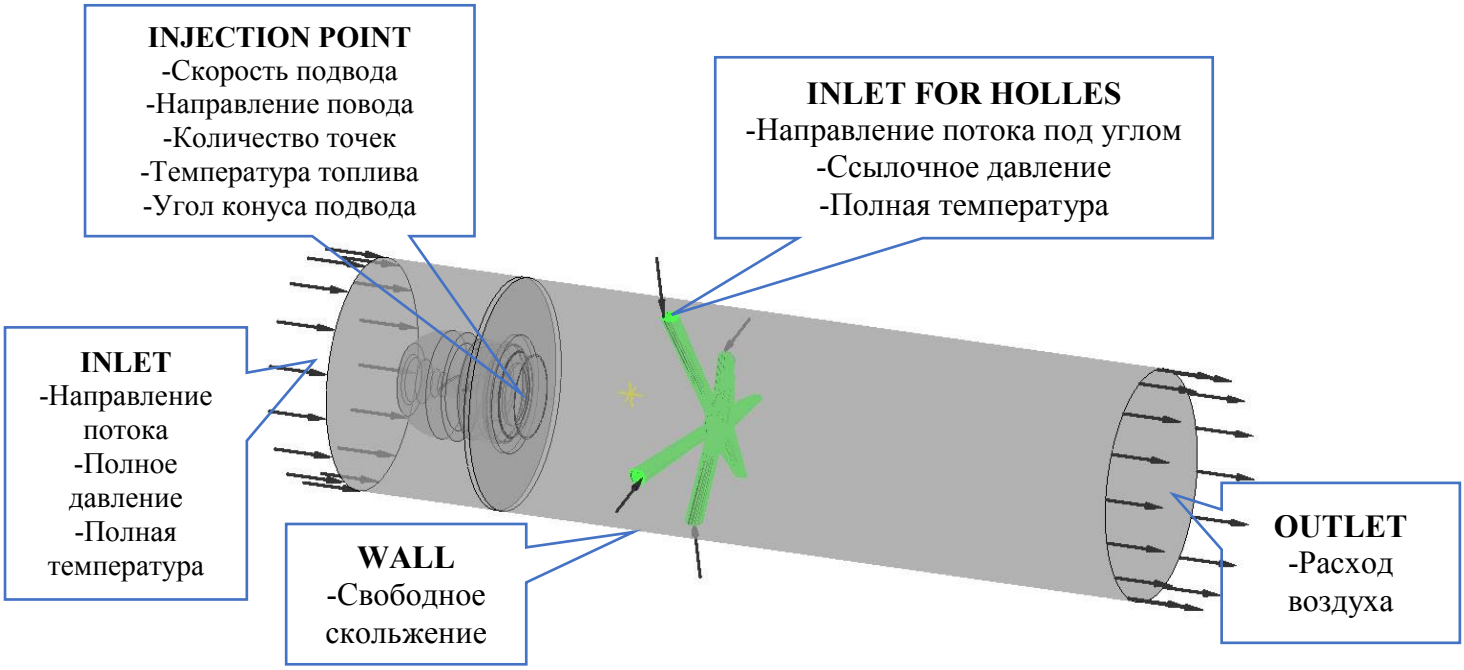


Рис.1. Граничные условия для расчетной модели

Моделирование горения керосина

В качестве базовой модели выполнен расчет горелочного устройства, работающего на жидком керосине, результаты которого представлены на рисунке 2.

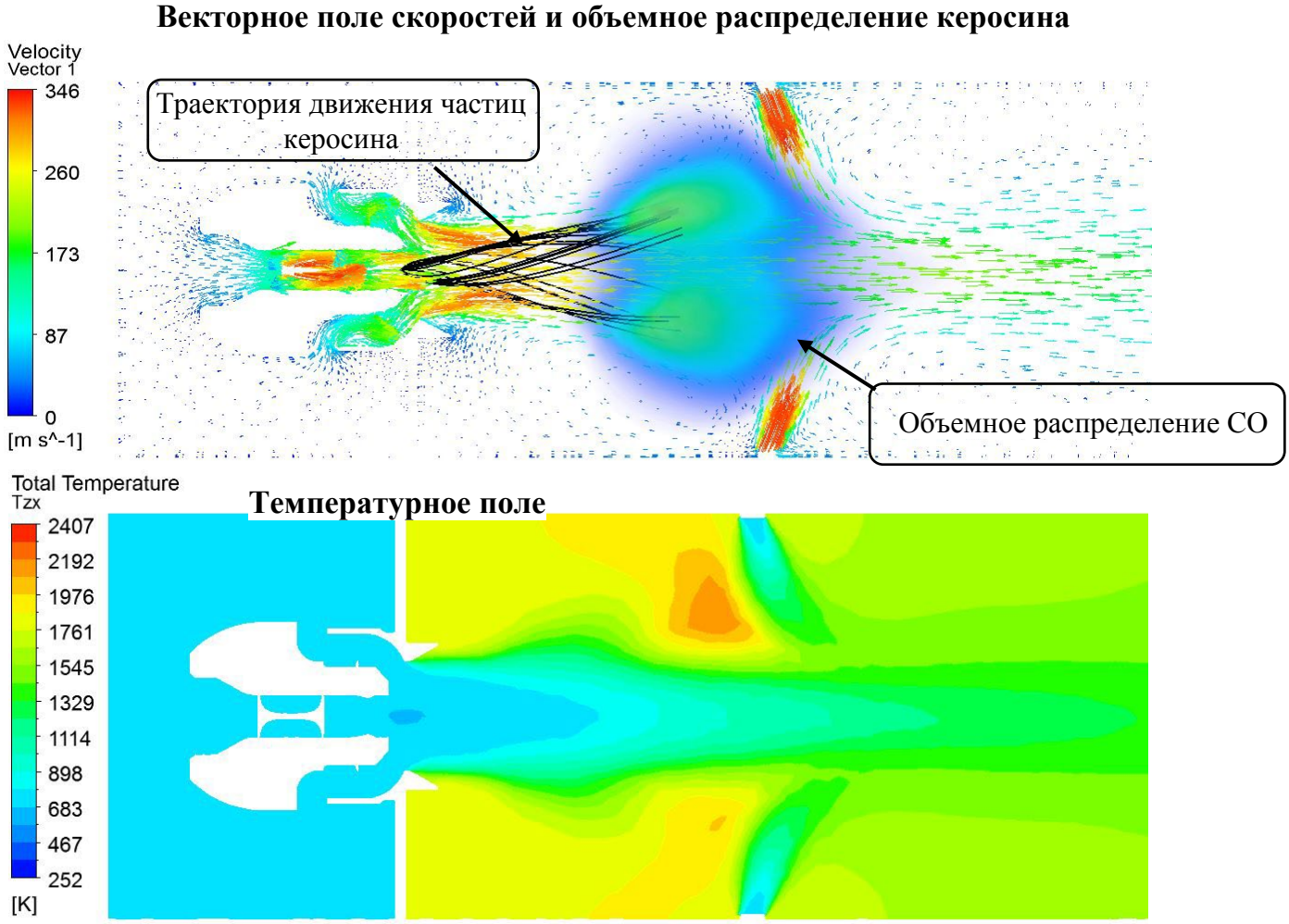


Рис. 2. Результаты расчета горелочного модуля на керосине

Одноточечный подвод топлива

Дальнейшим этапом работы выполнен расчет горелочного устройства на водородном топливе, результаты которого представлены на рисунке 3.

Изначально рассмотрен одноточечный подвод топлива с варьированием параметров впрыска: скоростью и гулом конуса ввода топлива. Результаты расчета приведены на рисунках 4-5.

Увеличение скорости подвода топлива в исследуемом диапазоне оказывает незначительное влияние на температурное поле: рост температур составляет порядка 2–3 K. Это свидетельствует о том, что в данной постановке задачи влияние скоростных параметров струи топлива на процесс горения незначительно.

Сравнение осевого вода и ввода с формированием конуса распыла показало существенно более выраженные различия. Наблюдается снижение температуры на начальном участке (на 1/2 зоны горения) примерно на 130 K. В

основной зоне горения снижение составляет около 30 K, поскольку при конусном вводе топливо распределяется по большему объёму, что приводит к уменьшению локальной концентрации горючей смеси и снижению интенсивности тепловыделения вблизи оси. За пределами зоны горения фиксируется увеличение температуры по сравнению с осевым впрыском в связи с более равномерным распределением топлива по сечению, приводящем к смещению зоны догорания вниз по потоку.

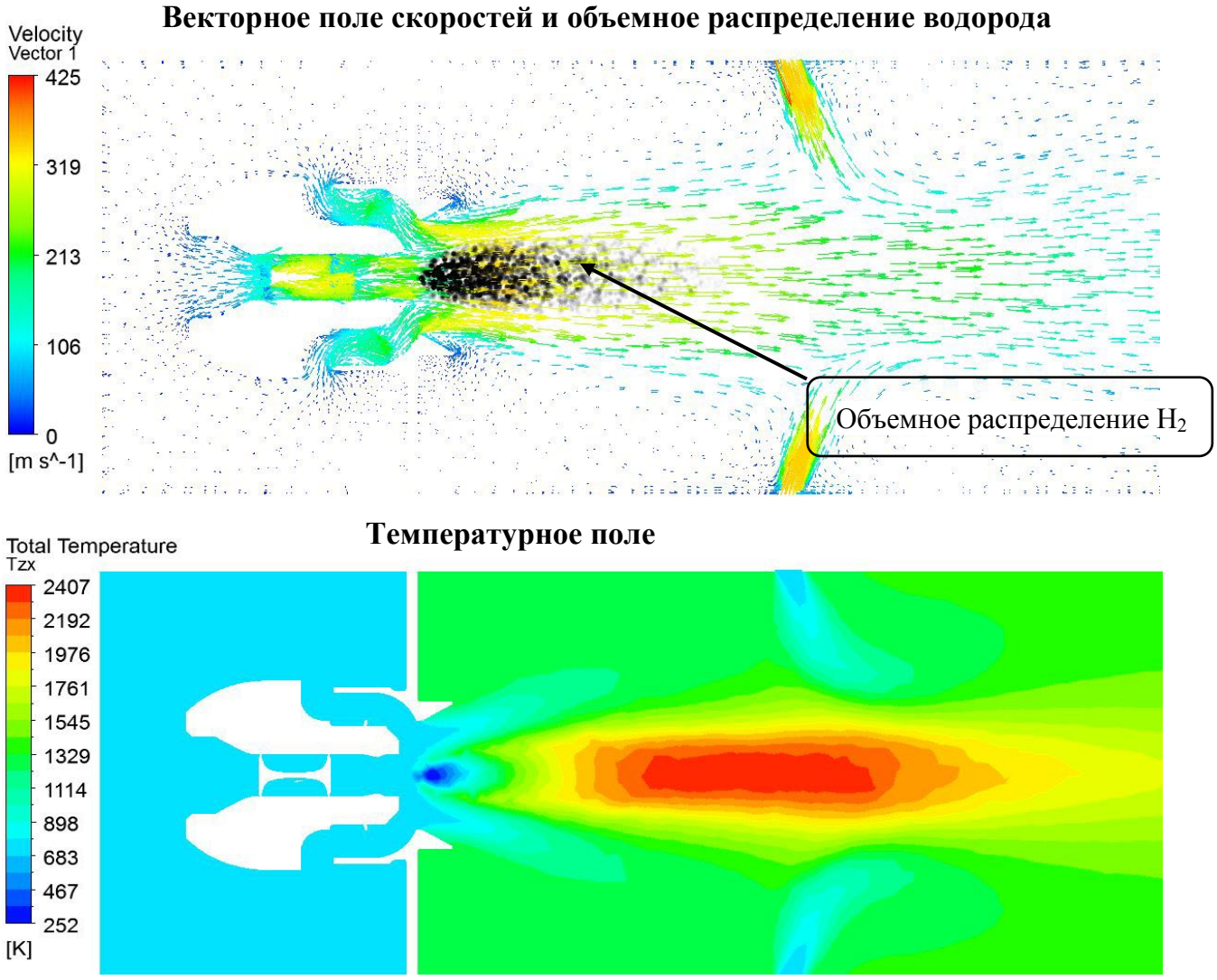
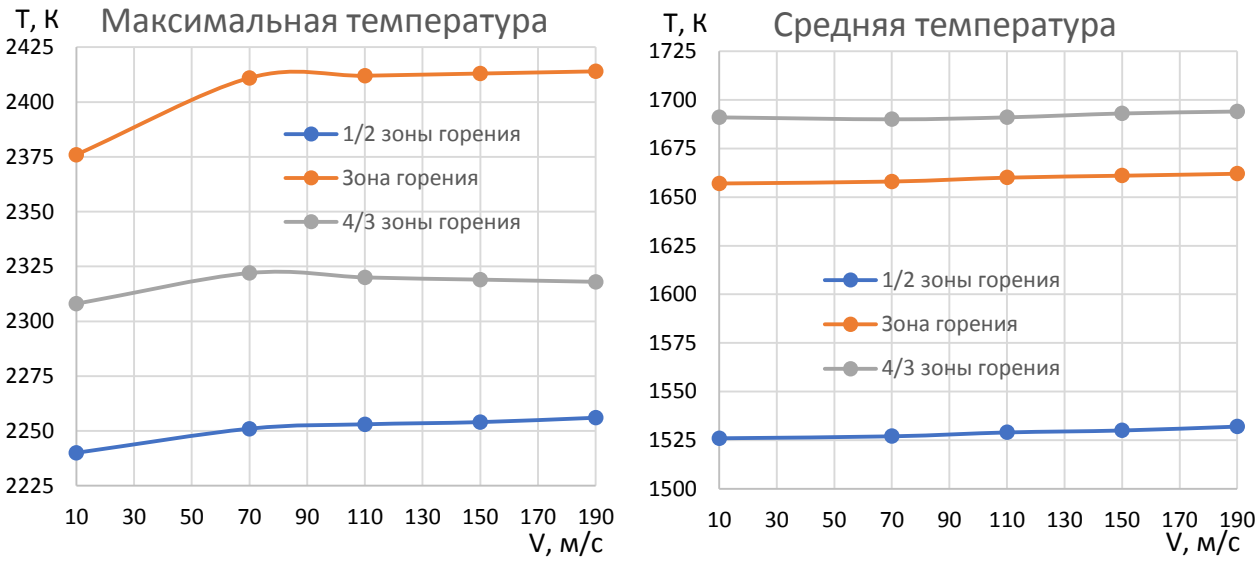
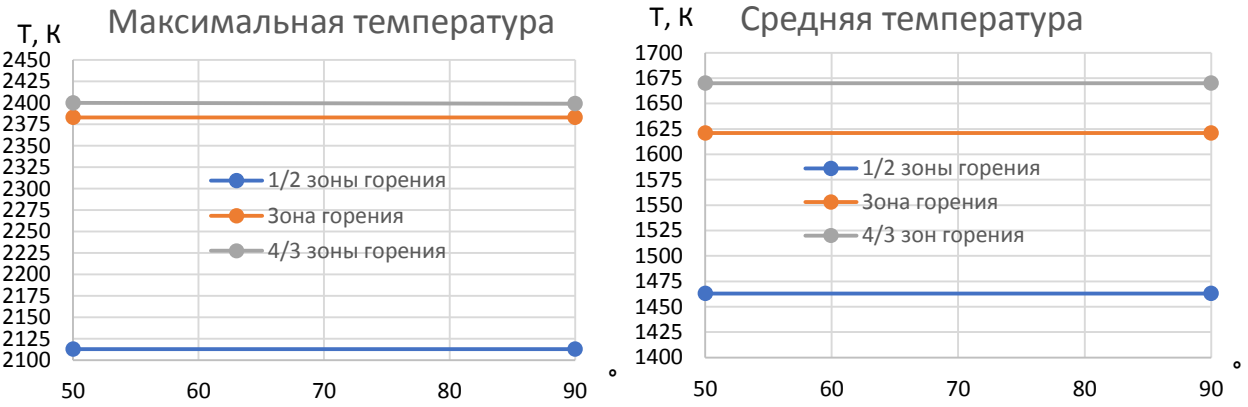


Рис. 3. Результаты расчета горения водорода при одноточечном подводе



а) б)

Рис.4. Влияние параметров при осевом, одноточечном вводе топлива:
а – скорости подвода топлива на максимальную температуру в сечении;
б – скорости подвода топлива на среднюю температуру в сечении.



а) б)

Рис.5. Влияние параметров при одноточечном вводе топлива:
а – угла распыла топлива на максимальную температуру в сечении;
б – угла распыла топлива на среднюю температуру в сечении.

Таким образом, переход от осевого впрыска к конусному существенно влияет на структуру температурного поля: снижает пиковые температуры вблизи зоны стабилизации пламени и способствует более протяжённому и равномерному процессу горения с переносом тепловыделения в отдаленную зону от фронтового устройства.

Многоточечный подвод топлива

Для дальнейшего изучения зависимости параметров подвода водородного топлива, проведен анализ многоточечного подвода топлива. Конфигурации расположения ввода топлива представлены на рисунке 6. Результаты расчета приведены на рисунке 7.

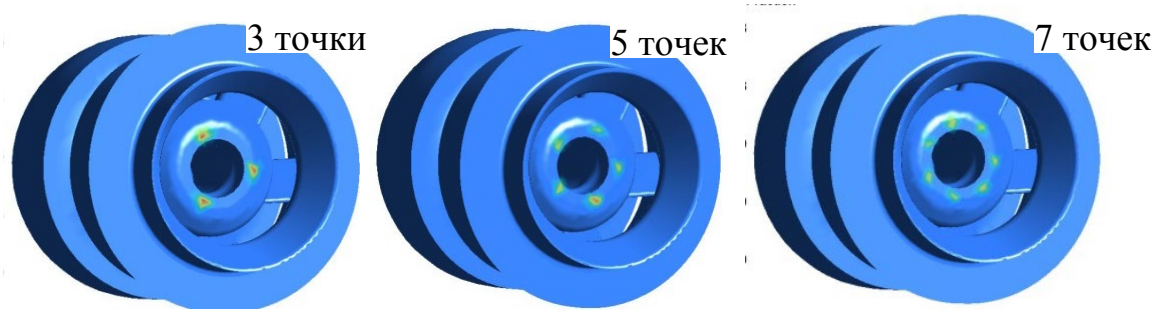


Рис. 6. Конфигурация расположения точек ввода топлива

При увеличении числа точек подачи топлива температура в камере сгорания возрастает на 15–30 К. Это можно объяснить следующими факторами:

1. С увеличением числа точек подачи, топливо распыляется более равномерно по объему камеры сгорания, что способствует более стабильному и интенсивному процессу горения.
2. Большое количество точек подачи способствует большему числу контактов между топливом и воздухом, улучшая условия для горения. В данном контексте, увеличение числа точек подачи водорода способствует улучшению смешения, что может привести к более полному сгоранию топлива и, как следствие, к повышению температуры в камере.

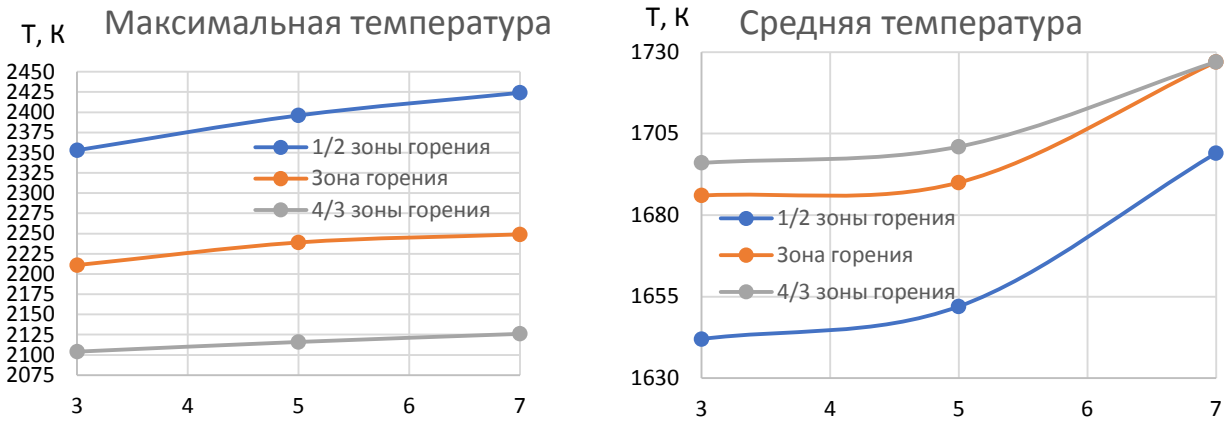


Рис.7. Влияние параметров при многоточечном подводе водорода:
а – количества точек подвода топлива на максимальную температуру в сечении;
б – количества точек подвода топлива на среднюю температуру в сечении.

Вывод

Численный анализ горения пневматической форсунки на водородном топливе позволил изучить влияние различных конфигураций подвода топлива на температурное поле в камере сгорания, а также выявить закономерности, связанные с изменением скорости подвода и числа точек подачи топлива.

На основании полученных результатов невозможно выбрать приемлемый вариант подвода топлива, который будет обеспечивать не только эффективное горение, но и минимизировать риски перегрева. В дальнейшем, для поиска приемлемого решения, планируется рассмотреть подвод водородного топлива на большем удалении от оси форсунки, ближе к центру Циркуляционной зоны.

Также требуется детально проработать конструкцию фронтового устройства, учитывая оптимальное количество и расположение точек подвода топлива на форсуночном устройстве, а также углы распыла для обеспечения равномерного распределения топливной смеси.

Библиографический список

1. В.Н. Орлов. Системы топливопитания и регулирования авиационных ГТД на криогенном топливе– Электрон. учеб. пособие/ Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); – Самара, 2013.

© Байбурин В.Н., Ханмурзин А.Д., 2026

УДК 621.452.3

А.Д. ХАНМУРЗИН, В.Н. БАЙБУРИН
x4n-art@yandex.ru, baiburin.vadim@mail.ru
Науч.руководов. – канд. техн. наук, доц. М.А. Мураева

Уфимский университет науки и технологий

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛЬЦЕВОГО КОЛЛЕКТОРА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: представляемая работа является продолжением исследования, посвящённого разработке газотурбинного двигателя (ГТД) на водородном топливе. В данной статье выполнено численное исследование кольцевого коллектора системы охлаждения турбины высокого давления, расположенного за теплообменником. Проведена оценка влияния геометрии коллектора на гидравлические потери и равномерность распределения воздуха. Определён рациональный вариант конструкции, обеспечивающий снижение потерь давления и улучшение подачи охлаждающего воздуха.
Ключевые слова: ГТД, криогенное топливо, водородное топливо, теплообменник-испаритель, коллектор

Согласно ряду экспертных мнений ведущих специалистов, в области газотурбостроения, в настоящее время достигнут уровень параметров, характеризующих эффективность работы ГТД, близкий к пределу улучшения, в связи с чем дальнейшее совершенствование ГТД возможно за счет кардинальных изменений в его рабочем процессе, одним из путей этого изменения является применение криогенных топлив, в частности, водорода. Одной из ключевых задач при создании водородного ГТД является

проектирование эффективного теплообменного аппарата для подогрева и испарения жидкого водорода до подачи в камеру сгорания.

Помимо обеспечения скачка в параметрах ГТД, актуальность применения водорода в качестве топлива обусловлена ограниченностью углеводородных источников энергии и негативным влиянием традиционных топлив на окружающую среду. Ряд крупных производители наземных газотурбинных установок в той или иной степени занимается разработкой новых установок на водородсодержащем топливе или переводом на него существующих [1]. Исследования применения водородного топлива для авиационных ГТД так же проводятся, однако их существенно меньше [2].

В данном исследовании рассматривается газотурбинный двигатель на водородном топливе, в котором теплообменник-испаритель размещается на линии подвода охлаждающего воздуха, отбираемого за компрессором и направляемого в систему охлаждения турбины высокого давления. Такое решение позволяет использовать теплоту воздуха для испарения и подогрева жидкого водорода перед подачей в камеру сгорания, одновременно снижая температуру самого охлаждающего воздуха. После теплообменника поток поступает в кольцевой коллектор, предназначенный для равномерного распределения воздуха по патрубкам охлаждения первой ступени турбины и соплового аппарата второй ступени. На данном этапе расчёта теплообменник представлен конструкцией типа «труба в трубе», где во внутренней трубе протекает водород, а в межтрубном пространстве движется воздух. На рисунке 1 представлена схема коллектора с теплообменником.

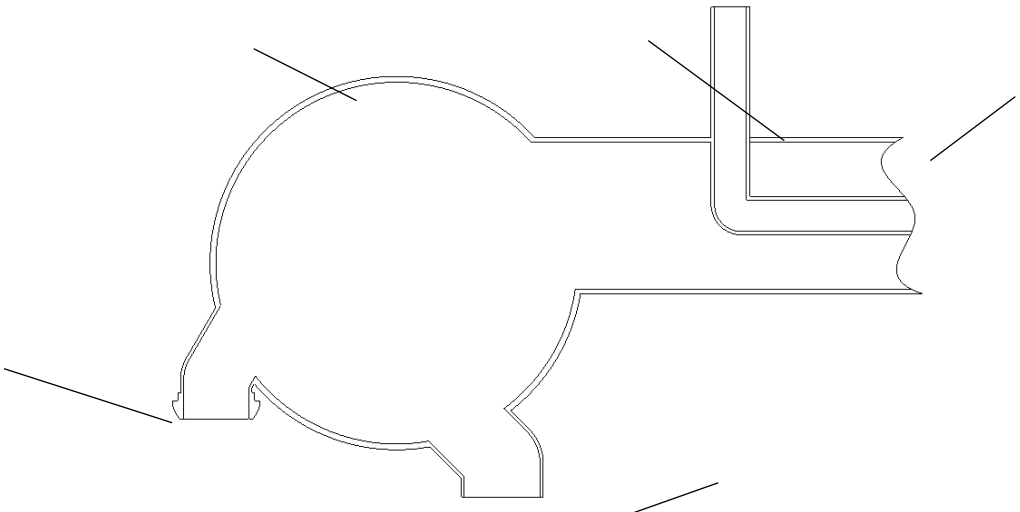


Рис.1. Схема коллектора с теплообменником:
1 – кольцевой коллектор; 2 – внешняя труба теплообменника; 3 – внутренняя труба теплообменника; 4 – патрубки подвода воздуха на охлаждение первой ступени; 5 – патрубки подвода воздуха на охлаждение соплового аппарата второй ступени.

Цель текущей работы: Выполнить численное исследование теплообменника и кольцевого коллектора системы охлаждения турбины высокого давления, оценить влияния геометрии проточной части на потери

давления и равномерность распределения воздушного потока, а также определить рациональный вариант конструкции.

Задачи:

1. Выполнить численное моделирование течения воздуха в теплообменнике и кольцевом коллекторе системы охлаждения турбины высокого давления с определением гидравлических характеристик проточной части.

2. Оценить влияние конструктивных особенностей коллектора на потери полного давления и равномерность распределения потока.

3. Определить рациональный вариант геометрии коллектора, обеспечивающий приемлемый уровень гидравлических потерь и улучшение подачи охлаждающего воздуха к элементам турбины.

Введение

Одной из ключевых задач при создании водородного ГТД является организация эффективной системы подачи топлива, в ранее выполненной работе был проведён тепловой расчёт теплообменника типа «труба в трубе», предназначенного для испарения и подогрева водородного топлива перед подачей в камеру сгорания. По результатам расчёта были определены тепловые нагрузки по характерным участкам теплообменника, а также сформирована его базовая геометрия. В настоящем исследовании данная конструкция была дополнена кольцевым коллектором системы охлаждения турбины высокого давления, установленным на выходе воздушного тракта теплообменника.

Расчётная модель и методика исследования

Расчётная геометрия включает внутренний проточный объём воздушного тракта: межтрубное пространство теплообменника, переходный участок и кольцевой коллектор с выходными патрубками. Таким образом, моделировалось течение охлаждающего воздуха от выхода из компрессора до распределения по каналам охлаждения турбины. Канал течения водорода не моделируется, однако учитывается отвод теплоты от внутренней стенки кольцевого канала теплообменника.

Численное моделирование выполнялось в программном комплексе ANSYS Workbench с использованием решателя ANSYS CFX. Для расчётной области строилась неструктурированная объёмная сетка, включающая 3088102 конечных элемента. Для корректного описания пристенного течения использовались призматический пограничный слой.

В качестве рабочего тела рассматривался воздух, свойства которого задавались как свойства идеального газа. Турбулентность моделировалась по модели SST, обеспечивающей корректное описание течений с отрывами и локальными рециркуляционными зонами.

На входе в расчётную область задавались полное давление и температура воздуха после компрессора. На выходных патрубках в качестве граничного условия задавались значения массового расхода, что для данной постановки задачи является корректным. Это обусловлено тем, что фактический расход охлаждающего воздуха в реальной системе определяется пропускной

способностью внутренних каналов и отверстий охлаждаемых лопаток и элементов турбины. На твёрдых стенках принималось условие прилипания потока.

Влияние теплообмена с водородом во внутренней трубе задавалось через граничное условие плотности теплового потока на внешней поверхности внутренней трубы. Значения теплового потока определялись по результатам предыдущего теплового расчёта для участков нагрева, фазового перехода и перегрева водорода.

Оценка эффективности рассматриваемых вариантов проводилась по величине потерь полного давления на участке теплообменника и на участке коллектора, распределению скоростей в кольцевом канале и равномерности подачи воздуха по выходным патрубкам.

Результаты численного моделирования

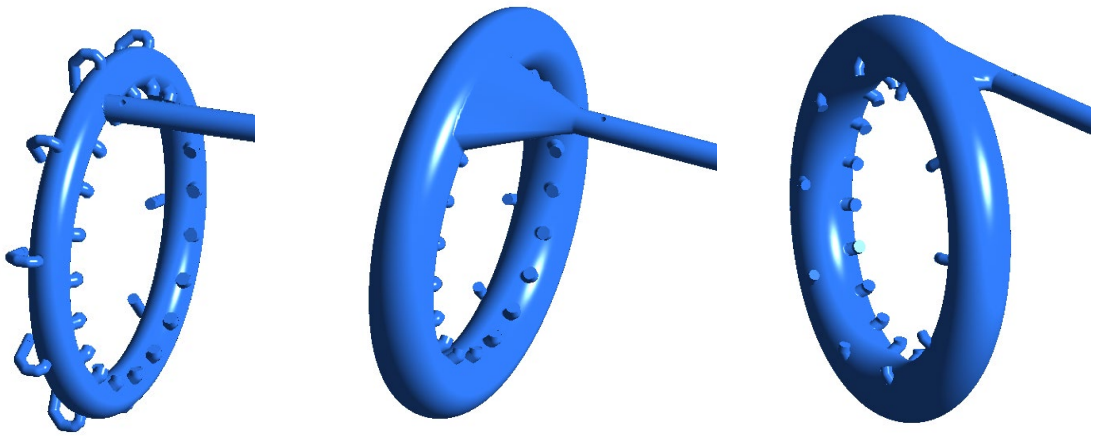
Для оценки влияния геометрии коллектора рассмотрены три последовательных варианта конструкции (рис. 2):

• Вариант 1 — базовый кольцевой коллектор;

• Вариант 2 — коллектор увеличенного диаметра с диффузорным переходом между теплообменником и кольцевым каналом;

• Вариант 3 —коллектор с касательным подводом воздуха в кольцевой канал.

Первый вариант представлял собой кольцевой коллектор диаметром 850 мм с прямым подводом воздуха (рис. 2 а). Во втором варианте был увеличен диаметр кольцевого коллектора на 70 мм и добавлен диффузорный переход между прямым трубопроводом и кольцевым каналом (рис. 2 б). В перовом во втором варианте теплообмен между воздухом и водородом в расчёте не учитывался. В третьем варианте подводящий трубопровод был подключён к кольцевому коллектору по касательной (рис. 2 в). Дополнительно учитывался теплообмен между воздухом и водородом через задание плотности теплового потока на поверхности внутренней трубы теплообменника.

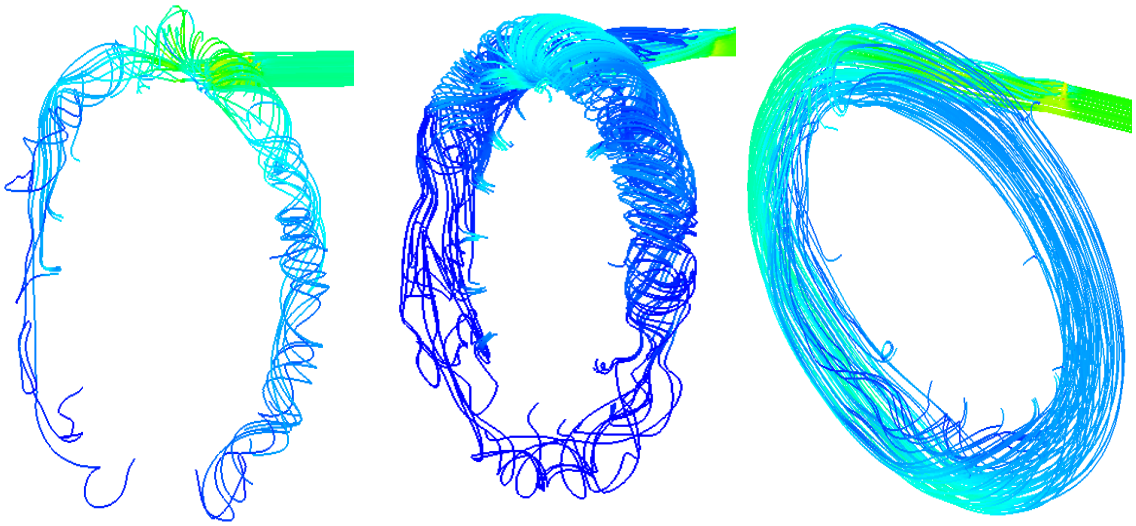


а б в

Рис.2. Расчетные модели:
а) первый вариант; б) второй вариант; в) третий вариант

Анализ результатов

На рисунке 3 представлены линии тока для трёх рассмотренных вариантов конструкции. Их анализ позволяет оценить влияние геометрии проточной части на характер течения и равномерность распределения воздуха в кольцевом коллекторе. Для базового варианта характерна подача основного объёма воздуха в патрубки, расположенные вблизи входного участка, что свидетельствует о неравномерном распределении потока. Во втором варианте после увеличения диаметра коллектора и применения диффузорного перехода наблюдается более равномерное перераспределение воздуха по кольцевому каналу. Наиболее благоприятная картина получена в третьем варианте с касательным подводом воздуха, где поток равномерно распространяется по окружности коллектора, обеспечивая улучшенную подачу воздуха к выходным патрубкам.



а б в

Рис.3. Поля скоростей:
а) – первый вариант; б) – второй вариант; в) – третий вариант

В таблице 1 приведены исходные данные с результатами расчета

Таблица 1

Параметр	1 вариант	2 вариант	3 вариант
Исходные данные			
Давление на входе, $P_{вх}$, кПа	1. 1290	2. 1290	3. 1290
Температура на входе, $T_{вх}$, К	4. 756	5. 756	6. 756
Результаты расчета			
Температура на выходе, $T_{вых}$, К	746	746	722
Коэффициент сохранения полного давления в теплообменнике, $\sigma_{ТО}$	0,805	0,782	0,749
Коэффициент сохранения полного давления в коллекторе, $\sigma_{кол}$	0,731	0,935	0,978
Суммарный коэффициент сохранения полного давления, σ_{Σ}	0,588	0,731	0,733

Из таблицы 1 видно, что базовый вариант конструкции характеризуется наименьшим суммарным коэффициентом сохранения полного давления, равным 0,588. После увеличения диаметра кольцевого коллектора и применения диффузорного перехода данный показатель возрос до 0,731. Наиболее эффективным оказался третий вариант с касательным подводом воздуха, для которого суммарный коэффициент составил 0,733, а коэффициент сохранения давления непосредственно в коллекторе достиг 0,978. Кроме того, в данном варианте обеспечено наиболее равномерное распределение воздуха по выходным патрубкам и снижение температуры потока на выходе до 722 К.

Выводы

В ходе численного моделирования течения воздуха в теплообменнике и кольцевом коллекторе системы охлаждения турбины высокого давления определены гидравлические характеристики и влияние геометрии на параметры потока. Базовый вариант имеет высокие потери давления — 531 кПа и неравномерное распределение воздуха по выходным патрубкам. Увеличение диаметра коллектора и применение диффузорного перехода снизили суммарный перепад до 347 кПа. Наилучшие результаты получены при касательном подводе воздуха: суммарные потери составили 345 кПа, перепад давления в коллекторе — 21 кПа. Также температура воздуха на выходе уменьшилась с 756 К до 722 К за счёт теплообмена с водородным топливом. Таким образом, рациональным вариантом является кольцевой коллектор увеличенного диаметра с касательным подводом, обеспечивающий снижение гидравлических потерь и улучшение работы системы охлаждения.

Библиографический список

1. Семенов С.В. Обзор исследований и разработок по газотурбинным энергетическим установкам на водородном топливе / Нихамкин М.Ш., Плотников А.И // Авиационные двигатели. – 2022. – №3 (16). – С. 77-79.
2. Энергия завтрашнего дня: создание и будущее водородного двигателя [Электронный ресурс]. - URL: https://dzen.ru/a/YOQcoUXSQwPsGlOi (дата обращения 20.10.2023)

© Ханмурзин А.Д., Байбурин В.Н. 2026

УДК 629.7.036

Э.Р. МУХАМЕТЗЯНОВА
EvelinaMukhametzyanova@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. М.А. МУРАЕВА

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАСЧЁТ ТЕПЛООТДАЧИ В ANSYS CFX ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛОСКИХ ТУРБИННЫХ РЕШЁТОК

Аннотация: в работе представлен анализ влияния моделей турбулентности, интенсивности турбулентности на распределение и изменение коэффициента теплоотдачи турбинного профиля.

Ключевые слова: осевая турбина, ANSYS CFX, модели турбулентности, интенсивность турбулентности, k-ε модель, BSL модель, SST модель.

Ускорение темпов развития авиационной промышленности требует быстрых конструктивных решений, которые в свою очередь должны быть подтверждены соответствующими испытаниями, доказывающими их надёжность, эффективность и технологичность в разрабатываемой системе. Однако на проведение натурных экспериментов затрачивается много экономических и временных ресурсов предприятия. Инструментом, предоставляющим возможность значительно ускорить процесс разработки, за счёт быстрого анализа и выявления наиболее выгодных решений, являются 3D расчёты, которые в представленной работе осуществляется посредством программного комплекса Ansys CFX.

Точность и объективность результатов 3D расчётов напрямую зависят от математической модели. При её формировании необходимо грамотно описывать происходящие процессы. Так при проектировании систем охлаждения для корректной оценки теплового состояния лопаток турбин важно учитывать явления, происходящие в пограничном слое, возникающем при обтекании аэродинамического профиля потоком газа.

В RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) модели, используемой в Ansys CFX, описание течения газа происходит при помощи незамкнутой системы уравнений Навье-Стокса, осреднённых по числу Рейнольдса. Для решения задач с турбулентным течением вводятся модели турбулентности, которые представляют собой дополнительные дифференциальные уравнения, замыкающие систему и различным образом описывающими физические процессы, происходящие в потоке.

В соответствии с вышесказанным, определены следующие задачи представленной работы:

- проанализировать влияние моделей турбулентности на результаты расчёта;

- рассмотреть взаимосвязь интенсивности турбулентности на входе в расчётную модель с коэффициентом теплоотдачи;

Для учёта изменения градиента скорости в направлении перпендикулярном поверхности лопаточного профиля в данной точке и вдоль него, сеточная модель формируется в виде гексаэдрической сетки с высотой элементов, значительно меньшей их ширины (рис.1). Связано это с тем, что по высоте пограничного слоя разница между значениями скорости в пристеночной области и в установившемся потоке значительно выше, чем изменение по обводу профиля. Пригодность применения построенной сетки для расчетов с определенной моделью турбулентности оценивается параметром Y+, который характеризует область пограничного слоя, захваченного первым элементом (рис.2).

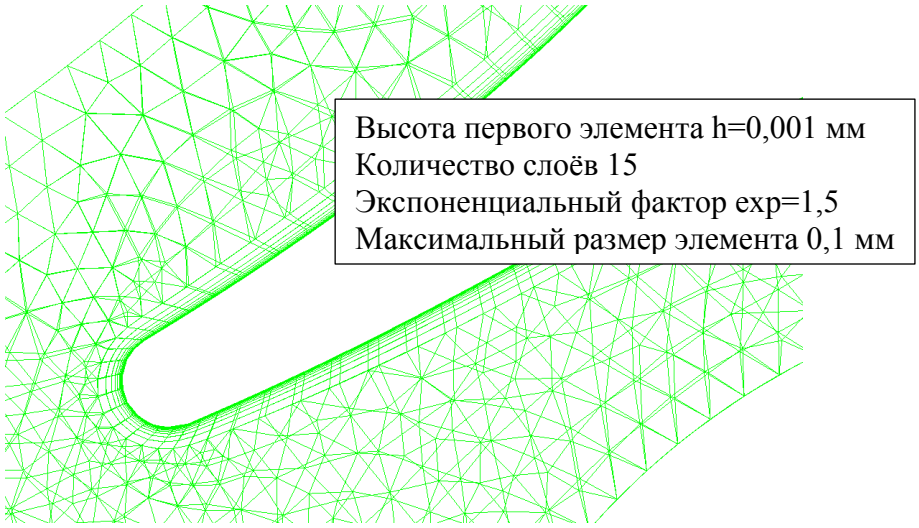


Рис. 1. Сеточная модель пограничного слоя

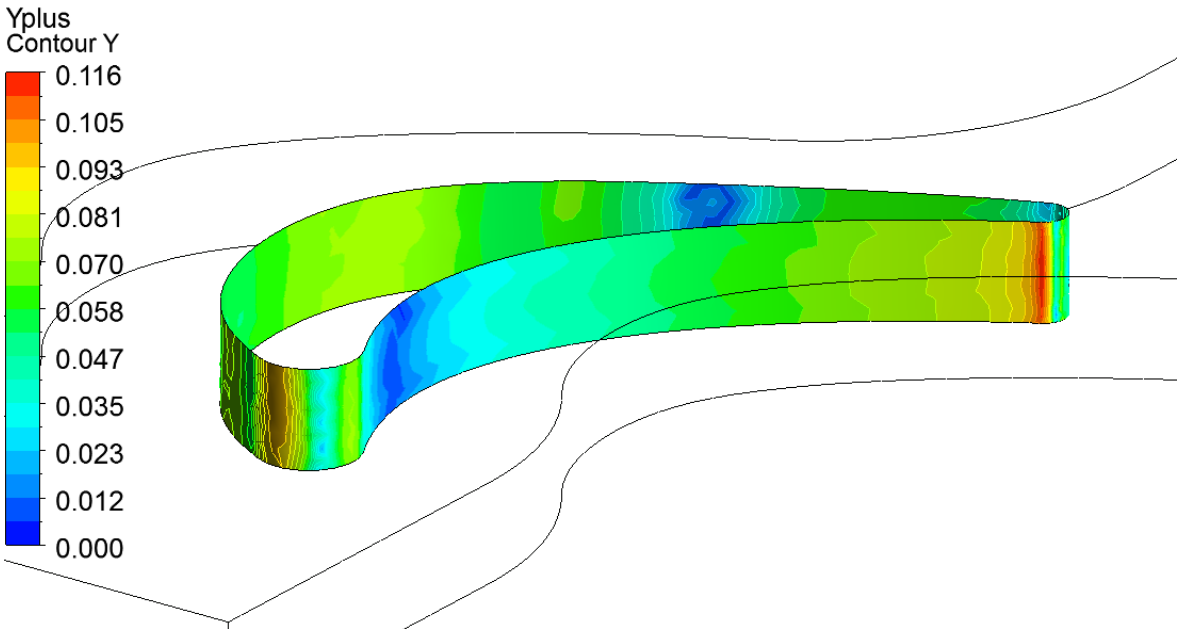


Рис.2. Распределение параметра Y+ по поверхности турбинного профиля

Так, модель турбулентности k-ε менее требовательна к сетке и рассчитывается при значениях Y+ от 15-30. Связано это с тем, что пограничный слой в этом случае описывается пристеночными функциями. Модель хорошо подходит для решения течений без отрывов, больших перепадов давлений и потоков с сильной кривизной.

Модель k-ω используется для описания турбулентности сложных течений в пограничных слоях, однако выдаёт грубые результаты в ядре потока. Для получения качественных результатов BSL (Base Line) и SST (Shear Stress Transport) модели объединяют в себе достоинства двух предыдущих. Они используют весовую функцию для плавного перехода между описанием ядра потока и пристеночного течения. При этом в SST модели, по сравнению с BSL, при описании турбулентных эффектов учитывается перенос главных сдвиговых напряжений, а соответственно и большие градиенты давления, и вводятся ограничения на коэффициент турбулентной вязкости, которые позволяют точнее моделировать точку отрыва потока. Размер зоны отрыва, прогнозируемый SST, как правило, больше, чем в случае применения BSL. Сеточная модель в обоих случаях должна удовлетворять условиям Y+ ≤ 1, для того чтобы учесть большие градиенты скорости. Однако, для SST-модели благодаря конкретизации весовой функции требования к сетке ниже при одинаковой требуемой точности.

Расчётная модель представляет собой трехмерный межлопаточный канал (рис.3), соседние каналы моделируются с помощью граничного условия Translation Periodicity. Для исключения влияния границ на результаты моделирования обтекания в расчетную модель добавлен входной и выходной участки.

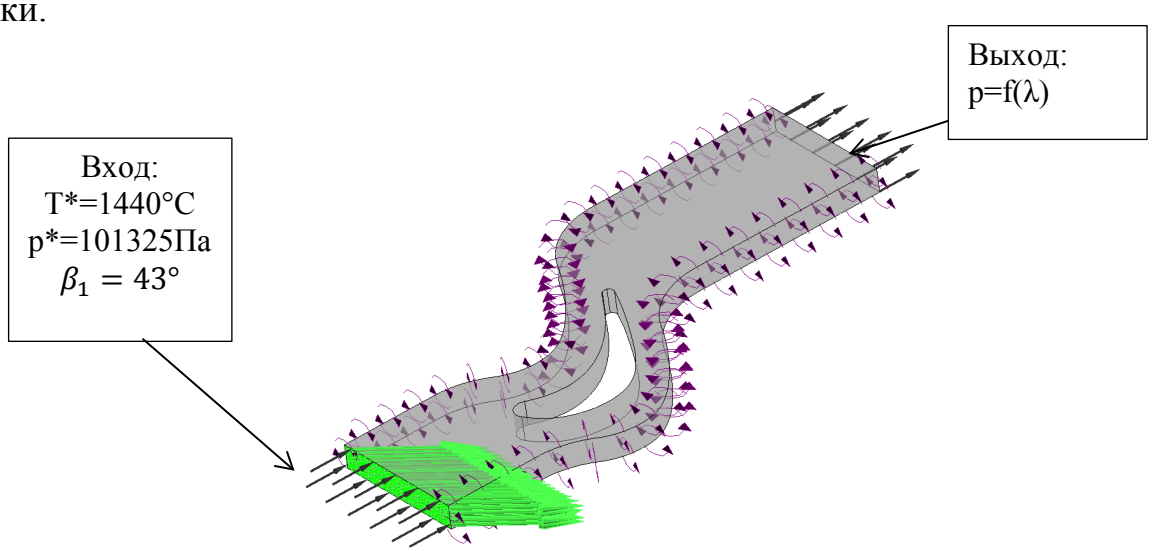


Рис.3. Расчётная область с заданными граничными условиями на входе и выходе

(p^* и T^* – полные давление и температура на входе, β_1- угол потока на входе, λ и p – приведенная скорость потока и статическое давление на выходе из расчётной области соответственно)

Результаты расчётов при приведённой скорости λ, равной 0,95, для различных моделей турбулентности приведены для наглядного сравнения на рисунке 5. Точки, в которых определялись значения коэффициента теплоотдачи указаны на рисунке 4.

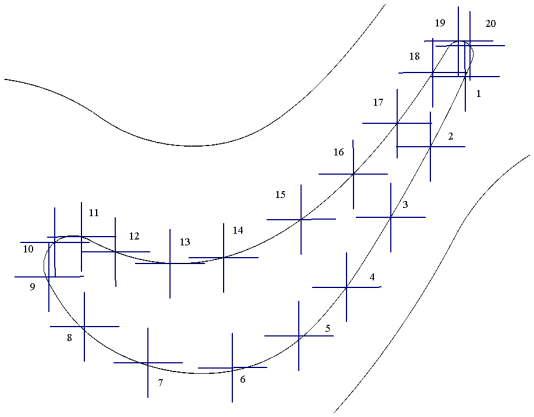


Рис.4. Расположение точек на профиле лопатки

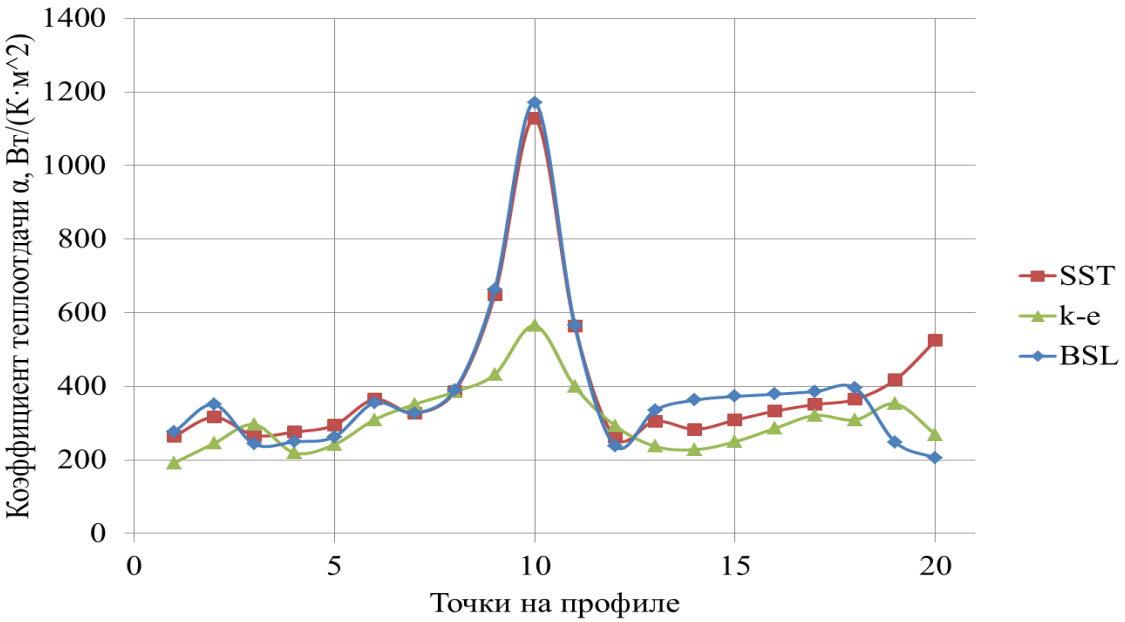


Рис.5. Изменение коэффициента теплоотдачи по поверхности турбинного профиля при различных моделях турбулентности

Опираясь на результаты расчетов, можем сделать вывод, что k-ε модель выдаёт заниженные результаты в сравнении с SST и BSL моделями, которые учитывают образование вихревых течений. Но стоит отметить, что время и энергетические ресурсы, затрачиваемые на выполнение задачи с применением k-ε модели значительно ниже за счёт невысокого качества сетки. Данная модель применима для начальных приближений, где максимальная быстрота расчёта превалирует.

Для виртуальных испытаний, в которых требуются значения, наиболее приближенные к реальным, необходимы две другие модели. Из графиков также видно, что результаты расчётов с использованием BSL и SST практически не

отличаются на спинке и входной кромке профиля. При этом на корыте, где присутствует застойная зона, BSL модель показывает результаты выше, чем в SST. Также сравнивая графики, можно увидеть следующую картину: в области выходной кромки коэффициент теплоотдачи снижается для BSL, аналогично k-ε, при этом повышается при использовании SST. Для определения корректности результатов расчёта при использовании различных моделей турбулентности необходимо провести экспериментальные исследования.

Помимо применения различных моделей турбулентности Ansys CFX также предлагает возможность изменения граничных условий для турбулентности потока на входе в расчетную область, что позволяет учитывать меру пульсаций параметров потока в данной точке, таких как скорости, давления и так далее. В настоящей работе рассматривается исключительно интенсивность турбулентности. Как видно из графиков (рис.6), с её возрастанием повышаются и значения коэффициентов теплоотдачи, что говорит нам о необходимости корректного учёта данного параметра при формировании расчётной модели. Для определения корректной интенсивности, соответствующей действительным физическим процессам, требуется сравнить полученные результаты расчётов с экспериментальными данными или проводить исследование турбулентности потока на испытуемом узле.

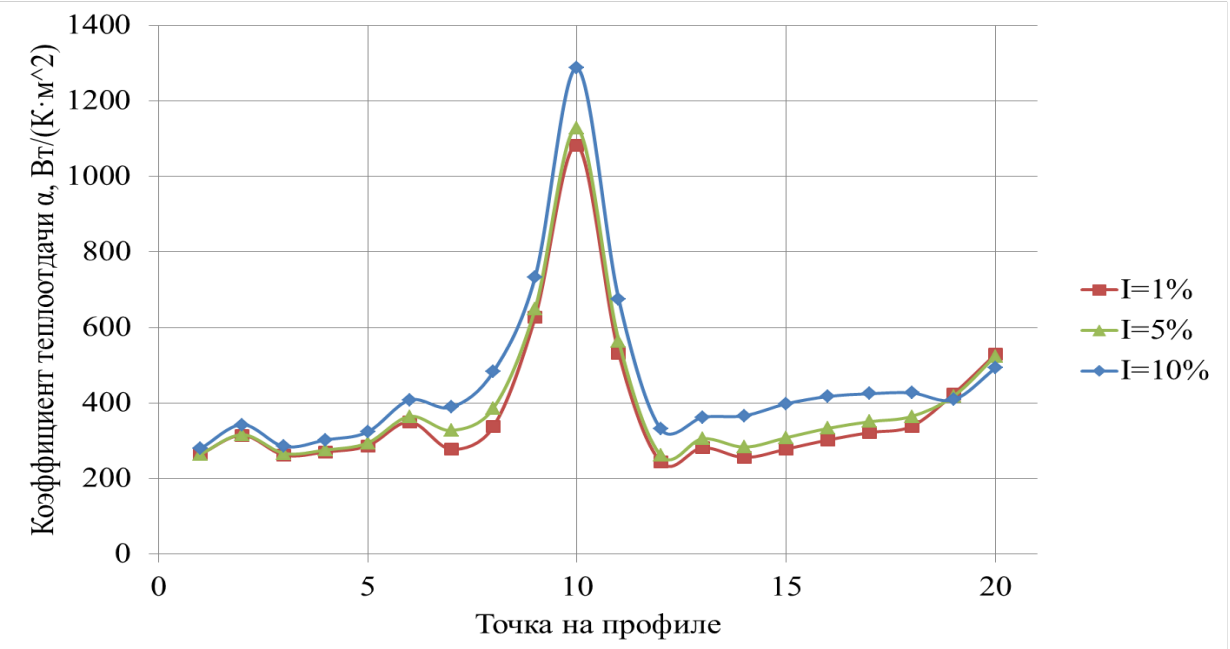


Рис.6. Изменение коэффициента теплоотдачи по поверхности турбинного профиля при различных настройках интенсивности турбулентного течения.

Подводя итоги представленной работы, можно сказать, что при формировании сеточной и расчётной модели, необходимо с внимательностью подходить к описанию физических процессов, и исходить из желаемой точности результатов и времени расчёта. Так, при выборе модели турбулентности важно руководствоваться поставленной задачей. При

обтекании аэродинамического профиля за счёт расширенного функционала в плане решения сложных пограничных слоёв, SST модель, по результатам анализа, является наиболее подходящей.

Интенсивность турбулентности также оказывает заметное влияние на результаты расчётов. Для определения условий выбора данных значений необходимо провести эксперимент.

Библиографический список

1. Копелев С.З. Расчёт турбин авиационных двигателей/ С.З. Копелев, Н.Д. Тихонов. – Москва: «Машиностроение», 1974. – 269 с. – Текст: непосредственный.

2. Клеванский В.М. Гидрогазодинамика: учеб. пособие/ В.М. Клеванский, В.И. Кузнецов – Уфа: УГАТУ, 2010. – 309 с.

3. Венедиктов В.Д. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин/ В. Д. Венедиктов, А.В.Грановский. – Москва: ЦИАМ, 1990. – 393 с. – Текст: непосредственный.

4. Мураева М.А. Верификация методики газодинамического расчета осевой турбины в программном комплексе Ansys CFX на базе экспериментальных исследований плоских решеток/ М.А. Мураева, А.В. Гумеров, Т.Р. Каримов. – Текст: непосредственный // – Уфа, 2022.

© Мухаметзянова Э.Р., 2025

УДК 621.43.018.5

П.Д. ЧЕГОДАЕВА
p.d.chegodaeva@gmail.com
Науч. руководов. – к.т.н., доц. А.Е. Кишалов

Уфимский университет науки и технологий

СНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАДИЕНТОВ В ЖАРОВОЙ ТРУБЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ОХЛАЖДЕНИЮ С ОРОШЕНИЕМ СТЕНОК

Аннотация: встатье приведено параметрическое исследование распределения температуры по стенке жаровой трубы при использовании послойной схемы и нескольких вариантов схемы охлаждения с орошением стенок. Проанализированы поля температур и распределение температуры по длине стенок.

Ключевые слова: жаровая труба, камера сгорания, послойное охлаждение, орошение стенок, градиент температуры, равномерность температурного поля.

Введение

В камерах сгорания современных ГТУ температура газов превышает допустимую для жаропрочных сплавов, что требует интенсивного охлаждения жаровых труб [1]. При этом долговечность конструкции ограничивается не столько средним уровнем температуры, сколько локальными градиентами, порождающими термические напряжения и малоцикловую усталость [2].

В работе сопоставлены продольные температурные градиенты послойной схемы и трех схем орошения с различной геометрией секций, с целью оценить равномерность температурного поля каждого варианта.

Традиционные системы послойного конвективно-пленочного охлаждения формируют защитную воздушную пленку через один ряд отверстий, расположенных за профилированным козырьком (рис. 1) [3]. Такие схемы успешно снижают среднюю температуру, но часто порождают высокую неравномерность температурного поля. Область вблизи отверстий интенсивно охлаждается, тогда как участки, удаленные от места подвода воздуха, остаются перегретыми, что ускоряет исчерпание ресурса. Для снижения подобной неравномерности могу применяться схемы с орошением стенок. В отличие от традиционного послойного охлаждения, в таких схемах воздух подается через несколько рядов отверстий малого диаметра, формируя локальные струи, которые интенсифицируют теплообмен и выравнивают температурное поле.

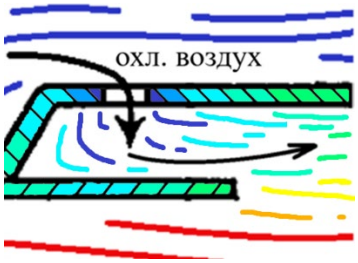
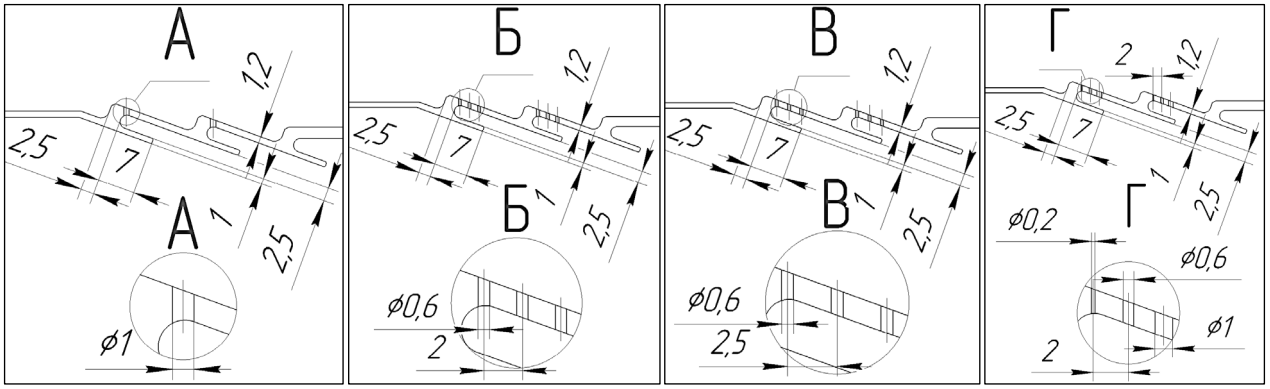


Рис. 1. Схема формирования охлаждающей пленки и температуры стенки при послойной схеме охлаждения

Объект исследования и методика моделирования

Рассмотрены четыре варианта схем охлаждения стенки ЖТ. В качестве базовой представлена схема послойного охлаждения (рис. 2а). Площадь одного отверстия для подвода воздуха 0,79 мм². Схема I (рис. 2б) – орошение несколькими рядами отверстий уменьшенного диаметра с шагом в осевом направлении 2 мм, суммарная площадь набора отверстий секции, распложенных на одной прямой 0,85 мм². Схема II (рис. 2в) отличается от схемы I шагом 2,5 мм. Схема III (рис. 2г) – комбинация отверстий трех разных диаметров – 0,2; 0,6 и 1 мм. Суммарная площадь одного набора отверстий 1,1 мм². Для всех схем длина исследуемого участка секции x=10 мм, число отверстий по окружности 720.



а) б) в) г)

Рис. 2. Моделируемая геометрия: а) базовая схема; б) схема I; в) схема II; г) схема III

Расчетная геометрия представляет собой сектор 1° охлаждаемой стенки ЖТ в области зоны горения. Она включает две последовательные секции охлаждения ЖТ, но анализируется вторая по потоку секция. Первая введена для формирования реалистичного профиля скорости и температуры на входе, имитируя влияние участка, расположенного выше по потоку.

В расчетах использованы теплофизические свойства жаропрочного никелевого сплава ЭП-648, широко применяющегося при изготовлении ЖТ. Моделирование выполнено в ANSYS CFX 22R1 на неструктурированной тетраэдрической сетке с локальным замельчением и призматическими слоями у стенок. Общее количество элементов приближено к трем миллионам. Использована модель турбулентности k-ε. Расчеты выполнены при температуре охлаждающего воздуха в кольцевых каналах 700 К и температуре продуктов сгорания внутри жаровой трубы 2000 К. Давление воздуха на выходе из расчетной области принято 1,75 МПа, давление газа – 1,7 МПа. Скорость газа внутри жаровой трубы принята равной 50 м/с. Расчеты проведены при скоростях наружного воздуха 10, 50 и 100 м/с, перекрывающих рабочий диапазон режимов работы КС. При моделировании учитывались температурные зависимости теплофизических свойств рабочего тела и теплопроводности материала стенки от температуры.

Обработка результатов расчета

Для каждой геометрии построены поля распределения температур по стенке и изменение температурного градиента по длине стенки:

$$gradT = \frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i}.$$

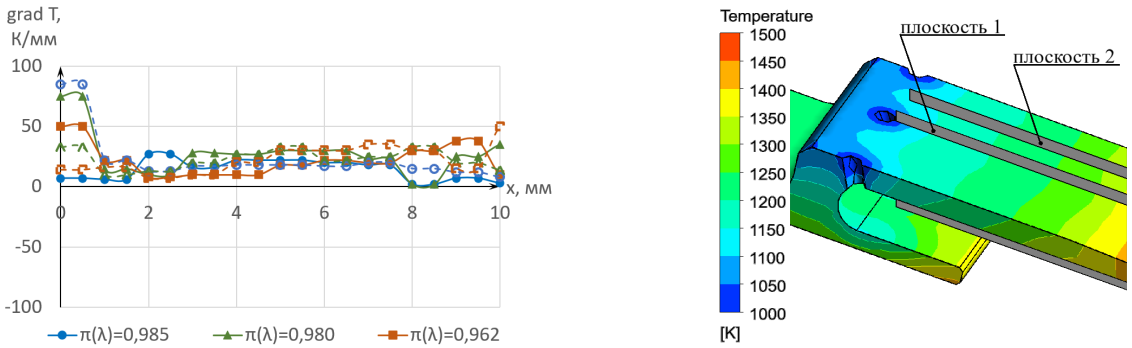
Для замера изменения температурного градиента по длине стенки в каждом варианте исследуемой геометрии на внутренней поверхности козырька построены две прямые – в плоскости, пересекающей центр отверстия подвода охлаждающего воздуха и в плоскости, расположенной между отверстиями (рис. 3б). Это необходимо для оценки влияния неравномерности введения воздуха через дискретные отверстия.

Также для объективного сравнения схем с разной суммарной площадью отверстий сопоставление по скорости наружного воздуха недостаточно информативно. Характер течения в отверстии определяется прежде всего перепадом давлений между полостью охлаждения и полостью жаровой трубы. Поэтому анализ выполнен в зависимости от безразмерного перепада:

$$\pi(\lambda) = \frac{P_{\text{вн}}}{P^*_{\text{нар}}},$$

где $P^*_{\text{нар}}$ – полное давление охлаждающего воздуха, $P_{\text{вн}}$ – статическое давление внутри жаровой трубы. Такой переход исключает влияние площади отверстий и обеспечивает одинаковые условия истечения.

Послойная схема охлаждения характеризуется выраженной неравномерностью распределения температурного градиента по длине стенки как в плоскости расположения отверстий, так и в плоскости между ними (рис. 3). Наиболее интенсивные – в начале участка, при значениях x от 0 до 2 мм, где градиент изменяется от величин порядка 80-90 К/мм до величин, близких к 0. Далее градиент практически постоянный, перепад не превышает 10–15 К/мм. Разброс между кривыми, соответствующими различным значениям $\pi(\lambda)$, является наибольшим среди всех рассмотренных вариантов, при этом режим с $\pi(\lambda) = 0{,}985$ демонстрирует наиболее выраженную неравномерность. В целом послойное охлаждение формирует достаточно равномерное распределение градиента температуры на определенной длине козырька, но имеет очень высокие локальные перепады в области, близкой к отверстиям.

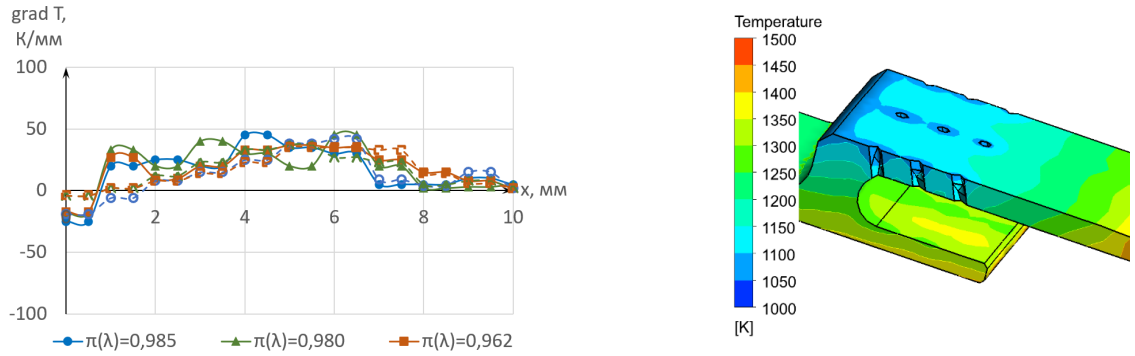


а) б)

Рис. 3. Результаты расчета базовой схемы: а) Изменение температуры по длине стенки (сплошные линии – в плоскости отверстия, штриховые линии – в плоскости между отверстиями); б) поля температур на стенке при скорости воздуха 50 м/с

Схема I обеспечивает наиболее равномерное распределение температурного градиента по длине стенки (рис. 4). В начале участка, при значениях x от 0 до 2 мм наблюдается незначительное снижение градиента, после чего происходит его стабилизация. На участке x от 2 до 8 мм зависимости имеют практически горизонтальный характер, перепад составляет порядка 15–20 К/мм. Кривые для различных значений безразмерного перепада давления располагаются близко друг к другу, что свидетельствует о слабой чувствительности схемы к изменению режима работы КС. В конечной части

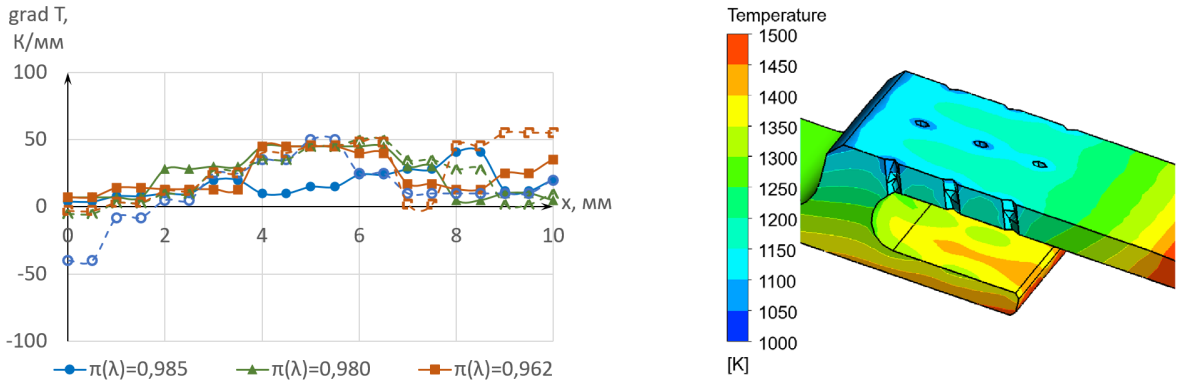
участка градиент снижается до значений, близких к 0. Таким образом, схема I формирует наиболее благоприятное распределение температурного поля с точки зрения равномерности охлаждения и потенциального снижения термических напряжений.



а) б)

Рис. 4. Результаты расчета схемы I: а) Изменение температуры по длине стенки (сплошные линии – в плоскости отверстия, штриховые линии – в плоскости между отверстиями); б) поля температур на стенке при скорости воздуха 50 м/с

Схема II демонстрирует промежуточный характер распределения температурного градиента (рис. 5). В начальной зоне при значениях x до 4 мм наблюдаются заметные перепады и локальные снижения температурного градиента, наиболее выраженные при $\pi(\lambda) = 0{,}985$. В диапазоне значений x от 4 до 7 мм градиент относительно стабилен, однако уровень размаха остается выше по сравнению со схемой I – до 25 К/мм. В целом схема II обеспечивает более равномерное распределение по сравнению с послойным охлаждением и схемой III, однако уступает схеме I вследствие повышенного разброса значений температурного градиента в начальной и конечной зонах.

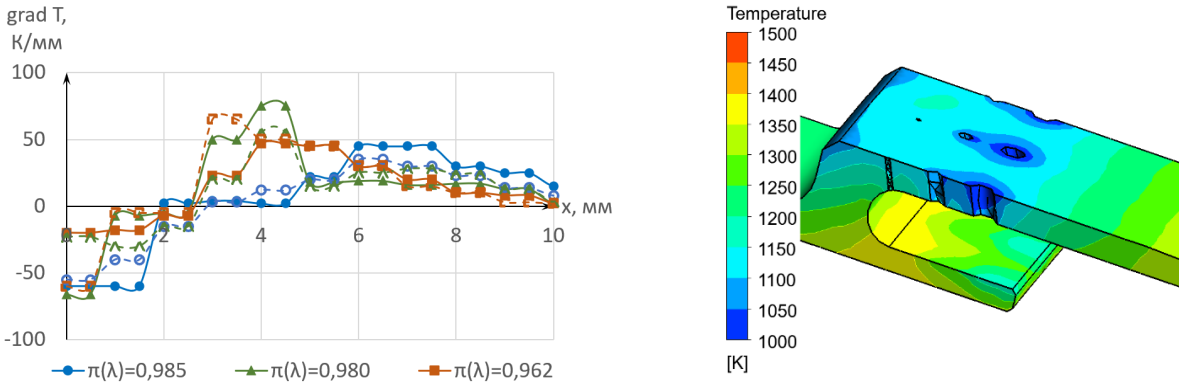


а) б)

Рис. 5. Результаты расчета схемы II: а) Изменение температуры по длине стенки (сплошные линии – в плоскости отверстия, штриховые линии – в плоскости между отверстиями); б) поля температур на стенке при скорости воздуха 50 м/с

Схема III характеризуется выраженной неравномерностью распределения температурного градиента и значительными перепадами по всей длине

исследуемого участка (рис. 6). В диапазоне значений x от 4 до 6 мм наблюдается резкое увеличение градиента, наиболее выраженное при $\pi(\lambda) = 0{,}980$. Разброс между кривыми для различных значений $\pi(\lambda)$ является значительным, что указывает на высокую чувствительность схемы к условиям работы КС. В результате схема III формирует наименее благоприятное распределение температурного градиента среди рассмотренных вариантов.



а) б)

Рис. 6. Результаты расчета схемы III: а) Изменение температуры по длине стенки (сплошные линии – в плоскости отверстия, штриховые линии – в плоскости между отверстиями); б) поля температур на стенке при скорости воздуха 50 м/с

Заключение

Численное моделирование позволило сравнить равномерность температурного поля стенки для четырех схем охлаждения. Традиционная послойная схема создаёт высокие локальные градиенты (до 80–90 К/мм) в зоне, прилегающей к отверстиям. Схемы с орошением стенок позволяют снизить неравномерность температурного поля, однако эффективность сильно зависит от конкретной геометрии секции. Схема I даёт наиболее стабильное и равномерное распределение градиента по длине с малой чувствительностью к режиму работы. Схема II занимает промежуточное положение, демонстрируя заметные перепады температурного градиента в начальной и конечной зонах. Схема III формирует наибольшие градиенты и сильную зависимость от режима работы, что делает её наименее благоприятной. Полученные результаты носят исследовательский характер и не являются готовым решением для конкретной конструкции – выбор оптимальной геометрии должен выполняться применительно к заданным условиям эксплуатации.

Библиографический список

1. Харитонов В. Ф., Соловьев П. В. «Материалы деталей авиационных двигателей: учебный справочник по дисциплине «Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок»» / Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа: УГАТУ, 2021. – 80 с.

2. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: учебник для вузов / С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов [и др.]; под общ. ред. Д. В. Хронина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 368 с.
3. Кишалов А.Е., Чегодаева П.Д. Методики оценки эффективности пленочного охлаждения секции жаровой трубы камеры сгорания / Вестник УГАТУ. 2025. Т. 21, № 1 (75). С. 1–11.

© Чегодаева П.Д., 2026

СЕКЦИЯ 1.3. ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.433

А.А. АХМЕТШИН, Д.А. ТИТОРЕНКО
kafedraatt@uust.ru
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ НА РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ И ПАРАМЕТРЫ ОСНОВНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в работе рассматривается влияние геометрических параметров основной камеры сгорания газотурбинного двигателя на характеристики рабочего процесса. Проведен анализ влияния формы и размеров жаровой трубы, параметров диффузора, системы подачи воздуха и топливных форсунок на устойчивость горения, полноту сгорания топлива, температурное поле и эмиссионные характеристики. Обобщены положения классических работ в области теории и проектирования камер сгорания ГТД. Показано, что изменение геометрии оказывает комплексное влияние на аэродинамику потока, процессы смесеобразования и горения.
Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, геометрия, горение, смесеобразование, аэродинамика, температура, эмиссия.

Введение: следует отметить, что камера сгорания является наиболее сложным элементом ГТД с точки зрения физики протекающих процессов. В ней одновременно протекают процессы турбулентного течения, распыливания топлива, испарения, смесеобразования и химического горения, причем все они тесно взаимосвязаны и зависят от геометрической конфигурации камеры.

Согласно работам по теории камер сгорания, геометрия определяет не только макроскопические параметры течения, но и микромасштабные процессы, такие как распределение капель топлива, локальные коэффициенты турбулентной диффузии и скорость химических реакций. Это обусловлено тем, что изменение формы элементов камеры приводит к изменению структуры турбулентности потока.

Кроме того, геометрические параметры напрямую связаны с эксплуатационными характеристиками двигателя, включая ресурс, надежность и уровень шума. Поэтому исследование влияния геометрии является одной из ключевых задач при проектировании современных газотурбинных установок.

Общая схема камеры сгорания

Следует подчеркнуть, что каждый элемент камеры выполняет строго определенную функцию, и их взаимное расположение определяется

требованиями к организации рабочего процесса. На рисунке 1 представлена типичная схема организации процесса в камере

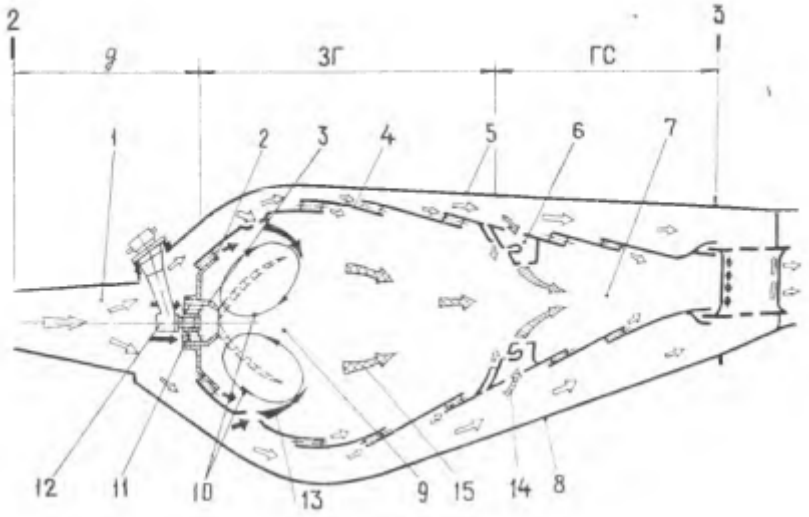


Рис. 1. Типичная схема организации процесса в камере: 1 – диффузор; 2 – фронтовое устройство; 3 – горелка; 4- жаровая труба; 5 – наружный корпус; 6 – смесительные патрубки; 7 – газосборник; 8 – внутренний корпус; 9 – зона горения; 10 – циркуляционное движение; 11 – завихритель; 12 – топливная форсунка; 13 – первичный воздух; 14 – вторичный воздух; 15 – продукты сгорания

Диффузор служит для преобразования кинетической энергии потока воздуха в потенциальную, обеспечивая снижение скорости и повышение давления перед зоной горения. При этом важно обеспечить минимальные потери полного давления, так как они напрямую влияют на эффективность всего двигателя.

Жаровая труба представляет собой основной объем, в котором происходит горение. Ее конструкция должна обеспечивать устойчивое пламя и равномерное распределение температуры. Внутри жаровой трубы формируются зоны различного назначения: зона первичного горения, зона дожигания и зона разбавления.

Система подачи топлива должна обеспечивать равномерное распределение топлива по объему камеры и формирование капель оптимального размера. При этом конструкция форсунок должна учитывать геометрию камеры, так как взаимодействие струй топлива с воздушными потоками зависит от взаимного расположения элементов.

Основные геометрические параметры

Важно отметить, что перечисленные геометрические параметры не являются независимыми. Изменение одного параметра неизбежно приводит к изменению других характеристик камеры. На рисунке 2 показано изменение основных параметров по длине камеры сгорания.

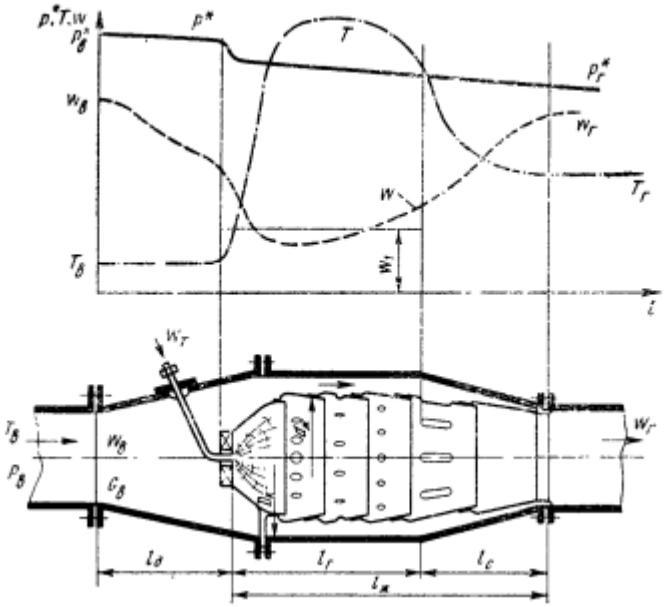


Рис. 2. Изменение основных параметров рабочего тела по длине камеры сгорания

Например, увеличение диаметра жаровой трубы приводит к снижению скорости потока, что может улучшить условия горения, но одновременно ухудшает интенсивность перемешивания. Аналогично, изменение угла раскрытия диффузора влияет не только на аэродинамику, но и на распределение воздуха между зонами камеры.

Особое значение имеет расположение отверстий подвода воздуха. Они формируют сложную систему струй, взаимодействующих между собой и создающих турбулентную структуру потока. От их геометрии зависит:

- глубина проникновения струй;
- интенсивность перемешивания;
- форма зоны горения.

Таким образом, геометрия камеры должна рассматриваться как единая система взаимосвязанных параметров.

Роль диффузора

Дополнительно следует отметить, что процесс торможения потока в диффузоре сопровождается ростом статического давления и изменением структуры турбулентности. При неправильном выборе геометрии возможно образование зон отрыва потока, что приводит к резкому увеличению потерь давления.

Оптимальный угол раскрытия диффузора выбирается исходя из компромисса между компактностью конструкции и допустимыми аэродинамическими потерями. Обычно применяются ступенчатые или комбинированные диффузоры, позволяющие снизить вероятность отрыва потока.

Кроме того, геометрия диффузора влияет на распределение скорости по сечению камеры, что, в свою очередь, определяет условия смесеобразования и горения.

Формирование зоны рециркуляции

Следует дополнительно отметить, что зона рециркуляции формируется за счет взаимодействия осевого потока воздуха с закрученными струями, создаваемыми конструктивными элементами камеры, такими как завихрители.

Размер и интенсивность рециркуляционной зоны зависят от:

- степени закрутки потока;
- геометрии входного устройства;
- соотношения расходов воздуха в различных зонах.

В работах по горению в потоке отмечается, что наличие устойчивой рециркуляционной зоны является необходимым условием стабильного горения, так как она выполняет роль источника горячих продуктов сгорания, обеспечивающих воспламенение свежей смеси.

При изменении геометрии камеры возможно, как усиление, так и ослабление рециркуляции, что напрямую влияет на устойчивость пламени.

Распыливание топлива

Процесс распыливания топлива представляет собой сложное физическое явление, включающее разрушение жидкой струи на капли под действием аэродинамических сил. Геометрия камеры влияет на этот процесс через распределение скоростей и турбулентности воздуха.

Согласно исследованиям, приведенным в учебной литературе, уменьшение размера капель приводит к увеличению их суммарной поверхности, что ускоряет процессы испарения и химического взаимодействия с окислителем. Однако слишком мелкий распыл может привести к неравномерности распределения топлива.

Кроме того, важным фактором является угол распыла форсунки, который должен соответствовать геометрии жаровой трубы. Несоответствие этих параметров может привести к попаданию топлива на стенки камеры, что ухудшает условия горения и вызывает перегрев конструкции.

Взаимодействие потоков воздуха и топлива

Следует подчеркнуть, что процессы взаимодействия воздуха и топлива носят турбулентный характер. Геометрия камеры определяет структуру турбулентных вихрей, которые обеспечивают интенсивное перемешивание компонентов.

В первичной зоне создаются условия для быстрого воспламенения и стабилизации пламени. Во вторичной зоне происходит дожигание топлива, а в зоне разбавления осуществляется снижение температуры продуктов сгорания до допустимого уровня перед турбиной.

Нерациональное распределение воздуха может привести к:

- локальному перегреву;
- увеличению выбросов вредных веществ;
- снижению эффективности работы камеры.

Устойчивость пламени

Устойчивость пламени определяется балансом между скоростью химических реакций и скоростью потока. Геометрия камеры должна обеспечивать такие условия, при которых пламя не выносится потоком и не гаснет.

Устойчивость горения обеспечивается за счет:

- формирования зон пониженной скорости;
- наличия рециркуляции;
- оптимального распределения топлива.

Изменение геометрии может нарушить этот баланс, что приводит к возникновению неустойчивых режимов горения, включая пульсации давления и вибрации.

Полнота сгорания

Полнота сгорания зависит от времени, температуры и степени перемешивания компонентов. Геометрия камеры влияет на все эти параметры одновременно.

В частности, увеличение времени пребывания смеси в зоне высоких температур способствует завершению химических реакций. Однако чрезмерное увеличение объема камеры может привести к росту потерь давления и ухудшению экономичности двигателя. На рисунке 3 показана зависимость изменения коэффициента полноты сгорания по длине жаровой трубы.

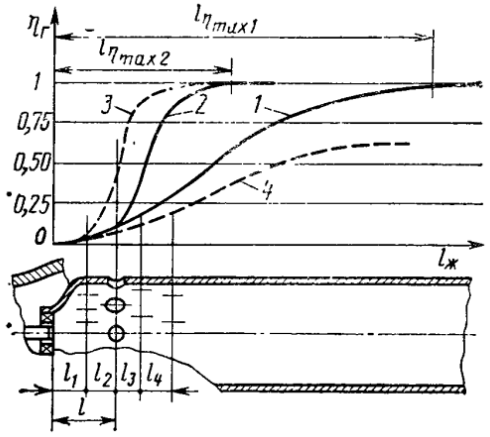


Рис. 3. Изменение коэффициента по длине жаровой трубы в зависимости от расположения отверстий для подачи первичного воздуха

Также важным фактором является равномерность распределения топлива и воздуха. При наличии зон с недостатком кислорода происходит неполное сгорание, сопровождающееся образованием оксида углерода и углеводородов.

Формирование температурного поля

Дополнительно следует учитывать, что температурное поле в камере сгорания формируется не только за счет тепловыделения при горении, но и вследствие сложного взаимодействия струй воздуха различной температуры и скорости. Геометрия камеры определяет траектории этих струй и характер их

смешения, что приводит к формированию как макроскопической, так и локальной неравномерности температур.

Согласно данным учебной литературы, в камерах сгорания наблюдается значительная температурная стратификация, особенно в зонах, где происходит подвод охлаждающего воздуха. Геометрия отверстий и их ориентация влияют на глубину проникновения холодных струй в основной поток, что определяет эффективность выравнивания температуры.

Кроме того, форма жаровой трубы влияет на развитие турбулентности, которая играет ключевую роль в процессе теплообмена. Чем выше уровень турбулентности, тем интенсивнее происходит выравнивание температурного поля.

Коэффициент неравномерности температуры

Следует отметить, что коэффициент неравномерности температуры является одним из основных параметров, определяющих допустимость работы турбины. Даже незначительное увеличение температурной неравномерности может привести к локальным перегрузкам лопаток и снижению их ресурса.

Геометрия камеры оказывает влияние на этот коэффициент через:

- распределение воздуха по зонам;
- организацию смешения горячих и холодных потоков;
- структуру вихревых течений.

В частности, увеличение количества отверстий в зоне разбавления способствует более равномерному распределению температуры, однако может привести к увеличению потерь давления. Таким образом, выбор геометрии требует учета компромисса между равномерностью температурного поля и аэродинамической эффективностью.

Тепловые нагрузки на жаровую трубу

Жаровая труба подвергается воздействию как конвективных, так и лучистых тепловых потоков. Геометрия камеры определяет условия теплообмена между горячими газами и стенками, включая интенсивность турбулентного переноса тепла.

Особое значение имеет распределение температуры вдоль длины жаровой трубы. В начальной зоне, где происходит основное горение, наблюдаются максимальные тепловые нагрузки. При этом геометрия камеры должна обеспечивать снижение этих нагрузок за счет эффективного подвода охлаждающего воздуха.

В работах по проектированию камер сгорания отмечается, что неправильная геометрия может привести к образованию так называемых «горячих пятен», являющихся причиной термических разрушений.

Система охлаждения и её связь с геометрией

Система охлаждения тесно связана с геометрией камеры, так как именно она определяет условия формирования защитного воздушного слоя на поверхности стенок. Этот слой препятствует прямому контакту горячих газов с металлом и снижает тепловые нагрузки.

Геометрия отверстий охлаждения влияет на:

- угол выхода струи;
- скорость и структуру потока;
- устойчивость пленочного слоя.

При неправильном выборе геометрии возможно разрушение охлаждающей пленки под действием турбулентности, что приводит к резкому увеличению тепловых нагрузок. Поэтому при проектировании необходимо учитывать взаимодействие охлаждающих струй с основным потоком.

Причины потерь давления

Следует дополнительно отметить, что потери давления в камере сгорания носят сложный характер и включают как гидравлические, так и термодинамические составляющие. Геометрия камеры определяет интенсивность всех этих процессов.

В частности, значительная часть потерь связана с:

- резкими изменениями направления потока;
- образованием вихрей;
- взаимодействием струй воздуха.

Кроме того, процессы горения сопровождаются увеличением объема газа, что также влияет на распределение давления. Геометрия камеры должна обеспечивать плавное протекание этих процессов с минимальными потерями энергии.

Зависимость потерь от геометрических параметров

Важно подчеркнуть, что влияние геометрии на потери давления носит нелинейный характер. Например, небольшое увеличение угла раскрытия диффузора может привести к резкому росту потерь из-за отрыва потока.

Аналогично, изменение формы жаровой трубы влияет на развитие турбулентности и, соответственно, на величину гидравлических сопротивлений. При этом увеличение турбулентности может быть полезным с точки зрения смесеобразования, но приводит к дополнительным потерям давления.

Таким образом, оптимизация геометрии должна учитывать баланс между улучшением процессов горения и минимизацией энергетических потерь.

Образование вредных веществ

Процесс образования вредных веществ в камере сгорания тесно связан с локальными условиями горения, которые определяются геометрией камеры. В частности, образование оксидов азота происходит при высоких температурах и наличии избытка кислорода.

Геометрия камеры влияет на:

- распределение температур;
- локальный состав смеси;
- время пребывания газов в зоне высоких температур.

В учебных источниках отмечается, что даже небольшие изменения геометрии могут существенно изменить уровень выбросов, так как они влияют на микроструктуру процессов горения.

Роль геометрии в снижении выбросов

Снижение эмиссий достигается за счет оптимизации геометрии, обеспечивающей равномерное распределение температуры и эффективное перемешивание компонентов смеси. При этом важную роль играет организация многоступенчатого подвода воздух. На рисунке 4 показаны схемы расположения зон горения

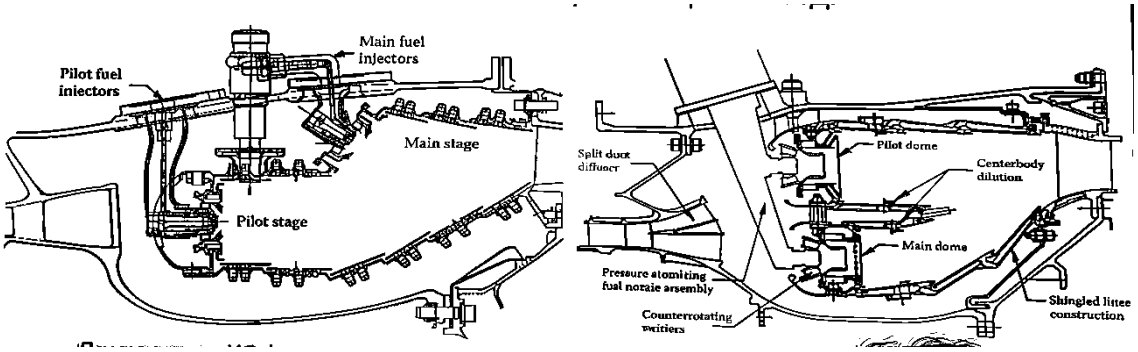


Рис. 4. Схемы расположения зон горения

а) б)

а) двухзонная КС фирмы PW с осевым размещением зон горения

б) двухъярусная КС с радиальным расположением зон горения

Геометрия камеры позволяет реализовать различные схемы горения, включая:

- зональное горение;
- предварительное смешение;
- ступенчатое сжигание топлива.

Зонное горение предполагает организацию процесса горения в ряде дискретных зон, причем должен быть обеспечен зонный подвод и воздуха, и топлива. Может использоваться радиальное (двухъярусная камера) или осевое расположение зон горения. Цель данной концепции состоит в регулировании температуры горения и состава ТВС для достижения низкого уровня выбросов при всех эксплуатационных условиях.

Пусковые режимы

На пусковых режимах процессы в камере сгорания протекают в условиях пониженных температур и давлений, что усложняет воспламенение топлива. Геометрия камеры должна обеспечивать концентрацию энергии в зоне воспламенения.

Особое значение имеет расположение форсунок и запальных устройств. Их геометрическое взаимодействие определяет эффективность воспламенения и устойчивость начального горения.

Также важным фактором является наличие рециркуляционных зон, которые обеспечивают подвод горячих газов к свежей смеси.

Работа на переменных режимах

При работе на переменных режимах изменяется структура потока, что требует адаптивности геометрии камеры. Хотя сама геометрия является

фиксированной, ее влияние на процессы проявляется по-разному при различных режимах работы.

Например, при увеличении расхода воздуха возрастает скорость потока, что может привести к выносу пламени. Геометрия камеры должна компенсировать эти изменения за счет формирования устойчивых зон рециркуляции.

Таким образом, камера должна быть спроектирована с учетом всего диапазона эксплуатационных режимов.

Основные расчетные параметры

Следует отметить, что расчетные параметры камеры сгорания определяются на основе уравнений сохранения массы, энергии и импульса, а также эмпирических зависимостей, полученных в результате экспериментальных исследований. Геометрия камеры непосредственно входит в эти зависимости через площадь сечений, длину канала и конфигурацию элементов.

Коэффициент избытка воздуха является одним из ключевых параметров, характеризующих соотношение между количеством подводимого воздуха и теоретически необходимым для полного сгорания топлива. Геометрия камеры влияет на распределение воздуха по зонам, что определяет локальные значения данного коэффициента.

Степень повышения температуры определяется количеством выделенной тепловой энергии и зависит от полноты сгорания топлива, которая, в свою очередь, связана с геометрией камеры. Потери полного давления рассчитываются с учетом гидравлических сопротивлений, зависящих от формы и размеров элементов конструкции.

Таким образом, расчет параметров камеры невозможен без учета ее геометрической конфигурации.

Влияние длины камеры на процессы горения

Длина камеры сгорания определяет время пребывания топливовоздушной смеси в зоне высоких температур, что является критическим фактором для завершения химических реакций. При этом важно учитывать, что увеличение длины камеры приводит к изменению структуры потока и распределения температуры.

Слишком короткая камера не обеспечивает достаточного времени для полного сгорания топлива, что приводит к увеличению выбросов вредных веществ и снижению эффективности двигателя. В то же время чрезмерное увеличение длины сопровождается ростом гидравлических потерь и ухудшением массогабаритных характеристик.

В учебной литературе подчеркивается, что оптимальная длина камеры определяется на основе компромисса между полнотой сгорания, потерями давления и конструктивными ограничениями.

Этапы проектирования

Процесс проектирования камеры сгорания представляет собой итерационную процедуру, включающую последовательное уточнение геометрических параметров на основе расчетов и экспериментальных данных.

На начальном этапе определяется тип камеры и ее основные размеры, исходя из требований к двигателю. Далее выполняется расчет аэродинамических характеристик, включая распределение скоростей и давления.

Особое внимание уделяется расчету распределения воздуха, так как именно он определяет условия горения и температурное поле. На завершающем этапе проводится анализ теплового состояния конструкции и проверка на прочность.

Современные методы проектирования включают использование численного моделирования, позволяющего учитывать влияние геометрии на все стадии рабочего процесса.

Выбор формы жаровой трубы

Форма жаровой трубы оказывает значительное влияние на организацию потока и процессы горения. Цилиндрическая форма обеспечивает простоту изготовления и стабильность характеристик, однако не всегда является оптимальной с точки зрения аэродинамики.

Альтернативные формы, такие как конические или комбинированные, позволяют улучшить распределение скорости и давления, а также повысить эффективность смесеобразования. При этом выбор формы должен учитывать особенности конкретного двигателя и режимы его работы.

Важным фактором является также возможность организации эффективного охлаждения, которое напрямую зависит от геометрии поверхности жаровой трубы.

Критерии оптимизации

Оптимизация геометрии камеры сгорания представляет собой сложную многокритериальную задачу, в которой необходимо учитывать большое количество взаимосвязанных факторов. При этом каждый критерий оказывает влияние на другие параметры системы.

Например, снижение потерь давления может привести к ухудшению смесеобразования, а уменьшение температурной неравномерности — к увеличению выбросов оксидов азота. Поэтому при оптимизации используется комплексный подход, включающий анализ всех факторов.

В учебных источниках отмечается, что для решения этой задачи применяются как аналитические методы, так и экспериментальные исследования, позволяющие определить оптимальные значения геометрических параметров.

Влияние распределения воздуха

Распределение воздуха между зонами камеры является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность ее работы. Геометрия

отверстий подачи воздуха влияет на направление и скорость струй, а также на их взаимодействие с основным потоком.

В первичной зоне необходимо обеспечить условия для устойчивого горения, что требует подачи ограниченного количества воздуха. Во вторичной зоне осуществляется дожигание топлива, а в зоне разбавления — снижение температуры. На рисунке 5 показано изменение коэффициента избытка воздуха по длине камеры сгорания.

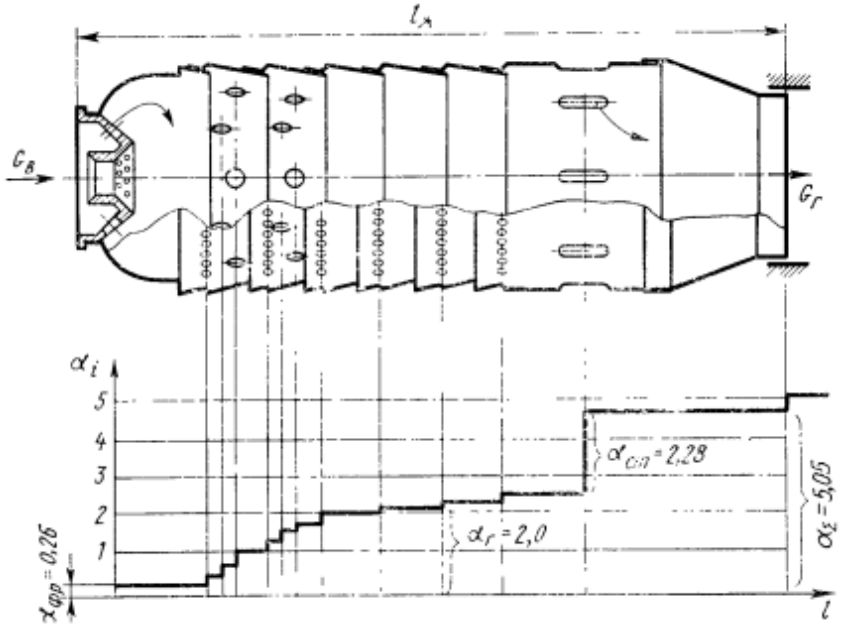


Рис. 5. Распределение коэффициента избытка воздуха по длине камеры сгорания

Изменение геометрии отверстий позволяет регулировать эти процессы, однако требует точного расчета и учета взаимного влияния всех элементов камеры.

Трубчатые камеры обладают рядом преимуществ, связанных с простотой конструкции и удобством обслуживания. Их геометрия позволяет легко организовать систему охлаждения и обеспечить устойчивость горения.

Однако такие камеры имеют ограниченные возможности по снижению температурной неравномерности и увеличению эффективности смесеобразования. Кроме того, они характеризуются большими габаритами, что ограничивает их применение в современных компактных двигателях.

Кольцевые камеры обеспечивают более равномерное распределение температуры за счет симметричной геометрии и равномерного подвода воздуха по окружности. Это позволяет снизить тепловые нагрузки на элементы турбины.

Кроме того, такая геометрия способствует уменьшению массы и габаритов двигателя. Однако сложность конструкции и высокая точность изготовления являются существенными недостатками.

Трубчато-кольцевые камеры представляют собой компромиссное решение, сочетающее преимущества трубчатых и кольцевых конструкций.

Геометрия таких камер обеспечивает модульность, что облегчает их изготовление и обслуживание.

При этом достигается достаточно равномерное распределение температуры и приемлемые аэродинамические характеристики. Такие камеры широко применяются в различных типах газотурбинных установок.

Современные тенденции

Современное развитие газотурбинных двигателей направлено на повышение эффективности и снижение экологической нагрузки. В этой связи особое внимание уделяется совершенствованию геометрии камер сгорания.

Одним из ключевых направлений является создание камер с предварительным смешением топлива и воздуха, что позволяет снизить уровень выбросов оксидов азота. Это требует сложной геометрии, обеспечивающей равномерное распределение смеси.

Также активно развиваются технологии многоступенчатого горения и адаптивных камер, способных эффективно работать в широком диапазоне режимов.

Использование альтернативных топлив

Применение альтернативных топлив, таких как водород, существенно изменяет требования к геометрии камеры сгорания. Это связано с высокой скоростью горения и широкими пределами воспламеняемости водорода.

Геометрия камеры должна обеспечивать:

- предотвращение обратного удара пламени;
- равномерное распределение топлива;
- эффективное охлаждение конструкции.

Кроме того, использование тяжелых жидких топлив требует иной организации процессов распыливания и испарения, что также отражается на геометрии камеры.

Таким образом, переход на новые виды топлива требует комплексного пересмотра геометрических параметров камеры сгорания.

Библиографический список

1. Пчелкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Турбиностроение». — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.: ил.

2. Резник В. Е., Данильченко В. П., Болотин Н. Б., Ковылов Ю. Л., Лукачев С. В. Инженерные основы проектирования камер сгорания ГТД: учебное пособие. — Куйбышев: КуАИ, 1981. — 80 с.

© Ахметшин А.А., Титоренко Д.А., 2026

УДК 621.43.016

А.Р. БИЛАЛОВ, В.С. КУТУЕВ
kafedraatt@uust.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. К.Е. РОЖКОВ

Уфимский университет науки и технологий

РЕКУПЕРАТОР ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА АЛ-41СТ

Аннотация: газотурбинные установки занимают важное место в современной энергетике благодаря высокой удельной мощности, манёвренности и экологическим характеристикам. Однако простой термодинамический цикл ГТУ (цикл Брайтона) характеризуется значительными потерями теплоты с уходящими газами, температура которых может достигать 750–900 К. Это обусловливает относительно низкий эффективный КПД установок простого цикла, который для современных стационарных ГТУ лежит в пределах 35–42 %. В связи с этим задача утилизации теплоты отработавших газов является одной из центральных в газотурбиностроении. Цель доклада – рассмотреть устройства рекуперации, которые смогут повысить КПД газотурбинного привода АЛ-41СТ, а также обосновать значение его модернизации.
Ключевые слова: газотурбинный двигатель, рекуперация, геометрия, горение.

Рекуперация (регенерация) теплоты представляет собой процесс передачи части теплоты выхлопных газов сжатому воздуху после компрессора перед его подачей в камеру сгорания. Это позволяет сократить расход топлива, необходимого для достижения заданной температуры рабочего тела перед турбиной, и, как следствие, повысить общий КПД установки.

Особое значение имеет развитие отечественных газотурбинных приводов, которые способны заменить импортные аналоги и обеспечить независимость российской газовой отрасли от зарубежных технологий.

ГТП (газотурбинный привод) АЛ-41СТ — современная энергетическая установка российского производства.

1. Назначение и общие сведения о газотурбинном приводе АЛ-41СТ

Газотурбинный привод АЛ-41СТ разработан Объединённой двигателестроительной корпорацией (АО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск) на основе авиационного турбореактивного двигателя АЛ-41Ф. При адаптации к наземному применению была проведена масштабная модернизация: увеличен ресурс, улучшена система охлаждения и доработана автоматика под режимы длительной непрерывной работы.

Основное назначение установки — приведение во вращение центробежных нагнетателей газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

2. Влияние рекуперации на эффективность ГТУ

Применение рекуперации позволяет существенно повысить эффективный КПД газотурбинной установки. В работе Султанова Р.Ф. и Сенюшкина Н.С. показано, что для ГТУ с рекуперативным воздухоподогревателем максимальное теоретически достижимое значение электрического КПД составляет 43,5 %. Практическая реализация столь высоких значений ограничивается, прежде всего, достижимым уровнем температур перед турбиной и совершенством конструкции теплообменника.

Эффект от рекуперации наиболее выражен при умеренных степенях повышения давления в компрессоре ($\pi к = 5…12$) и высоких температурах газа перед турбиной. С повышением температуры газа от 1200 до 2000 К эффективный КПД турбовального двигателя с регенерацией тепла возрастает с 20 до 35 % при $\pi к = 5$, тогда как в простом цикле аналогичный рост ограничен 10–15 % (абсолютных).

Для ГТУ малой мощности эффект от рекуперации ещё более значителен. В гибридной мини-ТЭЦ, работающей на попутном нефтяном газе, применение рекуперации тепла выхлопных газов в сочетании с солнечным подогревом воздуха до 200 °C позволило увеличить КПД с 5 до 10 %, то есть в два раза.

Рекуператор ГТУ представляет собой газовоздушный теплообменник, в котором сжатый в компрессоре воздух подогревается выхлопными газами, что увеличивает термодинамические параметры цикла. Конструктивное исполнение рекуператора в значительной степени определяет надёжность и ресурс всей установки.

По конструктивному признаку рекуператоры подразделяются на трубчатые и пластинчатые. Для стационарных ГТУ, где масса и габариты не имеют принципиального значения, применяются выносные трубчатые рекуператоры, конструкция которых отработана и обладает высокой надёжностью.

3. Влияние рекуператора на КПД и удельный расход

После расчета в программе DVIGwT были получены следующие параметры:

- КПД: 36,1 %;
- Удельный расход топлива: 0,2 кг/кВт·ч;

Схема ГТП представлена на Рис. 8. ГТП без рекуператора.

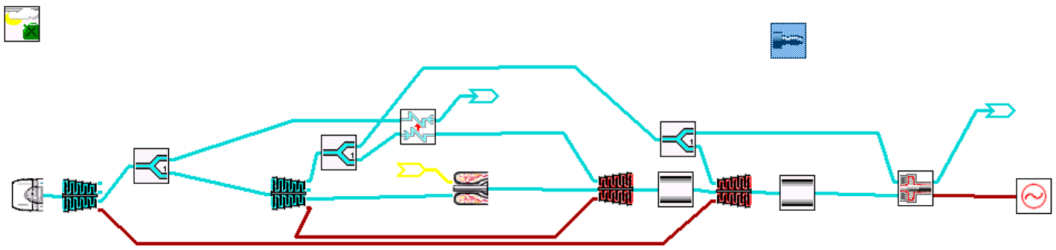


Рис. 8. ГТП без рекуператора

С целью повышения КПД установки решено было рассмотреть применение рекуператора, который использовал бы энергию газов после свободной турбины.

После добавления рекуператора были достигнуты следующие параметры установки:

– КПД: 38,2 %;
– Удельный расход топлива: 0,19 кг/кВт·ч;

Схема ГТП с рекуператором представлена на Рис. 9. ГТП с рекуператором
Рис. 9. ГТП с рекуператором

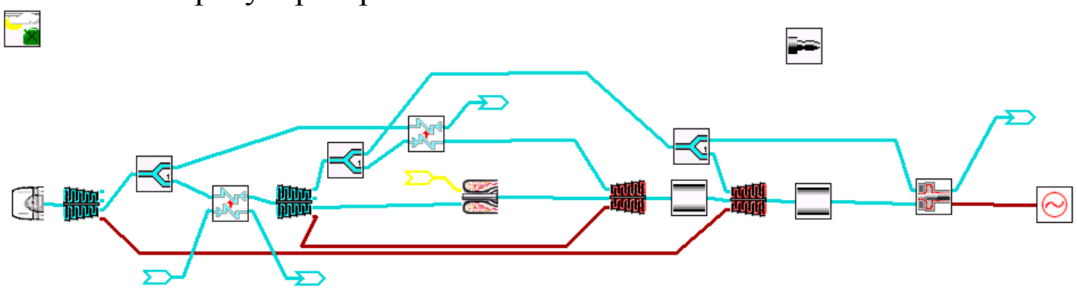


Рис. 9. ГТП с рекуператором

Воздух после компрессора низкого давления поступает в рекуператор, где нагревается за счёт теплоты уходящих газов свободной турбины, после чего направляется в компрессор высокого давления.

Основным параметром, характеризующим эффективность рекуперации, является степень рекуперации σ, определяемая как отношение фактического повышения температуры воздуха в рекуператоре к максимально возможному.

В нашем случае степень рекуперации достигла значений 0,032. Главной причиной, ограничивающей возможность повышения степени рекуперации, стала слишком высокая температура газов в последних ступенях КВД (компрессор высокого давления). Как следствие возникает потребность в охлаждении этих ступеней, что привело бы усложнению конструкции.

Таблица 2 позволяет наглядно сравнить параметры ГТП АЛ-41СТ до и после добавления рекуператора.

Таблица 2

Показатели ГТП до и после добавления рекуператора

Параметр	Без рекуператора	С рекуператором
КПД, %	36,1	38,2
Удельный расход топлива (на номинале), кг/кВт·ч	0,2	0,19

Отсюда видно, что применение рекуператора позволило повысить КПД установки на 2% и снизить расход топлива на 0,5%.

4. Проблемы и ограничения

Несмотря на очевидные термодинамические преимущества, широкое внедрение рекуперативных ГТУ сдерживается рядом технических и экономических факторов:

1. Повышение степени рекуперации неизбежно ведёт к росту гидравлических сопротивлений в воздушном и газовом трактах теплообменника, что снижает располагаемый теплоперепад на турбине и, следовательно, мощность установки.
2. Увеличение степени рекуперации сопряжено с ухудшением массогабаритных показателей рекуператора, что ограничивает её величину на уровне 0,85–0,90 для большинства практических конструкций.
3. Надёжность и ресурс рекуперативного ГТД в значительной степени зависят от герметичности теплообменника и его способности компенсировать температурные расширения. Утечки из тракта высокого давления на 1 % приводят к потере до 3 % мощности, а фактические потери на выработавших ресурс регенераторах могут достигать 10 %.

Заключение

Рекуперация теплоты отработавших газов является эффективным и технически реализуемым методом повышения КПД газотурбинных установок. Её применение на ГТП АЛ-41СТ позволило сократить удельный расход топлива, увеличить КПД и повысить конкурентоспособность ГТУ.

Библиографический список

1. Осипов М.И., Моляков В.Д., Олесевич К.А., Тумашев Р.З. Перспективные направления повышения эффективности ГТУ. Газотурбинные технологии. — 2011.
2. Косой А.С., Борисов Ю.А., Синкевич М.В., Рамазанов Э.Р., Вендланд Л.Е. Исследование путей совершенствования рекуперативного цикла ГТУ средствами эксергетического анализа. Вестник ОИВТ РАН. — 2023.
3. Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А. Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей. Труды МАИ. — Вып. 71.
4. Султанов Р.Ф., Сенюшкин Н.С. Влияние основных параметров цикла на показатели эффективности перспективных ГТУ. Энергетика. — 2014.

© Билалов А.Р., Кутуев В.С., 2026

УДК 621.4

Т.Д. ГАЙСИН
Tamerlangajsin0@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. К.Е. РОЖКОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА В АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Аннотация: в статье рассматривается применение композитных материалов в конструкции авиационных двигателей на примере лопаток вентилятора двигателя ПД-14. Проанализированы преимущества использования полимерных композиционных материалов, особенности конструкции и их влияние на характеристики двигателя. Рассмотрены перспективы развития данной технологии.
Ключевые слова: ПД-14, композитные материалы, лопатка вентилятора, авиационный двигатель, углепластик, снижение массы.

Актуальность.

Современное авиадвигателестроение направлено на повышение топливной эффективности и снижение массы двигателей. Одним из наиболее эффективных способов достижения этих целей является применение композиционных материалов в конструкциях силовых установок. В двигателе ПД-14 использование композитных лопаток вентилятора является важным технологическим решением, позволяющим улучшить эксплуатационные характеристики двигателя. В связи с этим исследование данной технологии является актуальным.

Одним из ключевых направлений развития современных авиационных двигателей является снижение массы при одновременном повышении прочностных характеристик элементов конструкции. В этом контексте особое значение приобретает использование полимерных композиционных материалов, в частности углепластиков, обладающих высокой удельной прочностью и жесткостью.

В двигателе ПД-14 композитные материалы применяются в конструкции лопаток вентилятора. Лопатка вентилятора является одним из наиболее нагруженных элементов двигателя, поскольку она работает в условиях значительных центробежных нагрузок, аэродинамических сил и возможных ударных воздействий (например, при попадании посторонних предметов).

Применение композитных материалов позволяет существенно снизить массу лопаток по сравнению с традиционными металлическими аналогами. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению массы ротора вентилятора и

снижению центробежных нагрузок, что положительно сказывается на ресурсе двигателя и снижает нагрузку на подшипниковые узлы.

Кроме того, композитные лопатки обладают высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к усталостным разрушениям. В отличие от металлических конструкций, они менее подвержены образованию трещин при циклических нагрузках. Также возможно формирование более сложного аэродинамического профиля лопатки, что способствует повышению эффективности работы вентилятора.

Однако применение композитных материалов связано с рядом технологических сложностей. К ним относятся высокая стоимость производства, сложность контроля качества, а также особенности поведения материала при ударных нагрузках. Для обеспечения надежности композитные лопатки требуют применения специальных защитных покрытий и конструктивных решений, предотвращающих разрушение при попадании посторонних предметов.

Перспективы развития данной технологии связаны с совершенствованием материалов и методов их изготовления. В частности, развивается применение трехмерного армирования, улучшенных связующих материалов и автоматизированных технологий формования. Это позволит повысить прочность, снизить стоимость и расширить область применения композитных элементов в авиационных двигателях.

Таким образом, использование композитных лопаток вентилятора в двигателе ПД-14 является важным шагом в развитии авиадвигателестроения и отражает общую тенденцию перехода к более легким и эффективным конструкциям.

Заключение.

Применение композитных лопаток вентилятора в двигателе ПД-14 позволяет существенно снизить массу, повысить эффективность и надежность работы двигателя. Несмотря на существующие технологические сложности, развитие композиционных материалов и технологий их производства делает данное направление одним из наиболее перспективных в авиадвигателестроении. В дальнейшем ожидается расширение применения композитов в других элементах двигателя.

Библиографический список

1. Гуляев В.И., Бажанов В.Л. Композиционные материалы в авиастроении. – М.: Машиностроение, 2019. – 320 с.

2.Mallick P.K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 638 p.

3. Камалов А.А., Кильмухаметов А.Ф. Применение композиционных материалов в конструкциях беспилотных летательных аппаратов // Труды Уфимского университета науки и технологий. – 2025. – С. 14–15.

4. Баталов М.В. Проектирование конструкций из композиционных материалов в авиации // Труды ЦАГИ. – 2020. – Вып. 2875. – С. 45–58.

5. Петров С.В. Гибридные и композиционные материалы нового поколения // Авиационные материалы. – 2022. – № 4. – С. 12–25.

6. Материалы Уфимского университета науки и технологий: сборник научных трудов по авиационным двигателям и материалам. – Уфа: УУНиТ, 2024.

© Гайсин Т.Д. 2026

УДК 629.764

А.И. ХАБИБУЛЛИН
habibullinartur2004@gmail.com
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С ТТРД РД-100-5М

Аннотация: в статье рассматриваются инженерные аспекты проектирования и моделирования ракеты-носителя легкого класса, оснащенной твердотопливным ракетным двигателем (ТТРД) РД-100-5М. Выполнено математическое моделирование траектории полета в программном комплексе OpenRocket с оценкой параметров устойчивости. Разработана компоновочная схема ракеты и предложены критерии выбора материалов.
Ключевые слова: ТТРД, РД-100-5М, проектирование ракеты-носителя, моделирование, аэродинамическая устойчивость, OpenRocket, ракетомоделирование, система спасения.

В современном ракетомоделировании для успешной реализации задач полёта требуется не просто подбора мощного двигателя, а качественного проектирования самой ракеты. Ракета-носитель, рассматриваемая в данной работе, представляет собой автономную механическую систему, полёт которой определяется сотнями параметров: от геометрии стабилизаторов до распределения масс по длине корпуса. Двигательная установка на базе ТТРД РД-100-5М выбрана в качестве источника тяги, однако именно ракета выступает главным объектом проектирования. Её компоновка, аэродинамика, система спасения и конструкционные материалы подчинены единой цели — достижение заданной высоты (более 200 метров), выпуском в апогее массогабаритного макета и со сработавшей системой спасения приземление на землю. Ракета-носитель разрабатывалась в рамках II Южно-Уральского

Чемпионата Ассоциации «Воздушно-инженерной школы». Поэтому условия полета ракеты-носителя, её характеристики и задачи полёта определялись условиями чемпионата.

Ракета имеет классическую схему «тандем» — последовательное расположение отсеков (рис. 1). Общая длина корпуса составляет 880 мм, калибр (наружный диаметр) — 74 мм. Выбор калибра 74 мм обусловлен двумя факторами: совместимостью с МГМ (массогабаритным макетом) диаметром 66 мм и достаточным объёмом для размещения парашютной системы.

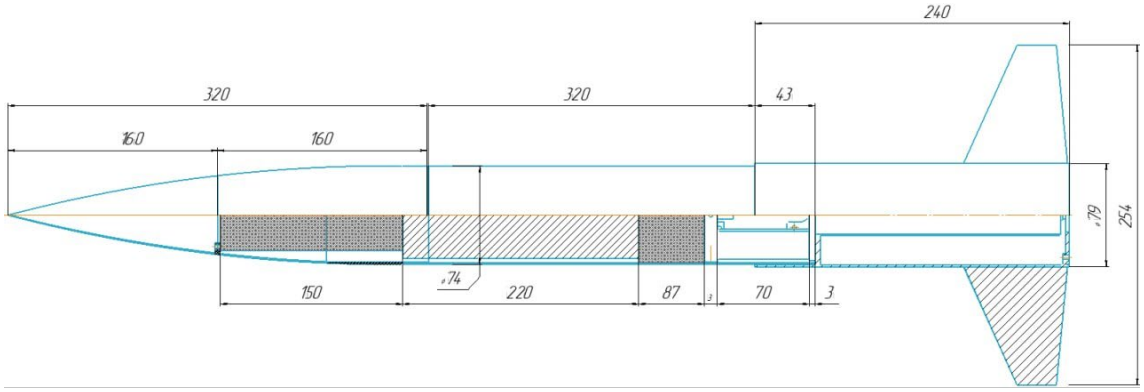


Рис. 1. Габаритные размеры модулей ракеты

Важным этапом проектирования ракеты-носителя является моделирование ее полёта и получение данных об этом полёте для дальнейшего их анализа. Для этого используют программный комплекс OpenRocket. В программу загружена полная геометрическая модель ракеты, рассчитаны и введены массы каждой детали и добавлен двигатель РД-100-5М путём загрузки данных о нём из Интернета. В результате получили график симуляции полёта (рис. 2) и численные данные полёта (табл. 1):

Таблица 1

Данные расчёта в OpenRocket

Наименование	Значение
Высота подъема РН	369 м
Время набора высоты	9 с
Высота выключения двигателя	62 м
Время работы двигателя	1,5 с
Максимальная вертикальная скорость	93,5 м/с
Максимальное ускорение	326 м/с^2
Общий импульс двигателя	111 Н·с

На графике симуляции полёта можно отобразить основные этапы полёта летательного аппарата, например, пуск или достижение аппаратом апогея. Что сильно упрощает процесс анализа расчетов.

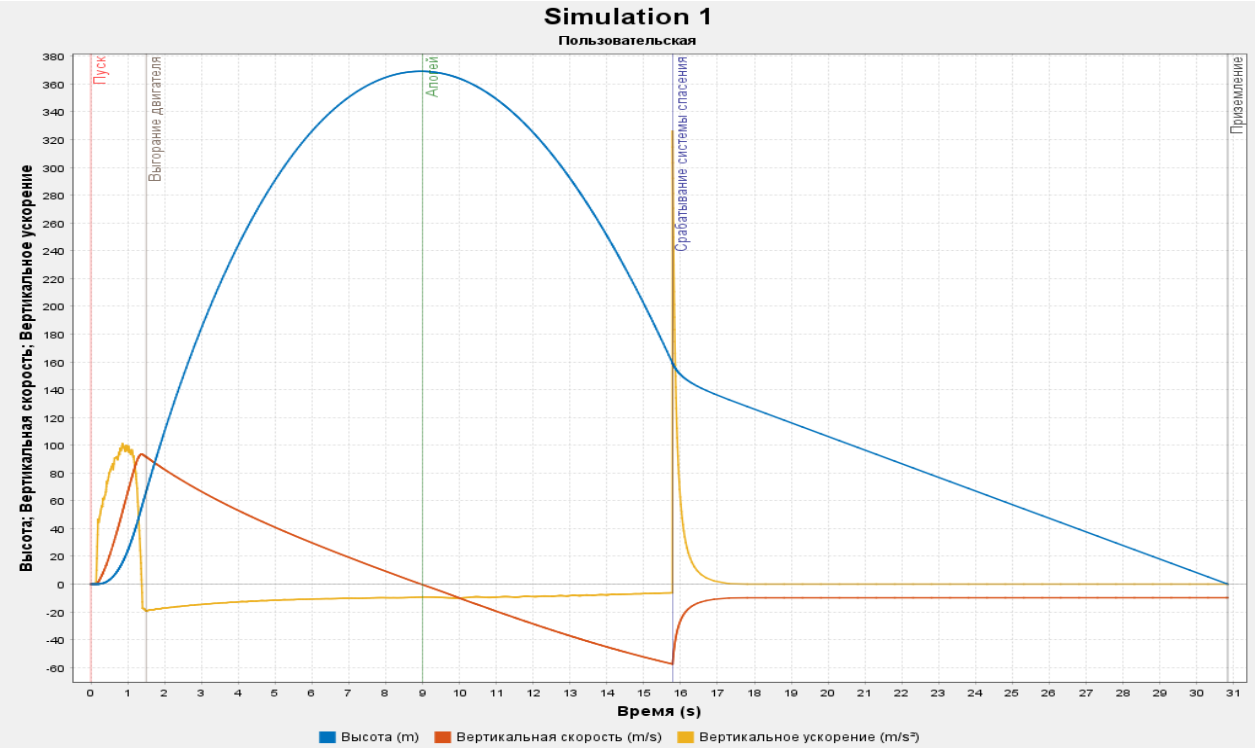


Рис. 2. График симуляции полёта ракеты-носителя

Также ракета-носитель должна отслеживать и записывать информацию о полёте на внутренний бортовой компьютер. Для чего в ней установлена система датчиков и модулей (табл. 2), обеспечивающих выполнение этих задач. Программа написана на Arduino IDE все модули соединены проводами на макетной плате (рис. 3).

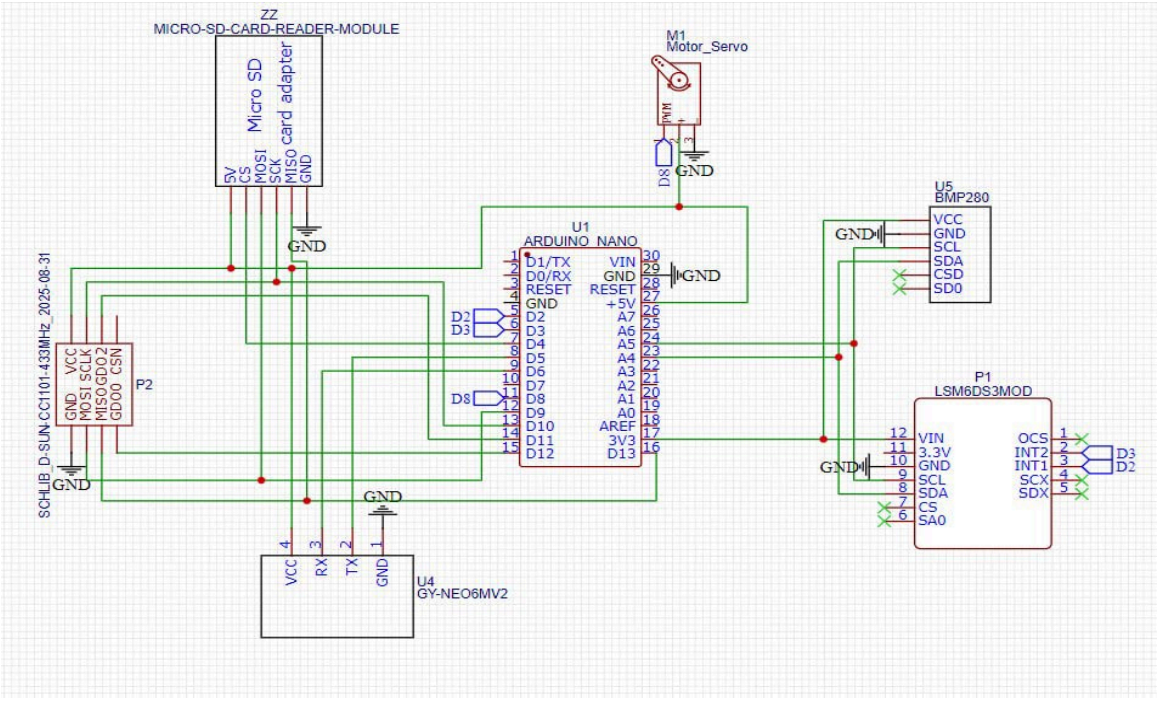


Рис. 3. Схема подключения модулей бортового компьютера

Таблица 2

Состав бортовой системы

Устройство	Количество
GPS модуль (NEO-6M)	1
Модуль Кардридер Micro SD	1
Приёмопередатчик (CC1101)	1
LSM6DS3	1
Барометр (BMP280)	1
Сервопривод	1
Аккумулятор	2

Материал сигары фузеляжа РН изготовлен из картона. Внутри обшивки предусмотрено место для выпускного механизма, который под напряжением создает определенную жесткость и защиту от вмятин. Так же предусмотрено упорное и фиксирующие кольца для двигателя. Стабилизаторы, обтекатель и задняя часть РН были выполнены с помощью 3D печати из PLA пластика.

Твердотопливный ракетомодельный двигатель от Real Rockets РД1-100-5М массой 180 грамм имеет общий импульс 100 Н при работе длительностью 2 секунды. Диаметр двигателя 29 мм, а длина 220 мм.

В качестве системы спасения ракеты-носителя используется парашют. Срабатывание системы спасения обеспечивается измерением ускорения по оси вертикального полёта ракеты акселерометром LSM6DS3. Когда ускорение становится равным 0, то запускается таймер, который отсчитывает 2 секунды после чего срабатывает сервопривод изначально удерживающий механизм выброса парашюта в натянутом положении. После срабатывания сервопривода гнездо с парашютом по «принципу катапульты» под действием двух сильно натянутых резинок выталкивает обтекатель ракеты и выбрасывает парашют и МГМ из ракеты-носителя (рис. 4).

Основные результаты проведенной работы:

- Разработана модульная конструкция ракеты с помощью КОМПАС-3D;
- С помощью OpenRocket произведено моделирование полёта ракеты;
- Спроектирована автономная система спасения;
- Проведен пуск ракеты-носителя в результате которого были выполнены все поставленные задачи и все системы отработали в штатном режиме.

Практическая значимость работы заключается в создании прототипа ракеты, готовой к лётным испытаниям.

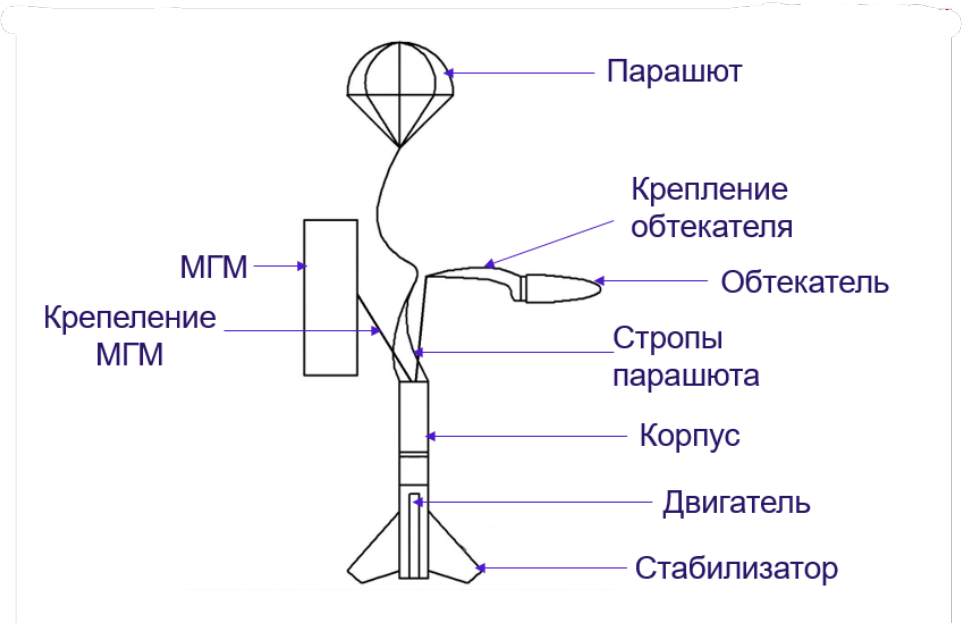


Рис. 4. Система спасения ракеты-носителя

Библиографический список

1. OpenRocket: программный комплекс для 6-DOF моделирования полета ракет / Официальный сайт. – URL: https://openrocket.info/.

2. Фролов, А. Д. Параметрическое проектирование, расчет и исследование траекторий движения баллистических ракет с твердотопливными двигательными установками: учебное пособие / А. Д. Фролов. — Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2007 – URL: https://e.lanbook.com/book/160727.

3. Сертифицированные ракетные двигатели и воспламенители : каталог продукции / Интернет-магазин Real Rockets – URL: https://real-rockets.ru/.

4. Калтыга, С. В. Проектирование модельной ракеты с ракетным двигателем на твердом топливе: учебное пособие для студентов специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» очной формы обучения / С. В. Калтыга, В. В. Кольга, Н. А. Терехин; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. — Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022.

5. Ракета от Амперки, часть 7-8: парашютная система, бомба Кроуфорда и испытания под давлением: технический отчет проекта – URL: https://temofeev.ru/info/articles/raketa-ot-amperki-chast-7-8-parashyutnaya-sistema-bomba-krouforda-i-ispytaniya-pod-davleniem/

© Хабибуллин А.И., 2026

УДК 621.4

В.С. КУТУЕВ, А.Р. БИЛАЛОВ
kutuev.vladisl@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. К.Е. РОЖКОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГТД МЕТОДОМ ВПРЫСКА ВОДЫ В КОМПРЕССОР

Аннотация: в работе рассмотрено влияние впрыска воды на входе в компрессор на эффективность газотурбинного двигателя на примере АЛ-41СТ. Исследование выполнено методом численного моделирования. Установлено, что впрыск воды в количестве 2% от массового расхода воздуха через двигатель обеспечивает увеличение мощности на 24 % и рост КПД на 2,54 %. Полученные результаты сопоставлены с экспериментальными данными.
Ключевые слова: газотурбинный двигатель, компрессор, впрыск воды, эффективность, АЛ-41СТ, DVIGwT.

Повышение эффективности газотурбинных приводов (ГТП) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) является одной из ключевых задач в газотранспортной отрасли. В условиях роста объемов транспортировки природного газа, а также необходимости снижения эксплуатационных затрат и повышения энергоэффективности компрессорных станций, особую актуальность приобретают методы увеличения мощности и снижения удельного расхода топлива без существенного усложнения конструкции двигателя и снижения его надежности.

Одним из эффективных методов повышения мощности и экономичности стационарных газотурбинных двигателей является впрыск воды или водяного пара в проточную часть в различных сечениях, в частности на вход в компрессор. Сущность данного метода форсирования двигателя заключается в испарительном охлаждении рабочего тела. При подаче мелкодисперсной воды в воздушный поток на входе в компрессор происходит интенсивное испарение капель по ходу воздушного тракта за счет тепла сжимаемого воздуха. Это приводит к снижению температуры рабочего тела в процессе сжатия и, как следствие, уменьшению удельной работы компрессора. В предельном случае процесс сжатия приближается к изотермическому, который является энергетически более выгодным по сравнению с адиабатическим.

Целью данной работы является оценка влияния впрыска воды на вход в компрессор на эффективность на примере ГТД АЛ-41СТ.

Исследования проводились методом математического моделирования термодинамического цикла двигателя с использованием системы имитационного моделирования (СИМ) DVIGwT.

По известным данным в СИМ DVIGwT была составлена математическая модель исследуемого двигателя (*Рис. 1*).

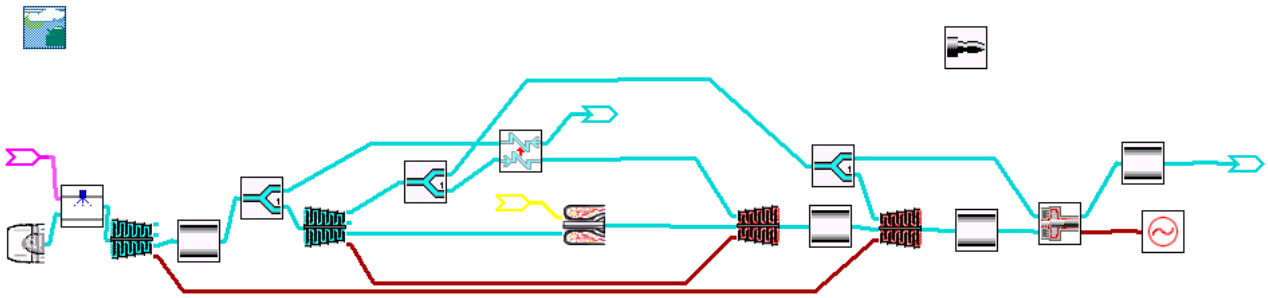


Рис. 1. Структурная схема модели АЛ-41СТ

Далее моделировался впрыск мелкораспыленной деминерализованной воды перед входным направляющим аппаратом компрессора. Относительный расход воды $\overline{g}_{H_2O}$ варьировался в диапазоне от 0 до 2% от расхода воздуха с шагом 0,5%. Температура впрыскиваемой воды составляла 15 °С, а давление 400 кПа.

Выбор верхней границы диапазона в 2% обусловлен физическими и эксплуатационными ограничениями, характерными для стационарных газотурбинных установок, а также подтвержден опубликованными экспериментальными исследованиями. Известно, что типичный порог полного испарения впрыскиваемой воды в проточной части компрессора без риска попадания неиспарившейся крупнодисперсной влаги (уноса) в камеру сгорания составляет 1–2 % от массового расхода воздуха [1, 2, 5]. Превышение этого порога ведет к потенциальному забросу капельной влаги в камеру сгорания, что провоцирует нестабильность горения, локальное переохлаждение зоны горения и возможный срыв пламени. Кроме того, избыточная влага интенсифицирует эрозионный износ лопаток последних ступеней компрессора и может приводить к потере газодинамической устойчивости [3]. Таким образом, значение 2 % является оптимальной границей, позволяющей максимально реализовать эффект испарительного охлаждения в компрессоре без выраженных отрицательных эффектов.

В ходе расчетов фиксировались следующие основные параметры двигателя: температура воздуха за компрессором $T^*_к$, расход топлива $G_т$, мощность на валу свободной турбины N_e, эффективный КПД η_e. Температура газа за камерой сгорания (КС) принималась постоянной $T^*_г = const$ для всех значений расходов $\overline{g}_{H_2O}$, атмосферные условия соответствовали условиям ISO.

Результаты численного эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

$\overline{g}_{H_2O}$, %	$T_к$, К	$G_т$, кг/с	N_e, кВт	η_e, %
0	715	1,377	24875	36,3
0,5	686	1,438	26366	36,9
1	660	1,493	28035	37,7
1,5	636	1,546	29520	38,4
2	614	1,597	30861	38,8

Анализ полученных данных выявляет следующие закономерности.

С ростом количества подаваемой воды с 0 до 2% уменьшение температуры за компрессором составляет $\Delta T_к = 101$ К. Это является прямым следствием испарительного охлаждения: вода интенсивно поглощает теплоту сжатия, приближая процесс сжатия в компрессоре к изотермическому, что требует меньших энергозатрат.

Несмотря на снижение температуры в процессе сжатия, расход топлива в камере сгорания не уменьшается, а возрастает с 1,377 кг/с до 1,597 кг/с (прирост 16%). Это связано с тем, что для нагрева пароводяной смеси, обладающей более высокой теплоемкостью, чем чистый воздух, до номинальной температуры перед турбиной требуется больше тепловой энергии.

Следует отметить, что рост расхода топлива при впрыске воды не приводит к ухудшению экономичности двигателя, поскольку увеличение полезной мощности происходит более интенсивно, чем увеличение расхода топлива. Так, мощность двигателя увеличивается с 24875 кВт до 30861 кВт, демонстрируя прибавку в 24%.

Как следствие, эффективный КПД двигателя монотонно возрастает с 36,3% до 38,8%. Относительный прирост КПД составил 2,54 процентных пункта (или 7% от исходного значения).

Сопоставление полученных в настоящей работе расчетных величин с известными экспериментальными данными показывает их качественное и количественное соответствие. Так, в работе [5] при испытаниях компрессора установки МЭС-60 с впрыском воды в проточную часть в количестве 1,8 % от расхода воздуха было зафиксировано снижение температуры за компрессором на 80–90 К и прирост мощности около 20 %, что близко к полученному значению 24%. В исследованиях Wang и Khan [4] для установки аналогичного класса при относительном расходе воды 2 % прирост мощности составил порядка 22–25 %, а повышение эффективного КПД достигало 2,0–2,8 процентных пункта, что практически совпадает с результатами данного численного эксперимента.

Несмотря на очевидные преимущества, технология впрыска воды в компрессор имеет ряд факторов, препятствующих ее широкому распространению. Главным фактором является необходимость применения

дорогостоящих высокоэффективных систем водоподготовки, обеспечивающих получение деминерализованной воды с минимальным содержанием растворенных солей и механических примесей. Недостаточная степень очистки может привести к отложению солей на элементах проточной части, развитию коррозионных процессов и их ускоренному износу.

С точки зрения дальнейших перспектив, технология впрыска воды в компрессор может быть интегрирована с системами промежуточного охлаждения и регенерации тепла отходящих газов, что позволит приблизить эффективность цикла к теоретическому пределу. Перспективным также представляется использование алгоритмов адаптивного управления впрыском, синхронизированных с режимами работы газоперекачивающего агрегата и климатическими условиями, что обеспечит максимальную экономию топлива и повышение надежности ГПА.

Проведенное исследование показало, что впрыск мелкодисперсной воды на входе в компрессор газотурбинного двигателя является эффективным способом повышения его энергетических характеристик. За счет испарительного охлаждения достигается существенное снижение температуры воздуха в процессе сжатия, что приводит к уменьшению удельной работы компрессора и росту мощности установки.

Результаты моделирования продемонстрировали, что при увеличении относительного расхода воды до 2 % мощность двигателя возрастает до 24 %, а эффективный КПД — на 2,5 процентных пункта. Несмотря на увеличение расхода топлива, общий энергетический эффект остается положительным за счет опережающего роста полезной мощности.

Полученные данные хорошо согласуются с известными экспериментальными и теоретическими исследованиями, что подтверждает адекватность используемой модели. Вместе с тем внедрение данной технологии требует решения задач, связанных с качественной водоподготовкой и обеспечением надежности работы проточной части.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция впрыска воды с другими методами повышения эффективности, а также разработка адаптивных систем управления процессом впрыска.

Библиографический список

1. Бодров, А. И. Исследование эффективности впрыска воды в проточную часть ГТУ / А. И. Бодров, В. Е. Михайлов // Теплоэнергетика. – 2019. – № 10. – С. 51–58.

2. Jonsson, M. Humidified Gas Turbines—A Review of Proposed and Implemented Cycles / M. Jonsson, J. Yan // Energy. – 2005. – Vol. 30, Issue 7. – P. 1013–1078

3. Куличихин, В. В. Ограничения по влажности и каплеуносу при впрыске воды в компрессор ГТУ / В. В. Куличихин, С. А. Мещеряков // Газотурбинные технологии. – 2021. – № 4. – С. 27–33.

4. Wang, T. The Performance of a Gas Turbine with Water Injection in the Compressor Inlet / T. Wang, J. R. Khan // Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 31, Issues 8–9. – P. 1451–1461.

5. Беляев В. Е., Середа С.О., Гельмедов Ф. Ш., Мунтянов И. Г., Мунтянов Г.Л. Результаты испытаний компрессора установки МЭС-60 с впрыском воды в проточную часть // Газотурбинные технологии. 2005. № 4(39). С. 16–20.

6. Горюнов И.М. Термогазодинамические расчеты в программном комплексе DVIGwT: учебное пособие [электронный ресурс]. Уфа: УГАТУ, 2022

© Кутуев В.С., Билалов А.Р. 2026

УДК 621.4

Д.А. КУЗНЕЦОВ
kutuev.vladisl@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ АЛ-31СТ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ GASTURB

Аннотация: ГТД АЛ-31СТ – ключевой двигатель для газоперекачивающих агрегатов. Его надежность критична для бесперебойности транспорта газа. Для усовершенствования или тестировании всегда делают газодинамический расчёт. Чтобы не считать вручную, используем программный комплекс GasTurb.
Ключевые слова: среднее квадратическое значение, вибродиагностика, эксцесс, ударные импульсы, метод прямого спектра, машинное обучение.

Начнём с первого окна программы.

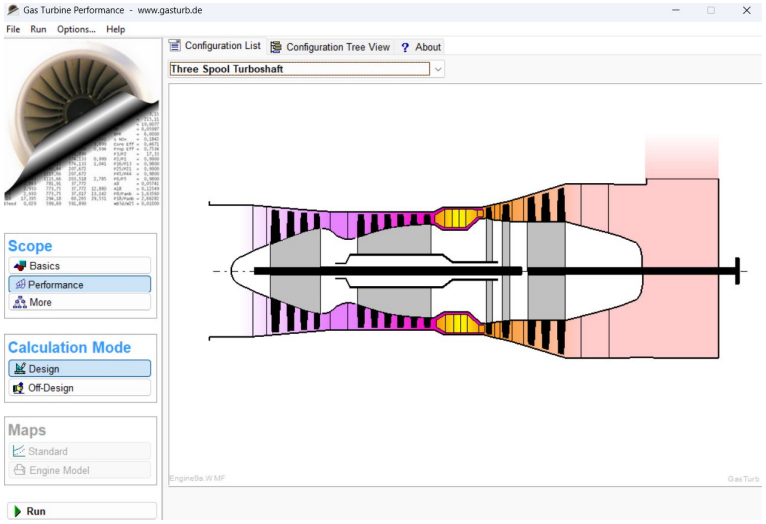
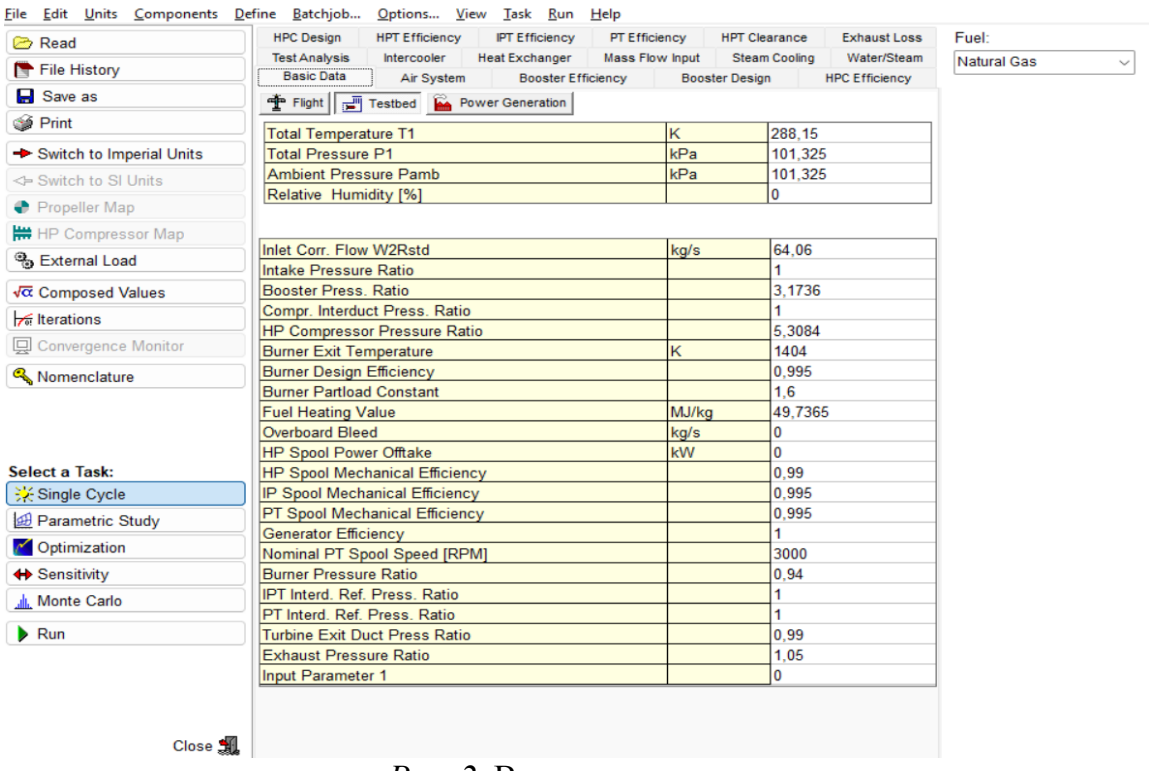


Рис. 1. Главное окно

Нажимаем Run, в появившемся окне заполняем данные нашего двигателя. В Air System вводятся данные охлаждения двигателя. Efficiency вводятся КПД компрессора и турбины (0,87-0,88), у свободной турбины 0,92-0,93. После такого как мы ввели в верхних таблицах свои параметры нажимаем Single Cycle. Там мы видим все наши посчитанные значения.

Далее нажимаем Parametric study. В значениях параметров задаём значения, по которым мы хотим посмотреть работу двигателя в графиках и его изменение от них. В Start Value пишем начальное значение. Снизу количество точек и шаг.



Total Temperature T1	K	288,15
Total Pressure P1	kPa	101,325
Ambient Pressure Pamb	kPa	101,325
Relative Humidity [%]		0

Inlet Corr. Flow W2Rstd	kg/s	64,06
Intake Pressure Ratio		1
Booster Press. Ratio		3,1736
Compr. Interduct Press. Ratio		1
HP Compressor Pressure Ratio		5,3084
Burner Exit Temperature	K	1404
Burner Design Efficiency		0,995
Burner Partload Constant		1,6
Fuel Heating Value	MJ/kg	49,7365
Overboard Bleed	kg/s	0
HP Spool Power Offtake	kW	0
HP Spool Mechanical Efficiency		0,99
IP Spool Mechanical Efficiency		0,995
PT Spool Mechanical Efficiency		0,995
Generator Efficiency		1
Nominal PT Spool Speed [RPM]		3000
Burner Pressure Ratio		0,94
IPT Interd. Ref. Press. Ratio		1
PT Interd. Ref. Press. Ratio		1
Turbine Exit Duct Press Ratio		0,99
Exhaust Pressure Ratio		1,05
Input Parameter 1		0

Рис. 2. Вводимые данные

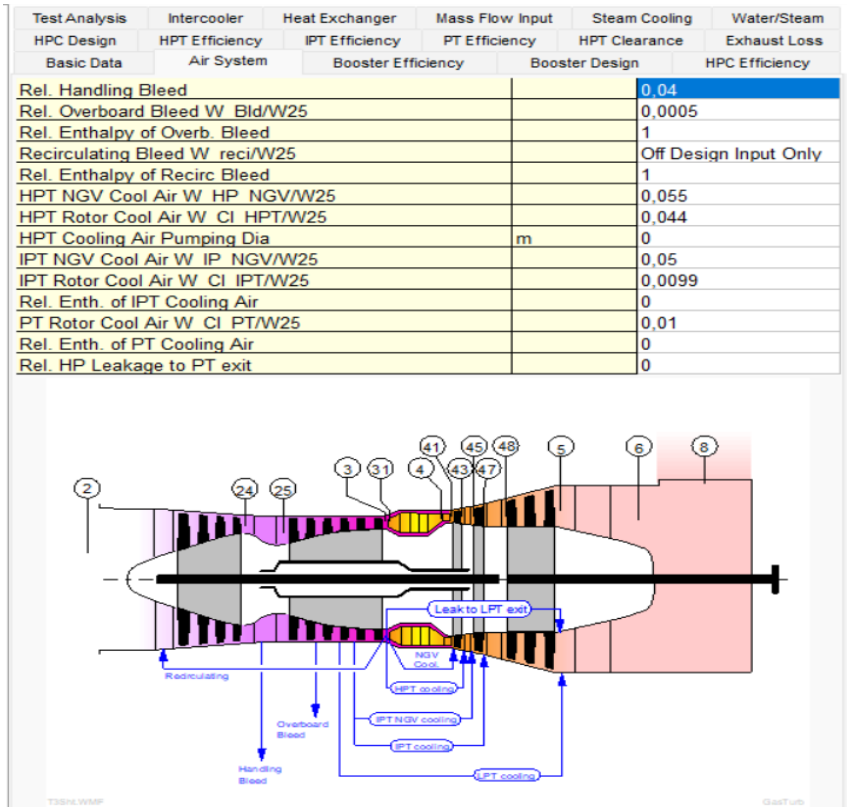


Рис. 3. Данные охлаждения

В данном графике под Рис. 6. Заданы температура и расход. В итоге получили линии работы двигателя от изменения расхода и температуры. В координатах можно менять от чего будет меняться (Оси x и y). Чтобы запустить надо нажать на две зелёные стрелочки.

Далее выходим в главное меню и нажимаем в Off design. В Maps можно заменять хар-ки компрессора, турбин. Нажимаем в Operating line, выходит окно, с шагом которым будет построение рабочих режимов компрессора.

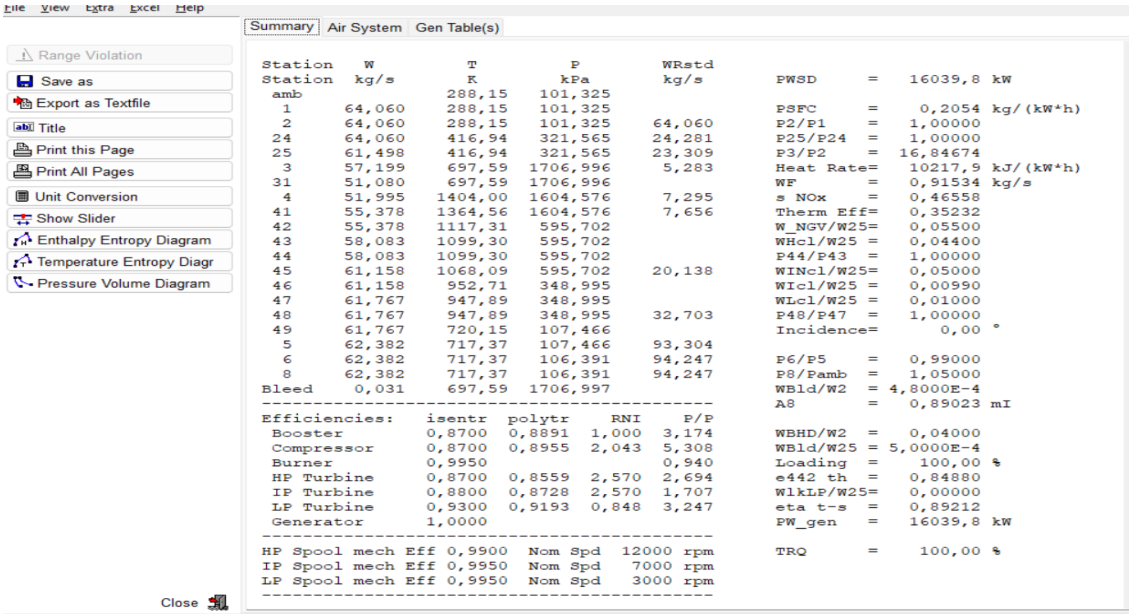


Рис. 4. Полученный газодинамический расчёт нашего двигателя

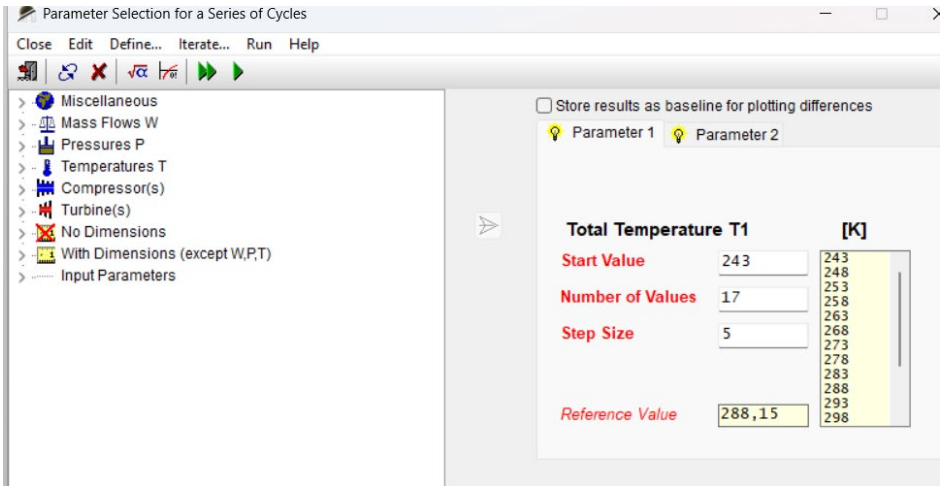


Рис. 5. Параметры для построения графиков

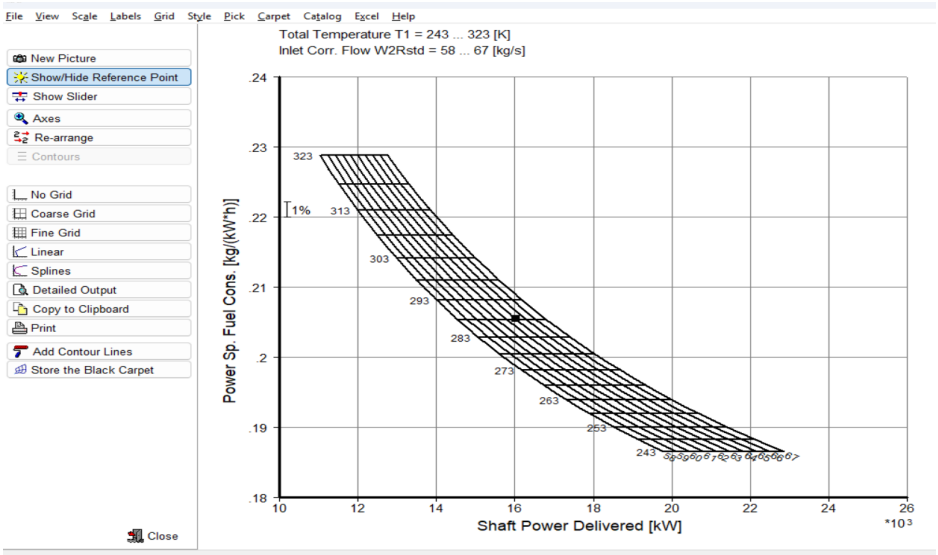


Рис. 6. Построение графиков от Мощности и расхода топлива

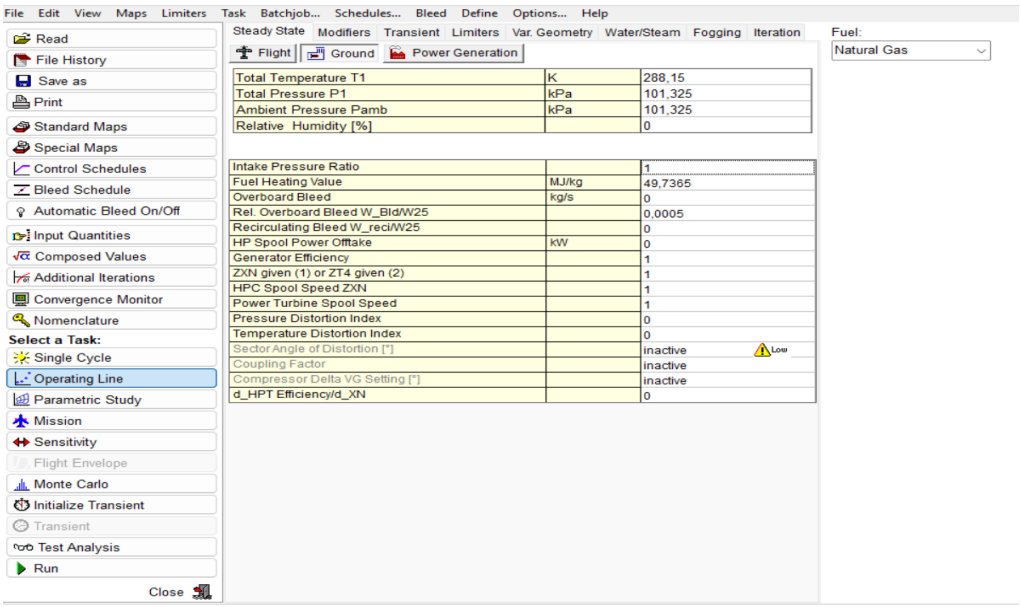


Рис. 7. Построение климатических характеристик и характеристики КНД

Нажимаем Run. В появившемся окне нажимаем крестик. Выходят характеристики частей двигателя. В Y=f(x) можно простроить графики, которые вам нужны. В Gen Table можно задать данные для построение самому, климатические, либо задать закон, по которому будет производится график.

В limiters задаются максимальные значения, после которых выше не происходит расчёт.

Заключение:

В ходе моей работы, человек сможет быстро ознакомиться с программой, чтобы сделать газодинамический расчёт, узнать данные о двигателе АЛ-31СТ, ознакомится с графиками, чтобы понять зависимости работы двигателя.

Библиографический список

1. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД/ В. В. Кулагин, С. К. Бочкарев, И. М. Горюнов и др.; под общ. ред. В. В. Кулагина. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.
2. Термогазодинамические расчеты авиационных ГТД: учеб. пособие для авиац. спец. / А.М. Ахмедзянов, В.П. Алаторцев, С.Е. Аксельрод [и др.]; отв. ред. А.М. Ахмедзянов. – Уфа : Уфим. авиац. ин-т, 1982. – 256 с.
3. АЛ-31СТ [Электронный ресурс] // Официальный сайт АО «ОДК» (Объединённая двигателестроительная корпорация). – Режим доступа: https://www.uecrus.com/products-and-services/products/gazoperekachivayushchie-ustanovki/gazoturbinnyy-privod-al-31ste2609/ (дата обращения: 16.04.2026).

© Кузнецов Д.А., 2026

УДК 629.783

Р.А. ПЛАТОНОВ
qwazar211@bk.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НАНОСПУТНИКА ФОРМАТА CUBESAT 3U

Аннотация: рассмотрена задача формирования облика электроракетной двигательной установки на основе импульсного плазменного двигателя для наноспутника формата CubeSat 3U. На основе обзора серийных и опытных

образцов выбран базовый тип двигателя, разработана математическая модель оценки эффективности, выполнен параметрический анализ с учётом ограничений платформы. Расчётный облик: удельный импульс 900 с, тяга 0,8 мН, потребляемая мощность 18 Вт, масса 730 г. Достижимое приращение характеристической скорости при массе рабочего тела 150 г составляет 430 м/с.
Ключевые слова: электроракетный двигатель, импульсный плазменный двигатель, CubeSat 3U, наноспутник, удельный импульс, рабочее тело, политетрафторэтилен.

Наноспутники формата CubeSat занимают всё более значимое место в современной космической отрасли. По данным Bryce Space and Technology, в период с 2012 по 2024 год на орбиту было выведено более 4500 наноспутников [1]. Стандартизированная платформа позволяет существенно сократить сроки и стоимость разработки, однако накладывает жёсткие ограничения на массу, габариты и энергопотребление бортовых подсистем.

Отсутствие двигательной установки (ДУ) ограничивает применение CubeSat низкими орбитами с коротким сроком активного существования. Электроракетные двигатели (ЭРД) благодаря высокому удельному импульсу обеспечивают значительно большее приращение характеристической скорости (ΔV) при той же массе рабочего тела по сравнению с химическими двигателями [2, 3].

Цель работы – сформировать оптимальный облик ЭРД, удовлетворяющий ограничениям платформы CubeSat 3U и обеспечивающий подъём орбиты с 300 до 500 км.

Задачи: проанализировать типовые миссии и системные ограничения; провести анализ существующих образцов ЭРД для наноспутников; разработать математическую модель оценки эффективности; выполнить параметрический анализ и выбрать базовый облик; верифицировать эффективность на эталонной миссии.

Системные ограничения CubeSat 3U и эталонная миссия.

Стандарт CubeSat (CDS Rev. 14) определяет платформу 3U как аппарат с габаритами 100×100×340,5 мм и максимальной массой 4 кг [4]. Системные ограничения для ДУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Системные ограничения ДУ для CubeSat 3U

Параметр	**Допустимое значение**
Масса ДУ	не более 1,2 кг
Объём ДУ	не более 0,5–1,0U
Потребляемая мощность	не более 25 Вт
Масса рабочего тела (РТ)	не более 200 г
Напряжение шины	до 12 В

В качестве эталонной миссии принят подъём орбиты с высоты 300 км до 500 км. Требуемое приращение характеристической скорости определяется методом Хомана и составляет 118 м/с [5]. С учётом потерь принимаем расчётное ΔV = 130–145 м/с.

Анализ существующих образцов ЭРД для наноспутников.

Для определения базового типа двигателя проведён обзор серийных и опытных образцов ЭРД, разработанных для платформы CubeSat. Основные характеристики приведены в табл. 2 по данным открытых публикаций производителей [6, 7, 8, 9].

Таблица 2

Характеристики образцов ЭРД для наноспутников

Образец, разработчик	Тип	Тяга, мН	I_уд, с	P, Вт	Масса, г
BGT-X5, Busek [6]	ИПД	1,0	1070	10	200
BIT-3, Busek [7]	РИТ	1,1	2150	50	850
IFM Nano, Enpulsion [8]	FEEP	0,35	6000	40	185
NPT30-I2, ThrustMe [9]	РИТ	1,1	1100	55	1200
ИД-50, МАИ [10]	ИПД	0,8	900	15	350

Из табл. 2 видно, что РИТ и FEEP-двигатели имеют высокий удельный импульс (1100–6000 с), однако их масса (185–1200 г) и потребляемая мощность (40–55 Вт) приближаются к предельным значениям ограничений платформы. ИПД с тефлоновым рабочим телом (BGT-X5, ИД-50) выделяются минимальной потребляемой мощностью (10–15 Вт), сравнительно небольшой массой (200–350 г) и достаточным удельным импульсом для типовых миссий CubeSat. Существенным конструктивным преимуществом ИПД является использование твёрдого рабочего тела, не требующего системы хранения газа под давлением и нейтрализатора, что снижает сложность установки [11].

С учётом совокупности показателей в качестве базового типа принят импульсный плазменный двигатель с тефлоновым рабочим телом.

Математическая модель оценки эффективности.

В основу модели положено уравнение Циолковского, связывающее приращение характеристической скорости с удельным импульсом и массой рабочего тела:

$$\Delta V = I_уд \cdot g_0 \cdot \ln(m_0 / m_2), \quad (1)$$

где I_уд – удельный импульс, с; $g_0 = 9{,}80665$ м/с² – ускорение свободного падения; m_0 – начальная масса аппарата, кг; m_2 – сухая масса аппарата, кг.

Необходимая масса рабочего тела определяется из (1):

$$m_PT = m_2 \cdot (exp(\Delta V / (I_уд \cdot g_0)) - 1). \quad (2)$$

Потребляемая мощность ИПД связана с энергией одного импульса E_имп и частотой f следующим соотношением [11]:

$$P = E_имп \cdot f / \eta_ЭБ, \quad (3)$$

где η_ЭБ – КПД зарядного устройства (принят 0,85).

Расчёт по формуле (2) при сухой массе m_2 = 3,0 кг для различных значений I_уд приведён в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость массы РТ от удельного импульса при m_2 = 3,0 кг

I_уд, с	**m_РТ при ΔV = 130 м/с, г**	**m_РТ при ΔV = 145 м/с, г**
700	185	207
900	143	160
1000	129	144
1200	107	119

Из табл. 3 видно, что увеличение удельного импульса с 700 до 900 с снижает массу РТ на 23%. Оптимальный диапазон I_уд = 800–1000 с.

Параметрический анализ и выбор облика.

С учётом характеристик образцов из табл. 2 рассмотрены три варианта параметров облика ИПД с разной энергией импульса E_имп и частотой следования f. Влияние этих параметров на массу установки и потребляемую мощность приведено в табл. 4.

Таблица 4

Параметрический анализ вариантов облика ИПД

Параметр	**Вар. 1**	**Вар. 2**	**Вар. 3**
Энергия импульса E_имп, Дж	15	10	30
Частота импульсов f, Гц	1,0	1,5	1,5
I_уд, с (по данным [6, 10])	900	800	1100
Средняя тяга F, мН (расчёт)	0,8	0,5	2,0
P, Вт (по формуле (3))	18	18	53
ΔV при m_РТ = 150 г, м/с	141	126	172

Из табл. 4 видно, что вариант 3 не удовлетворяет ограничению по мощности (53 Вт против 25 Вт допустимых). Вариант 2 даёт недостаточное ΔV = 126 м/с при принятой массе РТ. Вариант 1 удовлетворяет всем системным ограничениям и принят в качестве базового.

Итоговые тактико-технические характеристики облика ИПД-3U: удельный импульс 900 с, средняя тяга 0,8 мН, энергия импульса 15 Дж, частота 1 Гц, потребляемая мощность 18 Вт, масса РТ 150 г, суммарная масса ЭРДУ 730 г, занимаемый объём 0,5U.

Массовый бюджет ЭРДУ: двигательная головка – 120 г, блок питания и управления – 180 г, конденсаторная батарея – 150 г, корпус РТ – 80 г, жгуты и крепёж – 50 г, рабочее тело (ПТФЭ) – 150 г.

Верификация на эталонной миссии.

Верификация выбранного облика выполнена расчётом по формуле (1) при сухой массе m_2 = 3,0 кг, массе РТ 0,150 кг и I_уд = 900 с:

$$\Delta V = 900 \cdot 9{,}807 \cdot \ln(3{,}15 / 3{,}0) = 430 \text{ м/с}. \quad (4)$$

Полученное значение с трёхкратным запасом перекрывает требуемое ΔV = 130 м/с. Это означает, что предложенный облик ЭРДУ обеспечивает не только эталонную миссию (подъём орбиты 300→500 км), но и резерв для коррекций орбиты в течение всего срока активного существования аппарата.

Расчётное время манёвра при тяге 0,8 мН составляет 10–20 суток, что укладывается в типовые требования к подъёму орбиты CubeSat (не более 6 месяцев).

В работе сформирован облик электроракетной двигательной установки на основе импульсного плазменного двигателя для наноспутника CubeSat 3U. По результатам анализа существующих образцов ЭРД (BGT-X5, BIT-3, IFM Nano, NPT30-I2, ИД-50) в качестве базового типа выбран ИПД с тефлоновым рабочим телом, обладающий минимальной потребляемой мощностью при достаточном удельном импульсе. Разработана математическая модель оценки эффективности, проведён параметрический анализ трёх вариантов с разной энергией импульса и частотой, выбран базовый вариант. Расчёт подтвердил достижимость ΔV = 430 м/с при массе РТ 150 г, что обеспечивает выполнение эталонной миссии подъёма орбиты с трёхкратным запасом.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании двигательных установок для отечественных наноспутников, а также в учебном процессе при изучении электроракетных двигательных систем.

Библиографический список

1. Bryce Space and Technology. Smallsats by the Numbers: 2024 Edition // Alexandria, VA, 2024.

2. А.И. Морозов. Физические основы космических электрореактивных двигателей. М.: Атомиздат, 1978. 328 с.

3. D.M. Goebel, I. Katz. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters // Wiley, 2008.

4. CubeSat Design Specification (CDS) Rev. 14. The CubeSat Program, California Polytechnic State University, 2022.
5. G.P. Sutton, O. Biblarz. Rocket Propulsion Elements. 9th ed. // Wiley, 2017.
6. Busek Co. BGT-X5 Pulsed Plasma Thruster Datasheet // Natick, MA: Busek Space Propulsion, 2021.
7. Busek Co. BIT-3 RF Ion Thruster Technical Data Sheet // Natick, MA: Busek Space Propulsion, 2021.
8. Enpulsion GmbH. IFM Nano Thruster Product Specification // Wiener Neustadt, 2022.
9. ThrustMe SAS. NPT30-I2 Datasheet // Verrières-le-Buisson, 2023.
10. Н.Н. Антропов и др. Разработка ИПД для космических аппаратов типа CubeSat // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2021. № 4.
11. R.L. Burton, P.J. Turchi. Pulsed plasma thruster // Journal of Propulsion and Power. 1998. Vol. 14, No. 5.

© Платонов Р.А., 2026

УДК 621.43

В.В. ШУМСКАЯ
vshumsv@gmail.com
Науч. руководов. – к.т.н., доц. Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Аннотация: в статье представлен обзор основных способов стабилизации пространственного положения малоразмерных космических аппаратов. Рассмотрены возмущающие факторы, влияющие на ориентацию, пассивные и активные методы стабилизации, а также комбинированные системы управления. Особое внимание уделено ограничениям, характерным для малоразмерных аппаратов, и современным тенденциям развития систем ориентации.
Ключевые слова: малоразмерный космический аппарат, стабилизация, ориентация, система управления, реакционное колесо.

Введение

Малоразмерные космические аппараты, включая наноспутники и аппараты формата CubeSat, в настоящее время занимают значительную нишу в космической деятельности. Их применение охватывает научные исследования, дистанционное зондирование Земли, связь и образовательные проекты. При

этом одной из ключевых задач функционирования таких аппаратов является обеспечение требуемого пространственного положения.

Под стабилизацией понимается поддержание заданной ориентации аппарата и ограничение его вращательного движения. В отличие от крупных космических аппаратов, малоразмерные системы функционируют в условиях жестких ограничений по массе, энергопотреблению и вычислительным ресурсам, что существенно влияет на выбор методов стабилизации.

1. Возмущающие факторы, влияющие на ориентацию

На орбите на малоразмерный космический аппарат воздействует ряд внешних факторов, вызывающих отклонение от заданной ориентации.

К основным возмущениям относится гравитационное воздействие, связанное с неоднородностью поля притяжения Земли. Существенную роль играет остаточная атмосфера на низких орбитах, создающая аэродинамическое сопротивление. Дополнительно на аппарат влияет магнитное поле Земли, взаимодействующее с элементами конструкции, обладающими собственной намагниченностью.

Определенное воздействие оказывает давление солнечного излучения, особенно для аппаратов с развитой поверхностью. Внутренние факторы, такие как движение механизмов или перераспределение масс, также могут вызывать дополнительные возмущения.

Совокупное действие перечисленных факторов требует применения специальных методов стабилизации.

2. Пассивные методы стабилизации

Пассивные методы стабилизации реализуются без использования активных управляющих воздействий и не требуют затрат энергии.

Гравитационно-градиентная стабилизация основана на особенностях распределения массы аппарата. При соответствующей конфигурации конструкция стремится занять устойчивое положение относительно Земли. Для повышения эффективности данного метода применяются выносные элементы, увеличивающие разницу моментов инерции.

Магнитная стабилизация осуществляется за счет использования постоянных магнитов. Аппарат ориентируется вдоль линий магнитного поля Земли. Данный способ отличается простотой реализации, однако его точность ограничена и зависит от параметров орбиты.

Аэродинамическая стабилизация применяется на низких орбитах, где сохраняется влияние разреженной атмосферы. За счет специальной формы конструкции создается стабилизирующий момент, направленный на уменьшение вращения.

Пассивные методы характеризуются высокой надежностью, но не позволяют обеспечить высокую точность ориентации.

3. Активные методы стабилизации

Активные методы предполагают использование исполнительных устройств, создающих управляющие воздействия.

Одним из наиболее распространенных средств являются магнитные исполнительные органы, которые формируют управляющий момент за счет взаимодействия с магнитным полем Земли. Они отличаются малой массой и простотой, но обладают ограниченными возможностями управления.

Реакционные колеса обеспечивают более точное управление ориентацией. Они работают за счет изменения скорости вращения внутренних маховиков, что приводит к повороту аппарата. Данный метод широко применяется в современных малоразмерных спутниках, однако требует контроля накопления углового момента.

Микродвигательные установки позволяют создавать управляющие воздействия за счет реактивной тяги. Они обеспечивают высокую точность, но ограничены запасом рабочего тела и используются, как правило, в более сложных миссиях.

Активные методы обеспечивают требуемую точность ориентации, но требуют дополнительных энергетических и вычислительных ресурсов.

4. Датчики системы ориентации

Для определения текущего положения аппарата в пространстве используются различные типы датчиков.

Гироскопы позволяют измерять угловую скорость вращения. Магнитометры определяют направление магнитного поля Земли. Солнечные датчики используются для ориентации относительно Солнца. Для задач высокой точности применяются звездные датчики, определяющие положение по звездам. Комбинация различных датчиков позволяет повысить надежность и точность системы ориентации.

5. Комбинированные системы стабилизации

В современных малоразмерных космических аппаратах чаще всего используются комбинированные системы стабилизации, объединяющие несколько методов.

Наиболее распространенным решением является сочетание реакционных колес и магнитных исполнительных органов. Реакционные колеса обеспечивают точную ориентацию, а магнитные системы используются для компенсации накопленных эффектов и поддержания устойчивости.

Комбинированные системы позволяют учитывать ограничения по массе и энергопотреблению, обеспечивая при этом требуемые характеристики управления.

6. Алгоритмы управления ориентацией

Эффективность работы системы стабилизации определяется не только аппаратной частью, но и алгоритмами управления.

На практике широко применяются классические регуляторы, обеспечивающие устойчивое поведение системы. Для повышения точности используются более сложные методы, учитывающие динамику аппарата и внешние возмущения.

Обработка информации от датчиков осуществляется с использованием специальных алгоритмов, позволяющих повысить точность оценки ориентации и снизить влияние шумов измерений.

7. Особенности и перспективы развития

Малоразмерные космические аппараты характеризуются рядом ограничений, включая ограниченную мощность бортовых источников энергии, малую массу и компактные размеры. Эти факторы определяют выбор методов стабилизации и архитектуру системы управления.

Современные тенденции развития направлены на повышение точности при снижении энергопотребления. Развиваются миниатюрные датчики, совершенствуются исполнительные устройства и алгоритмы управления. Перспективным направлением является использование группировок аппаратов, где требуется согласованное управление ориентацией нескольких спутников.

Заключение

Стабилизация пространственного положения малоразмерных космических аппаратов является важной задачей, определяющей эффективность их функционирования. Пассивные методы обеспечивают простоту и надежность, активные — высокую точность, а комбинированные системы позволяют оптимально сочетать их преимущества. Развитие технологий и методов управления способствует расширению возможностей малоразмерных космических аппаратов и повышению эффективности их применения.

Библиографический список

1. Морозов А.И. Физика электроракетных двигателей: в 2 т. Т. 1: Физика плазмы и ускорение вещества. М.: МФТИ, 2019. 415 с.

2. Гришин С.Д., Лезнов В.С. Дуговые ракетные двигатели. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 488 с.

6. Алексеев И.В., Матвеев В.А. Высокотемпературные материалы в аэрокосмической технике. Екатеринбург: УрО РАН, 2023. 294 с.

4. Орлов А.Б., Попов Г.А. Термические электрореактивные двигатели малых космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2021. № 4 (115). С. 45-56.

5. Жуков В.П. Экспериментальное исследование микроволнового нагрева плазмы в ТЭРД // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. Вып. 5. С. 12-18.

© Шумская В.В., 2026

СЕКЦИЯ 1.4. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

УДК 656.1

Р.М. АБДУЛЛИН
Ruslan79608064097@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Н.Х. МУСИН

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МИКРОРАЙОНА «ЯРКИЙ» ГО Г. УФЫ

Аннотация: в работе выполнен анализ транспортной ситуации в микрорайоне «Яркий» г. Уфы и выявлены причины возникновения заторов. На основе данных натурных обследований разработана имитационная модель в среде AnyLogic и проведена оценка вариантов организации дорожного движения. Установлено, что наиболее эффективным решением является введение светофорного регулирования, обеспечивающее существенное снижение времени прохождения участка.
Ключевые слова: транспортная инфраструктура, моделирование, транспортная модель, час пик, интенсивность движения.

В современном мире невозможно представить город без транспортной инфраструктуры, ведь она является важной и в то же время неотъемлемой частью города, что объединяет его в одну единую улично-дорожной сеть. Именно благодаря этому город способен функционировать, развиваться, а самое главное – жить. Поэтому очень важно следить за состоянием транспортной инфраструктуры, изменять её в зависимости от сложившиеся условий в единой сети и самое главное улучшать для оптимизации улично-дорожной сети и решения различных проблем.

В работе рассматривается микрорайон «Яркий» ГО г. Уфы. Он расположен в Дёмском районе Уфы, в юго-западной части города, на берегу Кустарёвского озера. Население около 25 тыс. человек [1]. В перспективе, после полного заселения 34 тыс. человек [1]. Площадь микрорайона – 167,9056 гектара (1 679 056 кв. м.), общая площадь строительства – 932 764,4 кв.м. [2]. Состоит из 15 тематических кварталов, которым присвоены названия городов [3]. В каждом квартале предусмотрены детские и спортивные площадки, места для отдыха, пешеходные и велосипедные дорожки общей протяжённостью 9 км [3]. С остальной частью города соединяют улицы Евгения Столярова и Архитектора Калимуллина, через примыкание к Дёмскому шоссе. Дороги микрорайона «Яркий» являются двухполосными дорогами с двусторонним движением. Улицы оборудованы пешеходными переходами, велодорожками и дорожными знаками, однако нет дорожных разметок. Всего одна действующая

остановка под названием «Микрорайон Яркий», которая расположена рядом с въездом в микрорайон.

Натурное обследование показало, что через въезд в микрорайон «Яркий» по улице Евгения Столярова образуется скопление автомобилей в часы пик. В утренний час пик это происходит при выезде и начинается с квартала «Мадрид», а в вечерний час пик – при въезде и начинается с Дёмского шоссе, 85. Возможные причины:

1. Нерегулируемый пешеходный переход через улицу Евгения Столярова. Через него проходят частые и малочисленные группы пешеходов, что и затормаживает движение автомобилей.
2. Нерегулируемый поток автомобилей на перекрестке улиц Евгения Столярова и Архитектора Калимуллина и примыкания к Демскому шоссе. При повороте через перекрёсток водители уступают дорогу, что тоже затормаживает движение автомобилей.

Этот участок дорожной сети был выбран для дальнейшей оптимизации (рисунок 1). В ходе натурного обследования были определены интенсивности движения транспортных средств и пешеходов на исследуемом участке (таблицы 1-3), а также среднее время преодоления исследуемого участка. Схема направлений показана на рисунке 2.

Таблица 1

Интенсивность движения утром

направление	Интенсивность движения, ед./ч				
	8.00-9.00				
	Легковые	Автофургоны и микроавтобусы массой до 3,5 т	Грузовые массой от 3,5 до 12 т	Грузовые массой свыше 12 т	Автобусы массой свыше 3,5 т
1	275	0	0	0	0
2	317	0	0	0	0
3	209	2	0	0	14
4	405	0	0	0	0
5	153	3	0	0	17
6	46	0	0	0	0
Всего	1405	5	0	0	31

Таблица 2

Интенсивность движения вечером

направление	Интенсивность движения, ед./ч				
	18.00-19.00				
	Легковые	Автофургоны и микроавтобусы массой до 3,5 т	Грузовые массой от 3,5 до 12 т	Грузовые массой свыше 12 т	Автобусы массой свыше 3,5 т
1	188	0	0	0	0
2	106	0	0	0	0
3	235	2	0	0	14

4	91	0	0	0	0
5	564	4	0	0	13
6	113	0	0	0	0
Всего	1297	6	0	0	27

Таблица 3

Интенсивность движения пешеходов

Направление	Утренний час пик, пеш./ч	Вечерний час пик, пеш./ч
7	332	103
8	183	324
Всего	515	427

Рис. 1. Исследуемый участок

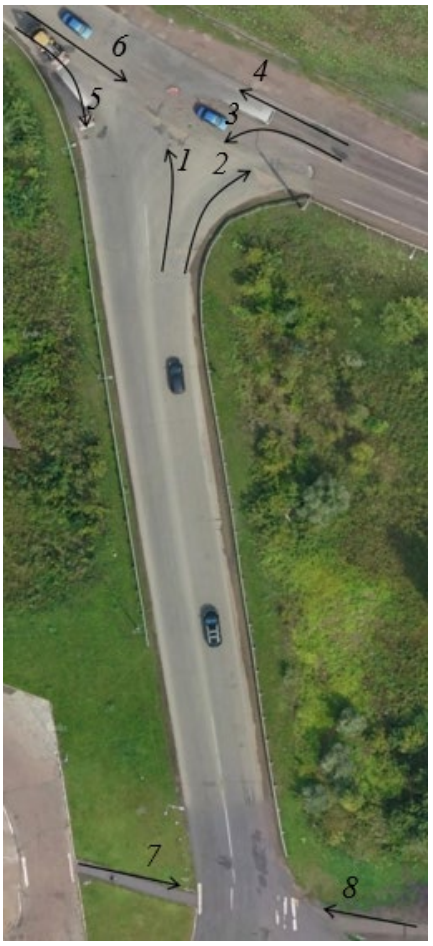


Рис.2. Схема направлений

На основании собранных данных была разработана транспортная модель исследуемого участка в системе имитационного моделирования AnyLogic. Были созданы модели существующей транспортной обстановки в утренний и вечерний час пики. Также были проанализированы следующие варианты организации дорожного движения (рисунок 3):

1. Вариант 1: использование светофорного регулирования с целью превращения нерегулируемого пешеходного перехода в регулируемый пешеходный переход. Оптимизация фаз светофора (Таблица 4).

2. Вариант 2: использование надземного пешеходного перехода с целью замены нерегулируемого пешеходного перехода на надземный пешеходный переход.

3. Вариант 3: Расширение участка дороги от нерегулируемого пешеходного перехода до Т-образного перекрёстка до 4 полос.

4. Вариант 4: Расширение Т-образного перекрёстка до 4 полос

а) Вариант 1

б) Вариант 2

в) Вариант 3

г) Вариант 4

Рис. 3. Варианты организации дорожного движения

Итоги моделирования всех вариантов представлены в таблице 5. Показано:

1. Результаты имитационного моделирования текущей дорожной ситуации согласуются с экспериментальными данными, что свидетельствует о валидности применяемой модели.

2. Вариант 1 уменьшает среднее время преодоления исследуемого участка почти в 3 раза, в то время как вариант 2 – почти в 2,5 раза.

3. Решения 3 и 4 уменьшают среднее время преодоления исследуемого участка почти на треть, имея между собой незначительную разницу между собой.

4. Был выбран вариант 1 как оптимальный по соотношению эффект/стоимость решения.

Таблица 4

Продолжительность фаз светофора

Фазы светофора для автомобиля	Продолжительность, с	
	Утром	Вечером
Зелёная	54	59
Красная	8	10
Жёлтая	3	3

Таблица 5

Среднее время преодоления исследуемого участка

Схемы моделей	Среднее время преодоления исследуемого участка утром, с.	Среднее время преодоления исследуемого участка вечером, с.
Результаты натурного обследования	124	129
Модель существующей транспортной обстановки	124,749	130,111
Вариант 1	51,667	50,841
Вариант 2	42,166	41.327
Вариант 3	93,306	98,078
Вариант 4	91,181	93,459

Библиографический список

1. Рувики: Интернет-энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Яркий_(Уфа)

2. Об утверждении проекта планировки и проекта межевания территории микрорайона, восточнее озера «Кустаревское» в Демском районе городского округа город Уфа Республики Башкортостан [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gorodufa.ru/docs/postanovleniya/postanovleniya_administratsii/44501/?sphrase_id=358837

3. ЖК «Яркий» от застройщика Третий Трест [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://realty.yandex.ru/ufa/kupit/novostrojka/yarkij-624287/
© Абдуллин Р.М., 2026

УДК 629.735.035

А.Ю. АХМАДЕЕВ, Д.Р. ВАЛЕЕВ, И.Р. КАШАПОВ
ahmadeevaibulat@yandex.ru
Науч. руководов. – д-р техн. наук, проф. М.Д. ГАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСА РЕДУКТОРА АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в статье выполнен расчет напряженно-деформированного состояния редуктора авиационного поршневого двигателя. Расчет проведен в программном комплексе SolidWorks Simulation. Полученные результаты подтвердили эффективность выбранного корпуса редуктора с точки зрения допустимых напряжений и деформаций на номинальных режимах работы двигателя.
Ключевые слова: авиационный редуктор; напряженно–деформированное состояние; SolidWorks Simulation.

Современные силовые установки малой авиации и беспилотных летательных аппаратов предъявляют повышенные требования к надежности и массогабаритным характеристикам трансмиссионных узлов. Одним из ключевых элементов является редуктор, обеспечивающий понижение частоты вращения винта относительно коленчатого вала двигателя. При этом редуктор испытывает значительные крутящие и изгибающие нагрузки от тяги винта, что обуславливает необходимость детального анализа его напряженно-деформированного состояния (НДС). В данной работе рассмотрен одноступенчатый редукторный узел для двухтактного четырехцилиндрового авиационного поршневого двигателя мощностью 110 лошадиных сил (Рис.1), разработанного на кафедре двигателей внутреннего сгорания (ДВС) «Уфимского университета науки и технологий» для малой авиации.

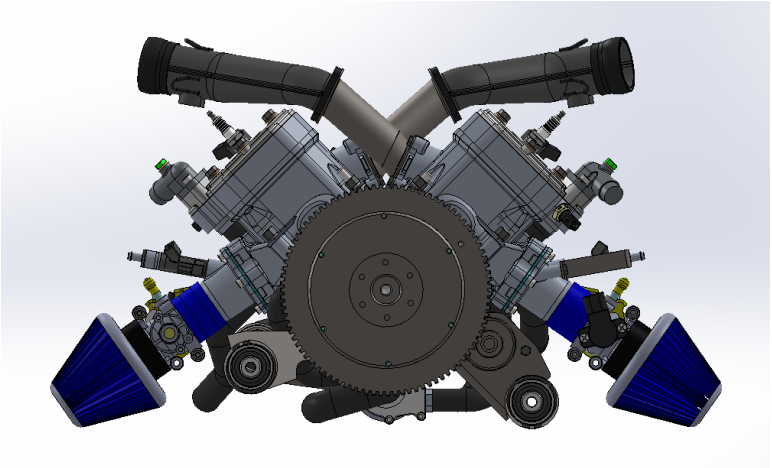


Рис 1. Двухтактный четырехцилиндровый авиационный поршневой ДВС

На рисунке 2 представлен корпус проектируемого редуктора и кронштейнов.

В таблице 1 представлены технические характеристики.

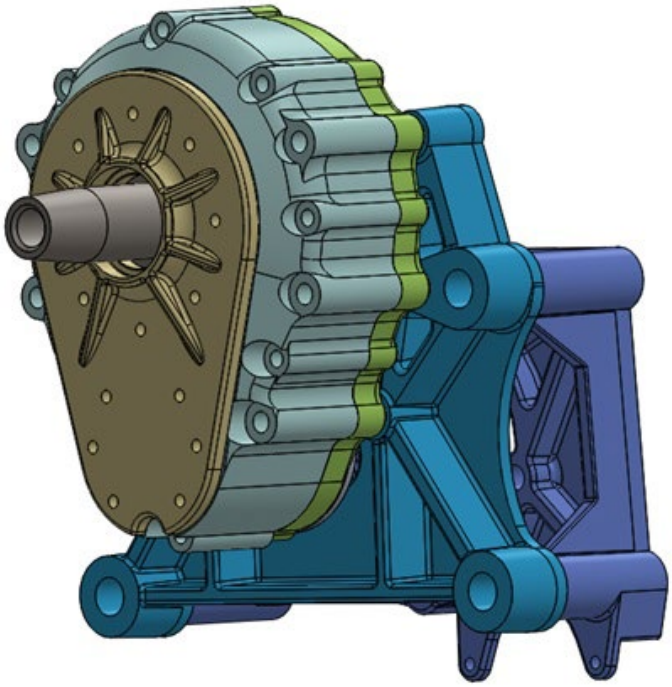


Рис. 2. Редуктор с кронштейнами крепления

Таблица 1

Технические характеристики редуктора:

Характеристика	Значение
Масса редуктора в сборе	13 кг.
Передаточное число	2,8
Количество ступеней	1
Материал корпуса	АК7

Материал корпуса по ГОСТ 1583-93 [2] сплав АК7 выбран по причине хороших литейных свойств и пониженной хрупкости при малой массе, что особенно важно для редукторов малой авиации. Способ литья выбран в кокиль как оптимальный вариант по себестоимости и технологичности. Предел текучести сплава $\boldsymbol{\sigma_T = 90}$ МПа.

Номинальная тяга воздушного винта составляет 3000 Н, принятая по известным параметрам двигателя Rotax 914 с аналогичной мощностью. При расчете принята тяга, равная 3500 Н для гарантированного обеспечения прочности конструкции.

Расчет напряжений и деформаций редуктора двигателя при статическом нагружении выполнен в программном комплексе SolidWorks Simulation. В модели были заданы следующие граничные условия:

1. Редуктор закреплен за 5 точек крепления к двигателю
2. Нагрузка на редуктор – 3500 Н

Места приложения нагрузок и места закрепления приведены на рисунке 3 и рисунке 4.

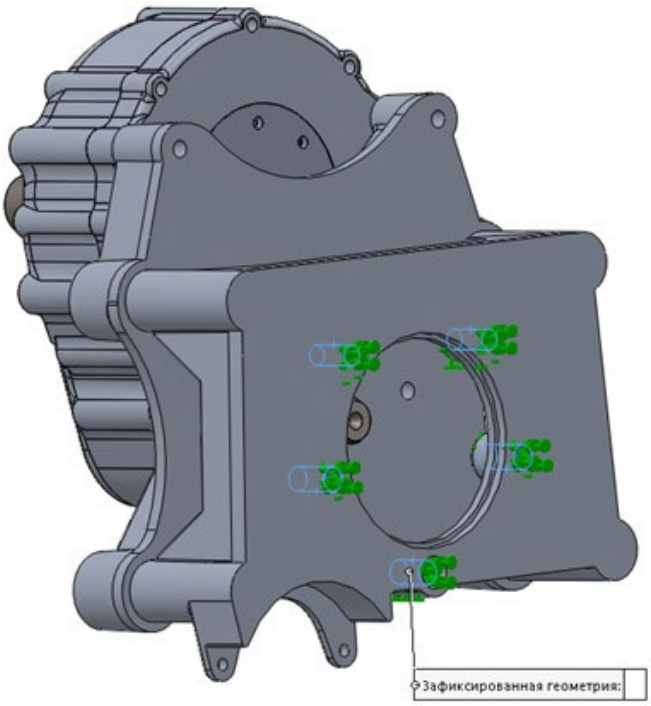


Рис. 3. Точки крепления редуктора к двигателю

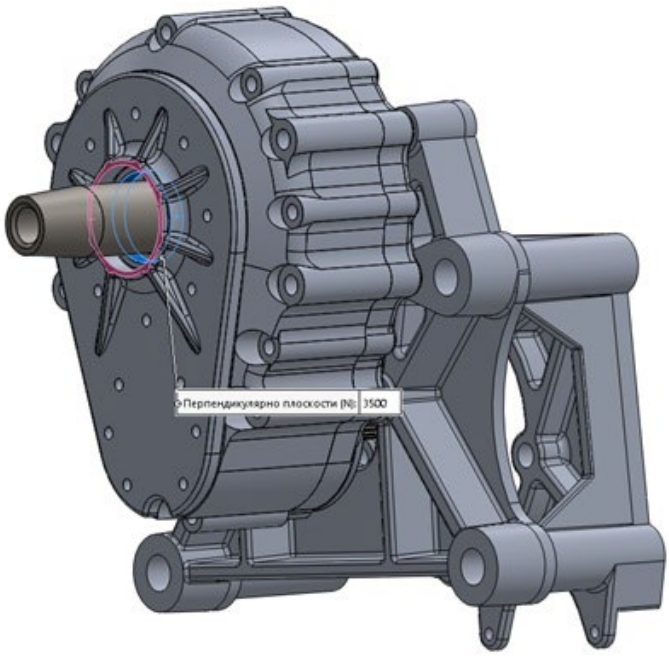


Рис. 4. Приложенная нагрузка

На рисунке 5 представлены поля деформаций напряжений

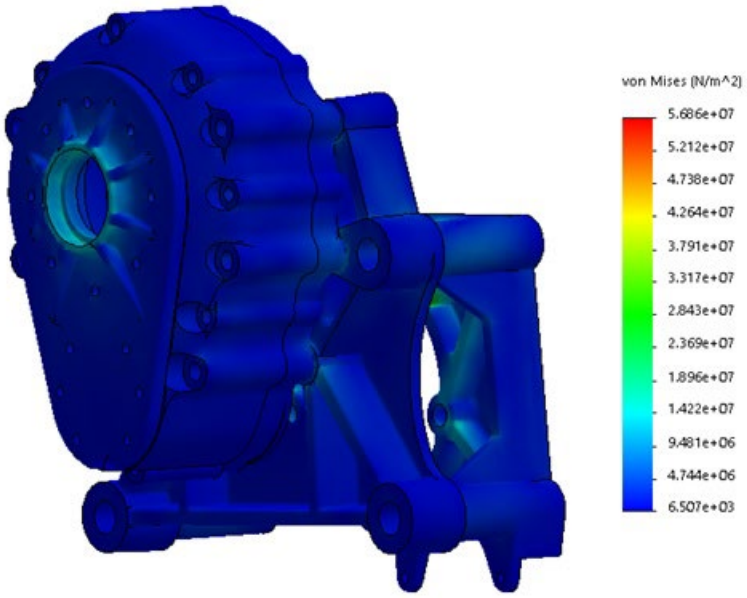


Рис. 10. Результат расчета редуктора

По результатам расчета представлено максимальное эквивалентное напряжение по von Mises $\sigma \approx 57$ МПа.

Таким образом, коэффициент запаса прочности $n = \frac{\sigma_T}{\sigma} = \frac{90}{57} \approx 1{,}6$ превышает минимально допустимое значение 1,5 [3], что подтверждает верный выбор материала и спроектированную геометрию, принятую на стадии предварительного проектирования.

Результаты численного анализа подтвердили прочность корпуса редуктора и кронштейнов крепления под воздействием тяговой нагрузки от

воздушного винта. Следующим этапом является расчет НДС цилиндрической прямозубой передачи в составе редуктора.

Библиографический список

1. ГОСТ 1583-93
2. ГОСТ Р 56514-2015

© Ахмадеев А.Ю., Валеев Д.Р., Кашапов И.Р., 2026

УДК 621.891:621.822.5:519.876.5

Т.Р. АХМАДУЛЛИН
timerbulatrussia@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. С.А. ЗАГАЙКО

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ В ТРИБОУЗЛЕ «ШЕЙКА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА – ВКЛАДЫШ» ДВС

Аннотация: в статье представлена математическая модель и реализованный на её основе в среде Microsoft Excel расчетный инструмент для анализа работы трибоузла «шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника». Модель позволяет в зависимости от частоты вращения идентифицировать режим трения (жидкостный или полужидкостный), рассчитывать мощность механических потерь и прогнозировать интенсивность изнашивания. Приведены результаты параметрического исследования для диапазона частот вращения от 250 до 5000 об/мин. Выполнена верификация модели путем сравнения с данными специализированных расчетов (погрешность не превышает 5%), что подтверждает возможность её применения на этапе предварительного проектирования ДВС.
Ключевые слова: трибология; подшипник скольжения; коленчатый вал; механические потери; интенсивность изнашивания; математическая модель; ДВС.

Подшипники скольжения коленчатого вала являются одними из наиболее нагруженных узлов двигателя внутреннего сгорания, и на их долю приходится до 20–25% от всех механических потерь [1]. Эффективность и ресурс данного трибоузла напрямую зависят от режима трения. Наиболее благоприятным является режим жидкостного трения, при котором поверхности вала и вкладыша полностью разделены масляной пленкой, а механический износ

практически отсутствует. Однако в реальных условиях эксплуатации, особенно при пуске, останове и работе на малых оборотах, возникает режим полужидкостного (смешанного) трения. Он характеризуется частичным контактом микронеровностей, что приводит к повышенным потерям энергии и интенсивному изнашиванию [2, 3].

Экспериментальное определение этих характеристик требует наличия готового образца двигателя, что затруднительно на ранних стадиях проектирования. В то же время, применение высокоточных CAD/CAE-систем (ANSYS, AVL Excite) для решения подобных задач зачастую избыточно и требует значительных временных и финансовых затрат. В связи с этим, целью данной работы является создание физически обоснованной, но доступной математической модели и расчетного инструмента в среде Microsoft Excel для моделирования потерь на трение и изнашивания в трибоузле «шейка коленчатого вала – вкладыш».

Математическая модель трибоузла. Моделирование базируется на раздельном учете двух основных режимов трения. Ключевым критерием, определяющим выбор расчетного алгоритма, является сравнение расчетной минимальной толщины смазочного слоя h_{min} с критической толщиной $h_{\text{кр}}$, которая определяется суммой высот микронеровностей шеек вала $h_{\text{вал}}$, вкладыша $h_{\text{вкл}}$ и деформации шипа $h_{\text{д}}$:

$$h_{\text{кр}} = h_{\text{вал}} + h_{\text{вкл}} + h_{\text{д}}$$

Если $h_{min} > h_{\text{кр}} + 2$ мкм, то расчет ведется по формулам гидродинамической теории смазки (жидкостное трение). В противном случае активируется алгоритм расчета контактного взаимодействия (полужидкостное трение).

Моделирование жидкостного трения. В данной области потери на трение определяются исключительно вязкостью масла η и скоростью вращения n. Мощность механических потерь $N_{\text{тр}}$ рассчитывается по классической формуле [4]:

$$N_{\text{тр}} = \text{К}_c \cdot \left(\frac{\pi \cdot n \cdot d_B}{30}\right)^2 \cdot \frac{\eta \cdot 1}{2 \cdot \varepsilon}$$

где К_c – коэффициент сопротивления вращению шипа (функция относительного эксцентриситета χ); d_B и l – диаметр и длина подшипника; ε – относительный зазор.

Моделирование полужидкостного трения и изнашивания. При нарушении гидродинамического клина модель переключается на расчет параметров контактного взаимодействия. На этом этапе решаются две взаимосвязанные задачи:

1. **Расчет силы трения.** Определяется фактическая площадь контакта микронеровностей A_c и контурное давление P_c. На основе физико-механических свойств материалов (модуль упругости E, твердость HB) вычисляется коэффициент трения f_s и, как следствие, мощность потерь в переходном режиме.

2. **Прогнозирование износа.** Интенсивность изнашивания I_h рассчитывается по методике, учитывающей фрикционную усталость материала вкладыша [5]. Для случая упругого ненасыщенного контакта, характерного для приработанных подшипников, интенсивность изнашивания является функцией контактного давления P_c, фрикционных характеристик пары трения (τ_0,β) и предела прочности материала σ_{BM}. . Суммируя приращения износа за цикл нагружения, модель позволяет прогнозировать скорость изнашивания $\upsilon_{\omega,max}$ и теоретический ресурс подшипника R_h до достижения предельно допустимого зазора.

Исходные данные и реализация в MS Excel. Разработанный алгоритм реализован в среде Microsoft Excel с использованием встроенных логических функций. В качестве объекта моделирования выбран коренной подшипник бензинового двигателя со следующими параметрами: диаметр шейки $d_B = 54$ мм; длина $l = 22$ мм; нагрузка $N = 6600\,H$; смазочный материал – моторное масло 5W-40 (вязкость $\eta = 0{,}014$ Па · с). Материал вкладыша – баббит ($E_{\text{вкл}} = 4{,}8 \cdot 10^{10}$ Па), материал вала – сталь ($E_{\text{вал}} = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па). Расчеты проводились для диапазона частот вращения коленчатого вала n от 250 до 5000 об/мин.

Результаты моделирования и их анализ. Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты расчета

n, об/мин	h min, мкм	Режим	Fтр	Nтр, Вт	I (Износ)
33	0,416	Полужидкостный	12,01712	1,177324	7,00E-11
66	0,690	Полужидкостный	24,03425	4,709297	4,16E-11
99	0,925	Полужидкостный	36,05137	10,59592	3,07E-11
132	1,138	Полужидкостный	48,06849	18,83719	2,48E-11
165	1,335	Полужидкостный	60,08561	29,43311	2,09E-11
198	1,521	Полужидкостный	72,10274	42,38368	1,83E-11
231	1,697	Полужидкостный	84,11986	57,68889	1,63E-11
264	1,865	Полужидкостный	96,13698	75,34876	1,47E-11
297	2,027	Полужидкостный	108,1541	95,36327	1,35E-11
330	2,182	Полужидкостный	120,1712	117,7324	1,24E-11
363	2,333	Полужидкостный	132,1883	142,4562	1,16E-11
396	2,479	Полужидкостный	144,2055	169,5347	1,09E-11
429	2,621	Полужидкостный	156,2226	198,9678	1,02E-11
462	2,760	Полужидкостный	168,2397	230,7556	9,67E-12
495	2,895	Полужидкостный	180,2568	264,898	9,18E-12
528	3,027	Полужидкостный	192,274	301,395	8,75E-12
561	3,156	Полужидкостный	204,2911	340,2467	8,36E-12
594	3,283	Полужидкостный	216,3082	381,4531	8,01E-12
627	3,407	Полужидкостный	228,3253	425,0141	7,69E-12
660	3,529	Жидкостный	0	7,234618	0

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Модель четко фиксирует переход от полужидкостного трения к жидкостному при достижении частоты вращения ≈660 об/мин. При пусковых оборотах ($n = 250$ об/мин) расчетная толщина масляного слоя $h_{min} = 1{,}8$ мкм меньше критической $h_{\text{кр}} \approx 3{,}5$ мкм, что приводит к активации алгоритма расчета износа.

2. Интенсивность изнашивания I имеет ненулевое значение только в зоне полужидкостного трения. Как только достигается устойчивый гидродинамический клин ($n \geq 750$ об/мин), механический износ поверхностей прекращается ($I = 0$). Это полностью соответствует фундаментальным положениям трибологии.

3. В зоне жидкостного трения мощность потерь $N_{\text{тр}}$ возрастает монотонно, подчиняясь квадратичной зависимости от оборотов, что обусловлено ростом сопротивления вязкому сдвигу масляного слоя.

Верификация модели. Проверка адекватности разработанной модели проводилась путем сравнения с эталонными данными численного моделирования гидромеханических характеристик (ГМХ) подшипников двигателя-аналога 4Т371, полученными при решении полного уравнения Рейнольдса в специализированном ПО [6]. При идентичных начальных условиях ($n = 2000$ об/мин) мощность потерь, рассчитанная по разработанной упрощенной модели, составила 315 Вт, в то время как в эталоне – 328,8 Вт. Относительная погрешность не превысила **4,2%**. Столь незначительное расхождение подтверждает корректность принятых допущений и приемлемую для инженерных задач точность разработанного инструмента.

Заключение. Разработанный в среде MS Excel расчетный модуль позволяет эффективно моделировать работу трибоузла «шейка коленчатого вала – вкладыш». Инструмент обеспечивает:

1. Идентификацию режима трения в зависимости от частоты вращения;

2. Расчет мощности механических потерь как в режиме жидкостного, так и полужидкостного трения;

3. Прогнозирование интенсивности изнашивания и теоретического ресурса подшипника.

Погрешность модели относительно специализированных CFD-пакетов не превышает 5%, что делает ее пригодной для использования в учебном процессе и на этапе предварительного проектирования ДВС для экспресс-оценки влияния конструктивных и эксплуатационных параметров на эффективность и долговечность подшипниковых узлов.

Библиографический список

1. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М.: Высшая школа, 2003. – 496 с.

2. Загайко С.А. Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: учебное пособие. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.
3. Задорожная Е.А. Изнашивание узлов трения механизмов и машин. Часть 1. Гидродинамические подшипники скольжения: учебное пособие. – Челябинск: ЮУрГУ, 2020. – 163 с.
4. Воскресенский, В.А. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка) / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков. – М.: Машиностроение, 1989. – 329 с.
5. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Прокопьев, В.Н. Применение пакетов прикладных программ при обосновании конструктивных параметров подшипников коленчатых валов / В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – № 23 (123). – С. 13–19.

© Ахмадуллин Т.Р., 2026

УДК 621.891

Т. М. АВХАДИЕВ
tagir.avkhadiyev@bk.ru
Научный руковод. – канд. техн. наук, доц. кафедры ДВС С.А. ЗАГАЙКО

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ В ПАРЕ ТРЕНИЯ «КУЛАЧОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ВАЛА - ТОЛКАТЕЛЬ»

Аннотация: данная статья посвящена исследованию процессов трения и изнашивания пары трения «кулачок распределительного вала – толкатель»
Ключевые слова: трение, изнашивание, ГРМ, ДВС, кулачок, толкатель

Введение

В современном двигателестроении одной из ключевых задач является повышение эффективности, ресурса и надёжности газораспределительного механизма (ГРМ) при одновременном снижении удельного расхода топлива. Особое внимание уделяется снижению механических потерь на трение и изнашивание, поскольку именно эти процессы в значительной степени определяют долговечность и экономичность двигателя внутреннего сгорания. В этом контексте пара трения «кулачок распределительного вала — толкатель» занимает центральное место: она работает в условиях высоких контактных нагрузок, переменных скоростей и сложных режимов смазки, а её отказы приводят к серьёзным последствиям для всего двигателя.

Анализ состояния вопроса и история развития

Проблема трения и изнашивания деталей ГРМ возникла с появлением первых ДВС в конце XIX века. Первоначально усилия инженеров были направлены на обеспечение геометрической точности профиля кулачка и выбор износостойких материалов. С ростом форсирования двигателей в середине XX века проблема износа вышла на первый план, что стимулировало развитие трибологических исследований: от простого наблюдения за износом к изучению его механизмов (адгезионного, абразивного, усталостного) и применению теории упругости и гидродинамической смазки.

Сегодня проблема остается актуальной по нескольким причинам:

- Жесткие экологические нормы (Евро-5, Евро-6) и требования к топливной экономичности требует снижения механических потерь, в том числе в ГРМ.
- Рост литровой мощности, использование турбонаддува и маловязких масел усложняют условия работы пары трения.
- Внедрение систем изменения фаз газораспределения предъявляет новые требования к стабильности и долговечности работы кулачков и толкателей.

Развитие вычислительной техники позволило перейти к детальному математическому моделированию процессов в контакте, включая нестационарные режимы эластогидродинамической смазки (ЭГД), влияние микрогеометрии поверхностей и создание новых материалов.

Методы исследования трения и изнашивания

Экспериментальные методы.

Экспериментальные методы – включают прямые и косвенные измерения на работающем двигателе, а также испытания на специализированных стендах и трибометрах. Позволяющие воспроизводить кинематику и нагружение узла в контролируемых условиях.

Прямое измерение момента трения на работающем двигателе. Наиболее достоверную информацию о потерях на трение в паре «кулачок распределительного вала – толкатель» дают методы, реализуемые на работающем двигателе без нарушения его целостности.

Тензометрический метод предполагает наклейку тензодатчиков на поверхность толкателя или на специальный вставной элемент, передающий усилие от кулачка. По деформации рассчитывают тангенциальную составляющую силы в контакте, что позволяет вычислить момент трения.

Стендовые испытания с использованием трибометрических установок. Для изолированного изучения трибологических характеристик без влияния других узлов двигателя применяют специализированные стенды.

Методы оценки теплового состояния контакта. Температура в зоне фрикционного контакта является интегральным показателем интенсивности

трения. Для ее измерения применяют микроминиатюрные термопары, вмонтированные в толкатель или кулачок на минимальном расстоянии от рабочей поверхности.

Методы оценки изнашивания

Профилометрия – измерение профиля поверхности до и после испытаний с помощью контактных (алмазная игла) или бесконтактных (лазерная интерферометрия, конфокальная микроскопия) профилометров.

Гравиметрический метод – взвешивание деталей с высокой точностью до и после испытаний, для интегральной оценки износа.

Метод радиоактивных индикаторов – непрерывный контроль интенсивности изнашивания.

Феррогрфия – метод анализа частиц износа, извлекаемых из масла магнитным полем.

Микроскопия (оптическая, электронная, атомно-силовая) для изучения морфологии повреждений.

Теоретические методы.

Динамическое моделирование механизма газораспределения. Математическое моделирование сил, действующих в механизме ГРМ, базируется на решении системы дифференциальных уравнений движения толкателя и клапана с учетом жесткости пружины, зазоров, демпфирования и инерционных нагрузок.

Эластогидродинамическая теория смазки (ЭГД). Для более точного прогнозирования потерь на трение и оценки толщины масляной пленки применяют методы эластогидродинамической теории смазки. В рамках ЭГД-подхода совместно решаются уравнение Рейнольдса для смазочного слоя, уравнения упругости для деформируемых тел и уравнение теплопроводности.

Моделирование изнашивания. Прогнозирование износа пары трения базируется на феноменологических моделях, связывающих интенсивность изнашивания с контактными параметрами. Наиболее широко используется модель Арчарда, в которой объём износа пропорционален нормальной нагрузке и пути трения и обратно пропорционален твёрдости материала.

Комбинированные методы.

Наиболее объективные результаты получают при совместном использовании экспериментальных и расчетных методов. Расчетно-экспериментальная методика предполагает проведение ограниченного объема физических испытаний, результаты которых служат для идентификации параметров математической модели (коэффициентов трения, граничных условий теплообмена, фактической жесткости системы). После калибровки модель используется для прогнозирования потерь на трение и износа в широком диапазоне режимов и для проведения параметрической оптимизации.

Конструктивные особенности, условия работы и материалы

Условия работы

Пара трения «кулачок распределительного вала и толкатель» является одной из самых уязвимых с точки зрения надежности и ресурса. В данной паре

трения реализуется преобразование вращательного движения распределительного вала в возвратно-поступательное движение клапана, связующим элементом между распределительным валом и клапаном является толкатель. Условия работы этой пары сочетают высокие контактные напряжения, переменные скорости скольжения, повышенные температуры, нехватка смазки в зоне контакта и периодические ударные нагрузки.

Виды и особенности кулачков

Дисковые (плоские) – наиболее распространенный тип. Кулачок выполнен в форме диска с профильным пазом или выступом, благодаря чему толкатель перемещается перпендикулярно оси вращения.

Цилиндрические (барабанные) – профиль располагается на боковой стороне цилиндрического элемента, а движение толкателя происходит вдоль оси вала.

Торцевые – профиль размещен на торцевой части цилиндра, а перемещение толкателя происходит параллельно оси вращения.

Линейчатые (копиры) – сам кулачок совершает возвратно-поступательное движение, а толкатель перемещается поперечно относительно направления перемещения кулачка.

Виды и особенности толкателей

Остроконечный – простейшая форма с минимальной зоной соприкосновения. Из-за маленькой площади соприкосновения с кулачком остроконечный толкатель имеет высокий износ рабочих поверхностей, что ограничивает его применение в механизмах с большими нагрузками.

Роликовый – оснащен подшипником качения на конце толкателя, что существенно уменьшает трение, увеличивает долговечность конструкции и позволяет передавать значительные усилия на больших скоростях.

Плоский (тарельчатый) – рабочая поверхность плоская либо слегка выпуклая. Простая геометрия данного толкателя упрощает изготовление и снижает себестоимость детали по сравнению с роликовым.

Сферический – рабочая поверхность выполнена сферической формой. Является компромиссом между остроконечным и плоским типом кулачков. При взаимодействии сферической поверхности толкателя с кулачком создается момент сил, который поворачивает толкатель вокруг своей оси.

Материалы кулачков и толкателей – специальные легированные стали, часто с упрочняющими покрытиями (нитридирование, DLC-покрытия), что позволяет выдерживать экстремальные контактные нагрузки.

Заключение

Проблема трения и изнашивания в паре трения «кулачок распределительного вала – толкатель» остается одной из самых ключевых в двигателестроении. Современные методы исследования - от экспериментальных до комплексных расчетно-экспериментальных – позволяют не только анализировать, но и прогнозировать поведение этой пары в различных условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: учебное пособие / С.А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.
2. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. Крагельский И.В. (1978) – 400 с.

©Авхадиев Т.М., 2026

УДК 629.3.017:656.13

Р. Ф. АВЗАЛОВА
avzalova.life@mail.ru
Науч. руководитель – старший преподаватель Д. Р. РЕЗВАНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ FIAT DUCATO 244 ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЭКСПЛУАЦИОННОЙ МАССЫ

Аннотация: статья посвящена анализу конструктивной безопасности коммерческого автомобиля Fiat Ducato. Рассматриваются ключевые аспекты активной и пассивной безопасности. На основе комплексного изучения инженерных решений дается оценка недостаткам конструктивной безопасности автомобиля.
Ключевые слова: конструктивная безопасность, пассивная безопасность, Feat Ducato, тормозной диск

В условиях стремительного развития автомобильной промышленности вопрос конструктивной безопасности транспортных средств становится одной из приоритетных задач инженерного проектирования. Безопасность автомобиля определяется не только наличием современных электронных систем, но и комплексом конструктивных решений, направленных на снижение риска травматизма водителя и пассажиров при дорожно-транспортных происшествиях.

Конструктивная безопасность- это свойство предотвращать ДТП, снижать тяжесть их последствий и минимизировать вред жизни и здоровью участников дорожного движения, а также окружающей среде. Для оценки конструктивной безопасности её подразделяют на активную, пассивную, послеаварийную и экологическую безопасность. Активная безопасность транспортных средств-свойство транспортного средства снижать вероятность возникновения ДТП. Активная безопасность проявляется в период, соответствующий начальной

фазе ДТП, когда водитель в состоянии изменить характер движения транспортного средства. Под пассивной безопасностью подразумевают комплекс эксплуатационных свойств транспортного средства, обеспечивающих снижение тяжести последствий ДТП. Пассивная безопасность вступает в действие, если водителю не удалось избежать аварии, и обеспечивает уменьшение инерционных нагрузок на водителя и пассажиров, ограничение перемещения их в кабине, защиту от травм, увечий при ударе, устранение возможности выбрасывания из кабины или салона транспортного средства в момент столкновения. Послеаварийная безопасность — это свойства транспортного средства снижать тяжесть последствий ДТП. К элементам послеаварийной безопасности относятся конструктивные свойства автомобиля, предотвращающие возникновение опасных явлений (пожар, заклинивание дверей) в результате ДТП. К элементам послеаварийной безопасности можно также отнести средства аварийной сигнализации и связи, средства оказания пострадавшим медицинской помощи. Экологическая безопасность — это свойство транспортного средства снижать степень отрицательного влияния на окружающую среду в процессе всего срока эксплуатации. Основные негативные последствия, связанные с эксплуатацией автомобиля, — это потери полезной площади земли, загрязнение атмосферного воздуха, истощение природных ресурсов, уничтожение флоры и фауны, шум, вибрации, электромагнитные излучения.

Основными элементами конструктивной безопасности являются: несущая структура кузова, зоны программируемой деформации, энергопоглощающие элементы, ремни безопасности и подушки, конструкция сидений и рулевой колонки. С развитием технологий большое внимание уделяется применению высокопрочных сталей, алюминиевых сплавов и композитов, которые позволяют добиться высокого уровня жесткости при сниженной массе автомобиля.

Рис.1 Виды конструктивной безопасности

Конструктивные решения Fiat Ducato. Fiat Ducato — многоцелевой коммерческий фургон, выпускаемый с 1981 года и неоднократно модернизированный. Современные версии, разработанные в рамках концерна Stellantis, получили усиленные кузовные элементы, рассчитанные на поглощение ударной энергии при фронтальных и боковых столкновениях. Кузов Ducato построен по схеме несущего монокока с продольными лонжеронами, что обеспечивает прочность при ударе. Особое внимание уделено жёсткости кабины, выполняющей роль защитной капсулы. Передняя часть автомобиля имеет зоны программируемой деформации, которые поглощают кинетическую энергию столкновения. С 2014 года модель оснащается фронтальными и боковыми подушками безопасности, контролем давления в шинах и ассистентом трогания на подъёме. В более новых версиях появились помощники водителя: автоматическое торможение при угрозе столкновения, контроль усталости, ассистент удержания полосы.

Преимущества модели с точки зрения активной и пассивной безопасности:

1. Lane Keep Assist (LKA): Система удержания в полосе, которая корректирует траекторию движения при непреднамеренном съезде с полосы.

2. Blind‑Spot Assist и Rear Cross Path Detection: Ассистенты контроля слепых зон и предупреждения о помехах при движении задним ходом, что особенно важно для габаритных автомобилей.

3. Усовершенствованный Electronic Stability Control (ESC): Система курсовой устойчивости, дополненная функциями стабилизации при порывах бокового ветра и контроля за движением с прицепом.

4. Усиленные стойки и пороги центральной части кузова образуют прочный каркас, предотвращающий деформацию салона при серьезных фронтальных и боковых ударах.

Недостатки и потенциальные риски активной и пассивной безопасности:

1. Уязвимость зоны ног водителя. При сильном фронтальном столкновении возможно смещение педального узла, что создает повышенный риск травм ног.

2. Отсутствие боковых подушек и шторок в базовых версиях. Особенно в ранних комплектациях недостаток этих элементов значительно снижает защиту при боковом ударе или опрокидывании.

3. Значительная масса кузова. Конструкция, выполненная преимущественно из стали, обладает большим весом, что негативно сказывается на тормозном пути и динамике автомобиля, также является одной из причин быстрого износа тормозных дисков и колодок.

Владельцы Fiat Ducato часто сталкиваются с аномально быстрым износом тормозных колодок и дисков. Основные причины — вес автомобиля, режим эксплуатации и качество запчастей. Но есть один скрытый фактор, который ускоряет износ в разы — перегрев тормозного диска. Рассмотрим данный пример более подробно.

Почему перегрев тормозных дисков влияет на износ тормозов:

1. Деформация металла — при высоких температурах структура диска меняется, он теряет прочность и начинает неравномерно изнашиваться.

2. Появление трещин — от перегрева на диске образуются микротрещины, которые ускоряют его разрушение.

3. Проблемы с торможением— перегретая тормозная жидкость может закипеть, что снижает эффективность всей системы.

Варианты решения проблемы:

1. Модернизация тормозных компонентов. Необходимо установить вентилируемые или перфорированные тормозные диск и увеличенного диаметра, которые обеспечивают лучший теплоотвод. Важно за менить стандартные тормозные колодки на высокотемпературные с улучшенны ми фрикционными свойствами.

2. Регулярное техническое обслуживание. Требуется проводить своевременную замену тормозной жидкости каждые 2 год а, проверять состояние пыльников суппортов и отсутствие подклинивания меха

низмов. Необходимо контролировать толщину тормозных дисков и равномерно сть износа колодок, а также чистоту вентиляционных каналов

3. Профилактический контроль. Выполнять эту процедуру не только после ремонта ходовой части, но и профилактически — каждые 20 000 км. Неправильные углы установки колес приводят к повышенному сопротивлению качению, что вынуждает водителя чаще пользоваться тормозами.

В ходе работы я проанализировала конструктивную безопасность автомобиля Fiat Ducato, рассмотрев активные, пассивные и послеаварийные элементы. Выявлены ключевые преимущества модели и недостатки, такие как уязвимость зоны ног водителя и повышенный износ тормозов. Проведён анализ влияния состояния тормозного диска на эффективность тормозной системы. Предложены меры по диагностике и обслуживанию для повышения безопасности и надёжности автомобиля. В дальнейшем планирую провести сравнение с другими моделями и разработать рекомендации по совершенствованию конструкции.

Библиографический список

1. Князев А. В. Конструктивная безопасность автомобилей. — М.: МАДИ, 2020.

2. Журнал «Авторевю». Тест Fiat Ducato: проверка безопасности. — 2021.

3. Федоров В. В. Пассивная безопасность транспортных средств. — М.: Транспорт, 2018.

4. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту Fiat Ducato. – М.: Автопресс, 2021. – 264 с.

©Авзалова Р.Ф., 2026

УДК 621.891

С.А. БЕЛОВ
sb163186@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. кафедры ДВС С.А. ЗАГАЙКО

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В РОЛИКОВОМ И ПЛОСКОМ ТОЛКАТЕЛЕ ГРМ

Аннотация: данная статья посвящена исследованию процесса трения и износа пары трения, образованных кулачком распределительного вала и роликовом и плоским толкателями клапана двигателя внутреннего сгорания.
Рассматриваются механизмы возникновения трения и износа, а также методы их *предотвращения.*

Ключевые слова: трение, изнашивание, газораспределительный механизм

Газораспределительный механизм (ГРМ) является важной частью в функционировании двигателей внутреннего сгорания, обеспечивая правильное регулирование площади проходного сечения клапана (перемещение толкателя клапана) в зависимости от угла поворота распределительного вала. Важнейшими компонентами этого ГРМ являются кулачки распредвалов, а также толкатели клапанов. Их взаимодействие сопровождается высокой степенью трения и большими нагрузками. Данный процесс к приводит быстрому износу указанных элементов. Понимание механизмов трения и износа позволяет разработать эффективные стратегии продления срока службы и улучшения эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания.

Плоский толкатель (ПТ) – это классический элемент газораспределительного механизма, который передает усилие от кулачка распределительного вала на клапан. В отличие от роликового, он не имеет подшипника – его рабочая поверхность скользит непосредственно по кулачку. В результате трения скольжения в паре образуются повышенные нагрузки и нагрев. В этой связи требуются прочные материалы (например, закаленный чугун или сталь) и качественное моторное масло с противоизносными присадками. Плоские толкатели чувствительны к скорости нарастания профиля кулачка. Так – агрессивные фазы быстро приводят к задирам и износу. ПТ имеет ряд недостатков и преимуществ, которые представлены на рисунке 1.

Рис. 1. Недостатки и преимущества ПТ

Роликовый толкатель — это элемент газораспределительного механизма, передающий усилие от кулачка распредвала на клапан. В отличие от классического ПТ, работающего скольжением, в данном механизме используется небольшой подшипник — ролик, который катится по кулачку. Это ключевая особенность, обеспечивающая главные преимущества:

1. резкое снижение трения в паре «кулачок-толкатель»,
2. уменьшение потерь мощности и нагрева.

Благодаря ролику можно применять агрессивные профили кулачков такие как — быстрое открытие и закрытие клапанов, без риска задиров, что улучшает наполнение цилиндров и работу на высоких оборотах. Кроме того, роликовый толкатель менее требователен к противоизносным присадкам в масле. Однако есть и недостатки:

- более высокая стоимость,
- сложность конструкции,
- чувствительность к загрязнению масла (ролик может заклинить).

При износе — появлении люфта или заклинивании ролика — возникает характерный стук, и толкатель начинает разрушать кулачок распредвала, что также входит в перечень недостатков роликового толкателя.

Трение – это сила, которая возникает при соприкосновении двух тел и препятствует их движению относительно друг друга. Направлена сила трения всегда вдоль поверхности соприкосновения. При данном процессе происходит разрушение поверхностного слоя, что приводит к износу деталей. Об этом свидетельствуют изменения размеров, форм или состояния поверхности:

- появляются царапины, задиры, питтинг,
- изменяется первоначальная геометрия деталей.

Изнашивание происходит в несколько стадий, представленных на рисунке 2:

Рис.2. Изнашивание

Изнашивание пары «кулачок-толкатель» в двигателе внутреннего сгорания приводит к изменению фазы газораспределения. В результате уменьшения высоты кулачка клапан открывается на меньшую величину или вовсе перестаёт открываться, а тепловые зазоры уходят из нормы. Таким образом падает компрессия в цилиндре, ухудшается наполнение цилиндров топливно-воздушной смесью, что ведёт к потере мощности, вялой динамике и появлению пропусков зажигания, фиксируемых электронным блоком управления.

Основными факторами, влияющими на интенсивность износа данной пары трения, являются:

1. Неправильная установка фаз газораспределения:

Несоответствие момента открытия клапанов оптимальному положению относительно положения поршня приводит к увеличению нагрузок на элементы механизма и росту потерь на трение.

2. Инерционные нагрузки:

Во время движения двигателя возникают значительные силы инерции, действующие на толкатели и кулачки. Эти силы увеличивают нагрузку на поверхности контакта и приводят к повышенному износу и потерям энергии.

3. Динамические нагрузки:

Изменение направления вращения коленчатого вала вызывает дополнительные динамические нагрузки на механизм привода клапанов, что также способствует повышению потерь на трение.

4. Высокая скорость относительного перемещения:

Высокая скорость перемещения элементов механизма приводит к интенсивному износу поверхностей трения и увеличивает потери мощности.

5. Зазор в механизме:

Наличие зазоров в соединениях деталей механизма создает условия для увеличения износа трущихся поверхностей и роста потерь на трение.

6. Качество смазочного материала:

Использование некачественного масла или недостаточная подача смазки снижает эффективность работы механизмов и повышает износ поверхностей трения.

7. Геометрия профиля кулачка:

Неправильно выбранная геометрия профиля кулачка может привести к неравномерному распределению давления на поверхность толкателя, вызывая повышенный износ и увеличение потерь на трение.

8. Материал толкателей:

Материал толкателей оказывает значительное влияние на коэффициент трения и износостойкость пар трения.

Существуют несколько способов минимизации потерь на трение данной пары:

1. Правильный выбор материалов для изготовления деталей:

- Использование специальных сплавов и легированных сталей.
- Нанесение защитных покрытий (например, хромирование).

2. Оптимизация геометрии кулачка:
- Подбор оптимальной формы профиля кулачка.
- Улучшение динамики взаимодействия кулачка и толкателя.
3. Обеспечение качественной смазки:
- Установка эффективных масляных насосов.
- Регулярный контроль уровня и качества масла.

В роликовом толкателе ГРМ трение оказывается многократно ниже, чем в плоском, однако полностью не исчезает — оно просто переносится в другие места и меняет характер. В исправном роликовом толкателе доминирует трение качения: между иглами или шариками подшипника и беговыми дорожками потери минимальны (коэффициент трения около 0,002–0,005), что в 10–20 раз меньше, чем трение скольжения у плоского толкателя. Также между роликом и кулачком распредвала при нормальной работе возникает преимущественно трение качения с незначительным микроскольжением — это всё равно неизмеримо легче, чем скольжение всей рабочей поверхности плоского толкателя.

В плоском толкателе ГРМ главной проблемой является высокое трение скольжения. Основная пара — между рабочей поверхностью толкателя и кулачком распредвала — работает в режиме скольжения с коэффициентом трения примерно 0,08–0,15. В момент максимального давления на вершине кулачка масляная плёнка может разрываться, и трение резко возрастает. Помимо этого, трение скольжения возникает также между толкателем и направляющей (посадочным каналом в ГБЦ) при возвратно-поступательном движении.

Таким образом, с точки зрения минимизации механических потерь и повышения ресурса, роликовый толкатель является безусловно предпочтительным для современных форсированных и высокооборотных двигателей. Он обеспечивает многократное снижение потерь на трение и позволяет реализовать агрессивные фазы газораспределения. Однако его применение требует более дорогого производства, качественной фильтрации масла и регулярного обслуживания. Плоский толкатель остаётся технически и экономически оправданным решением только для бюджетных, низкофорсированных или устаревших конструкций ДВС, где простота и дешевизна перевешивают потери на трение.

Библиографический список

1. Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: учебное пособие / С.А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.

© Белов С.А., 2026

УДК 621.43.068.2

М.А. ДЕМЧУКОВ
demchukovmax@mail.ru
Науч. руководитель – д-р техн. наук, проф. Р.Д. ЕНИКЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫХЛОПА ДЛЯ СОЗДАНИЯ РЕАКТИВНОЙ ТЯГИ В ПОРШНЕВОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

Аннотация: в статье рассматривается способ создания дополнительной реактивной тяги в поршневых летательных аппаратах за счёт энергии отработавших газов. Выполнен тепловой расчёт двигателя ДДА-8V, определены параметры рабочего цикла. Предложена методика оценки реактивной силы на выхлопе. Показано, что при статической тяге винта 10 кгс, дополнительная тяга выхлопной системы может составить около 1,5 кгс что составляет 15% от тяги винта. Определены пути максимизации реактивной силы и ограничения, связанные с ухудшением экономичности.
Ключевые слова: реактивная тяга; выхлопная система; отработавшие газы; ДВС

Поршневые двигатели работают на основе преобразования тепловой энергии в механическую работу. Рабочий цикл силовой установки состоит из впуска свежего заряда, сжатия смеси, расширение сгоревшей смеси и выпуска отработавших газов. В поршневых летательных аппаратах, тяга создается через вращение винта, однако часть энергии теряется в виде отработавших газов. Данную энергию можно использовать за счет изменения выхлопного тракта или рабочего процесса. Таким образом, можно получить реактивную силу, которая позволит прибавить общую полезную мощность двигателя или компенсировать потери.

Расчет действительного цикла авиационного невысотного поршневого двигателя ДДА-8V. ДДА-8V — это двухцилиндровый четырехтактный бензиновый двигатель внутреннего сгорания с воздушным охлаждением, предназначенный для БПЛА и радиоуправляемых авиамоделей. Двигатель имеет V-образную конфигурацию, рабочий объем 40,2 см³ и максимальную мощность 5,2 кВт, отношение хода поршня к диаметру 32/40=0,8, частота вращения вала двигателя при максимальной мощности 8000 мин$^{-1}$, удельный расход топлива на максимальной мощности 246 $\frac{\text{г}}{\text{кВт*ч}}$.

Параметры впуска: Давление в конце впуска p_a = 0,0866 МПа, температура в конце впуска T_a = 330 К, коэффициент остаточных газов γ_r = 0,0437.

Сжатие: Давление сжатия p_c = 1,76 МПа, температура T_c = 744,1 К, показатель политропы сжатия n_1 = 1,37.

Сгорание: Температура конца сгорания $T_z = 3052{,}6$ К, давление теоретическое $p_z = 7{,}57$ МПа, действительное $p_{zд} = 6{,}43$ МПа, степень повышения давления $\lambda = 4{,}31$.

Расширение и выпуск: Давление конца расширения $p_b = 0{,}4814$ МПа, температура $T_b = 1747$ К, показатель политропы расширения $n_2 = 1{,}245$.

Расчет винтовой тяги. Для расчёта был принят винт с диаметром 0,54 м и шагом воздушного винта 0,26 из их соотношения равным 0,49, частоты вращения двигателя и мощности, получается статическая тяга 10 кгс. Также были найдены кпд винта и реальная тяга на расчетных режимах.

Результаты приведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты расчета.

Скорости	25	50	75	100	125
Рид	43,5	36,7	34	31,3	26,5
λ	0,096	0,193	0,289	0,385	0,482
η	0,35	0,5	0,65	0,72	0,785
Рв	11,36	10,5	10,7	11,4	10,4

Расчёт реактивной силы на выхлопе. При расчете развиваемой тяги на выхлопе используются данные, полученные в расчете действительного цикла. Исходные данные для выхлопной системы: Диаметр выхлопной трубы d = 0,05 м, давление в выхлопной трубе $P_{вых}$ = 0,15 МПа, давление на срезе сопла $P_{срез}$ = 0,105 МПа, давление окружающей среды P_0 = 0,1 МПа, давление окружающей среды P_b = 0,481 МПа, температура выхлопных газов T_b = 1747 К, универсальная газовая постоянная R = 287 Дж/(кг·К), показатель адиабаты γ = 1,24.

Частота выпускных тактов:

$$f = \frac{n}{60} * 2 = \frac{6000}{60} * 2 = 266{,}67 \ \frac{\text{такт}}{\text{с}}$$

Обьем одного цилиндра:

$$V_{ц} = \frac{V_h}{\text{Цилиндры}} = \frac{0{,}0000804}{2} = 0{,}0000402 \ \text{м}^3$$

Масса газа в цилиндре перед выпуском:

Используя уравнения состояния $m_{ц} = \frac{P_{вп} * V_{ц}}{R * T_{вых}} = \frac{481360 * 0{,}0000402}{287 * 1746{,}97} =$ 0,000048 кг

Средний массовый расход через выхлоп:

$$m = m_{ц} * f = 0{,}000048 * 266{,}67 = 0{,}0129 \ \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Давление в цилиндре в момент открытия клапана намного выше, чем в трубе. Это создает скачок давления и истечение газа со скоростью, близкой к скорости звука в этих условиях.

Скорость звука в выхлопных газах:

$$\text{А} = \sqrt{\gamma * R * T_{вых}} = \sqrt{1{,}24 * 287 * 1746{,}97} = 788{,}5 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

При перепаде давлений больше, чем 2:1, скорость на срезе клапана будет равна скорости звука. Но по мере движения по трубе давление падает до $P_{\text{вых}}$. Для оценки возьмем скорость в трубе, используя формулу для дозвукового истечения из области с $P_{\text{вых}}$ в P_a.

$$V_e = \sqrt{\frac{2 * \gamma}{\gamma - 1} * R * T_{\text{вых}} * (1 - (\frac{P_a}{P_{\text{вых}}})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = 615{,}5\,\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Площадь сечения трубы:

$$A_e = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * 0{,}05^2}{4} = 0{,}00196\ \text{м}^2$$

Реактивная тяга:

$$F = m * V_e + \left(P_{\text{срез}} - P_a\right) * A_e = 0{,}0129 * 615{,}5 + (105000 - 101325) * 0{,}00196 = 15{,}2\ \text{Н}$$

Пути оптимизации. Для максимизации реактивной силы целесообразно: увеличить частоту вращения коленвала, повысить температуру выхлопных газов за счёт изменения углов зажигания, увеличение диаметра выхлопной трубы, однако чрезмерное увеличение может привести к падению скорости истечения, также увеличивается противодавление и ухудшается топливная экономичность.

Заключение. На основе теплового расчёта поршневого двигателя ДДА-8V определены параметры рабочего цикла, подтверждена возможность использования отработавших газов для создания реактивной тяги.

1. Разработана методика расчёта реактивной силы на выхлопе. Для рассмотренного режима получена *F*=15,2 Н.
2. Установлены основные пути повышения эффективности (увеличение n, T_b, оптимизация диаметра трубы) и указаны ухудшения, которые могут быть вызваны.

Библиографический список

1. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М.: Высшая школа, 2003. – 496 с.
2. Дорофеев, А. А. Основы теории тепловых реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 2018. – 312 с.
3. Кондратьев В. Движитель — воздушный винт // Моделист-Конструктор. — 1988. — № 12.

© Демчуков М.А., 2026

УДК 629.33.017:621.43

А.В. ГРИГОРЕВСКИЙ
arsdudegrig@gmail.com
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ПЕНКИН

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЯ И ЕГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: предложена методика оценки топливной экономичности на основе параметров двигателя и автомобиля, представлен результат применения данной методики на примере данных реального автомобиля и двигателя. Обосновано применение данной методики как рабочего инструмента в части анализа и улучшения топливной экономичности автомобилей.
Ключевые слова: топливная экономичность, расход топлива, двигатель внутреннего сгорания, скоростная характеристика, нагрузочная характеристика, многопараметровая характеристика, кривая используемой мощности.

Топливная экономичность – свойство, определяющее расходы топлива при выполнении автомобилем транспортной работы в различных условиях эксплуатации.

Вопрос понимания топливной экономичности автомобилей по-прежнему является одной из главных задач при разработке новых моделей и эксплуатации существующих транспортных средств. Топливная экономичность очень важна как с точки зрения экономики: стоимость топлива составляет до 20...30 % всех затрат на перевозки и до 50% при эксплуатации частного автопарка, так и с точки зрения обеспечения требуемых экологических параметров/ограничений при эксплуатации автомобилей: объем «сырых» выбросов отработавших газов (еще необработанных посредством средств нейтрализации отработавших газов), или, используя общемировой термин – raw emission, непосредственно связан прямой зависимостью с фактическим расходом топлива автомобилем.

Топливная экономичность непосредственно зависит от конструкции автомобиля. Она определяется степенью совершенства рабочих процессов двигателя и каждого элемента трансмиссии, оцениваемой соответствующими КПД, совершенством формы автомобиля, характеризуемым потерями на преодоление сопротивления воздуха, рациональностью использования массы автомобиля, оцениваемой, как вариант, коэффициентом грузоподъемности.

В настоящее время существуют стандартные способы оценки, приведенные в литературе [1, 2].

Рассмотрим поподробнее возможности оценки топливной экономичности.

Упрощенно, механическая мощность/крутящий момент вырабатываются Двигателем (в нашем случае Двигателем Внутреннего Сгорания или далее ДВС), преобразуются в трансмиссии (цепочка Сцепление → Коробка Передач, далее КПП → Главная Передача, далее ГП) и передаются и «потребляются» Колесом автомобиля.

Топливную экономичность/эффективность работы ДВС оценивают удельным параметром: удельный эффективный расход топлива g_e [г/(кВт·ч)]. Значения g_e определяются в ходе испытаний ДВС в виде следующих зависимостей:

- от частоты вращения вала двигателя – скоростных характеристик: внешняя, частичная, холостого хода;
- от нагрузки при фиксированной частоте вращения – собственно нагрузочных характеристик.

Все эти характеристики могут быть сведены в комплексную многопараметровую характеристику или engine map – см. Рис 1.

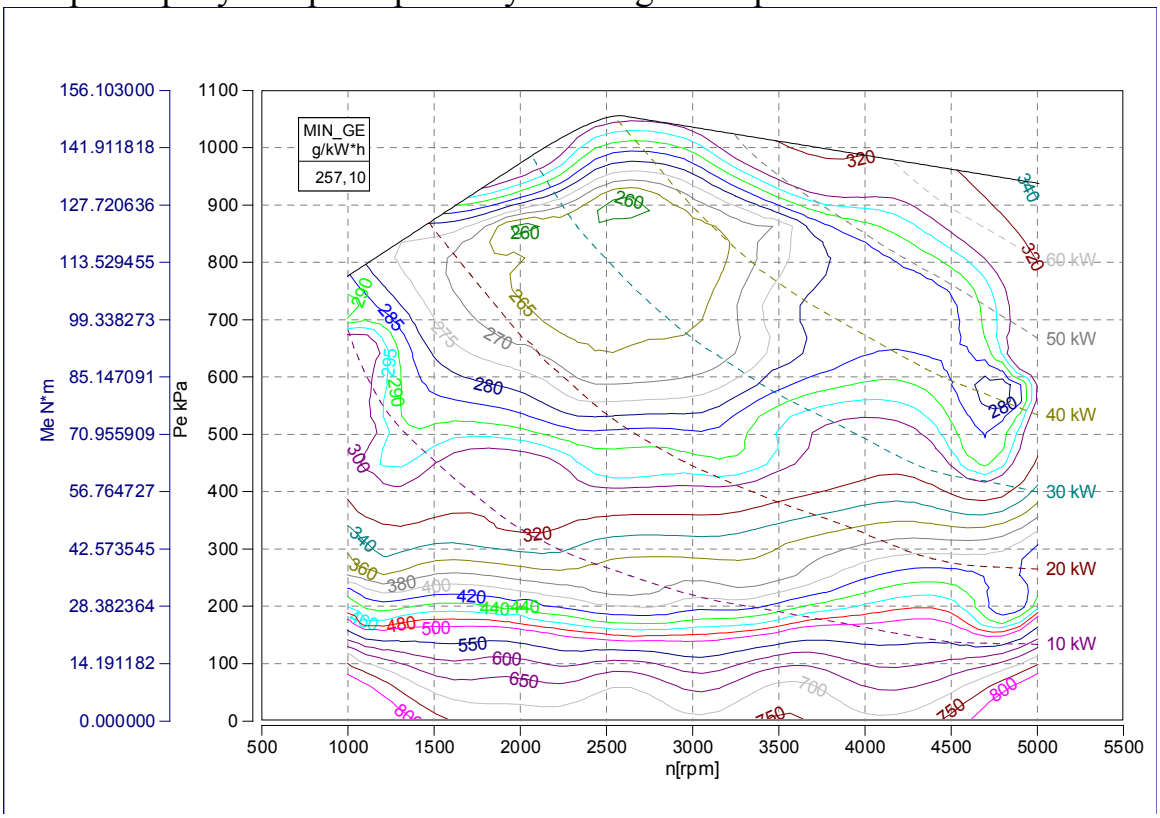


Рис. 1. Пример многопараметровой характеристики двигателя/engine map. Двигатель УЗАМ

Параметры трансмиссии характеризуются передаточным отношением и КПД в каждой передаче КПП и ГП. Эти данные могут быть оценены по методикам, описанным в литературе, либо получены непосредственно от организаций, выполняющих разработку и производство данных компонентов.

Параметры сил/моментов сопротивления на колесе автомобиля при равномерном движении принято оценивать кривой используемой мощности, далее КРИМ. КРИМ представляет собой зависимость мощности или момента

сопротивления движению автомобиля на колесе в зависимости от скорости движения автомобиля. Пример КРИМ для автомобиля Иж-2126 Ода для случая движения по ровной горизонтальной поверхности приведен на Рис. 2.

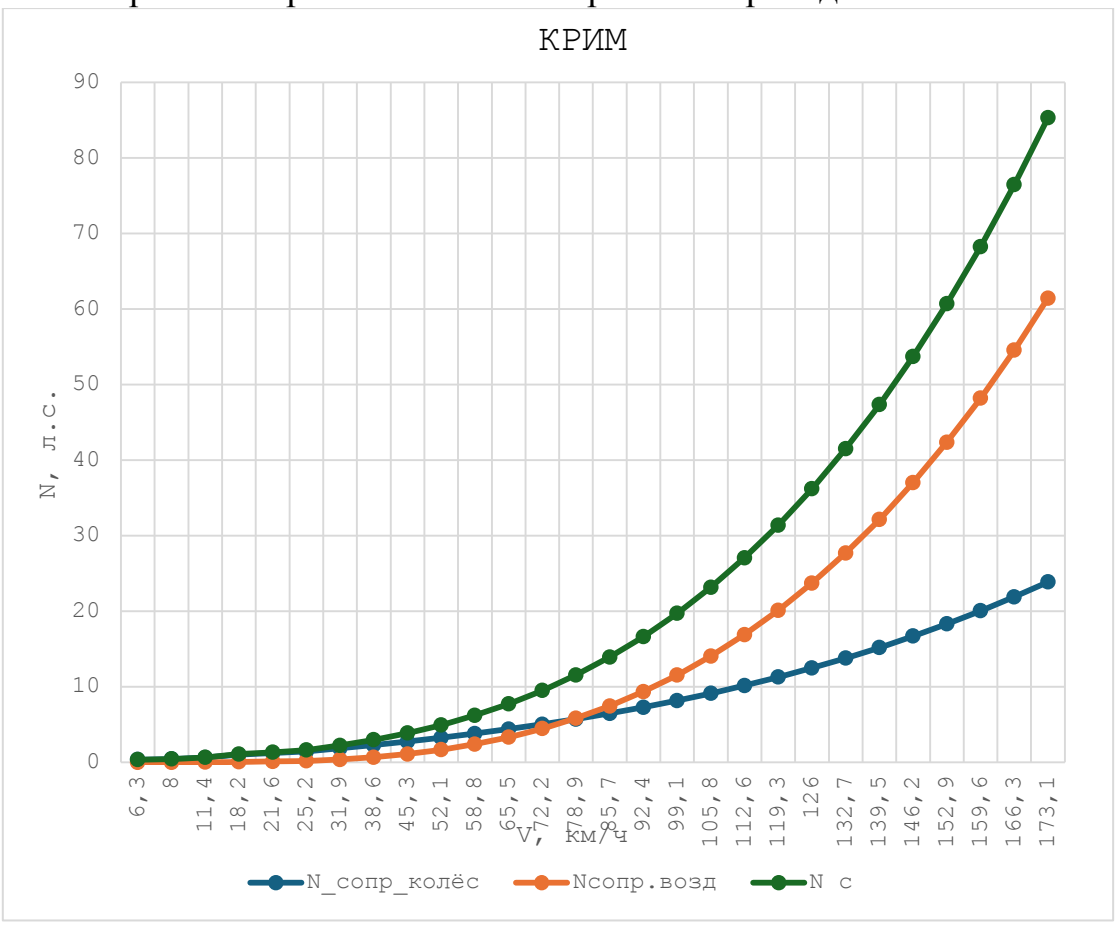


Рис. 2. КРИМ автомобиля Иж-2126 ОДА

Имея величины передаточных чисел в КПП и ГП, а также соответствующие КПД, мы можем привести момент сопротивления к выходному валу ДВС → см. Рис. 3. Каждая кривая на Рис.3 является КРИМ, приведенной к валу двигателя для конкретной передачи в КПП. В нашем анализе использованы фактические значения передаточных отношений и КПД для ГП и передач 1…5 КПП автомобиля ИЖ-2126 Ода: 3,91; 3,19; 1,964; 1,329; 1; 0,806 соответственно для передаточных отношений. Дополнительно, для исследовательских целей были проработаны параметры для гипотетических передач 6 (0,710753) и 7 (0,649635), сформированных по принципу гармонического ряда.

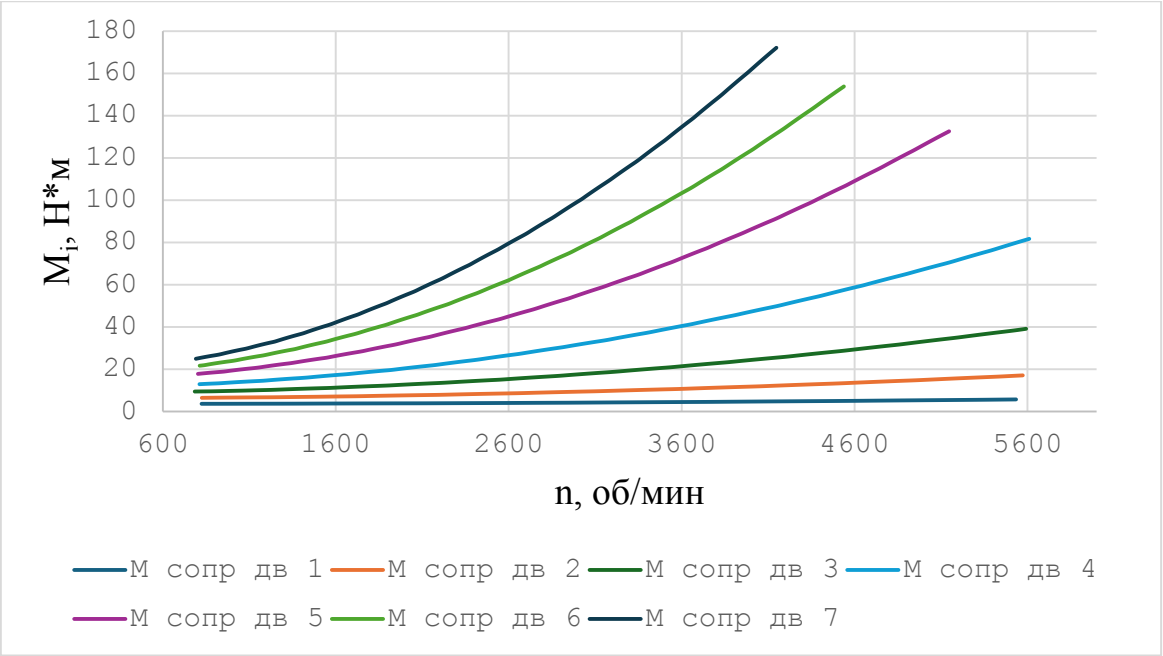


Рис. 3. КРИМ, преобразованная в кривые моментов сопротивления на валу ДВС при различных передачах в КПП. Автомобиль ИЖ-2126 Ода – Двигатель УЗАМ

Операция приведения КРИМ к валу двигателя позволяет «наложить» график Рис. 3 на многопараметровую характеристику Рис. 1, и получить требуемые значения g_e непосредственно из поверхности многопараметровой характеристики двигателя.

Далее мы можем перечитать значения g_e непосредственно в путевой расход топлива, используя формулы, приведенные в [1, 2]:

$$Q_s = \frac{g_{e\text{ф}}\, N_\text{ф}}{36\, V\, \rho_\text{т}},$$

где Q_s [л/(100км)] – путевой расход топлива, $N_\text{ф}$ [кВт] – фактическая мощность, вырабатываемая ДВС и «потребляемая» автомобилем для данного рассматриваемого режима, $g_{e\text{ф}}$ [г/(кВт·ч)] – удельный эффективный расход топлива на рассматриваемом режиме, V [км/ч] – скорость автомобиля, $\rho_\text{т}$ [кг/л] – плотность топлива.

Результат показан на Рис. 4.

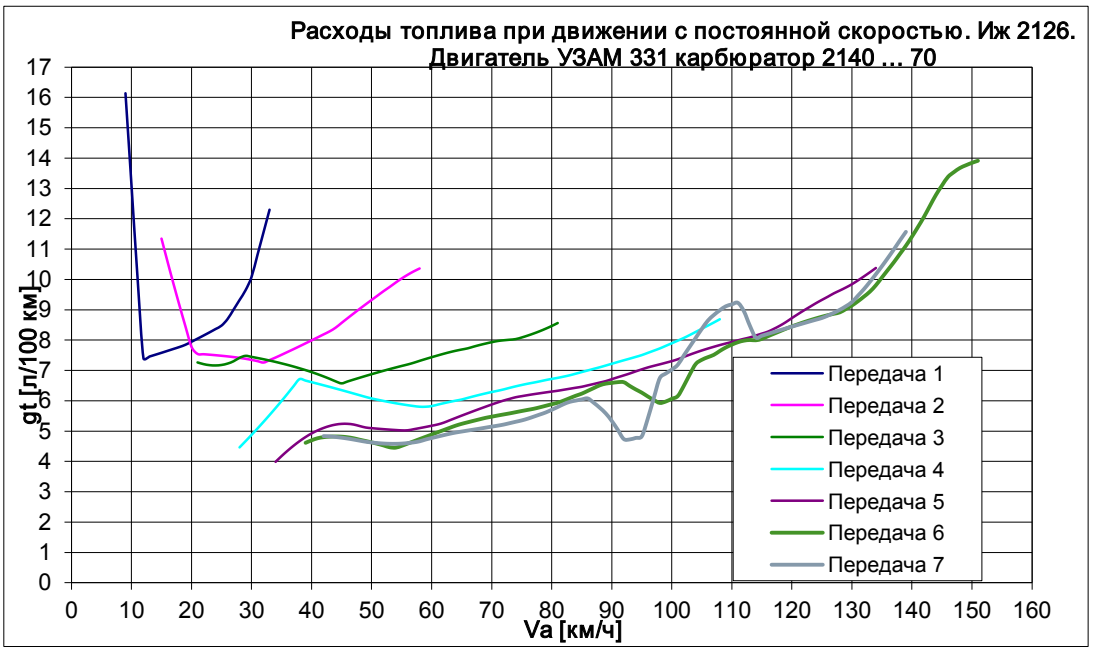


Рис. 4. Результаты расчетов топливной экономичности при различных передачах в КПП. Автомобиль ИЖ-2126 Ода – Двигатель УЗАМ

Сравнение полученных результатов с полученными от ИЖАВТО результатами фактических замеров для передач 4 и 5 демонстрирует точность до 6%. При этом форма расчетных кривых расходов топлива соответствует таковым, полученным экспериментальным путем.

Краткий анализ результатов.

1. Переход на каждую последующую повышенную передачу в пределах передач 1…5 улучшает характеристику топливной экономичности. При этом, естественно, мы понимаем, что изменяется диапазон скоростей автомобиля, на которых та или иная передача может быть задействована.

2. Улучшение экономичности при переходе с передачи 4 на 5-ю уже значительно меньше, по сравнению с улучшением экономичности при переходе 3-4 или 2-3.

3. Введение гипотетических 6-й и 7-й передач по результатам данного расчета показывает интересные результаты:

- Улучшение до 0,5…0,6 л/(100км) просматривается для 6-й передачи по сравнению с 5-й в диапазоне скоростей автомобиля 55…90 км/ч.

- Улучшение до 0,3…0,35 л/(100км) просматривается для 7-й передачи по сравнению с 6-й в диапазоне скоростей автомобиля 55…85 км/ч.

Введение «экономичных» передач для определенного диапазона скоростей возможно и применяется в мировом автомобилестроении. Целесообразность применения определяется уже экономическими и потребительскими/маркетинговыми факторами: влиянием дополнительных затрат на введение дополнительных передач на потребительские качества автомобиля и готовностью платить именно за эти качества со стороны потенциальных потребителей.

Используя тот же автомобиль с тем же двигателем можно полностью заменить механическую КПП на бесступенчатую трансмиссию с КПД 0,9 и диапазоном передаточного отношения от 0,55 до 4. Результат на Рис. 5

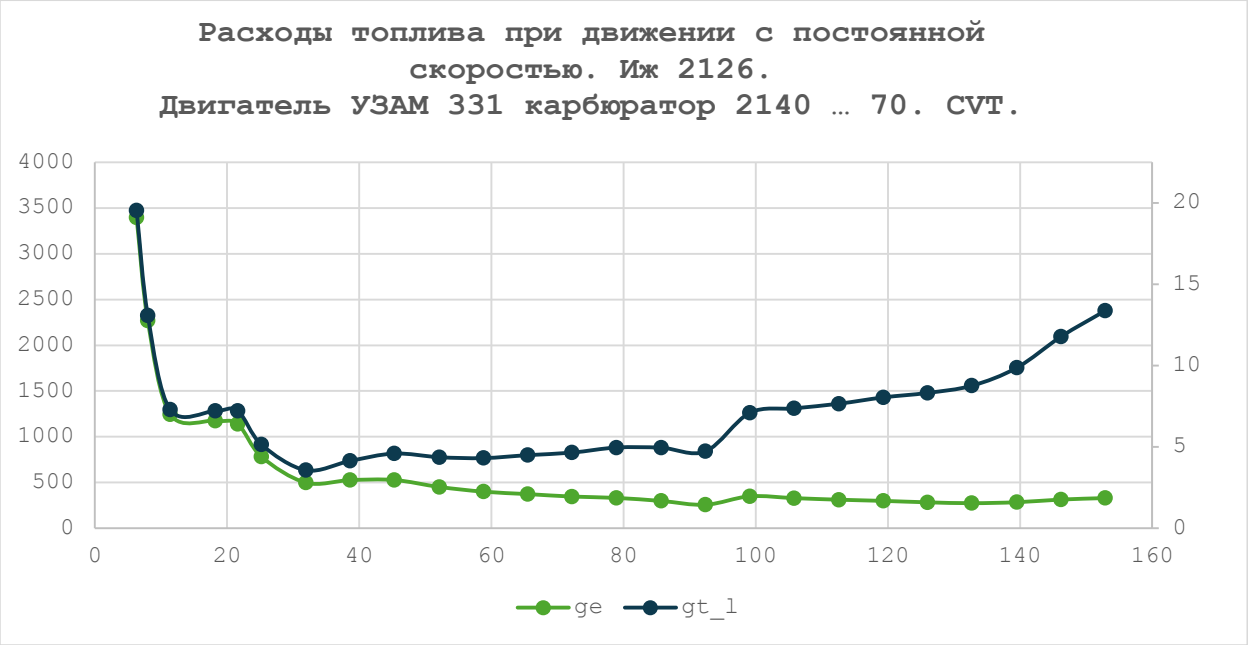


Рис.5. Результаты расчетов топливной экономичности при использовании бесступенчатой трансмиссии. Автомобиль ИЖ-2126 Ода – Двигатель УЗАМ.

Затем получены следующие значения расходов топлива для каждой КПП на двух характерных скоростных режимах, таб.1.

Таблица 1

Значения расходов топлива для каждой КПП на двух характерных скоростных режимах

V, км/ч	g_t ,л/100км		
	MT5	MT6	CVT
60	5,14	4,84	4,36
90	6,7	6,48	4,56

Анализируя эти полученные данные, можно оценить экономичность каждой КПП относительно друг друга, таб. 2.

Таблица 2

Экономия топлива при переходе на другую КПП

Скоростной режим	Переход на другую КПП	
	MT5 -> MT6	MT5 -> CVT
	Экономия топлива, %	
60 км/ч	5.836	15,175
90 км/ч	3,280	31,940

Из таблицы видно, что использование бесступенчатой трансмиссии гораздо эффективнее, чем добавление дополнительной передачи и состовляет до 32%.

В ходе экономического расчёта получены следующие результаты:

Таблица 3

Срок окупаемости по пробегу

	Переход на другую КПП	
	MT5 -> MT6	MT5 -> CVT
Скоростной режим	Срок окупаемости по пробегу, км	
60 км/ч	224215,25	305748,06
90 км/ч	95818,48	34924,49

Таблица 4

Срок окупаемости по времени

		Переход на другую КПП	
		MT5 -> MT6	MT5 -> CVT
	Скоростной режим	Срок окупаемости по времени, лет	
Для частного сектора (18 500 км)	60 км/ч	12,120	5,180
	90 км/ч	16,530	1,890
Для комм. сектора (60 000 км)	60 км/ч	3,737	1,597
	90 км/ч	5,097	0,583
Для комм. сектора (120 000 км)	60 км/ч	1,869	0,799
	90 км/ч	2,549	0,291

Полученные данные говорят о том, что быстрее всего окупится переход на другую КПП, если использовать бесступенчатую трансмиссию в частном секторе.

В ходе экологического расчёта получены следующие результаты:

Таблица 5

Приведенные выбросы на 100 км согласно ГОСТ Р 56162-2019

Приведённые выбросы (на 100 км)							
КПП	V, км/ч	CO (в пересчете на NO_x), г/100км	CH, г/100км	Сажа, г/100км	SO_2, г/100км	Формальдегид, г/100км	Бенз(а)пирен, г/100км
MT5	60,0000	312,2550	114,4935	90,2070	1,9082	2,2899	0,0001
	90,0000	1495,2516	548,2589	431,9616	9,1376	10,9652	0,0003
MT6	60,0000	294,0300	107,8110	84,9420	1,7969	2,1562	0,0001
	90,0000	1446,1538	530,2564	417,7778	8,8376	10,6051	0,0003
CVT	60,0000	264,8700	97,1190	76,5180	1,6187	1,9424	0,0001
	90,0000	1017,6638	373,1434	293,9918	6,2191	7,4629	0,0002

Таблица 6

Уменьшение расходов топлива при переходе на другую КПП.

	Приведённое уменьшение выбросов (на 100 км)						
Переход на КПП	V, км/ч	CO (в пересчете на NO_x), г/100км	CH, г/100км	Сажа, г/100км	SO_2, г/100км	Формальдегид, г/100км	Бенз(а)пирен, г/100км
MT5-MT6	60,0000	60,7500	22,2750	17,5500	0,3713	0,4455	0,0000
	90,0000	85,3875	31,3088	24,6675	0,5218	0,6262	0,0000
MT5-CVT	60,0000	157,9500	57,9150	45,6300	0,9653	1,1583	0,0000
	90,0000	830,5875	304,5488	239,9475	5,0758	6,0910	0,0002

По итогам расчёта удалось установить, что использование бесступенчатой трансмиссии существенно сокращает сырые выбросы.

Предложенная методика оценки топливной экономичности:

- расширяет возможности инженера исследователя в части возможностей оценки топливной экономичности как проектируемых автомобилей, так и возможностей, и пределов модификаций автомобилей, находящихся в производстве;
- дает теоретически обоснованный инструмент для поисков путей минимизации расходов топлива автомобилями.

Библиографический список

1. Тарасик, В.П. Теория автомобилей и двигателей: учебное пособие / В.П. Тарасик, М.П. Бренч. — Электрон. дан. — Минск: Новое знание, 2012. — 448 с.

2. Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Нижний Новгород, 2013. – 413 с.

© Григоревский А.В., 2026

УДК 621.436

И.У. ИЛЬБАКТИН, Н.И. САЛАТОВ
ideluralovich@gmail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. А.О. БОРИСОВ

Уфимский университет науки и технологий

КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ БОЛИДА FORMULA STUDENT

Аннотация: в статье рассматривается первый этап разработки гибридной силовой установки для болида Formula Student. Проведён анализ существующих архитектур ГСУ и решений электрических болидов. Предложена концепция последовательной гибридной установки мощностью 80 кВт с ДВС 25–45 кВт. Приведена структура расчёта динамических и энергетических параметров. Сформирован план разработки гибридной силовой установки.
Ключевые слова: гибридная силовая установка; Formula Student; последовательная архитектура; двигатель внутреннего сгорания; энергетический баланс; тяговый расчёт; ездовой цикл.

1. Актуальность гибридных силовых установок и их преимущества

В современных условиях развития транспортных систем одним из ключевых направлений повышения энергоэффективности и экологической безопасности является применение гибридных силовых установок (ГСУ), представляющих собой сочетание двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электрической тяговой системы, объединённых единой системой управления.

Актуальность ГСУ обусловлена необходимостью снижения расхода топлива и выбросов вредных веществ при сохранении высоких динамических характеристик. Классические ДВС обладают ограниченной зоной эффективной работы, и в реальных условиях эксплуатации часто функционируют вне области минимального удельного расхода топлива. Гибридные системы позволяют перераспределить функции между источниками энергии: электропривод обеспечивает пиковую мощность и быстрые переходные процессы, а ДВС работает в узком диапазоне режимов с максимальным КПД.

Дополнительным преимуществом является возможность рекуперации энергии торможения, что особенно эффективно при циклическом характере движения. В результате гибридизация обеспечивает повышение общей энергоэффективности системы без ухудшения динамики.

Гибридные силовые установки активно применяются в автомобильной промышленности, грузовом транспорте и авиации, а также в автоспорте, включая Формулу-1, где используются высокоэффективные мотор-генераторные системы. В соревнованиях Formula Student доминируют

электрические болиды, однако их ограничением остаётся ёмкость аккумуляторных батарей.

В этой связи гибридные силовые установки представляют перспективное направление, позволяющее объединить преимущества электрического привода и энергетическую автономность, обеспечиваемую ДВС. Разработка ГСУ для болида Formula Student является актуальной задачей, направленной на повышение эффективности и расширение функциональных возможностей силовой установки.

2. Обзор архитектур гибридных силовых установок в различных областях техники

Гибридные силовые установки классифицируются по способу взаимодействия источников энергии на последовательные, параллельные и комбинированные.

В последовательной архитектуре ДВС не связан механически с колесами и используется для привода генератора. Электрическая энергия передаётся на тяговый электродвигатель и аккумуляторную батарею. Данная схема обеспечивает работу ДВС в оптимальном режиме, однако сопровождается дополнительными потерями при преобразовании энергии.

Параллельная архитектура предполагает механическую связь ДВС и электродвигателя с трансмиссией, что позволяет совместно формировать тяговое усилие и повышает общий КПД при установившемся движении. Комбинированные схемы объединяют преимущества обеих архитектур, обеспечивая гибкое распределение потоков энергии, но отличаются высокой конструктивной сложностью.

В автомобильной промышленности применяются все типы ГСУ, включая системы с функцией range extender. В автоспорте гибридные технологии реализованы, в частности, в Формуле-1, где используются турбированные ДВС и мотор-генераторы, обеспечивающие рекуперацию энергии.

В грузовом транспорте и городских условиях преимущественно применяются последовательные схемы, обеспечивающие эффективную работу при переменных режимах. В авиации рассматриваются гибридные системы с газотурбинными установками и распределённым электрическим приводом.

В составе ГСУ могут использоваться различные типы тепловых двигателей: поршневые, роторно-поршневые и газотурбинные. Выбор определяется требованиями к массе, эффективности и режимам работы.

Таким образом, последовательные гибридные схемы представляют наибольший интерес для транспортных средств с переменными режимами движения, включая гоночные болиды.

3. Обзор решений силовых установок в соревнованиях Formula Student

Соревнования Formula Student представляют собой платформу для разработки инновационных транспортных средств, в рамках которой предъявляются высокие требования к динамике, массе и энергоэффективности.

Изначально доминировали болиды с ДВС (класс CV), использующие мотоциклетные двигатели объёмом до 710 см³. Основными требованиями являлись высокая удельная мощность и минимальная масса, однако эффективность таких установок ограничивалась работой двигателя вне оптимальных режимов.

В настоящее время ведущие позиции занимают электрические болиды (EV), обладающие высокой удельной мощностью, мгновенным откликом и возможностью реализации систем управления тягой. Распространены конфигурации с двумя или четырьмя электродвигателями, включая мотор-колёса. Применяются синхронные электродвигатели с постоянными магнитами и высоковольтные батареи напряжением 400–600 В.

Основным ограничением электрических болидов является ёмкость аккумуляторных батарей, что влияет на массу и продолжительность работы на высоких мощностях.

В связи с этим рассматриваются гибридные решения, способные объединить преимущества электрического привода и автономность, обеспечиваемую ДВС. Наиболее перспективной для условий Formula Student является последовательная архитектура, в которой ДВС используется в качестве генератора, а тяга формируется электрическими двигателями.

Таким образом, развитие гибридных силовых установок представляет собой логичный этап эволюции силовых установок в Formula Student.

4. Выбор архитектуры и формирование концепции гибридной силовой установки болида Formula Student

С учётом особенностей движения болида Formula Student, характеризующихся переменными режимами и ограничением по сцеплению, целесообразно применение гибридной силовой установки с разделением функций между источниками энергии.

В качестве базовой архитектуры предлагается последовательная схема, в которой двигатель внутреннего сгорания используется для привода генератора и не имеет механической связи с колесами. Тяговое усилие формируется исключительно электрическими двигателями.

В состав силовой установки входят тяговые электродвигатели, силовая электроника, аккумуляторная батарея, генераторный агрегат на базе ДВС и система управления.

Целевая пиковая мощность тяговой системы принимается на уровне 80 кВт, обеспечиваемая электродвигателями. При этом мощность ДВС определяется исходя из средней потребляемой мощности и составляет порядка 25–35 кВт с учётом потерь в системе.

В качестве компоновки рассматривается полноприводная схема (4WD) с четырьмя электродвигателями, обеспечивающая расширенные возможности управления тягой. Альтернативой является двухмоторная схема, однако она уступает по управляемости.

Для генераторного агрегата предлагается использование компактного поршневого двигателя с числом цилиндров один или два, оснащённого системой наддува. Это позволяет обеспечить необходимую мощность при минимальной массе.

Таким образом, сформирована концепция гибридной силовой установки с последовательной архитектурой, пиковой мощностью 80 кВт и генераторным ДВС мощностью 25–35 кВт, обеспечивающая баланс между динамикой, энергоэффективностью и конструктивной сложностью.

5. Методика расчёта динамических и энергетических параметров гибридной силовой установки

Для обоснования параметров гибридной силовой установки болида Formula Student применяется методика, основанная на переходе от модели движения к требованиям к элементам силовой установки.

На первом этапе формируется модель продольной динамики болида, описываемая уравнением:

$$m \cdot a = F_{\text{т}} - F_{\text{сопр}},$$

где m — масса болида, a — ускорение, $F_{\text{т}}$ — тяговая сила, $F_{\text{сопр}}$ — суммарная сила сопротивления.

Сопротивление определяется как:

$$F_{\text{сопр}} = F_{\text{кач}} + F_{\text{аэр}} + F_{\text{инерц}},$$

где $F_{\text{кач}}$ — сопротивление качению, $F_{\text{аэр}}$ — аэродинамическое сопротивление, $F_{\text{инерц}}$ — инерционные потери.

Сопротивление качению:

$$F_{\text{кач}} = c_r \cdot m \cdot g,$$

Аэродинамическое сопротивление:

$$F_{\text{аэр}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2.$$

Максимальная тяговая сила ограничена сцеплением:

$$F_{\text{т},max} = \mu \cdot m \cdot g.$$

На втором этапе задаётся ездовой цикл v(t), a(t), по которому определяется требуемая мощность:

$$P(t) = F_{\text{т}}(t) \cdot v(t).$$

Средняя мощность:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t)\, dt,$$

Энергия за цикл:

$$E = \int_0^T P(t)\,dt.$$

На третьем этапе выполняется энергетический анализ ГСУ. С учётом КПД цепи преобразования энергии η\etaη, мощность ДВС определяется как:

$$P_{\text{двс}} = \frac{P_{\text{ср}}}{\eta}.$$

Аккумуляторная батарея компенсирует разницу мощностей:

$$\Delta P(t) = P(t) - P_{\text{двс}} \cdot \eta,$$

Требуемая энергия батареи:

$$E_{\text{бат}} = \int \Delta P^{+}(t)\,dt.$$

На заключительном этапе формируются требования к электродвигателям, аккумуляторной батарее и двигателю внутреннего сгорания по мощности, энергии и режимам работы.

Представленная методика является схематичной и упрощенной. Полная математическая модель ГСУ, находящаяся в разработке, должна обеспечить согласованный выбор параметров силовой установки на основе динамики движения и энергетического баланса.

6. Постановка задач и план разработки гибридной силовой установки

На основании проведённого анализа и сформированной концепции гибридной силовой установки для болида Formula Student необходимо определить последовательность этапов разработки, обеспечивающих переход от теоретической модели к практической реализации. Разработка носит междисциплинарный характер и требует системного подхода с поэтапной детализацией на уровне всей установки и её компонентов.

Первый этап включает углублённый анализ существующих решений гибридных силовых установок с целью уточнения архитектуры и выбора эффективных технических решений, применимых в условиях Formula Student.

На втором этапе формируется концепция болида и ГСУ, включая архитектуру, компоновку элементов и распределение масс.

Третий этап связан с разработкой математической модели болида и формированием ездового цикла, на основе которого рассчитываются динамические характеристики и распределение мощности во времени.

На четвёртом этапе выполняется энергетический расчёт, позволяющий определить требования к электродвигателям, аккумуляторной батарее и двигателю внутреннего сгорания.

Пятый этап включает разработку ДВС генераторного типа с расчётом рабочего процесса, кинематики, газодинамики и теплового состояния с ориентацией на работу в оптимальном режиме.

Шестой этап предусматривает подбор и моделирование компонентов силовой установки с учётом их реальных характеристик, массы и эффективности.

Седьмой этап — изготовление опытного образца и проведение испытаний с целью проверки расчётных характеристик и выявления возможных доработок.

Заключительный этап включает интеграцию гибридной силовой установки в болид и создание демонстрационного образца с последующей отладкой в реальных условиях.

Таким образом, предложенный план обеспечивает последовательный переход от анализа и моделирования к созданию работоспособной гибридной силовой установки.

Библиографический список

1. Formula Student Germany. FSG Rules 2026 V1.1.
2. Designing and manufacturing of Formula SAEHybrid racecar for a new engineering education program Ikwhang Chang1 , Namwook Kim2 , Daeheung Lee2 , Suk Won Cha2 1 Graduate school of conversion science and technology, Seoul National University, Gwanak-ro599, Gwanak-gu, Seoul, Korea 151-744 – URL: https://www.iri.upc.edu/people/riera/VPPC10/vppc2010.univ-lille1.fr/uploads/PDF/papers/SS9/95-48802-final.pdf
3. Driving Profile Optimization for Energy Management in the Formula Student Tecnico Prototype ´ Tomas Peric ´ ao Moreira Roque Pires ˜ Thesis to obtain the Master of Science Degree in Electrical and Computer Engineering Supervisor: Prof. Joao Filipe Pereira Fernandes ˜ Examination Committee Chairperson: Prof. Celia Maria Santos Cardoso de Jesus ´ Supervisor: Prof. Joao Filipe Pereira Fernandes ˜ Member of the Committee: Prof. Paulo Jose da Costa Branco – URL: file:///C:/Users/idelu/Downloads/Thesis_Tomas_Pires.pdf
4. Alternative powertrain Hybridization of Formula Student car Bachelor Thesis in Applied Mechanics Fredrik Hermansson David Stenman Martin Holder Martin Strängberg Carl Petersson Håkan Winqvist Department of Applied Mechanics Division of Combustion CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden, 2012 Kandidatarbete 2012:04 – URL: https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/699f1b80-3496-4b4d-ab6a-7260e97c0a1f/content
5. Mattarelli, E., Rinaldini, C., Scrignoli, F., and Mangeruga, V., "Development of a Hybrid Power Unit for Formula SAE Application: ICE CFD-1D Optimization and Vehicle Lap Simulation," 14th International Conference on Engines & Vehicles, Capri, Italy, September 15, 2019 – URL: https://doi.org/10.4271/2019-24-0200.

© Ильбактин И.У., Салатов Н.И., 2026

УДК 629.7.036

А.Т. ЯКИМОВ
bumsou80681@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. А.А. ЧЕРНОУСОВ

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «СИЛОВАЯ УСТАНОВКА – ВИНТ» В РАЗОМКНУТОМ И ЗАМКНУТОМ КОНТУРАХ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: в работе выполнен сравнительный анализ переходных процессов разгона самолёта с поршневой силовой установкой и винтом изменяемого шага. Рассмотрены два варианта: неуправляемый разгон с фиксированным углом лопастей и регулируемый разгон с ПИД-контроллером в контуре обратной связи по частоте вращения. Представлена структурная схема системы, математическая модель регулятора и ожидаемые эффекты от применения САР.
Ключевые слова: винт изменяемого шага, неуправляемый и регулируемый разгон.

Качество переходных процессов в силовой установке (СУ) летательного аппарата (ЛА) напрямую влияет на безопасность взлёта, приёмистость и ресурс двигателя. Особенно остро проблема стоит для поршневых СУ с винтом изменяемого шага (ВИШ), где несогласованность темпа изменения шага винта и роста частоты вращения может приводить к забросу оборотов, потере тяги или перегрузке двигателя. Решением является введение автоматического контура регулирования, который в реальном времени корректирует угол установки лопастей, обеспечивая оптимальное протекание переходного процесса.

В данной работе на базе пакета ALLBEA рассматривается модель разгона самолёта с ПСУ и ВИШ в двух постановках:

- без САР – угол лопастей фиксирован на взлётном значении, процесс идёт «самотёком» (неуправляемый разгон);
- с САР – в контур введён ПИД-регулятор, отрабатывающий рассогласование между заданной и текущей частотой вращения двигателя n(t).

Методика проведения вычислительного эксперимента:

Для получения количественных оценок предлагается трёхэтапная схема численного эксперимента в среде ALLBEA:

Этап 1. Расчёт без САР. Угол лопастей фиксируется во взлётном положении, которое обеспечивает максимальную тягу на месте. Моделируется разгон от нулевой скорости до набора примерно восьмидесяти процентов от максимальной скорости горизонтального полёта. В ходе расчёта фиксируется, как меняются обороты двигателя во времени. Ожидается, что вначале, пока

скорость мала и винт «буксует» в воздухе, обороты резко подскочат выше номинала – это и есть тот самый нежелательный заброс. Затем, по мере разгона, обдувка винта усиливается, момент сопротивления растёт, и обороты постепенно снижаются до установившегося значения. Такой «горбатый» график типичен для неуправляемого разгона с фиксированным шагом.

Этап 2. Настройка ПИД-регулятора. Чтобы регулятор работал эффективно, нужно правильно подобрать три его коэффициента. Для этого нелинейную модель в окрестности рабочей точки (номинальный режим) приближённо заменяют упрощённой линейной моделью. На основе этой линейной модели одним из стандартных инженерных методов подбираются предварительные значения пропорционального, интегрального и дифференциального коэффициентов.

Этап 3. Расчёт с САР. Найденные коэффициенты заносятся в модель регулятора, и проводится повторный расчёт того же самого разгона. Теперь шаг винта уже не постоянен – он непрерывно меняется по команде ПИД-регулятора. Результаты двух расчётов сравниваются по графикам изменения оборотов во времени. Оцениваются три основных показателя качества: насколько сильно обороты превысили задание в пике (перерегулирование), как быстро они вошли в допустимый коридор вокруг задания (время регулирования) и насколько резкими были рывки (максимальная скорость изменения оборотов).

Ожидаемые результаты и их интерпретация:

В варианте без САР картина получается следующая. На старте скорость мала, винт недогружен, и двигатель, получив полную подачу топлива, стремительно раскручивается. Обороты могут превысить номинал на десять–пятнадцать процентов, а для двигателя М-14П это означает выход за три тысячи двести оборотов в минуту. Затем самолёт начинает разгоняться, поток воздуха набегает на винт всё сильнее, момент сопротивления растёт, и обороты проседают. Возникает неприятная ситуация: двигатель сначала перекручен, а затем, на большой скорости, может оказаться недогруженным относительно оптимального режима

С системой регулирования поведение принципиально другое. В первые секунды разгона датчик фиксирует резкий рост оборотов. Ошибка рассогласования становится большой положительной величиной. ПИД-регулятор немедленно выдаёт команду на увеличение шага – лопасти поворачиваются на больший угол, винт «затяжеляется», момент сопротивления растёт и сдерживает раскрутку. Двигатель не успевает выйти в заброс.

Структурная схема модели с САР представлена на рисунке Рис. 11.

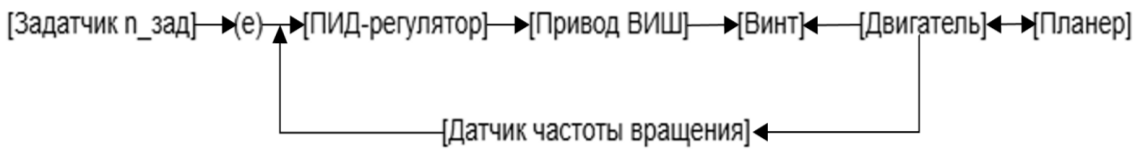


Рис. 11. Структурная схема САР частоты вращения двигателя с воздействием на шаг ВИШ

Угол установки лопастей φ(t) формируется ПИД-регулятором по закону:

$$\varphi(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int_0^t e(\tau)d\tau + Kd \cdot (\frac{de}{dt}),$$

где $e(t) = n_\text{зад}(t) - n(t)$ – ошибка регулирования; Kp, Ki, Kd – настраиваемые коэффициенты.

В модели без САР $\varphi = const$, и переходный процесс описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений динамики вращающегося ротора и поступательного движения ЛА. В модели с САР к этим уравнениям добавляется уравнение регулятора и динамика сервопривода ВИШ (апериодическое звено с постоянного времени $K_\text{пр}$ и ограничением по скорости перекладки лопастей).

Ожидаемые результаты моделирования. Без САР переходный процесс характеризуется значительным забросом частоты вращения (до 8–12 % выше номинала) и затянутым выходом на установившийся режим (6–8 с). Введение ПИД-регулятора, настроенного по критерию минимума интегральной квадратичной ошибки, позволяет:

1. снизить перерегулирование до ≤2 %;
2. сократить время регулирования до 2–3 с;
3. исключить статическую ошибку за счёт интегральной составляющей.

Дополнительным эффектом является сглаживание пиковых нагрузок на коленчатый вал и трансмиссию, что положительно сказывается на ресурсе двигателя.

Таким образом, предложенная структура САР с ПИД-регулятором и её интеграция в модель самолёта в ALLBEA позволяют на этапе численного эксперимента подобрать параметры регулятора и оценить качество переходного процесса до проведения натурных испытаний. Дальнейшее развитие работы предполагает постановку задачи оптимального выбора не только коэффициентов регулятора, но и характеристик самого ВИШ под заданный планер и профиль полёта.

Библиографический список

2. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Система моделирования силовых установок наземного и воздушного транспорта // Транспорт. Взгляд в будущее (TFV-24). – СПб., 2024. – С. 17–19.

3. Руководство по лётной эксплуатации самолёта Як-18Т с двигателем М-14П ФЛА России. – М., 2001. – 46 с

© Якимов А.Т., 2026

УДК 621.833.15

И.Р. КАШАПОВ, А.Ю. АХМАДЕЕВ
kashapov.ilgiz2004@yandex.ru
Науч. руководитель – д-р техн. наук М.Д. ГАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТ ПРИВОДА ПОМПЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВУХТАКТНОГО ЧЕТЫРЕХЦИЛИНДРОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в статье представлен расчёт цилиндрической прямозубой передачи привода помпы охлаждения для разработанного V-образного четырёхцилиндрового двухтактного двигателя, созданного с применением комплекса КОМПАС-GEARS. Рассмотрена схема зубчатой передачи, определены основные геометрические параметры, ее прочности и долговечности зубчатой передачи.
Ключевые слова: двухтактный двигатель; жидкостное охлаждение; прямозубое зацепление; цилиндрическая передача; малая авиация; КОМПАС-GEARS.

На кафедре двигателей внутреннего сгорания (ДВС) «Уфимского университета науки и технологий», осуществляется разработка двигателя внутреннего сгорания с жидкостной системой охлаждения. Для обеспечения функционирования насоса системы охлаждения возникла необходимость в проектировании и расчёте зубчатой передачи, предназначенной для привода данного агрегата.

Целью работы является разработка цилиндрической прямозубой передачи внешнего зацепления привода помпы авиационного поршневого ДВС и оценка ее работоспособности при заданных исходных параметрах. Для достижения цели необходимо: определить основные геометрические параметры передачи, обеспечить требуемое передаточное число, проверить прочность зубьев по контактным напряжениям и изгибу, а также оценить ресурс работы. Расчет был выполнен в программном комплексе КОМПАС-GEARS в соответствии с ГОСТ 16532-70 [2], ГОСТ 21354-87 [3] и нормам прочности зубчатых передач, используемых в авиационных газотурбинных двигателях для гражданской авиации [6].

Выбранный насос системы охлаждения должен иметь одинаковую угловую скорость с коленчатым валом и вращаться с ним синхронно. Однако в процессе проектирования было принято решение о введении в схему

дополнительной паразитной шестерни. Это обусловлено тем, что реализация привода с использованием только двух шестерён привела бы к необходимости применения шестерён чрезмерно больших размеров, что не позволило бы разместить их в пределах габаритов картера. В связи с этим далее будет выполняться расчет зубчатого зацепления между ведущей и паразитной шестернями. Ввиду того, что ведущая шестерня первой пары конструктивно и геометрически идентична шестерне, установленной на приводе насоса, можно сделать вывод об идентичности параметров второй ступени зубчатой передачи (от паразитной к ведомой шестерне) к параметрам первой. Это позволяет распространить результаты расчета первой пары на вторую, упрощая анализ всей кинематической цепи.

При расчете были приняты исходные параметры, приведенные в табл. 1

Таблица 1

Исходные параметры для расчета

Наименование и обозначение параметра		Ведущая шестерня	Ведомая шестерня
Число зубьев	z	32	38
Модуль, мм	m	1,5	
Ширина зубчатого венца	b	8	8
Коэффициент смещения исходного контура	□	+0,741	+1,133
Степень точности	–	7-В	7-В
Марка материала	–	Сталь 40ХМФА ГОСТ 4543-2016	Сталь 40ХМФА ГОСТ 4543-2016
Твердость активных поверхностей зубьев, HRC	–	62	62
Крутящий момент на ведущей шестерне, Н□м	T_{max}	0,59	–
Частота вращения ведущей шестерни, об/мин	n_1	6500	–
Коэффициент безопасности(контакт)	S_H	1,35	
Коэффициент безопасности(изгиб)	S_F	1,75	
Коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности	Z_R	0,95	

Числа зубьев ведущей и ведомой шестерни определены на основании предварительного параметрического анализа с учётом рациональных значений, обеспечивающих минимизацию габаритов узла. Модуль зубчатых колёс выбран из стандартного ряда модулей с учётом передаваемого крутящего момента, частоты вращения и конструктивных ограничений [5]. Ширина венца *b* принята с учетом передаваемого крутящего момента и габаритных ограничений. При

этом значение ширины находится в допустимом интервале 7…14 мм, что позволяет обеспечить компактность конструкции [7].

Для зубчатой передачи, работающей с повышенной скоростью и при расчетных нагрузках, степень точности 7-B по параметрам кинематической точности, плавности хода и пятна контакта зубьев признана достаточной [8]. Сопряжение зубчатых колёс выполнено по виду допуска b, что обеспечивает гарантированный боковой зазор между зубьями. Такой подход исключает возможность заклинивания передачи при наличии производственных погрешностей и температурных деформаций материала, возникающих вследствие разницы температур зубчатых колёс и корпуса до 25 °C в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 [1].

В качестве конструкционного материала для изготовления зубчатых колёс применяется сталь марки 40ХМФА по ГОСТ 4543-2016 [4]. Для обеспечения высокой поверхностной твёрдости зубьев используется процесс азотирования, в результате которого формируется упрочнённый слой, способствующий значительному повышению износостойкости и контактной выносливости. При этом сердцевина зуба сохраняет вязкость и обладает твёрдостью на уровне 30 HRC, что обеспечивает повышенную стойкость к изгибной усталости и минимизирует вероятность хрупкого разрушения в условиях эксплуатации нагруженной зубчатой передачи. Твёрдость рабочих поверхностей зубьев, достигающая 62 HRC, соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к высоконагруженным авиационным зубчатым передачам [6].

Коэффициенты запаса прочности по контактным напряжениям и изгибу приняты с превышением минимально требуемых значений и составляют 1,35 и 1,75 соответственно, в то время как минимальные нормативные значения равны 1,2 и 1,4 [3]. Подобное решение обусловлено высокой ответственностью, поскольку их отказ может привести к серьёзным последствиям, что требует обеспечения повышенного запаса прочности по сравнению с минимально допустимым уровнем.

При расчете на долговечность выбран следующий режим нагружения передачи: $T_1 = 0{,}59$ Н·м и $n_1 = 6500$ мин$^{-1}$. Такой режим отражает условия эксплуатации помпы в составе авиационного поршневого ДВС.

Основные геометрические параметры, а также показатели прочности и долговечности зубчатой передачи, полученные в результате расчётов в КОМПАС-GEARS, приведены в таблицах 2 и 3. Геометрические характеристики спроектированной зубчатой передачи иллюстрируются на рис. 1.

Таблица 2

Основные геометрические параметры зубчатой пары

Наименование и обозначение параметра		Ведущая	Ведомая
Межосевое расстояние, мм	a_w	54,939 ±0,025	
Делительный диаметр, мм	d	48	57
Диаметр вершин зубьев, мм	d_a	52,4	62,65

Диаметр впадин зубьев, мм	d_f	46,47	56,65
Начальный диаметр, мм	d_w	50,23	59,65
Коэффициент торцового перекрытия	ε_a	1,221	

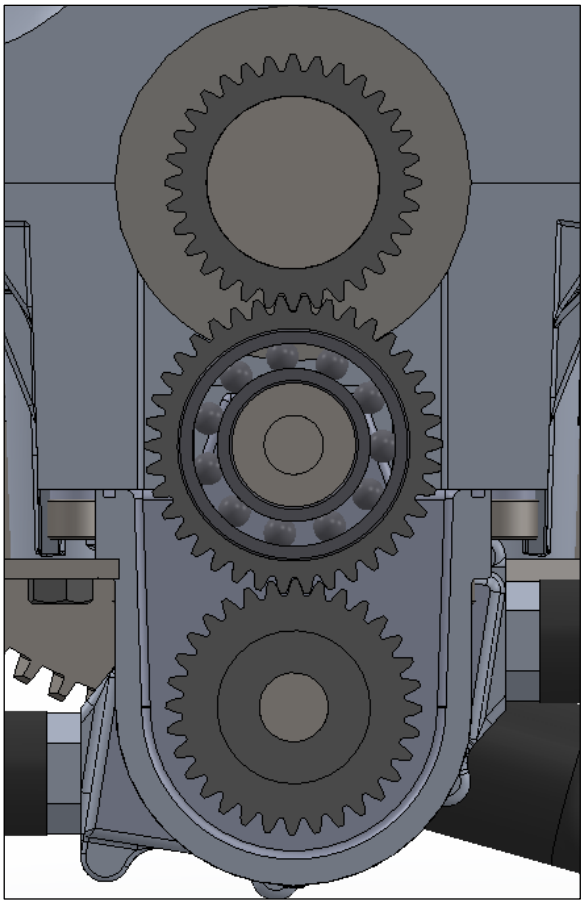


Рис. 1. Геометрия полученной зубчатой передачи

Таблица 3

Параметры прочности и долговечности

Наименование и обозначение параметра		Ведущая	Ведомая
Окружная скорость, м/с	υ	16,34	
Окружная сила на делительном диаметре, Н	F_t	24,58	
Расчетное контактное напряжение, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{Hmax}$	784,98	
Допускаемое контактное напряжение, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{HPmax}$	2433	2433
Коэффициент запаса по контактным напряжениям	n_H	3,099	3,099
Расчетное напряжение изгиба, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{Fmax}$	265,34	249,37
Допускаемое напряжение изгиба, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{FPmax}$	1029	1029
Коэффициент запаса по	n_F	3,88	4,13

напряжениям изгиба			
Ресурс по контакту, час	L_H	1876	2228
Ресурс по изгибу, час	L_F	45158	93758

Коэффициенты запаса прочности по контактным напряжениям n_H и изгибу n_F (см. табл. 3) превышают нормативные минимальные значения, составляющие 1,1 и 1,6 [6] соответственно, что свидетельствует о наличии достаточного конструктивного запаса по указанным критериям. Таким образом, выбранная геометрия зубчатой передачи обеспечивает необходимую эксплуатационную надёжность в условиях заданного нагружения. Использование стали 40ХМФА ГОСТ 4543-2016 с высокой поверхностной твёрдостью зубьев (62 HRC) способствует повышению износостойкости и увеличению срока службы зубчатой передачи.

Более нагруженным элементом, обладающим меньшими значениями ресурса по контактной выносливости L_H и выносливости при изгибе L_F (см. табл. 3), является ведущая шестерня. Данная ситуация характерна для зубчатых передач рассматриваемого типа, поскольку ведущая шестерня функционирует в более тяжёлых эксплуатационных условиях и достигает предельного состояния раньше, чем сопряжённые детали.

В заключение, проведённые расчёты подтверждают, что зубчатая передача обладает необходимой работоспособностью и может быть использована для привода помпы охлаждения авиационного поршневого двигателя внутреннего сгорания.

Выполнен расчёт первой пары зубчатой передачи. Определённые геометрические параметры, коэффициент перекрытия, запасы прочности и расчётный ресурс работы подтверждают работоспособность данной зубчатой пары в заданных эксплуатационных условиях.

На основании проведённых расчётов и анализа можно сделать вывод, что вторая пара также обеспечит оптимальное сочетание прочностных характеристик и будет работоспособна в составе привода насоса охлаждения ДВС.

Библиографический список

1. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Москва, Издательство стандартов, 1981. – 75 с.

2. ГОСТ 16532-70. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии. Москва, Издательство стандартов, 1983. – 43 с.

3. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Москва, Издательство стандартов, 1988. – 129 с.

4. ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Москва, Стандартинформ, 2019. – 53 с.
5. ГОСТ 9563-60. Основные нормы взаимозаменяемости. Колеса зубчатые. Модули. Москва, Издательство стандартов, 1988. – 5 с.
6. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации. 6-е изд. ЦИАМ, 2004. – 260 с.
7. Курсовое проектирование деталей машин: Учеб. пособие для учащихся машиностроительных специальностей техникумов / С. А. Чернавский, К. Н. Боков, И. М. Чернин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 416 с.: ил.
8. Детали машин: Учеб. для студентов втузов / М. Н. Иванов; под ред. В. А. Финогенова. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.: ил.

© Кашапов И. Р., Ахмадеев А. Ю., 2026

УДК 629.371:533.6.013

И.И. КУДАШЕВА
catrinka.irinka@yandex.ru
Науч. руководов. – старший преподаватель М.В. РАЗЯПОВ

Уфимский университет науки и технологий

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И БЕЗОПАСНОСТЬ ГОНОЧНОГО АВТОМОБИЛЯ

Аннотация: в работе рассматривается роль заднего антикрыла в конструкции гоночного автомобиля Project Seven – CN3500. Обоснована важность аэродинамики, проведен краткий сравнительный анализ типов антикрыльев в автоспорте по критериям эффективности и технологичности. Раскрыт механизм формирования прижимной силы на основе законов аэродинамики и описан принцип оптимизации конструкции с помощью компьютерного моделирования.
Ключевые слова: гоночный автомобиль, антикрыло, аэродинамика, прижимная сила, лобовое сопротивление, угол атаки.

Гоночный автомобиль Project Seven – CN3500 разрабатывается конструкторским бюро Bureau Seven (“Конструкторское Бюро 7”) для участия в Российской серии кольцевых гонок (РСКГ). На данный момент автомобиль уже дебютировал в 2025 году на выставке автодрома Игора Drive в качестве спортпрототипа и в 2026 году на старт в РСКГ должны выйти шесть CN3500. В основе спорткара стальная пространственная рама с интегрированным каркасом безопасности, а под капотом японский атмосферный шестицилиндровый двигатель Toyota 2GR объемом 3,5 литра и мощностью 350 лошадиных сил, при расчетной сухой массе 750 кг. При заданных параметрах аэродинамическая

балансировка становится критическим фактором управляемости, поэтому, как и многие гоночные автомобили, Project Seven нуждается в заднем антикрыле. Оно увеличивает прижимную силу автомобиля, что существенно влияет на стабильность в поворотах, маневренность и устойчивость, так как улучшает сцепление колес с дорогой и уменьшает вероятность сноса.

К ключевым конструкторским требованиям к антикрыльям относятся высокая аэродинамическая эффективность, достаточная жесткость для сохранения формы при аэродинамических нагрузках, низкая масса и надежность креплений, способных выдерживать боковые и вертикальные нагрузки в условиях агрессивного маневрирования. В автоспорте применяются различные типы антикрыльев: фиксированные, регулируемые и активные, каждая из которых имеет свои преимущества.

Фиксированные антикрылья – простейшая и наиболее надёжная конструкция с неизменным углом атаки и геометрией, могут включать дополнительные закрылки. Отличаются минимальным весом, низкой стоимостью и неприхотливостью в обслуживании. Главный недостаток – отсутствие адаптации к разным условиям трассы: они обеспечивают лишь компромисс между прижимной силой и сопротивлением.

Регулируемые антикрылья позволяют менять угол атаки вручную или с помощью винтового или рычажного привода. Настройка производится перед заездом под конкретную трассу. Конструкция включает шарнирное крепление и несколько фиксированных положений. Такое решение сочетает умеренную стоимость и функциональность, но требует времени на регулировку и несёт риск ошибок.

Активные антикрылья – это наиболее технологичное решение, автоматически адаптируют геометрию в реальном времени на основе данных телеметрии, таких как скорость, угол поворота, ускорения. Оснащаются сервоприводами/гидравликой, датчиками и электронным блоком управления. Обеспечивают максимальную аэродинамическую эффективность, мгновенно реагируя на изменения условий. Недостатки – высокая стоимость, увеличенный вес и сложность обслуживания.

Наиболее оптимальный вариант должен быть выбран с учётом совокупности ключевых факторов: целевых показателей производительности, условий эксплуатации, ограничений по массе и стоимости, требований регламента соревнований, а также возможностей интеграции с существующей конструкцией автомобиля.

Работа заднего антикрыла базируется на фундаментальных законах аэродинамики, определяющих взаимодействие воздушного потока с твёрдым телом. Ключевую роль играет третий закон Ньютона: изменяя направление потока воздуха (направляя его вверх), антикрыло создаёт равную по величине и противоположную по направлению прижимную силу, которая удерживает автомобиль на трассе. Благодаря этому эффекту гоночные болиды способны проходить повороты и тормозить с перегрузками до 5 g, что существенно превышает предел сцепления шин с покрытием (1–1,1 g).

Уравнение Бернулли объясняет механизм генерации прижимной силы:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = const,$$

где: P – статическое давление; ρ – плотность воздуха; v – скорость потока; g – ускорение свободного падения; h – высота над уровнем отсчёта.

При обтекании антикрыла: над профилем скорость v возрастает → давление P падает; под профилем скорость v снижается → давление P растёт.

Разность давлений создаёт прижимную силу F_z, которую можно оценить по формуле:

$$F_z = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_z,$$

где: S – площадь антикрыла; C_z – коэффициент прижимной силы (зависит от угла атаки α и формы профиля).

Угол атаки α выступает ключевым параметром: его увеличение усиливает F_z, но одновременно повышает лобовое сопротивление F_x:

$$F_x = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_x,$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Эффект Коанда обеспечивает прилипание пограничного слоя воздуха к изогнутой поверхности антикрыла. Это позволяет: эффективно управлять направлением потока, снижать вероятность отрыва потока и вихреобразования и повышать прижимную силу при умеренном сопротивлении. Однако резкие перепады давления могут спровоцировать, отрыв потока и турбулентность. Для минимизации негативных эффектов применяют: торцевые пластины (снижают боковые утечки потока), многоэлементные профили (распределяют градиент давления) или оптимизированную форму кромки (сглаживает переход).

Критически важен баланс прижимной силы между осями. Неравномерное распределение приводит либо к избыточной поворачиваемости (перегрузка задней оси), либо к потере сцепления передних колёс. Поэтому расчёт антикрыла включает не только абсолютную величину F_z, но и её оптимальное распределение по осям ($F_{z\text{перед}}$, $F_{z\text{зад}}$).

Таким образом, проектирование заднего антикрыла требует комплексного учёта физических законов, геометрических параметров и эксплуатационных условий. Оптимальная конструкция должна обеспечивать: максимальную прижимную силу F_z при минимально возможном лобовом сопротивлении F_x, стабильное распределение нагрузки между осями ($F_{z\text{перед}}/F_{z\text{зад}} \approx const$) и устойчивость к отрыву потока. Только сбалансированное сочетание этих факторов позволяет достичь высокой эффективности антикрыла на различных участках трассы – от скоростных прямых до крутых поворотов.

Для оптимизации конструкции заднего антикрыла применяется компьютерное моделирование в среде SolidWorks. На первом этапе создаётся трёхмерная модель с заданными геометрическими параметрами, после чего она импортируется в модуль Flow Simulation для аэродинамического анализа. В расчётной области задаются граничные условия (скорость потока, давление, свойства воздуха) и активируются целевые параметры – прижимная сила (F_z), лобовое сопротивление (F_x). С помощью адаптивной расчётной сетки с уплотнением у поверхности моделируется пограничный слой, а численное решение уравнений Навье-Стокса позволяет получить поля скоростей и давлений, визуализировать линии воздушного потока и зоны отрыва. На основе результатов проводится оптимизация геометрии (изменение кривизны профиля, угла атаки), после чего выполняется повторный расчёт. Таким образом, SolidWorks обеспечивает комплексную оценку аэродинамических характеристик антикрыла и существенно сокращает необходимость в физических испытаниях на этапе проектирования.

Для расчета были спроектированы антикрылья по 8 вариантам аэродинамических профилей: NACA6413, FX74, lotus (цифровая копия профиля антикрыла реального автомобиля Lotus), NACA23012, NACA0015, E423, NACA4412, Selig S1223.

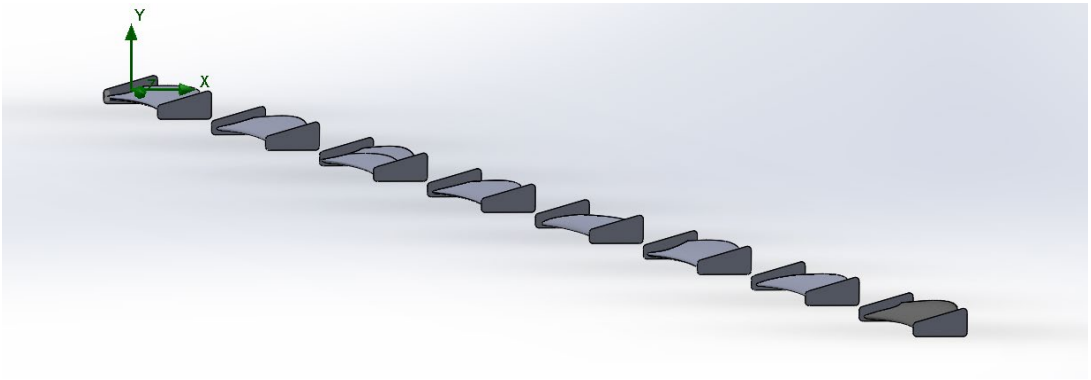


Рис. 1. Профили для расчета

В качестве расчётной скорости потока принята расчетная средняя эксплуатационная скорость автомобиля – 50 м/с (180 км/ч). Выбор обусловлен тем, что в условиях кольцевых гонок (РСКГ) автомобиль значительную часть круга движется на средних скоростях, где аэродинамическая эффективность антикрыла критически влияет на управляемость и время прохождения поворотов. В дальнейших исследованиях планируется анализ зависимости $K(\alpha,v)$ для диапазона 30–70 м/с.

На все профили применена локальная сетка с минимальным дроблением. Сетка дискретизирует пространство, позволяя вычислить поля скорости и давления, а также интегральные характеристики (прижимную силу, лобовое сопротивление). Минимальное дробление позволяет ускорить расчет, но дает менее точный результат, что допустимо на данном этапе сравнения большого количества профилей в большом диапазоне углов атаки.

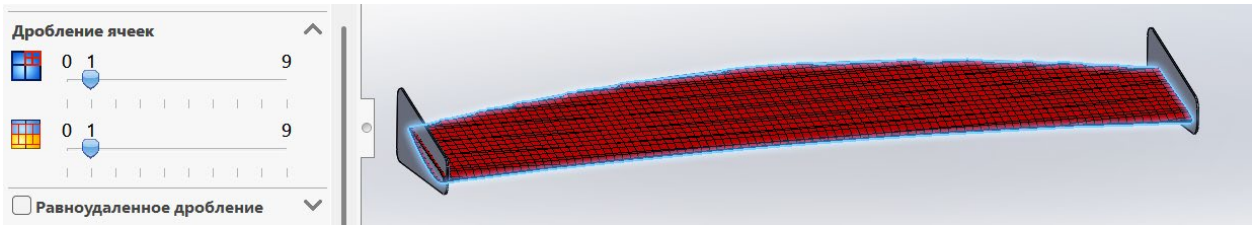


Рис. 2. Сетка

После того, как были заданы начальные и внешние условия, а также сгенерирована сетка, было запущено параметрическое исследование. Оно позволяет совместить расчеты, отличающиеся изменением одного параметра в одну систему расчетов, что упрощает работу, исключая необходимость каждый раз настраивать все и запускать вручную, а также собирает все итоговые данные в одну таблицу. Таким образом, были получены значения лобового сопротивления и прижимной силы для всех 8 профилей на 9 расчетных точках угла атаки α в диапазоне 0-0,31 рад. (см. Приложение)

На основе полученных данных был выбран профиль, с которым будет продолжаться дальнейшая работа по проектированию и расчету антикрыла: Lotus: α=0,1939 рад, Fz=−815,1 Н, K=4,8.

Для профиля определён оптимальный угол атаки α, обеспечивающий максимальную прижимную силу *Fz* при $K \geq 4{,}0$ (принято, как минимальное удовлетворительное значение отношения прижимной силы к лобовому сопротивлению).

На следующем этапе исследования была выполнена детальная трехмерная модель гоночного автомобиля Project Seven – CN3500 в программном комплексе SolidWorks. В процессе моделирования особое внимание уделялось точному воспроизведению геометрии кузова в соответствии с техническими требованиями РСКГ, а также корректной проработке конструктивных элементов аэродинамического пакета.

После создания базовой 3D-модели был проведен комплексный аэродинамический анализ автомобиля без антикрыла. Расчетные исследования выполнялись при скорости потока 50 м/с с использованием модуля Flow Simulation. В результате были определены ключевые характеристики базовой конфигурации, включая величину лобового сопротивления, распределение зон повышенного и пониженного давления по поверхности кузова, а также характер обтекания автомобиля воздушным потоком.

Следующим важным этапом стало параметрическое исследование с применением антикрыла. На основе предварительно выбранного аэродинамического профиля был проводен комплексный анализ, включающий определение оптимального положения относительно кузова автомобиля, расчет прижимной силы и лобового сопротивления, а также детальный анализ влияния на общую аэродинамику транспортного средства.

В ходе параметрического исследования особое внимание уделялось поиску оптимального расположения антикрыла, при котором достигалось

максимальное значение аэродинамического качества. При этом учитывались такие факторы, как минимизация негативного влияния на общую аэродинамику автомобиля, обеспечение равномерного распределения прижимной силы и предотвращение образования зон отрыва потока.

По результатам проведенных расчетов был определен оптимальный вариант конфигурации антикрыла, который демонстрирует наилучшее сочетание прижимной силы и лобового сопротивления при сохранении общей аэродинамической эффективности автомобиля. Выбранная конфигурация обеспечивает максимальную прижимную силу при допустимом лобовом сопротивлении, равномерное распределение нагрузки по осям и минимальное образование зон отрыва потока.

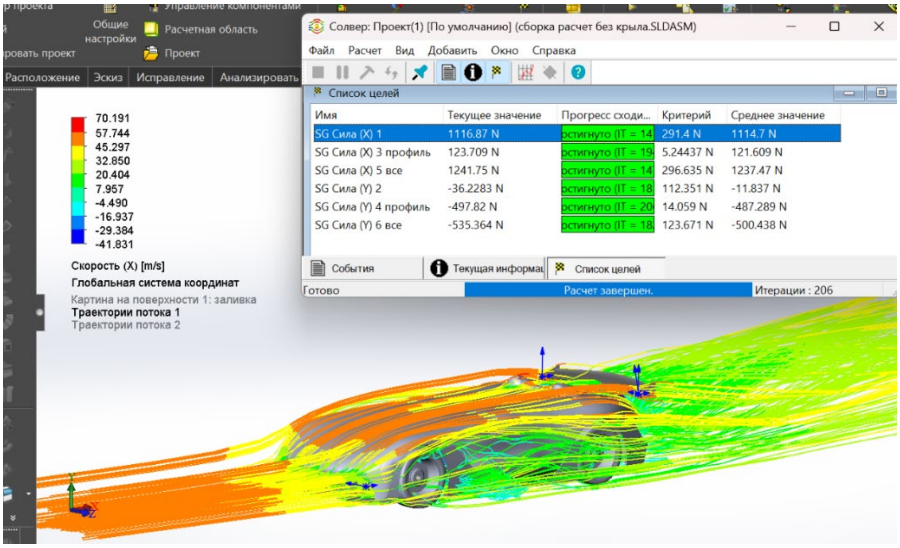


Рис. 3. Аэродинамический расчет автомобиля с антикрылом

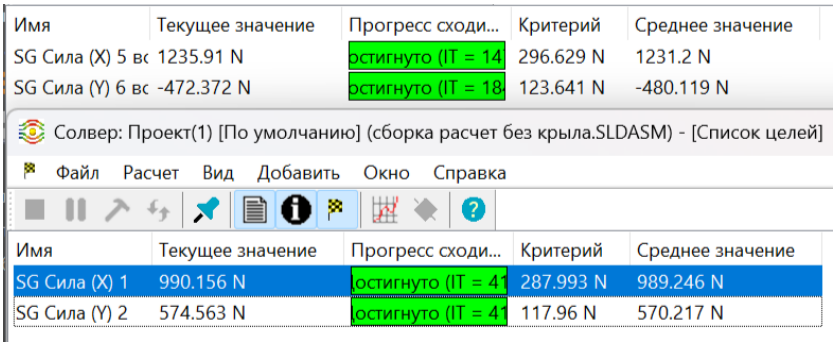


Рис. 4. Лобовое сопротивление и прижимная сила автомобиля с антикрылом (сверху) и без антикрыла (снизу)

Полученные результаты являются фундаментальной основой для дальнейшей детальной проработки конструкции антикрыла с учетом прочностных характеристик материала и технологических ограничений производственного процесса. Следующий этап работы предусматривает разработку полной конструкторской документации и подготовку к изготовлению опытного образца антикрыла для проведения натурных испытаний.

Проектирование заднего спойлера для Project Seven CN3500 — многоэтапный процесс, включающий выбор оптимального типа конструкции (с учётом регламента РСКГ), расчёт прижимной силы и лобового сопротивления, а также оптимизацию геометрии для интеграции в общую аэродинамику кузова, на основе моделирования в SolidWorks Flow Simulation. Итоговая конструкция должна обеспечивать максимальную прижимную силу при минимальном сопротивлении, равномерное распределение нагрузки между осями и устойчивость к турбулентности. Это гарантирует высокую эффективность спойлера на разных участках трассы, повышая стабильность и манёвренность автомобиля в гоночных условиях.

Библиографический список

1. Гамов Д.А., Хоперскова Ю.С., Оганесов О.А. ВЛИЯНИЕ АНТИКРЫЛА АВТОМОБИЛЯ НА АЭРОДИНАМИКУ В ДРИФТЕ // Вестник науки №5 (86) том 1. С. 1151 - 1158. 2025 г. ISSN 2712-8849 // Электронный ресурс: https://www.вестник-науки.рф/article/22815

2. «Творить дичи не будем»: всё о новом российском спорткаре CN3500 https://auto.rambler.ru/travels/55065068/?utm_content=auto_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink

3. Katz J. Race Car Aerodynamics: designing for speed, 1995 г.

© Кудашева И.И., 2026

УДК 629.891

И.В. КУРГУЗОВ
ivkabz@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. А.А. ЧЕРНОУСОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛЬ АВТОМОБИЛЯ С ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ: ИНТЕГРАЦИИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ В ПАКЕТ ALLBEA

Аннотация: в статье рассматривается разработка базовой модульной математической модели прямолинейного движения легкового автомобиля с двигателем внутреннего сгорания для мультифизического пакета ALLBEA. Модель описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающих баланс сил, расход топлива и параметры трансмиссии
Ключевые слова: динамика автомобиля; двигатели внутреннего сгорания; численное моделирование; алгоритмы управления; мультифизическое моделирование; ALLBEA.

Современные тенденции в автомобилестроении характеризуются переходом от разрозненных инженерных расчётов к комплексному цифровому проектированию, объединяющему модели динамики транспортного средства, термодинамики силовых установок и алгоритмов автоматического управления. Традиционные подходы, основанные на использовании специализированных пакетов для отдельных физических полей, затрудняют анализ взаимосвязанных процессов, происходящих в реальных условиях эксплуатации. В связи с этим возрастает потребность в универсальных вычислительных платформах, способных одновременно решать задачи мультифизического моделирования и синтеза систем управления. В рамках развития пакета прикладных программ ALLBEA, предназначенного для численного анализа и оптимизации технических систем, реализована базовая модель прямолинейного движения автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Основная цель текущей работы заключается в создании надёжной вычислительной основы, готовой к последовательному внедрению алгоритмов регулирования параметров двигателя, трансмиссии и тормозной системы в единую программную среду.

Разработка представляет собой стартовый этап создания инструмента промышленного уровня для совместного анализа динамики наземной техники и систем её управления. Несмотря на ряд упрощающих допущений, текущая версия модели уже обладает необходимой архитектурной гибкостью для сопряжения с более детализированными описаниями рабочих процессов ДВС, коробок передач, а также с модулями моделирования регуляторов и комплексных систем управления в среде ALLBEA. Подобная модульность обеспечивает возможность поэтапного наращивания вычислительной сложности без необходимости полной переработки базового кода, что особенно актуально при отработке новых алгоритмов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Модель горизонтального прямолинейного движения автомобиля описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), учитывающей баланс сил, действующих на транспортное средство, а также изменение массы и расхода топлива в процессе работы силовой установки. В уравнениях движения фигурируют сила аэродинамического сопротивления, зависящая от скорости движения, плотности атмосферного воздуха, площади лобового сопротивления и коэффициента обтекаемости кузова; сила сопротивления качению, определяемая массой автомобиля и эмпирическими коэффициентами, характеризующими взаимодействие шин с дорожным покрытием; а также сила тяги, передаваемая на ведущие колёса через трансмиссию. Сила тяги вычисляется на основе крутящего момента двигателя, передаточных чисел трансмиссии, коэффициента полезного действия механических звеньев и текущего радиуса качения колёс. Расход топлива моделируется через удельный эффективный расход и развиваемую двигателем мощность, которая, в свою очередь, зависит от частоты вращения коленчатого вала, положения дроссельной заслонки и внешних нагрузок.

В базовой реализации модель силовой установки упрощена: текущая располагаемая мощность ДВС считается мгновенно равной потребной мощности, необходимой для поддержания заданного режима движения. Данное допущение исключает детальное описание переходных процессов, термогазодинамических явлений в цилиндрах, инерционных эффектов вращающихся масс коленчатого вала и турбокомпрессора. Однако подобное упрощение вполне допустимо на начальном этапе верификации программного модуля, поскольку позволяет сосредоточиться на отработке численных методов, проверке сходимости решений и подготовке архитектуры для последующего подключения сложных подмоделей. При необходимости модель может быть дополнена табличными характеристиками внешних скоростных характеристик двигателя, картами удельного расхода топлива и эмпирическими зависимостями, описывающими динамику впуска и выпуска.

Реализация тестировалась на задаче о разгоне легкового автомобиля с последующим выходом на крейсерский режим движения. Начальная скорость задана ниже равновесного значения, при котором сила тяги полностью компенсирует суммарное сопротивление движению. Прочие параметры задачи, включая начальную массу транспортного средства, плотность воздуха, площадь лобового сопротивления, передаточное число главной передачи, коэффициент полезного действия трансмиссии, базовые значения удельного расхода топлива и коэффициента аэродинамического сопротивления, подобраны в соответствии с паспортными характеристиками серийных автомобилей отечественного и зарубежного производства. Подобный подход обеспечивает физическую достоверность результатов и позволяет сравнивать полученные данные с известными экспериментальными наблюдениями.

Программная модель реализована в виде отдельного модуля на языке C, в котором система уравнений интегрируется численно явным двухстадийным методом Рунге-Кутты второго порядка. Выбор данного метода обусловлен его вычислительной эффективностью, простотой реализации и достаточной точностью для задач динамики транспортных средств, где отсутствуют жёсткие быстропротекающие процессы. Параллельно с основным вычислительным ядром разработан модуль автоматизированного тестирования, который воспроизводит заданные начальные условия, фиксирует промежуточные значения переменных и формирует выходные данные для последующего графического анализа. В тестовой конфигурации базовой модели безразмерные коэффициенты сопротивления, тяги и мощности, вычисленные по параметрам опорного режима, подставляются в расчёт как константы, что позволяет изолировать влияние численной схемы от погрешностей параметрического описания.

Для упрощения анализа и проверки устойчивости численного решения в одном из расчётных сценариев учёт расхода топлива был временно отключён. В этом частном случае численное решение скорости асимптотически стремится к теоретическому равновесному значению. Было оценено отклонение численного решения от аналитической оценки в зависимости от шага интегрирования. При

уменьшении шага вдвое разность между решениями уменьшалась приблизительно в четыре раза, что полностью соответствует теоретическому порядку точности метода Рунге – Кутты второго порядка и подтверждает корректность программной реализации модуля. Подобный тест на сходимость является обязательным этапом верификации любого вычислительного инструмента, предназначенного для инженерного применения.

Расчёт процесса в течение ста двадцати секунд с учётом расхода топлива и фиксированным шагом интегрирования дал решение, отражающее типичную картину разгона автомобиля. На начальном этапе наблюдается быстрое увеличение скорости, сопровождаемое интенсивным расходом топлива. По мере приближения скорости к равновесному значению ускорение снижается, а расход топлива стабилизируется на уровне, необходимом для компенсации аэродинамических и механических потерь. Полученные зависимости качественно согласуются с реальными характеристиками разгона легковых автомобилей, что подтверждает адекватность выбранных физических упрощений и параметров модели.

Таким образом, модель автомобиля с двигателем внутреннего сгорания и трансмиссией успешно проверена на задаче о прямолинейном движении. Реализованная вычислительная схема представляет собой первый этап создания в пакете ALLBEA специализированных модулей для совместного анализа динамики транспортных систем, рабочих процессов их силовых установок и алгоритмов автоматического управления сложными объектами. Модель уже применяется в рамках учебных и исследовательских проектов для демонстрации принципов сопряжения динамики автомобиля и управления силовой установкой, а также для отладки интерфейсов обмена данными между программными модулями.

В рамках дальнейшей разработки выданы задания на создание подмодельных блоков, реализующих более детальные описания работы силовой установки, многоступенчатой трансмиссии и изменяющихся условий окружающей среды. Следующий этап работы предусматривает интеграцию в ALLBEA библиотеки алгоритмов управления для анализа и синтеза оптимальных систем регулирования. Ключевые направления развития включают:

1) внедрение моделей датчиков и регуляторов для управления частотой вращения двигателя, оптимальным переключением передач, распределением крутящего момента между осями и колёсами, а также для реализации систем стабилизации тяги и курсовой устойчивости;

2) модернизацию вычислительных методов с переходом к неявным решателям, устойчивым к жёстким системам уравнений, характерным для мультифизических задач с быстропротекающими тепловыми и гидродинамическими процессами;

3) полную верификацию и промышленную отработку пакета ALLBEA на реальных кейсах, включая анализ переходных процессов в городских,

шоссейных и внедорожных режимах эксплуатации, а также оценку топливной экономичности и экологических показателей.

Библиографический список

1. Еникеев Р. Д., Черноусов А. А. Пакет прикладных программ ALLBEA для моделирования и оптимизации процессов энергетических установок // Двигателестроение. Общие проблемы двигателестроения. 2023. № 4(294). С. 3–15.

2. ГОСТ 33025-2018. Автомобильные транспортные средства. Методы определения топливной экономичности. М. : Стандартинформ, 2019. 22 с.

3. ГОСТ Р 54123-2010. Транспортные средства. Методы определения топливной экономичности. М. : Стандартинформ, 2011. 18 с.

4. Лапшин А. М., Анохин П. И. Автомобильные двигатели внутреннего сгорания. М. : Транспорт, 2018. 229 с.

5. Практическая динамика легкового автомобиля / В. П. Бехтир [и др.]. Ульяновск : УАГТУ, 2015. 91.

© Кургузов И.В., 2026

УДК 621.43.052

Н.Е. ЛАДЫНИН
blth@yandex.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Н.Х. МУСИН

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ВЫПУСКНОГО КАНАЛА НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРА

Аннотация: в работе рассмотрено комплексное воздействие теплозащитных покрытий на выпускном канале двигателя внутреннего сгорания на температурное поле головки цилиндра. Описаны механизмы перераспределения теплового потока, влияние геометрии канала, а также методология конъюгированного теплообмена и экспериментальной верификации. Установлено, что применение покрытий снижает локальный нагрев выпускных клапанов, повышает эффективность рабочего процесса, но требует учёта вторичных термических напряжений.

Ключевые слова: тепловой баланс; головка цилиндра; выпускной канал; теплозащитное покрытие; конъюгированный теплообмен; численное моделирование; термические напряжения.

Применение теплозащитных покрытий (ТЗП) на внутренних поверхностях выпускного канала двигателя внутреннего сгорания представляет собой эффективный метод управления тепловым балансом головки цилиндра (ГЦ). Основной физический механизм действия заключается во введении дополнительного термического сопротивления на пути теплопередачи от отработавших газов к металлоконструкции выпускного коллектора и сопряжённой зоне ГЦ. Традиционные материалы покрытий, такие как частично стабилизированный диоксид циркония (PSZ) или иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ), обладают низкой теплопроводностью в диапазоне 1,2–2,5 Вт/(м·К), что существенно ограничивает конвективный и радиационный теплообмен. В результате снижается прямой нагрев прилегающих участков ГЦ, в первую очередь зоны выпускного клапана и его седла. Одновременно формируется положительная обратная связь: уменьшение потерь тепла через стенки приводит к повышению температуры и давления рабочего тела в камере сгорания. Это способствует интенсификации процессов смесеобразования и сгорания, что в итоге повышает индикаторный коэффициент полезного действия и снижает удельный расход топлива на 3–7 %. Термодинамический эффект объясняется первым законом термодинамики: снижение теплоотвода в стенки увеличивает долю теплоты, преобразуемой в механическую работу, что особенно заметно при частичных нагрузках и на режимах холодного пуска.

Влияние ТЗП на температурное поле ГЦ носит строго дифференциальный характер. Наиболее выраженный эффект наблюдается в зоне выпускного клапана, где снижение теплового потока от коллектора позволяет уменьшить рабочую температуру на 30–50 °C, что критически важно для предотвращения термоусталости и прогара клапанов. В то же время, зона впускного клапана и перемычек между цилиндрами может испытывать локальный нагрев. Это обусловлено двумя факторами: потерей эффекта внешнего охлаждения от ранее горячего выпускного тракта и общим ростом теплонапряжённости камеры сгорания. Перераспределение тепловых потоков требует тщательного расчёта температурных градиентов, так как их изменение напрямую влияет на величину термических напряжений в металлоконструкции. При недостаточной эффективности системы охлаждения двигателя возможен рост средней температуры ГЦ, что нивелирует преимущества применения покрытий и повышает риск детонационных процессов. Контроль температурного поля осуществляется через расчёт граничных условий третьего рода с учётом локальных коэффициентов теплоотдачи, а также через анализ напряжений по формуле $\sigma_т = E \cdot \alpha \cdot \Delta T/(1–\nu)$, где E – модуль упругости, α – коэффициент линейного расширения, ν – коэффициент Пуассона. Для алюминиевых сплавов ГЦ (типа АЛ25 или АК12М2) превышение градиента 15 °C/мм в зоне клапанных перемычек может инициировать зарождение микротрещин.

Геометрия выпускного канала выступает вторичным, но значимым модулятором тепловых процессов. Форма, сечение и радиусы изгибов коллектора определяют газодинамическую структуру потока отработавших газов, что напрямую влияет на распределение коэффициентов конвективной

теплоотдачи по стенкам. Неравномерность скоростного поля создаёт локальные зоны повышенного теплообмена, где тепловая защита работает наиболее интенсивно. Оптимизация геометрии выпускного тракта с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет выровнять распределение температурного потока, повышая однородность работы ТЗП. Сочетание рациональной формы канала и нанесённого покрытия обеспечивает синергетический эффект: снижение гидродинамических потерь давления и минимизация локальных перегревов. Важно учитывать, что толщина и равномерность нанесения самого покрытия также зависят от геометрии поверхности, так как в зонах резких переходов возможно образование дефектов, снижающих эффективность теплозащиты. Расчёт теплопередачи в изогнутых участках требует учёта кривизны стенок и вторичных течений, возникающих в пограничном слое. При моделировании пульсирующего потока отработавших газов необходимо применять нестационарные методы (LES или DES), поскольку акустические волны и отражения от коллектора влияют на локальную скорость и, следовательно, на интенсивность теплоотдачи.

Современная методология исследования теплового состояния ГЦ с ТЗП базируется на интеграции численного моделирования и экспериментальной верификации. Ключевым вычислительным подходом является расчёт конъюгированного теплообмена (CHT), который позволяет одновременно решать уравнения Навье–Стокса для газовой фазы и уравнения теплопроводности для твёрдого тела. Такой метод исключает применение упрощённых граничных условий и учитывает реальную теплоёмкость и теплопроводность материалов ГЦ, коллектора и покрытия. Для оценки напряжённо-деформированного состояния результаты теплового моделирования передаются в пакеты конечноэлементного анализа (FEA). Экспериментальная проверка адекватности моделей проводится с использованием инфракрасной термографии, обеспечивающей бесконтактное картирование поверхностных температур, и контактных термопарных датчиков, размещённых в критических зонах клапанов и перемычек. Сравнение расчётных и измеренных полей температур позволяет калибровать математические модели и обеспечивать достоверность прогнозирования долговечности конструкции. Численная сетка строится с учётом пограничного слоя ($y+ <1$), что гарантирует корректное разрешение градиентов скорости и температуры у стенок. При обработке данных ИК-камеры необходимо вводить коррекцию на степень черноты поверхности ($\varepsilon \approx 0{,}85–0{,}95$ для оксидных покрытий), а термопары калибруют по эталонным источникам с погрешностью не более ±1,5 °C.

Практическое применение теплозащиты выпускного канала сопряжено с необходимостью учёта вторичных эффектов. Снижение теплоотвода в охлаждающую жидкость приводит к повышению температуры наружной поверхности коллектора, что ускоряет выход каталитического нейтрализатора на рабочую температуру и снижает выбросы вредных веществ в период пуска двигателя. Однако термическая изоляция увеличивает разность температур

между внутренними и наружными слоями металла, что может способствовать росту термических напряжений в зоне перехода от выпускного порта к основной части ГЦ. Экономическая целесообразность технологии определяется балансом между повышением топливной экономичности и ресурса клапанной группы, а также затратами на нанесение покрытий и возможное увеличение массы узла. В условиях современных требований к экологичности и эффективности двигателей внутреннего сгорания, разработка оптимизированных систем тепловой защиты выпускного канала остаётся актуальным направлением исследований, требующим комплексного подхода к проектированию, моделированию и экспериментальному подтверждению. Перспективными направлениями являются использование градиентных покрытий с плавным изменением теплофизических свойств, а также интеграция ТЗП в аддитивные технологии изготовления коллекторов, что позволяет минимизировать дефекты интерфейса и повысить усталостную прочность.

Библиографический список

1. Петров, П. П. Тепловые процессы в двигателях внутреннего сгорания : учебное пособие / П. П. Петров. – Уфа : УГАТУ, 2018. – 210 с.

1. Сидоров, В. М. Конъюгированный теплообмен в головке цилиндра дизеля / В. М. Сидоров, А. И. Козлов // Двигателестроение. – 2020. – № 3. – С. 15–21.

3. Иванов, А. В. Численное моделирование тепловых полей выпускного коллектора с теплозащитным покрытием / А. В. Иванов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2021. – № 2. – С. 45–58.

4. Кузнецов, Д. С. Экспериментальное исследование температурных полей головки цилиндра методом инфракрасной термографии / Д. С. Кузнецов, Е. В. Морозов // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – № 8. – С. 33–40.

5. Лебедев, С. А. Теплозащитные покрытия в двигателестроении : монография / С. А. Лебедев. – СПб. : СПбПУ, 2020. – 185 с.

6. Новиков, И. И. Газодинамика выпускных систем поршневых двигателей / И. И. Новиков, Р. С. Галимов // Труды УУНИТ. Технический вестник. – 2022. – Т. 14, № 4. – С. 78–86.

7. Морозов, Е. В. Термические напряжения в головках цилиндров двигателей внутреннего сгорания / Е. В. Морозов, К. А. Волков // Двигатели внутреннего сгорания. – 2021. – № 2. – С. 12–19.

8. Волков, К. А. Аддитивные технологии в производстве выпускных коллекторов / К. А. Волков, А. С. Белов // Машиностроение и инжиниринг. – 2023. – № 5. – С. 44–51

© Ладынин Н.Е., 2026

УДК 621.432.3

Т.Р. Минигалеев
timurminigaleev@mail.ru
Науч. руководитель – д-р техн. наук М.Д. Гарипов

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЁТ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КАРТЕРА МАЛОРАЗМЕРНОГО ЧЕТЫРЁХЦИЛИНДРОВОГО ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в статье рассматривается четырехтактный поршневой двигатель внутреннего сгорания мощностью около 13 л.с. для беспилотных летательных аппаратов. В рамках работы был выполнен расчёт его картера на прочность.
Ключевые слова: X-образная компоновка, расчет, БПЛА.

Сегодня современная малая авиация активно развивается: растёт использование лёгких самолётов и беспилотников, что требует создания лёгких, надёжных и простых в эксплуатации двигателей. Широко применяются четырёхтактные двигатели с воздушным охлаждением благодаря их простоте и эффективности. На кафедре ДВС разрабатывается двигатель с Х-образной компоновкой. Особое внимание уделяется разработке картера как основного несущего элемента. Он служит основой для установки цилиндров, коленчатого вала и вспомогательного оборудования, принимая на себя существенные динамические и вибрационные воздействия, возникающие в процессе работы двигателя.

Целью данной работы является расчёт напряжённо-деформированного состояния картера с использованием модуля Simulation, интегрированного в CAD-систему SolidWorks 2018.

На рисунке 1 представлен внешний вид проектируемого двигателя, в таблице 1 – его технические характеристики. Двигатель –четырехцилиндровый четырехтактный, с Х-образной компоновочной схемой.

Таблица 1

Технические характеристики проектируемого двигателя:

Характеристика	Значение
Масса двигателя, кг	5.45
Рабочий объём, $см^3$	160
Номинальная мощность, л.с.	13
Тяга двигателя, кг	24
Компоновочная схема	Х-образная
Материал корпуса	АК12М2МгН

Материал корпуса по ГОСТ 1583-93 сплав АК12М2МгН выбран по причине хороших литейных свойств и низкой хрупкости при малой массе, что является важным параметром для двигателей малой авиации.

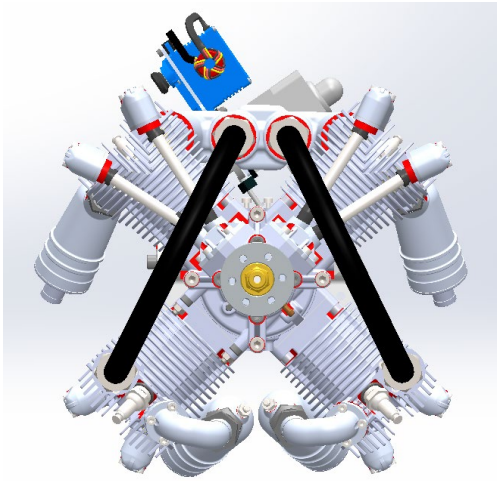


Рис. 12. Двигатель с *X*-образной компоновкой

Расчёт картера проектируемого Х-образного двигателя выполнялся с учётом специфики передачи нагрузок от двух цилиндров, расположенных под углом 90° друг к другу. При анализе напряжённо-деформированного состояния картера учитывалось, что нагрузки от цилиндров, возникающие в результате рабочего хода, передаются на картер последовательно, а не одновременно. В момент действия сил на картер, усилие возникает только от одного цилиндра, поскольку принятое чередование вспышек не предусматривает одновременного возникновения максимальных усилий на разных шейках. Сила, формирующаяся вследствие максимальных давлений в первом цилиндре, направлена перпендикулярно плоскости стыкового соединения половин корпуса картера. Сила, создаваемая максимальным давлением второго цилиндра, приложена параллельно линии сопряжения указанных частей картера. Области приложенных сил от обоих цилиндров воздействуют на опоры подшипников картера под углом 120°.

В модели были заданы следующие граничные условия:

Закрепление картера происходит в местах, через которые осуществляется стяжка двух половин корпуса;

Нагрузка на картер в местах опор подшипников коленвала – 2800 Н;

Места закрепления картера представлены на рисунке 2. На рисунках 3, 4 представлены места приложения нагрузок от первого цилиндра и результат приложения нагрузок на картер. На рисунках 5, 6 представлены места приложения нагрузок от второго цилиндра и результат приложения нагрузок на картер.

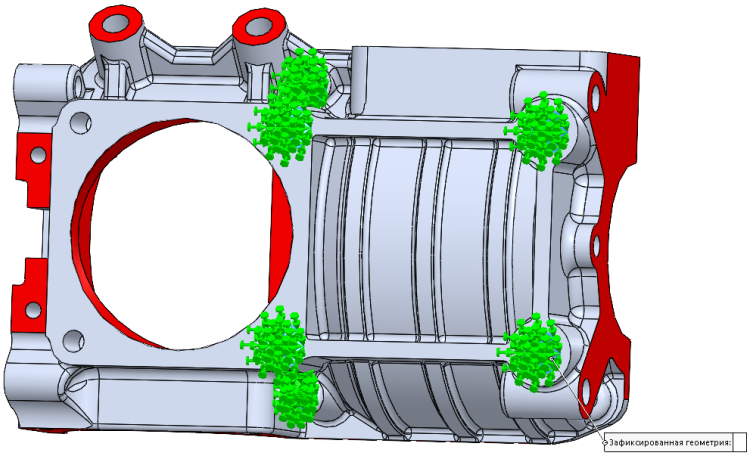


Рис. 13. Точки крепления картера

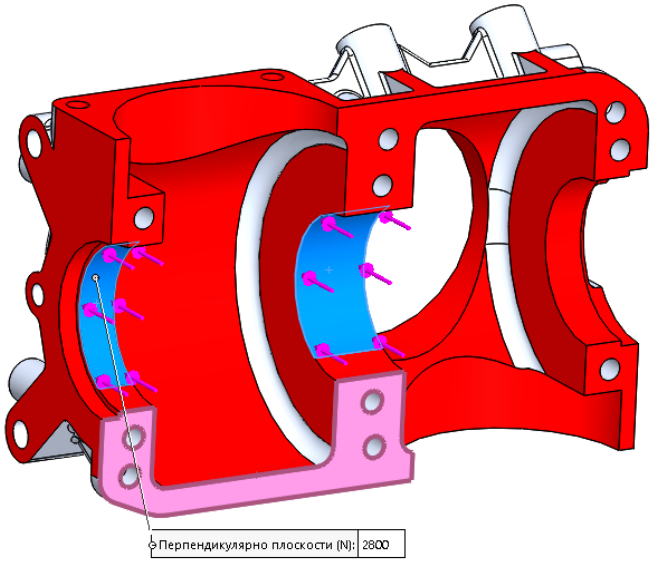


Рис. 14. Приложенная нагрузка

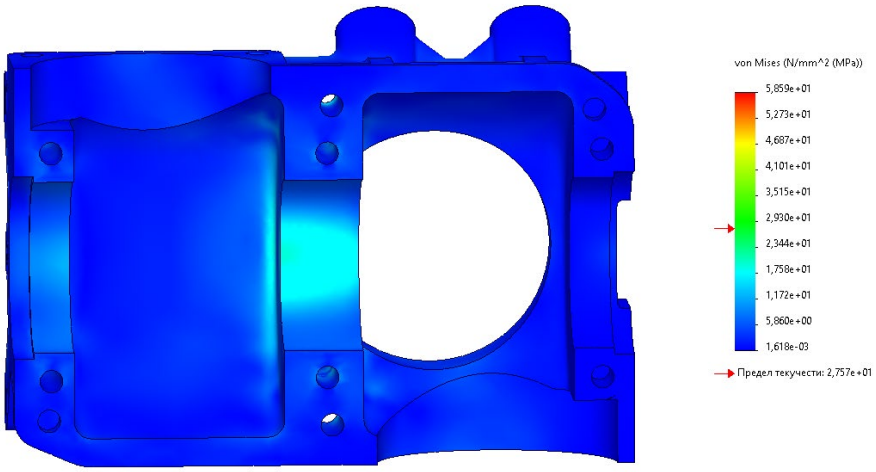


Рис. 15. Результаты приложения нагрузок

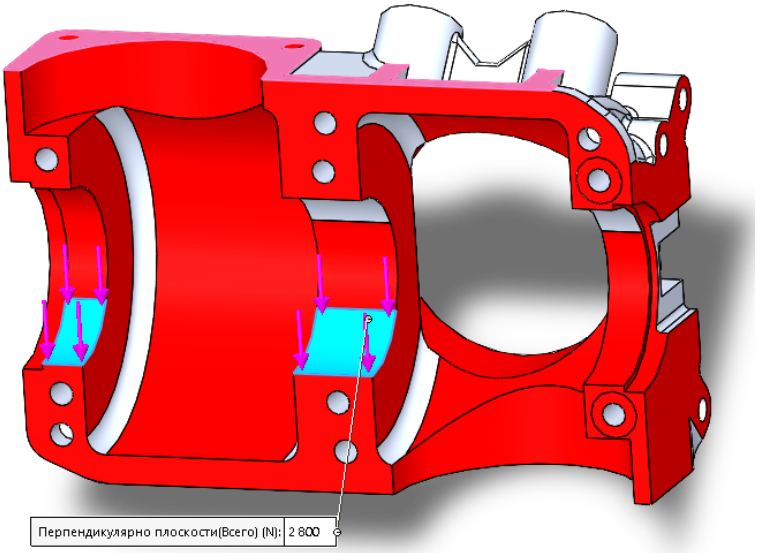


Рис. 16. Приложенная нагрузка

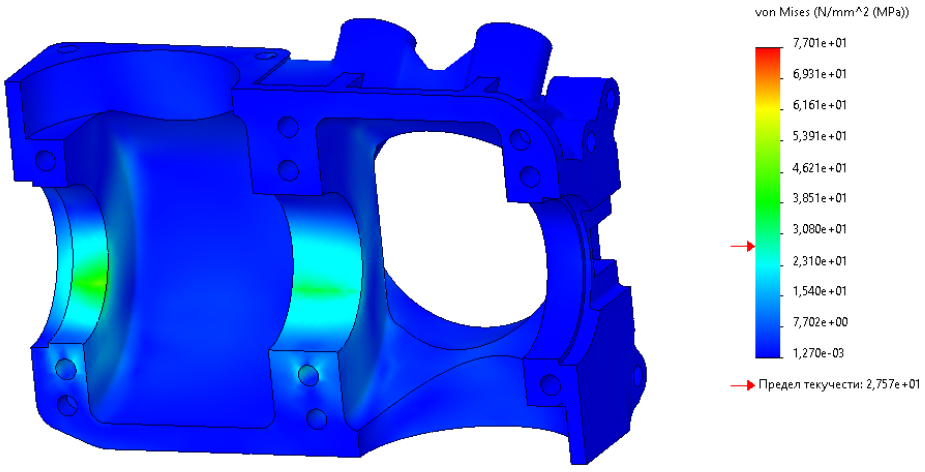


Рис. 17. Результаты приложения нагрузок

В рамках проведенной работы были определены поля деформаций и напряжений картера. В дальнейшем планируется продолжение проведения работ, будет рассчитан запас усталостной прочности.

Библиографический список

1. Орлов П. И. *Конструкция и расчёт деталей авиационных двигателей. Книга вторая.* – Киев: 1940. (дата обращения 25.03.2026)

2. Биргер И. А., Дружинин Н. И., Житомирский В. К. *Авиационные поршневые двигатели: кинематика, динамика и расчёт на прочность.* – Москва: Оборонная промышленность, 1950. (дата обращения 25.03.2026)

3. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справ. - М : Машиностроение, 1993.(дата обращения 30.04.2026)

© Минигалеев Т.Р., 2026

УДК 338.2:504.06(470)

А.И. МИРГАЗОВ
jekatomf@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Н.Х. МУСИН

Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАТНОЙ ПАРКОВОЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КАК СРЕДСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА К ОБЪЕКТАМ СОЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Аннотация: в работе рассматривается проектирование платной парковочной инфраструктуры как инструмента регулирования транспортных потоков в зонах объектов социальной направленности на примере территории РКБ им. Куватова в г. Уфе. На основе натурных обследований выполнен анализ загрузки парковочного пространства и интенсивности движения, разработаны варианты организации парковок и оценены их параметры с учётом нормативных требований. Рассчитан коэффициент оборачиваемости и проведено сравнение проектных решений. Установлено, что внедрение платных парковок с оптимизацией схемы размещения позволяет повысить оборачиваемость и снизить перегрузку улично-дорожной сети.
Ключевые слова: парковки, инфраструктура, интенсивность, пропускная способность, загрузка, оборот парковочных мест и уровень автомобилизации.

Платные парковки — актуальная мера в организации городского пространства, которая применяется во многих российских городах и за рубежом. В РФ на сегодняшний день в 38 городах реализованы проекты платных парковок. В г. Уфе платные парковки работают с 27 июня 2025 года [1]. Платные парковки могут создаваться для достижения различных целей. Первая очередь платных парковок в Уфе была создана для:

1) снижения нагрузки на улично-дорожную сеть;
2) снижения количества нарушений правил парковки;
3) увеличения оборачиваемости парковочных мест;
4) сокращение потоков личного автотранспорта, и стимулирование использования других видов транспорта;

5) создание предпосылок для развития пешеходных зон и велосипедных дорожек в городе.

Дальнейшее внедрение платных парковок в г. Уфе может быть организовано в виде точечных изменений, например, для обеспечения доступности социальных и инфраструктурных объектов. Целью данной работы является: разработать и обосновать проект платной парковочной инфраструктуры, направленной на оптимизацию транспортных потоков и повышение доступности объектов социальной инфраструктуры, с учетом современных требований к организации движения, эффективного использования парковочного пространства и устойчивого городского развития.

Был проведен обзорный анализ участков улиц возле объектов социальной инфраструктуры в центре города. В результате были найдены проблемные участки возле Республиканской клинической больницы имени Куватова. РКБ Куватова – это объект массового притяжения людей со всей республики, поэтому его парковочная территория всегда перегружена. В связи с этим наблюдаются нарушения правил парковки, включая образование второго ряда или остановкой автомобилей в не положенных местах (рис.1).

Рис. 1. Второй ряд припаркованных автомобилей на уч. ул. Кирова

Обследование текущей схемы организации дорожного движения (ОДД) и парковочных мест вокруг РКБ (4 улицы) показало, что в пиковые часы территория вмещает 252 автомобиля. С помощью модели в AutoCAD с дополнением SAS Planet рассчитана максимальная вместимость территории без учёта требований пожаробезопасности, правил дорожного движения и природно-климатических факторов — 278 парковочных мест. Сравнение фактической и теоретически возможной загрузки приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение фактической и теоретической загрузки парковок

Улица	Факт. загрузка, в ед.	Теор. загрузка в ед.	Загрузка мест в%
Кирова	26	23	113
Мингажева	63	59	107
Кустарная	131	152	86

Революционная	32	41	78
Суммарно	252	278	91

Сравнение фактической загрузки парковочного пространства с его теоретической вместимостью выявило перегрузку: в пиковые часы число автомобилей вокруг РКБ превышает количество доступных мест.

В ходе анализа выявлены участки с наибольшей перегрузкой парковочного пространства — улицы Кирова и Мингажева. Для повышения доступности парковок у РКБ планируется увеличить их оборачиваемость с применением льготного режима: бесплатный период — 1 час, тариф за последующее время — 40 руб./ч.

Первый вариант, расположить парковки вдоль участков улиц, с учётом всех норм и ГОСТ, рис. 2.

Рис. 2. Парковочные места, расположенные вдоль уч. ул. Кирова и Мингажева

Второй вариант решения, расширить территорию вдоль ул. Кирова, а участок Мингажева оставить аналогично первому варианту. Данный вариант позволит не только убрать второй ряд, см. рис. 1, но и добавить новые парковочные места, см. рис. 3.

Рис. 3. Места, расположенные на ул. Кирова на газоне

Согласно данным табл. 2, среди рассматриваемых решений вариант 2 обеспечивает наибольшую вместимость парковочных мест.

Таблица 2

Сравнение вариантов решения

Показатель	Вариант 1		Вариант 2	
	Кирова	Мингажева	Кирова	Мингажева
Общее кол-во мест в ед.	22	8	54	8
Кол-во мест для ТС инвалидов в ед.	2	1	5	1
Кол-во мест для электромобилей в ед.	1	0	2	0

В соответствии с методическими рекомендациями по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения в городах РФ выполнены расчёты требований к проезжей части, а также определена перспективная интенсивность движения и пропускная способность на основе натурных исследований интенсивности автомобильного трафика на улицах [2].

Натурные исследования показали, что фактическая интенсивность на участке ул.Кирова составляет 756 авт./ч, а на Мингажева – 124 авт./ч.

Была рассчитана перспективная интенсивности движения транспортных средств (N_c^1) на расчётный срок эксплуатации парковки, ед/ч; кол-во полос движения (n_r), нужных для размещения парковки, в ед; ширина проезжей части и минимум, который должен быть в м. Результаты расчётов можно увидеть в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчётов

Улица	N_c^1	n_r	R_{rp}	$R_{rp(\min\ )}$
Кирова	907	1	7,75	7,75
Мингажева	130	1	5,5	5,5

Полученные результаты показывают перегруженность парковочного пространства вблизи РКБ им. Куватова, обусловленную высокой концентрацией транспортного спроса и недостаточной оборачиваемостью парковочных мест.

Далее был рассчитан коэффициент оборачиваемости парковки, который показывает сколько автомобилей обслуживается одним парковочным местом в течение определённого периода:

$$K_{\text{об}} = \frac{N_{\text{приб}}}{M_o},$$

где $N_{приб}$ – количество прибывающих автомобилей (табл. 4), M_o – общее кол-во мест.

Таблица 4

Кол-во авто, использующих парковки по времени

Камера	Время	Кол-во прибывших авто
первый участок	от 8 до 12	158
второй участок	от 8 до 12	82
первый участок	от 12 до 16	210
второй участок	от 12 до 16	78
первый участок	от 16 до 20	314
второй участок	от 16 до 20	58
первый участок	от 20 до 8	19
второй участок	от 20 до 8	5

Фактическая загрузка на парковочных местах:

$$Z = \frac{N_{зан}}{M_0} \cdot 100\%$$

где $N_{зан}$ – количество занятых мест.

Проведено сопоставление числа парковочных мест проектируемого и существующего решений при фиксированной загрузке парковок (табл. 5)

Таблица 5

Сравнение текущей и проектной вместимости парковочных мест

Участки на улицах	Кол-во мест в текущем состоянии		Кол-во мест во 2варианте	
	Кирова	Мингажева	Кирова	Мингажева
$N_{приб}$, ед	100	32	100	32
$K_{об}$, ед	4	4	2	4
Z, %	113	88	48	88

Расчёты показали, что предложенные мероприятия обеспечивают увеличение количества доступных мест и рост коэффициента оборачиваемости, что способствует снижению загрузки в пиковые часы и повышению доступности объекта. Полученные результаты подтверждают эффективность внедрения платной парковочной инфраструктуры как инструмента управления транспортными потоками в зонах массового притяжения.

Библиографический список

1. Парковочное пространство Уфы – URL: https://parking02.ru/ru/ (Дата обращения: 04.05.2026).

2. ОДМ 218.2.020-2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог».

3. Распоряжение Минтранса России от 07.09.2023 № АК-188-Р «Об утверждении методических рекомендаций по определению размера платы за пользование платными парковками».

© Миргазов А.И., 2026

УДК 621.43.66

Э.И. МУРЗЫЕВ
eldarmoto149@yandex.ru
Науч. руководв. – д.т.н. Н.Ю. ДУДАРЕВА

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Аннотация: работа посвящена анализу свойств материалов, применяемых для изготовления гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Проведена оценка физико-механических свойств различных материалов с учетом условий эксплуатации двигателей, их механических и температурных нагрузок.
Ключевые слова: гильза, материалы, применение, двигатель внутреннего сгорания.

Двигатели внутреннего сгорания остаются одним из наиболее распространённых источников механической энергии в транспортной, сельскохозяйственной и промышленной технике. Несмотря на развитие электрических и гибридных силовых установок, ДВС продолжают широко применяться благодаря высокой удельной мощности, автономности и отработанной технологии производства. При этом к современным двигателям предъявляются повышенные требования по ресурсу, экономичности, экологичности и надёжности [1].

Одним из наиболее нагруженных элементов цилиндро-поршневой группы является гильза цилиндра. Её внутренняя поверхность служит направляющей для поршня и поршневых колец, воспринимает давление газов, участвует в герметизации рабочего объёма и передаёт значительную часть теплоты от продуктов сгорания к системе охлаждения. В процессе эксплуатации гильза работает при высоких температурах, переменных давлениях, интенсивном трении и воздействии продуктов сгорания топлива. Поэтому её тепловое состояние напрямую влияет на износостойкость, стабильность зазора в паре «поршень - гильза», расход масла, компрессию и общий ресурс двигателя [2].

Материал гильзы определяет способность детали воспринимать тепловые и механические нагрузки. Наиболее распространёнными материалами являются серые и легированные чугуны, стали, алюминиевые сплавы с износостойкими

покрытиями, а также композиционные и биметаллические решения. Каждый материал имеет собственное сочетание теплопроводности, прочности, твёрдости, коэффициента линейного расширения и износостойкости. При одинаковых условиях работы это приводит к различному распределению температуры по толщине стенки гильзы и к различному уровню тепловой и механической напряжённости.

В работе был проведен анализ материалов, которые используются в ДВС для изготовления гильз, проанализированы достоинства и недостатки материалов с точки зрения применения для деталей цилиндропоршневой группы. Итоговый анализ представлен в табл. 1.

Таблица 1

Материалы, применяемые для гильз цилиндров [3-5]

Материал	**Коэффициент тепло-проводности, Вт/(м·К)**	**Коэффициент линейного расширения, 10^{-6} 1/К**	**Основные преиму-щества**	**Ограничения**
Серый чугун	45-55	10-12	Износостойкость, хорошая приработка, удержание масла	Большая масса, средняя теплопроводность
Легирован-ный чугун	35-50	10-12	Повышенная твёрдость и теплостой-кость	Более высокая стоимость и сложность механической обработки
Сталь	35-50	11-13	Высокая прочность, стойкость к давлению	Требует упрочнения рабочей поверхности
Алюминиевый сплав	120-180	20-24	Малая масса, интенсивный отвод теплоты	Высокий коэффициент линейного расширения, необходимость использования упрочняющих покрытий
Композиционный материал	Зависит от состава	Зависит от состава	Возможность сочетания свойств основы и покрытия	Сложная технология изготовления

С учетом физико-механических свойств материалов (табл. 1) была проведена оценка достоинств и недостатков для вышеприведенных материалов, которая представлена в табл. 2.

Таблица 2

Достоинства и недостатки материалов гильз цилиндров ДВС

Вид материала	**Твердость**	**Прочность**	**Плотность**	**Коэффициент тепло-проводности**
Серый чугун	+	+	–	–
Легированный чугун	+	+	–	–
Сталь	+	+	–	–
Алюминиевый сплав	–	+	+	+
Композиционный материал	–	+	+	+

Вывод. В работе установлено, что гильза цилиндра ДВС работает в условиях высоких температур, давления и трения, поэтому материал гильзы должен обеспечивать высокие теплопроводность, износостойкость и стабильность размеров. Проведенный анализ показывает, что выбор материала гильзы представляет собой сложную и многокритериальную задачу, при решении которой необходимо уделять внимание назначению двигателя и условиям его эксплуатации, а также его конструктивным особенностям. Перспективы развития материалов для гильз цилиндров ДВС в настоящее время связаны с совершенствованием как самих сплавов, так и технологий нанесения покрытий.

Библиографический список

1. Santos Filho, D., Metallurgical and topographical alterations of the engine cylinder block of internal combustion engine, Sao Paulo: Polytechnic School of the University of Sao Paulo, 2013.
2. Cylinder components. Properties, applications, materials. 2nd edition. Wiesbaden: Springer, 2016. 143 p.
3. Баранов, С. В. Технология обработки материалов. – Москва: Машиностроение, 2015. – 325 с.
4. Васильев, И. А. Современные материалы для двигателей. – Санкт-Петербург: Политехника, 2018. – 290 с.
5. Жуков, Н. Р. Поверхностные технологии в машиностроении. – Казань: Идея Пресс, 2017. – 350 с.

© Мурзыев Э.И.,2026

УДК 621.43.013.1: 533.6.07

А.А. НАЗИРОВ
airatnaziroff@yandex.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. А.А. ЧЕРНОУСОВ

Уфимский университет науки и технологий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАКТОВ НАТУРНЫМ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Аннотация: представлены методика и результаты натурных продувок калиброванных шайб на лабораторном стенде для трёх конфигураций измерительного канала. Предложена двухэтапная процедура обработки данных, позволяющая выделить коэффициент расхода местного сопротивления с использованием 1D-модели в среде ALLBEA. Полученные характеристики предназначены для валидации моделей нестационарных течений в трубопроводах.
Ключевые слова: газовоздушный тракт, местное сопротивление, расходная характеристика, натурный эксперимент, продувочный стенд, коэффициент расхода, обработка данных, 1D-моделирование, валидация

Введение. Достоверность одномерных моделей рабочих процессов в двигателестроении напрямую зависит от точности характеристик местных сопротивлений газовоздушных трактов (ГВТ). Такие характеристики могут быть получены 3D-расчётами течений в инженерных пакетах, однако наиболее надёжные данные дают натурные продувки. Для ответственных расчётов оптимальны комбинированные методики, включающие как расчёты в 3D, так и «калибровку» по экспериментальным данным. Этим обусловлена актуальность владения инструментами и методикой проведения и обработки продувок.

Проработаны теоретические и методические основы расходных характеристик местных сопротивлений: выполнен обзор существующих продувочных стендов, выбраны основные расчетные зависимости, обоснован выбор схемы установки и предложена методика обработки результатов продувок. Обработка, как уже говорилась может и должна включать разные этапы, включая использование данных экспериментов для «калибровки» (коррекции) точек расходной характеристики из расчетов в 3D. Также важное требование практически применяемой методологии – автоматизация процедур обработки данных, что также учитывается нами в ходе работ по данному направлению развития ПО.

В выполненном исследовании решались задачи реализации на практике известных теоретических подходов к идентификации характеристик. Для этого необходимо было собрать и отладить продувочный стенд на базе имеющегося

лабораторного оборудования, опробовать различные схемы сборки и провести продувки калиброванных шайб.

Экспериментальная установка представляет собой стенд для продувок каналов воздухом, собранный на базе лабораторного оборудования кафедры УУНиТ. В ходе исследования изучалась возможность с высокой точностью определить расходные характеристики шайб с острыми кромками отверстий для исследовательских расчеты нестационарных течений воздуха в трубопроводе.

Атмосферный воздух поступает сначала в расходомер, представляющий собой ротаметр РГ-40 или РГ-250. Выбор конкретного ротаметра определяется величиной объемного расхода (до 40 м3/ч или более). После расходомера воздух проходит канал с исследуемой калиброванной шайбой. Канал содержит: входной участок трубы длиной l_1 (не менее $10d_т$ для формирования стабилизированного профиля скорости), шайбу толщиной 3,0 мм с отверстием диаметром $d_ш$ равным 6, 10, 14, 18 или 24 мм, а также выходной участок длиной l_2 ($l_2 \geq 15d_т$ для выравнивания потока за шайбой), в зависимости от конфигурации (схемы сборки): «труба – шайба – труба», «труба – шайба» или «шайба – труба». Диаметр трубы $d_т = 24{,}30$ мм, площадь поперечного сечения трубы $F_т = 463{,}77 \cdot 10^{-6}$ м².

Действительные диаметры шайб измерены электронным штангенциркулем (с точностью не хуже 0,03 мм): 5,9580 мм; 10,220; 14,040; 18,062 мм; для конфигураций на рис. 2 и 3 вместо шайбы на конец трубы устанавливали элемент, оформляющий круглое отверстие с острой кромкой диаметром 24,030. Приняты следующие площади сечения $F_с = \frac{\pi}{4} d_ш^2$: 27,8735; 82,0256; 154,834; 256,230 и 453,647 мм2.

Для измерения атмосферного давления используется барометр, а для измерения температуры окружающего воздуха — термометр. В сечениях до и после шайбы предусмотрены штуцеры для подключения водяных дифференциальных манометров. Измерения расходов, полной температуры и давлений в двух сечениях необходимы, чтобы определять точки расходной характеристики канала и собственно шайбы как местного сопротивления.

Порядок измерений на стенде. Продувка воздухом выполнена для трех вариантов исполнения канала, различающихся конфигурацией соединительных труб относительно исследуемой шайбы.

Сборка №1: «труба – шайба – труба» с шайбой, установленной между подводящей и отводящей трубами. Воздух после расходомера стабилизируется перед шайбой в первой из труб. Затем поток воздуха выравнивается после шайбы во второй трубе, после которой направляется к насосу (в соответствии с рисунком 1).

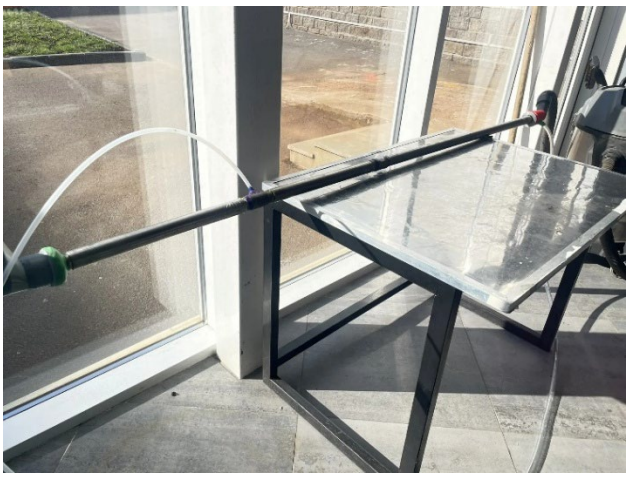


Рис.1. Конфигурация «труба – шайба – труба»

Сборка №2: «труба – шайба». В этой конфигурации стабилизирующая поток труба расположена только перед шайбой, а после шайбы воздух поступает в насос без дополнительного участка трубы. Такая конфигурация обеспечивает снятие точек расходной характеристики при истечении воздуха через шайбу на конце исследуемого трубопровода (рисунок 2).

Рис. 2. Конфигурация «труба – шайба»

Сборка №3: «шайба – труба». Конфигурация с расположением трубы после шайбы обеспечивает продувку шайбы на режимах втекания воздуха в трубопровод (рисунок 3) для работ по валидации 1D моделей нестационарного течения.

Рис. 3. Конфигурация «шайба – труба»

Продувки выполнены для всех схем сборки и всех шайб в каждой из схем, на трех режимах по расходу воздуха. Каждое такое измерение повторялось трижды. Перед началом продувок проводилась проверка герметичности всех соединений. После включения воздушного насоса и установки стационарного режима течения, показания дифференциальных манометров заносились в протокол, а изменение показаний счетчика газовых расходомеров фиксировалось видеосъемкой.

Порядок обработки измерений. Первичная обработка продувок выполнена по методике, включавшей следующие этапы:

1. Вычисление объемного расхода Q в каждом измерении путем усреднения по 5 интервалам из снятого видеоролика, что позволило точнее определить эту величину по показаниям ротаметра РГ-40 или РГ-250, исключить промахи и показать, что случайный разброс мал.

2. Пересчет показаний ротаметра в массовый расход $G = \rho_0 Q$, где ρ_0 – плотность воздуха при измеренных параметрах (p_0 и T_0) воздуха в лаборатории.

3. Расчет абсолютных статических давлений: p_1 и p_1 – соответственно, на входе и на выходе из продуваемого канала (также для каждого измерения на режиме).

4. Вычисление полного давления на входе: $p_1^* = p_1/\pi(\mathrm{M}_1)$, где M_1 – число Маха, определенное из уравнения расхода:

$$G = m \cdot y(\mathrm{M}_1) \cdot p_1 F_1/\sqrt{T_1^*},$$

где $T_1^* = T_0$ – полная температура воздуха в канале, $m = m(\gamma,\ R)$ – константа в уравнении расхода.

5. Вычисление $\beta = p_2/p_1^*$ – параметра режима течения в канала (от сечения 1 перед шайбой до сечения 2 после неё);

6. Вычисление теоретического расхода через канал с шайбой по этим данным:

$$G_{\text{теор}} = F_{\text{с}} \cdot (p_1^*/\sqrt{T_1^*}) \cdot \sqrt{\gamma/R} \cdot f(\beta,\ \gamma),$$

где $f(\beta, \gamma) = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}\left(\beta^{\frac{2}{\gamma}} - \beta^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)}$ – функция для докритических отношений давлений.

7. Вычисление коэффициента расхода всего канала $C_d = G/G_{\text{теор}}$ и отображение на графиках всех обработанных расходной характеристики канала $C_d = f(\beta)$, для контроля.

Вторичная обработка данных продувок включала расчеты стационарного течения воздуха в 1D модели канала в ALLBEA [1] (в соответствии с рисунком 4). Задача этого этапа – определить подбором уточненных значений C_d и β непосредственно на шайбе как на местном сопротивлении на границе двух каналов.

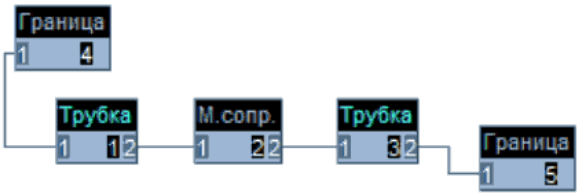


Рис. 4. Структурная схема 1D модели канала для любой из трех конфигураций

Уточненные значения C_d, превышают значения, получаемые первичной обработкой, поскольку те значения характеризуют течение через весь канал, с учетом интегрального действия потерь на трение в подводящем и отводящем каналах. При вторичной обработке C_d «очищаются» от этих потерь с использованием 1D модели, – той же, в рамках которой модели местных сопротивлений и их характеристики будут применены в расчетах движения волн, что и обосновывает корректность этого этапа методики. На рисунке 5 показаны выведенные на графики обработанные точки измерений при продувках.

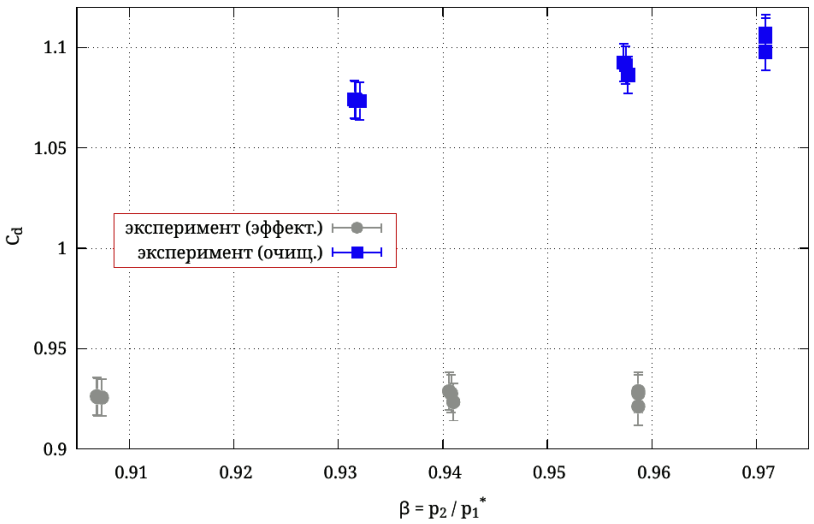


Рис. 5. Точки обработанных продувок шайбы диаметром 18 мм в канале

Значения «очищенных» от трения коэффициентов расхода (см. рисунок 5) превышают единицу, что, по нашему мнению, не является «нефизичным» результатом для конфигурации «труба – шайба – труба» (см. рисунок 1).

Аналогичным образом обработанные продувки шайб всех диаметров для всех трех конфигураций, послужат реперными точками для расходных характеристик, подставляемых в исследовательские расчеты движений волн в трубопроводах, подобные описанным в статье [2].

Заключение. В ходе исследования статически продуты воздухом каналы с интересующими шайбами с острокромочными отверстиями. Получены все необходимые расходные характеристики шайб, используемых на кафедре ДВС УУНиТ для валидации 1D моделей неустановившихся течений газа в трубопроводах и алгоритмов вычислений, встраиваемых в прикладное ПО [1].

Перспективой дальнейшей работы является завершение полного цикла обработки экспериментальных данных: расчёт коэффициентов расхода C_d для всех исследуемых шайб, всех схем сборки и всех режимов работы насоса, построение расходных характеристик в виде зависимостей $C_d(\beta)$, анализ влияния диаметра шайбы и конфигурации сборки на коэффициент расхода, а также оценка погрешностей измерений.

Библиографический список

1. Еникеев Р.Д., Черноусов А.А. Пакет прикладных программ ALLBEA для моделирования и оптимизации процессов энергетических установок // Двигателестроение. – 2023. – № 4 (294). – С. 3–15.

2. Черноусов А.А. О достоверности результатов моделирования движения волн конечной амплитуды в длинном неразветвленном трубопроводе с местными сопротивлениями в одномерном приближении. // Вестник УГАТУ. – 2009. – № 1. – С. 197–210.

© Назиров А.А., 2026

УДК 621.432.4

П.Л. НЕКРАСОВ, А.А. ШАРАФУТДИНОВ, Э.М. ХАЛИЛОВ
petrnekrasov61@gmail.com
Науч. руководов. – д-р техн. наук, проф. М.Д. ГАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в данной работе представлены результаты численного моделирования температурного состояния цилиндров двухтактного двигателя внутреннего сгорания. Оценка эффективности работы системы воздушного

охлаждения проводилась с помощью прикладного программного обеспечения *Simcenter Star-CCM+*. Полученные результаты показали потребность в доработке конструкции системы охлаждения.

Ключевые слова: система охлаждения; воздушный поток, численное моделирование.

На данный момент на кафедре двигателей внутреннего сгорания (ДВС) «Уфимского университета науки и технологий» ведется разработка четырехцилиндрового двухтактного V-образного бензинового двигателя с принудительным воздушным охлаждением мощностью 90 лошадиных сил.

Одним из ключевых вопросов при разработке двигателя является расчет системы охлаждения. В целях унификации конструкции решено использовать систему охлаждения серийного рядного двухцилиндрового двигателя. Отсюда следует, что целью данной работы является численное исследование возможности использования серийной системы охлаждения для разрабатываемого двигателя.

На рис. 1 представлен внешний вид двигателя. В серийной системе охлаждения для создания охлаждающего потока используется осевой вентилятор 1 (см. рис.1). Далее поток проходит через воздушный кожух 2 и охлаждая поверхности нагрева выходит через отверстие 3 в окружающую среду.

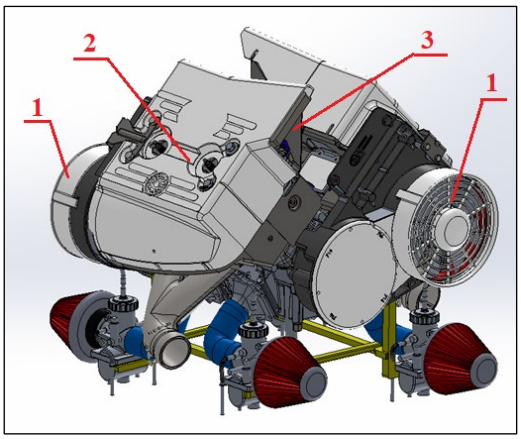


Рис. 1. Внешний вид двигателя

Моделирование теплового состояния цилиндров и головок цилиндров производилось с помощью прикладного программного обеспечения *Simcenter Star-CCM+*. Для этого было создано две расчетные области. Первая соответствовала твердотельной модели цилиндра, вторая – области течения охлаждающего потока.

Генерация охлаждающего потока производилась с помощью вращающейся системы координат с частотой соответствующей работе двигателя на максимальных оборотах (6500 мин$^{-1}$) [1].

На рис. 2 представлена скалярная сцена поля распределения температур по поверхности ребер охлаждения цилиндров и головок цилиндров (в

изометрии). По рисунку видно, что более теплонапряженным является цилиндр и головка, находящиеся дальше от вентилятора.

На рис. 3 представлена скалярная сцена поля температур на головке (вид сверху). По рисунку видно, что максимальная температура в области свечи зажигания соответствует 275°С. Из практики эксплуатации и испытаний данного двигателя известно, что такое значение температуры не допустимо, так как при дальнейшей эксплуатации на данном режиме приведет к поломке. Наблюдаемый перегрев второго цилиндра непосредственно связан с недостаточной эффективностью работы серийной системы воздушного охлаждения.

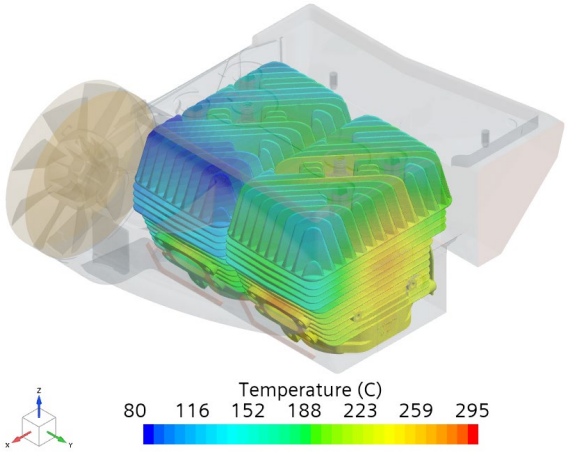


Рис. 2. Поле распределения температур по поверхности цилиндров и головок цилиндров (в изометрии)

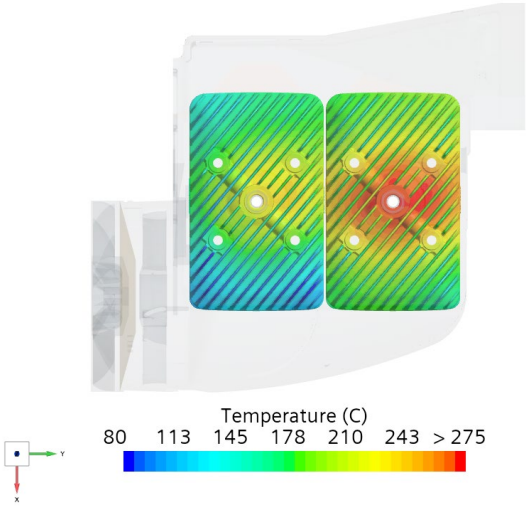


Рис. 3. Поле распределения температур по поверхности цилиндров и головок цилиндров (вид сверху)

На основе анализа, серийная система воздушного охлаждения с осевым вентилятором для разрабатываемого двигателя, обеспечивает недостаточное охлаждение [2]. С учетом вышесказанного требуется усовершенствовать систему охлаждения.

Библиографический список

1. Шарафутдинов, А. А. Расчет температурных полей деталей двухтактного двигателя с принудительным воздушным охлаждением / А. А. Шарафутдинов // Мавлютовские чтения : Материалы XIX Всероссийской молодежной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2026. – С. 295-297. – EDN XQVAAD.
2. Шароглазов, Б. А. Численная оценка температур деталей цилиндропоршневой группы двигателей воздушного охлаждения / Б. А. Шароглазов, И. И. Закомолдин // Двигателестроение. – 2009. – № 3(237). – С. 13-18. – EDN MTHDWL
3. Моделирование течения воздуха в кожухе системы охлаждения дизельного двигателя с центробежным и осевым вентиляторами. Исследование влияния размеров воздуховодов кожуха на равномерность воздушного потока / А. С. Климук, С. Н. Ботяновский, В. Т. Войтов, Д. Л. Янович // Актуальные вопросы машиноведения. – 2014. – Т. 3. – С. 151-154. – EDN ZCHPMX.

© Некрасов П.Л., Шарафутдинов А.А., Халилов Э.М., 2026

УДК 621.43.01-242.2:539.538

А.Д. ПАВЕЛЬЕВ
dap-2002@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. С.А. ЗАГАЙКО

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРЫ ТРЕНИЯ ЮБКА ПОРШНЯ-ЦИЛИНДР

Аннотация: повышение надежности двигателей внутреннего сгорания остается одной из ключевых задач машиностроения, что определяет актуальность исследований цилиндропоршневой группы, на долю которой приходится до 75% механических потерь. В работе проанализированы условия работы пары трения «юбка поршня - цилиндр», рассмотрены факторы, определяющие интенсивность ее изнашивания. Дан обзор отечественных и зарубежных подходов к расчету трения и механических потерь, отмечены преимущества упрощенных инженерных методик. Систематизированы требования к конструкции, геометрии и материалам юбки поршня и гильзы цилиндра, обеспечивающие заданный ресурс цилиндропоршневой группы.
Ключевые слова: цилиндропоршневая группа, пара трения, юбка поршня, гильза цилиндра, изнашивание, механические потери, двигатель внутреннего сгорания.

Одной из основных задач современного машиностроения остается повышение надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания. Среди всех узлов трения особо выделяется цилиндропоршневая группа, механические потери в которой могут достигать 75% от общих потерь двигателя. По данным, приведенным в литературе, в зависимости от режима работы и конструкции двигателя на долю трения поршневых колец и юбки поршня о поверхность цилиндра приходится от 40 до 75% всех потерь на трение в двигателе внутреннего сгорания. Исследование этого сопряжения позволяет прогнозировать ресурс, топливную экономичность, расход масла, шумовые и вибрационные характеристики двигателя в целом.

Фундаментальные основы расчетов на трение и износ заложены в работах И. В. Крагельского, В. В. Алисина и М. Н. Добычина, а методики расчета механических потерь в двигателях детально проработаны С. А. Загайко. В зарубежной литературе, в частности в трудах Livianos и Kyratzis, а также G. Offner, представлены более сложные комплексные модели, учитывающие гидродинамику масляной пленки, вторичное движение поршня и динамику всей системы гибкого тела. Эти модели, при всей их точности, требуют знания множества труднодоступных параметров, таких как точная влажность масла и топлива, что делает расчет значительно более сложным. В связи с этим для инженерной практики часто предпочтительнее более простые, но надежные методики, основанные на классической теории трения и смазки.

Рассмотрим условия, в которых работает пара трения «юбка поршня - цилиндр». Юбка направляет движение поршня в цилиндре и одновременно воспринимает боковую силу, прижимающую поршень к стенке цилиндра. Величина этой силы зависит от текущего положения поршня и характера процессов в рабочей полости. Также через боковую поверхность юбки отводится тепло от поршня и поршневых колец к стенке цилиндра. Чем больше площадь этой поверхности, тем эффективнее теплоотвод, меньше прорыв газов и слабее стук поршня, возникающий при износе втулки верхней головки шатуна.

На юбке находятся бобышки с отверстиями под поршневой палец. С днищем поршня они связаны массивными ребрами. Поскольку в зоне приливов сосредоточено больше металла, чем в остальных сечениях, под действием высоких температур деформации чаще всего проявляются именно в плоскости бобышек. Чтобы уменьшить температурные напряжения, в районе приливов выполняют прямоугольные углубления глубиной 0,5–1,5 мм. Их получают при литье или фрезерованием и условно называют «холодильниками».

Юбке поршня придают небольшую конусность: диаметр у днища делают на несколько сотых долей миллиметра меньше. Это позволяет уменьшить тепловой зазор без риска появления задиров. Такая форма нужна для того, чтобы при нагреве поршень расширялся равномерно, поскольку в верхней части его температура выше и тепловое расширение больше.

Тепловой зазор между поршнем и втулкой цилиндра предусматривают специально для предотвращения заедания. Головка поршня нагревается сильнее всего, поэтому радиальный зазор между головкой и втулкой назначают больше, чем между юбкой и втулкой. Для этого головку поршня изготавливают меньшего диаметра, чем тронк, или обрабатывают ее на конус. Зазор определяют опытным путем с учетом диаметра цилиндра, конструкции поршня, материала и условий его охлаждения. При чрезмерном увеличении зазора растет температура газа и самого поршня над верхним компрессионным кольцом, что ухудшает условия его работы Зазор между тронком и втулкой должен быть таким, чтобы поршень перемещался свободно. Слишком большой зазор приводит к стукам при проходе поршнем мертвых точек, так как нормальная сила меняет направление и перекладывает поршень от одной стенки цилиндра к другой.

В тронковых дизелях с чугунными поршнями диаметральный тепловой зазор между головкой и втулкой обычно принимают равным 0,006 от диаметра цилиндра, а между юбкой и втулкой - 0,001 от диаметра. Для поршней из алюминиевых сплавов эти зазоры устанавливают примерно в два раза большими.

Детали цилиндропоршневой группы работают в наиболее тяжелых условиях среди всех подвижных сопряжений двигателя внутреннего сгорания. Это утверждение справедливо для всего класса поршневых двигателей внутреннего сгорания и обусловлено одновременным действием нескольких факторов: высоких температур и давлений, знакопеременных нагрузок и скоростей, а также химически агрессивной среды. В наибольшей степени перечисленные воздействия проявляются для двух элементов - гильз цилиндров и юбок поршней, образующих пару трения, от состояния которой критически зависит ресурс двигателя в целом [1,2].

Скоростной режим сопряжения также отличается крайней неравномерностью. Скорость перемещения юбки поршня относительно гильзы изменяется в широких пределах: от нуля вблизи мертвых точек до максимума в средней части хода. В моменты остановки поршня гидродинамический режим смазки неизбежно нарушается, масляный клин выдавливается, и пара трения переходит в режим граничной смазки. При последующем разгоне поршня режим жидкостного трения восстанавливается не мгновенно, что создает циклически повторяющиеся неблагоприятные условия для износа [3,4].

Не менее значимым является и химическое воздействие на поверхности трения. Продукты сгорания топлива и масла образуют агрессивную среду, в которой присутствуют кислоты и сернистые соединения. Эти вещества, взаимодействуя с влагой, конденсирующейся на стенках цилиндра при определенных тепловых режимах, образуют электролиты, провоцирующие коррозионно-механическое изнашивание. Данный вид изнашивания особенно интенсивен в период пуска и прогрева двигателя, когда температура стенок цилиндра еще недостаточна для испарения конденсата. Кроме того, нагретые до высокой температуры газ, проникающий через зазоры между поршнем и

цилиндром, содержит абразивные частицы нагара, которые дополнительно интенсифицируют абразивный износ.

Таким образом, пара трения «юбка поршня - цилиндр» функционирует в условиях одновременного воздействия термических, механических и химических факторов, взаимно усиливающих друг друга [5].

Сложные условия работы сопряжения «юбка поршня - цилиндр», описанные выше, формируют требования, предъявляемые к каждому из элементов этой пары трения. Данные требования направлены на обеспечение заданного ресурса при одновременном снижении механических потерь.

К юбкам поршней предъявляются следующие требования:

1. Достаточная жесткость, позволяющая выдерживать силовые нагрузки. Юбка воспринимает знакопеременную боковую силу, и ее недостаточная жесткость привела бы к упругим деформациям, нарушающим расчетную геометрию сопряжения и ухудшающим условия смазки;
2. Минимальное трение о стенки цилиндра. Данное требование достигается как подбором геометрии юбки и величины теплового зазора, так и нанесением специальных покрытий;
3. Тепловая стойкость и минимальные температурные деформации. Материал юбки должен сохранять механические свойства при рабочих температурах, а сама конструкция юбки должна обеспечивать равномерность теплового расширения, для чего, как отмечалось ранее, ей придают конусную форму и выполняют компенсационные элементы;
4. Минимальная масса для снижения инерционных нагрузок. Инерционные силы, действующие на детали кривошипно-шатунного механизма при возвратно-поступательном движении, растут пропорционально квадрату частоты вращения, поэтому снижение массы поршня становится особенно значимым требованием с ростом оборотности современных двигателей;
5. Низкий коэффициент трения в паре с материалом гильзы и повышенная износостойкость поверхности юбки. Выполнение этого требования обеспечивается применением износостойких покрытий, таких как твердое никелирование, микродуговое оксидирование для алюминиевых поршней или нанесение антифрикционных твердосмазочных слоев.

Не менее строгие требования предъявляются и к геометрическим характеристикам гильз цилиндров:

1. На внутренней поверхности гильзы не допускаются дефекты в виде рисок, забоин, раковин и заусенцев. Исключение составляют лишь отдельные раковины и точечная пористость, которые не оказывают влияния на эксплуатационные качества гильзы и не провоцируют ускоренное изнашивание сопряженных деталей;
2. Шероховатость внутренней поверхности гильз по ГОСТ 2789-73 должна быть не более Ra 0,32 мкм. Для гильз автомобильных двигателей разрешается присутствие отдельных участков с шероховатостью Ra 0,63 мкм, занимающих не более 20% общей площади поверхности. Для гильз тракторных

дизелей, работающих в иных нагрузочных режимах, разрешается снижение требований по шероховатости до Ra 1,25 мкм на тех участках внутренней поверхности, которые находятся вне зоны работы поршневых колец и, следовательно, не участвуют непосредственно в формировании потерь на трение и износа;

3. Овальность и конусность рабочей поверхности гильз не должна превышать следующих значений: 0,015 мм - для гильз диаметром до 82 мм; 0,02 мм - для гильз диаметром от 82 до 110 мм; 0,025 мм - для гильз диаметром более 110 мм. Вне зоны работы поршневых колец допускается увеличение овальности и конусности на 0,01 мм, поскольку точность формы на этих участках не оказывает прямого влияния на условия трения и уплотнения.

Соблюдение данных геометрических параметров в совокупности с выполнением требований к материалам и покрытиям позволяет обеспечить стабильность масляной пленки, предсказуемый характер изнашивания и, как следствие, заданный ресурс цилиндропоршневой группы.

Выполненный анализ подтверждает, что пара трения «юбка поршня — цилиндр» является наиболее нагруженным сопряжением двигателя внутреннего сгорания, определяющим как величину механических потерь, так и общий ресурс силового агрегата. Совокупность рассмотренных в работе данных об условиях эксплуатации, действующих нагрузках и конструктивных требованиях к элементам пары трения создает необходимую базу для перехода к расчету. Представленная систематизация требований к геометрии и материалам юбки поршня и гильзы цилиндра, а также сравнительный обзор методик расчета позволяют обоснованно выбрать подход к построению математической модели сопряжения. Дальнейшим развитием работы должно стать непосредственное моделирование изнашивания с использованием классических зависимостей теории трения, что даст возможность прогнозировать ресурс цилиндропоршневой группы на этапе проектирования и оптимизировать конструктивные параметры деталей.

Библиографический список

1. В. М. Корнеев, Ю. В. Катаев. Система обеспечения работоспособности техники в агропромышленном комплексе // В сборнике: Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России. Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию академика Д.К. Беляева. – 2017. – С. 86-91.

2. Ю. В. Катаев, Е. Ф. Малыха. Анализ направлений повышения эффективности дилерской деятельности на // Наука без границ. – 2018. – №6 (23). – С. 62-67.

3. Ю. В. Катаев, Е. Ф. Мальха, Д. Г. Вялых. Организация технического сервиса машинно-тракторного парка на региональном // Наука без границ. – 2017. – №11 (16). – С. 60-64.

4. В. М. Корнеев, Ю. В. Катаев, Д. Г. Вялых Обеспечение работоспособности техники в гарантийный период эксплуатации. // Сельский механизатор. – 2017. – №4. – С. 39-40.
5. М. В. Степанов, Л. Н. Трушина, В. В. Лазарь. Анализ условий работы гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания // Наука без границ. - 2020. - № 7 (47). - С. 48-53.

© Павельев А.Д., 2026

УДК 62-03

Е.М. ПРОХОРОВА
ProkhorovaEkaterinaM@mail.ru
Науч. руководов. – д-р техн. наук, профессор Р.Д. ЕНИКЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ МЕМБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ФОРСИРОВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВС

Аннотация: рассмотрены различные варианты применения газоразделительных мембран для обогащения воздуха кислородом с целью форсирования поршневых двигателей внутреннего сгорания. Проведён сравнительный анализ трёх подходов: схемы с полимерной мембраной и компрессором, системы с половолоконными полиимидными мембранами и системы с керамическими перовскитными мембранами.
Ключевые слова: поршневой двигатель внутреннего сгорания; газоразделительная мембрана; форсирование двигателя; обогащение воздуха кислородом; полиимидные мембраны; перовскитные мембраны; оксиды азота.

Мембранные технологии представляют собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений современной инженерной науки, находящее применение в самых разных отраслях: от водоочистки и пищевой промышленности до медицины и энергетики. Под мембранными процессами в широком смысле понимают совокупность методов разделения, концентрирования или избирательного переноса компонентов жидких и газовых сред через полупроницаемую перегородку-мембрану. Движущей силой таких процессов может служить разность давлений, концентраций, электрических потенциалов или температур. Наибольшее распространение получили баромембранные методы: микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос, а также газоразделительные процессы, основанные на различной скорости проникновения молекул через полимерные или неорганические плёнки. Главными достоинствами мембранных технологий традиционно считаются низкое энергопотребление по сравнению с термическими методами, компактность оборудования, отсутствие фазовых

переходов и экологическая чистота, поскольку разделение, как правило, не требует введения дополнительных химических реагентов.

В последние десятилетия интерес к мембранным технологиям вышел далеко за пределы классических «химико-технологических» приложений. Одним из перспективных объектов их внедрения стал поршневой двигатель внутреннего сгорания. Мембранные модули находят применение в системах питания и наддува ДВС, позволяя направленно изменять состав рабочего тела и улучшать протекание рабочего процесса, что открывает дополнительные возможности для форсирования двигателя. Применение газоразделительных мембран в системах впуска ДВС позволяет ощутимо улучшить ключевые показатели двигателя. Обогащение воздуха кислородом до 28-30% даёт прирост эффективной мощности без увеличения рабочего объёма, сокращает время прогрева холодного двигателя на 25-30% и повышает устойчивость работы на обеднённых смесях. Расход топлива при этом снижается, а дымность и выбросы несгоревших углеводородов уменьшаются на 20-40%. Одновременно мембранное разделение позволяет почти полностью исключить попадание паров масла и воды из системы вентиляции картера обратно в цилиндры, что замедляет нагарообразование и продлевает ресурс свечей зажигания.

Одним из первых и наиболее показательных примеров такого подхода является разработка Уфимского государственного авиационного технического университета-способ работы ДВС с мембранным обогащением воздуха кислородом, предложенный Р. Д. Еникеевым и А. Ф. Хамитовой в 2003 году. В нём реализована схема обогащения впускного воздуха кислородом с помощью газоразделительной мембраны и компрессора. Кислород выделяется из атмосферного воздуха, и на частичных нагрузках в цилиндры поступает обычный воздух, а при максимальной мощности-чистый кислород при закрытой дроссельной заслонке. Управляет процессом электронный блок по сигналу от педали газа. Заявленные преимущества: рост мощности, снижение расхода топлива и уменьшение выбросов CO, CH и NOx. В данной статье этот патент рассматривается как один из базовых вариантов применения мембранных технологий для форсирования ДВС.

Среди более поздних решений можно выделить систему с половолоконными мембранами на основе полиимидов, обеспечивающую обогащение впускного воздуха кислородом до 28-30%. Модуль способен работать за счёт разрежения во впускном коллекторе, без дополнительного компрессора, что снижает энергозатраты. Прирост мощности при этом достигает 10-15%, расход топлива снижается на 5-8%. В качестве недостатка следует отметить чувствительность мембран к механическим загрязнениям и необходимость установки фильтра тонкой очистки на входе.

Ещё один вариант применения мембран предполагает использование керамических мембран на основе перовскитов. В отличие от полимерных, такие мембраны способны работать при высоких температурах, что позволяет размещать модуль в зоне впускного тракта, прилегающей к горячей части двигателя. Кроме того, керамические мембраны со смешанной ионно-

электронной проводимостью обеспечивают селективное пропускание кислорода с чистотой до 99 %, что недостижимо для полимерных аналогов. Это позволяет не только улучшить сгорание топлива, но и практически полностью исключить попадание азота в цилиндры, а значит резко снизить образование оксидов азота (NOx). К достоинствам данного решения относятся термостойкость, химическая стабильность и высокая селективность мембранного материала. В качестве недостатков следует отметить высокую стоимость изготовления мембран и пока ещё ограниченный ресурс в условиях реальной эксплуатации двигателя.

Рассмотренные выше варианты применения мембран на впуске различаются как по типу мембранного материала, так и по достигаемым эффектам. Для наглядного сопоставления эти данные сведены в таблицу. Анализ характеристик позволяет оценить, какие из существующих решений наиболее перспективны для задачи форсирования поршневого ДВС, а также увидеть направления дальнейшего совершенствования мембранных модулей.

Таблица 1

Вариант	Материал мембраны	Степень разделения O_2/N_2	Преимущества	Ограничения
Разработка УГАТУ, 2003 г. (Р. Д. Еникеев, А. Ф. Хамитова)	Полимер	-	Рост мощности, снижение расхода топлива и выбросов	Требуется компрессор
Система с половолоконными полиимидными мембранами	Полиимид	$P'O_2/P'N_2 \geq 4{,}0$; до 5,3	Компактность, возможность работы без компрессора, умеренное обогащение O_2	Чувстви-ть к загрязнениям, необходимость фильтрации
Система с керамическими перовскитными мембранами	Перовскит	> 10 000; теор. до 100 %	Термостой-ть, высокая селективность, потенциал исключения NOx	Высокая стоимость, ограниченный ресурс

Библиографический список

1. Патент РФ № 2209322 C2, МПК F 02 B 47/00, F 02 M 23/04. Способ работы двигателя внутреннего сгорания и энергетическая установка для его осуществления. Р. Д. Еникеев, А. Ф. Хамитова; заявитель и патентообладатель Уфимский гос. авиац. техн. ун-т. № 2001127365/06.
2. Патент JP 2017180346 A, МПК F 02 M 33/00. Intake system for engine. Kitani Yasuyuki, Meji Kazuto; заявитель Subaru Corp. № JP2016070356A.

3. Rashid A. Engineering Sustainability in Ceramic Membranes for CO_2 Conversion and H_2 Utilisation: dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2025. DOI: 10.26083/tuprints-00030816.

© Прохорова Е.М., 2026

УДК 629.3.018:629.3.064.4

Э.А. РЫСАЛИЕВА
elmira.ryssaliyeva@mail.ru
Науч. руководв. – ст. преподаватель Д.Р. РЕЗВАНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АТП. ЗОНА ТО-2 ЗАДНЕЙ ПОДВЕСКИ ЛЕГКИХ КОММЕРЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ

Аннотация: эффективность функционирования автотранспортного предприятия во многом определяется уровнем организации его производственно-технической базы. В статье рассмотрены особенности проектирования зоны технического обслуживания второго уровня (ТО-2) задней подвески легких коммерческих автомобилей. Проанализированы характерные неисправности подвески, обусловленные условиями эксплуатации, а также предложены рациональные планировочные решения зоны ТО-2, направленные на снижение трудоемкости работ и повышение надежности подвижного состава.
Ключевые слова: автотранспортное предприятие, ТО-2, легкие коммерческие автомобили, задняя подвеска, проектирование, производственные участки.

Современная транспортная система является важнейшим элементом экономики, обеспечивающим перемещение грузов и поддержание устойчивых логистических связей. Существенную роль в этом процессе играют легкие коммерческие автомобили, отличающиеся высокой маневренностью, экономичностью и адаптивностью к условиям городской среды. Их широкое применение в сфере малого и среднего бизнеса, курьерских и сервисных услуг обуславливает необходимость поддержания высокого уровня технической готовности.

Автотранспортные предприятия (АТП) обеспечивают не только эксплуатацию подвижного состава, но и его техническое обслуживание, направленное на предупреждение отказов и продление срока службы. В структуре технического обслуживания особое место занимает ТО-2, включающее углубленную диагностику и выполнение регламентных работ по основным системам автомобиля.

В условиях интенсивной эксплуатации легких коммерческих автомобилей наиболее нагруженным элементом является задняя подвеска. Это связано с постоянной перевозкой грузов, часто превышающих номинальную грузоподъемность, а также с воздействием дорожных факторов. К числу наиболее распространенных неисправностей относятся износ рессор, снижение эффективности амортизаторов, разрушение резинометаллических шарниров и ослабление крепежных соединений. Данные дефекты приводят к ухудшению устойчивости автомобиля, увеличению износа шин и снижению уровня безопасности.

Техническое обслуживание второго уровня направлено на своевременное выявление и устранение указанных неисправностей. Согласно нормативным рекомендациям, ТО-2 проводится с периодичностью 20–30 тыс. км пробега и включает комплекс операций по диагностике, разборке, дефектации и восстановлению узлов. Реализация данных мероприятий осуществляется в рамках технологического процесса обслуживания задней подвески, который предполагает последовательное выполнение работ с применением специализированного оборудования и инструмента. Такой подход позволяет не только эффективно устранять имеющиеся дефекты, но и предупреждать развитие более серьезных повреждений, снижая тем самым затраты на последующий ремонт и повышая надежность подвижного состава в целом.

Рассмотрим на примере задней подвески (рис. 1) технологический процесс ТО-2.

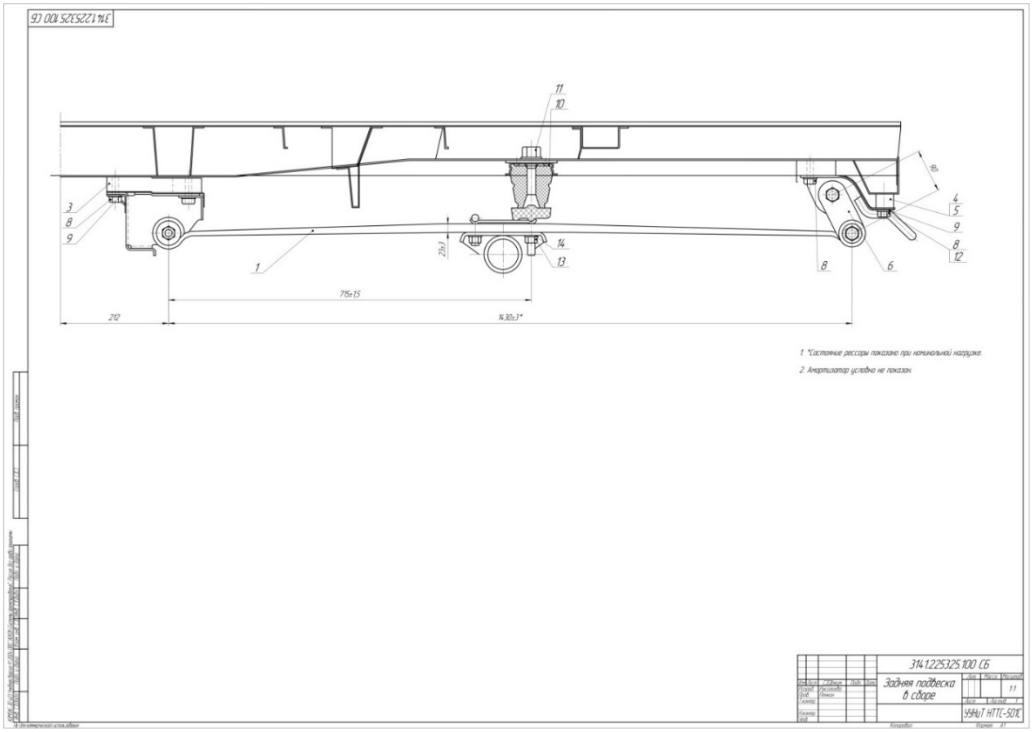


Рис. 1. Задняя подвеска в сборе

Технологический процесс технического обслуживания второго уровня (ТО-2) задней подвески легких коммерческих автомобилей начинается с приема транспортного средства и проведения первичной диагностики, при

которой используется осмотровый инструмент, включая переносной светильник, монтировку для проверки люфтов и измерительные приборы, такие как штангенциркуль. Далее автомобиль устанавливается на подъемник или смотровую канаву с применением гидравлического подъемного оборудования, противооткатных упоров и домкрата для обеспечения безопасного доступа к узлам подвески.

После установки производится очистка элементов подвески от загрязнений с использованием моечного аппарата высокого давления, металлических щеток и ветоши, что необходимо для повышения точности последующей диагностики. Затем выполняется детальная проверка технического состояния элементов задней подвески с применением диагностического стенда, индикатора часового типа для измерения люфтов и динамометрического ключа для контроля усилий затяжки крепежных соединений.

При выявлении неисправностей осуществляется демонтаж узлов подвески с использованием набора гаечных ключей, торцевых головок, трещоточного механизма и пневматического гайковерта. В процессе разборки производится снятие колес, отсоединение амортизаторов, откручивание стремянок и демонтаж рессоры. Далее выполняется дефектация деталей, в ходе которой оценивается степень износа элементов и принимается решение о их ремонте или замене.

Ремонтные операции проводятся с использованием гидравлического пресса для выпрессовки и запрессовки втулок, а также специализированных оправок и смазочных материалов. При необходимости осуществляется замена рессор, амортизаторов и резинометаллических элементов на новые комплектующие.

Сборка узла производится в обратной последовательности с применением динамометрического ключа для обеспечения нормативного момента затяжки крепежных соединений и пневматического инструмента для ускорения монтажных операций. Особое внимание уделяется равномерности затяжки стремянок и правильности установки элементов подвески.

Завершающим этапом технологического процесса является контроль качества выполненных работ, который осуществляется с использованием диагностического оборудования, а также посредством визуального осмотра и контрольного пробега автомобиля. В результате обеспечивается восстановление работоспособности задней подвески и повышение надежности эксплуатации легких коммерческих автомобилей.

Проектирование зоны ТО-2 задней подвески является важной задачей при создании или модернизации автотранспортного предприятия. Основной целью является обеспечение рациональной организации производственного процесса, минимизация времени выполнения работ и повышение качества обслуживания.

Планировочные решения зоны ТО-2 должны учитывать следующие требования:

1) обеспечение технологической последовательности выполнения операций;

2) минимизация перемещений автомобилей и персонала;

3) соблюдение норм безопасности и эргономики;

4) учет габаритов обслуживаемых транспортных средств;

5) эффективное размещение оборудования и рабочих мест.

Зона ТО-2, как правило, включает один или несколько постов, оснащенных подъемниками или смотровыми канавами, что обеспечивает доступ к элементам задней подвески. Дополнительно предусматриваются участки для хранения инструмента, запасных частей и вспомогательного оборудования, пример планирования на рис. 2.

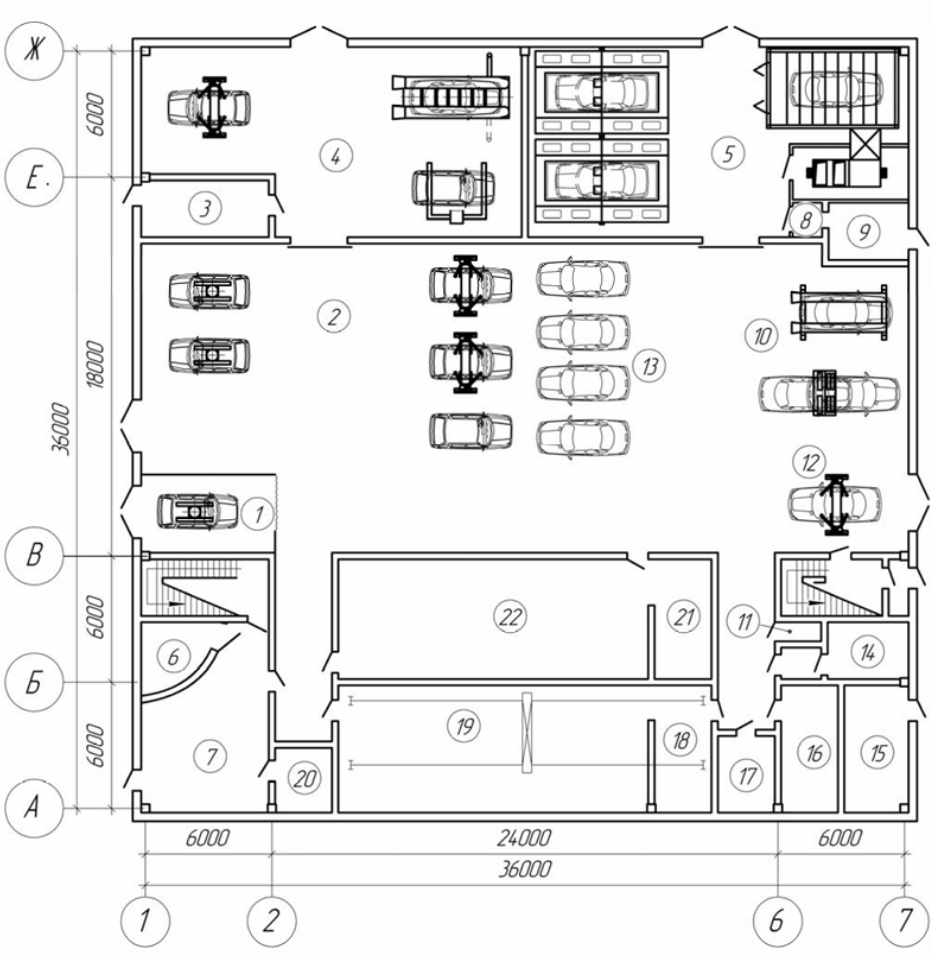


Рис. 2. Городская универсальная СТО

Экспликация помещений: 1 – участок ручной мойки автомобилей; 2 – участок ТО и ТР; 3 – склад деталей кузова автомобиля; 4 – кузовной участок; 5 – окрасочный участок; 6 – комната оформления документов; 7 – клиентское помещение; 8 – тамбур; 9 – участок подбора колера (краскоприготовительное отделение); 10 – участок диагностики; 11 – умывальная; 12 – пост приёмки-выдачи автомобилей; 13 – зона ожидания автомобилями ТО и Р; 14 – санитарные узлы; 15 – тепловой узел; 16 – обойное отделение; 17 – аккумуляторный участок; 18 – участок мойки узлов и агрегатов; 19 – агрегатный, механический, шиномонтажный и электрокарбюраторный участки; 20 – кабинет директора; 21 – участок расконсервации деталей; 22 – склад узлов и агрегатов

Оснащение зоны ТО-2 должно соответствовать характеру выполняемых работ. В состав оборудования входят подъемные устройства, диагностические стенды, прессовое оборудование, пневматический инструмент и контрольно-измерительные приборы. Применение современного оборудования позволяет повысить точность диагностики и сократить трудоемкость операций.

Рациональная организация зоны ТО-2 способствует снижению простоев подвижного состава, повышению коэффициента технической готовности и улучшению экономических показателей деятельности предприятия. Таким образом, грамотное проектирование данного участка является необходимым условием эффективного функционирования автотранспортного предприятия

Библиографический список

1. Бычков В. П. Экономика автотранспортного предприятия. – М., 2011.
2. Епишкин В. Е., Караченцев А. П., Остапец В. Г. Проектирование станций технического обслуживания автомобилей. – Тольятти: ТГУ, 2012.
3. Головин С. Ф. Технический сервис транспортных машин и оборудования. – М.: Альфа-М, 2008.
4. Напольский Г. М. Технологическое проектирование автотранспортных предприятий и СТО. – М., 1993.
5. ГОСТ 18322–2016. Система технического обслуживания и ремонта техники.

© Рысалиева Э.А., 2026

УДК 621.891

Е.Д. САЙГИН
saigin.ed@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. кафедры ДВС С.А. ЗАГАЙКО

Уфимский университет науки и технологий

ТРЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ ПАРЫ ТРЕНИЯ «ПОРШНЕВОЕ КОЛЬЦО – ГИЛЬЗА ЦИЛИНДРА»

Аннотация: данная статья посвящена исследованию процесса трения и износа пары трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра». Рассматриваются механизмы возникновения трения и износа анализируются специфические факторы, влияющие на интенсивность изнашивания в выбранной паре трения, а также предлагаются конструктивные и эксплуатационные методы снижения потерь на трение и повышения ресурса.
Ключевые слова: трение, изнашивание, поршневое кольцо, гильза цилиндра, цилиндропоршневая группа, механические потери, смазывание.

Цилиндропоршневая группа (ЦПГ) – основной и самый нагруженный функциональный элемент любого поршневого двигателя внутреннего сгорания. ЦПГ воспринимает нагрузки от сжатия рабочей смеси, её сгорания и последующего расширения, в результате которого тепловая энергия от сгорания топливо-воздушной смеси преобразовывается в механическую работу перемещения поршня. Поршневые кольца играют ключевую роль в уплотнении надпоршневого пространства, прижимаясь в том числе за счет газов из камеры сгорания (рис 1), отводе тепла от поршня и распределении смазочного материала по цилиндру. Пара трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра» работает в самых тяжёлых условиях среди всех узлов двигателя: высокие температуры (до 300–400 °C в зоне первого компрессионного кольца), большие давления газов (до 15 МПа), возвратно-поступательное движение с переменной скоростью и недостаточное количество смазки вблизи верхней мертвой точки.

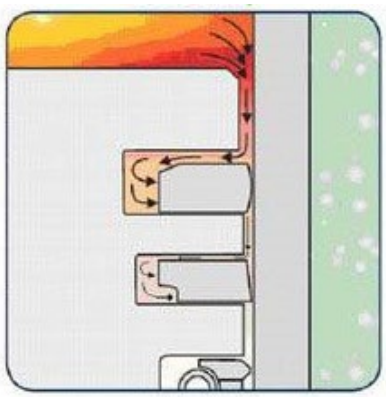


Рис. 1. Прижатие поршневых колец

Интенсивный износ этой пары приводит к потере компрессии, увеличению расхода масла, прорыву картерных газов, снижению мощности и ухудшению экологических показателей. Потери на трение при работе поршневых колец составляют примерно 50–70% всех механических потерь в двигателе.

Трение – это сила, возникающая при относительном перемещении двух соприкасающихся тел и направленная вдоль поверхности контакта. При трении происходит разрушение поверхностного слоя, что проявляется в изменении размеров, формы или состояния поверхности: появляются царапины, задиры, изменяется микро- и макрогеометрия деталей.

Изнашивание обычно проходит три стадии (рис. 2):

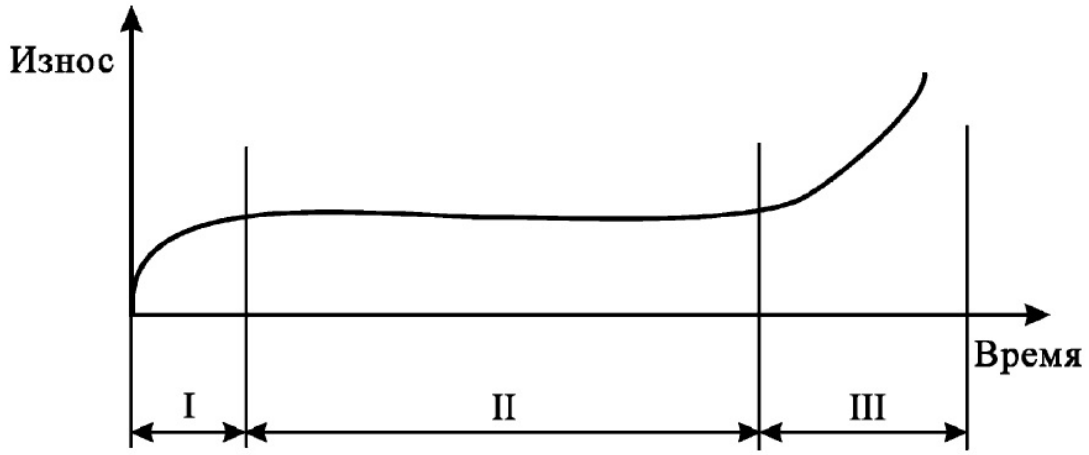


Рис. 2. Кривая изнашивания

1. Приработка – начальный период, во время которого происходит сглаживание исходных микронеровностей, скорость изнашивания постепенно снижается.

2. Нормальный износ – установившийся режим с примерно постоянной, относительно низкой скоростью изнашивания; этот период занимает основную часть ресурса двигателя.

3. Катастрофический износ – наступает при критическом изменении формы и зазоров, разрушении масляной плёнки, резком росте температуры и вибраций; скорость износа многократно возрастает вплоть до заклинивания.

В зависимости от преобладающих механизмов разрушения в паре «кольцо–гильза» выделяют следующие основные виды износа:

– Абразивный – вызывается твёрдыми частицами (пыль, нагар, продукты износа, частицы сажи), которые царапают и режут поверхности, что особенно характерно при недостаточной фильтрации воздуха или масла.

– Адгезионный – возникает при схватывании и вырыве микровыступов при недостатке смазки и высоких контактных давлениях (например, в верхней мёртвой точке на пусковых режимах).

– Усталостный – проявляется в виде микротрещин и выкрашивания частиц материала при многократном циклическом нагружении.

– Тепловой – вызван локальными температурными вспышками, которые приводят к структурным изменениям (отпуск, закалка, оплавление) и последующему разрушению.

На интенсивность износа любой пары трения, в том числе узлов ЦПГ, влияют следующие факторы:

1. Материалы пары трения
2. Наличие и качество смазочного материала
3. Скорость относительного скольжения
4. Температура в зоне контакта
5. Состояние окружающей среды

Общие методы снижения износа, применимые для большинства пар трения, включают:

1. Применение смазочных материалов с противоизносными и противозадирными присадками;

2. Повышение твёрдости трущихся поверхностей (термическая обработка, хромирование, молибденовое напыление, лазерная закалка);

3. Использование эффективных уплотнений, воздушных и масляных фильтров для предотвращения поступления абразивных частиц;

4. Поддержание оптимального теплового режима работы двигателя.

На разных участках хода поршня и в разных фазах рабочего цикла характер трения неодинаков:

В верхней мёртвой точке (ВМТ) – температура максимальна, слой масла минимален, а контактное давление велико. Здесь реализуется граничное трение, иногда близкое к полусухому, что вызывает наибольший износ.

На среднем участке хода поршня при исправной системе смазки обычно создаётся устойчивый жидкостный режим трения – кольца «всплывают» на масляном слое, и износ минимален.

В нижней мёртвой точке (НМТ) возможен переход к граничному трению из-за снижения скорости и изменения гидродинамического клина.

Пусковые режимы наиболее опасны: в течение первых секунд после запуска масло ещё не поступило ко всем поверхностям, и имеет место сухое или полусухое трение, что вызывает заметный износ при каждом запуске.

Помимо общих факторов, для поршневых колец выделяют специфические факторы трения и износа:

1. Высокое давление газов в камере сгорания
2. Температура в пристеночной зоне гильзы
3. Скорость скольжения
4. Состояние масляной плёнки
5. Микрогеометрия гильзы (хонингование)
6. Зазор в замке кольца
7. Подача масла
8. Качество топлива и полнота сгорания

По разным оценкам, на преодоление трения в ЦПГ расходуется от 4 до 12% индикаторной мощности, причём в малоразмерных высокооборотных двигателях эта доля может быть ещё выше.

Последствиями высоких потерь будут являться: снижение эффективной мощности, перерасход топлива, снижение ресурсов и загрязнение окружающий среды

Для уменьшения трения и износа в рассматриваемой паре применяют комплекс конструктивных, технологических и эксплуатационных мер:

Подбор материалов и покрытий:

– Применение высокопрочных чугунов с вермикулярным графитом с нанесением износостойких покрытий на гильзы цилиндров;

– Нанесения покрытий на верхнее компрессионное кольцо (как правило это хром и молибден)

– Второе кольцо и маслосъёмное могут иметь фосфатное покрытие или нитридную упрочнённую зону.

Совершенствование смазки:

– Применение масляных форсунок, направленных на днище поршня;

– Специальная обработка поверхности гильзы (хонингование);

– Применение маловязких масел с высокой термоокислительной стабильностью и присадками.

Эксплуатационные меры:

– Своевременная замена масла и фильтров (воздушного, масляного и топливного).

– Контроль и поддержание рабочей температуры охлаждающей жидкости, так как перегрев значительно ускоряет износ колец.

– Избегание длительной работы на холостом ходу и резких «холодных» стартов;

– Использование качественного топлива, предотвращающего отложение нагара и детонацию.

Конструктивные решения в двигателестроении:

– Применение «мокрых» гильз цилиндра

– Биметаллические гильзы (износостойкий внутренним слой из чугуна и алюминиевым корпусом).

Таким образом, анализ факторов, влияющих на трение и изнашивание в паре трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра» позволит снизить механические потери и износ материалов и за счет этого повысить экономичность двигателя и увеличить ресурс.

Библиографический список

1. Расчет механических потерь в двигателях внутреннего сгорания: учебное пособие / С.А. Загайко; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 123 с.

2. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчёт на прочность поршневых и комбинированных двигателей : учебник для втузов / Вырубов Д. Н., Ефимов С. И., Иващенко Н. А. [и др.] ; ред. Орлин А. С., Круглов М. Г. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1984. - 382 с.

© Сайгин Е.Д., 2026

УДК 621.432.4

К.М. САЛИМХАНОВ, А.А. МЕЛКОВ, Т.Ф. МАМАТОВ
Salimhanov02@yandex.ru
Науч. руководитель – ст. преподаватель Р.Ф. ЗИННАТУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

СИСТЕМА ИНДИЦИРОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ДПКВ

Аннотация: в данной работе представлены результаты разработки система индицирования на базе имеющегося модуля *INDIMODUL* и разработанного датчика положения коленчатого вала (ДПКВ).
Ключевые слова: фотопрерыватель, датчик поворота коленчатого вала, индицирование, система управления, микроконтроллер.

На кафедре двигателей внутреннего сгорания решается задача исследования и совершенствования рабочих процессов двигателей, работающий на авиационном керосине, для организации данных рабочих процессов используется экспериментальная система топливоподачи на основе поршневого компрессора. Получение достоверной индикаторных характеристик поршневого компрессора является важной задачей при экспериментальных исследованиях. Современные ДПКВ, применяемые для систем индицирования, таких как AVL 365C и Kistler2614D, обеспечивают необходимую точность определения положения поршня, однако их применение часто ограничивается высокой стоимостью. Стоимость штатных энкодеров и сопутствующих элементов системы может составлять значительную часть бюджета экспериментального стенда. К тому же для индицирования малоразмерных поршневых машин (объемом одного цилиндра от 1,5 до 50 $см^3$) имеющихся на рынке ДПКВ способных к прямому подключению к системе индицирования не существует. Применение же стандартных (не специализированных для ДПКВ) высокоточных энкодеров ограничено их габаритами и невозможностью установки на одноопорном коленчатом валу [1]. В связи с этим разработка компактной и доступной системы индицирования на базе разработанного ДПКВ является актуальной. Данный ДПКВ должен обеспечивать высокую дискретизации сигнала, для последующей его обработки с высокой точностью [1, 2]. Это и являлось целью данной работы.

Объектом исследования является малогабаритный поршневой компрессор объемом 1,5 $см^3$ с одноопорным валом.

Основными регулируемыми параметрами системы являются длительность и угол опережения впрыска (УОВ). Длительность впрыска определяется шириной управляющего импульса, подаваемого на форсунку, а угол опережения впрыска задается угловым положением вала [3]. Значения

указанных параметров задаются пользователем и могут корректироваться в ходе экспериментальных исследований с помощью инкрементальных энкодеров, подключённых к микроконтроллеру. Это позволяет адаптировать режим работы системы к условиям испытаний и уточнять параметры управления впрыском.

Общий вид разработанной конструкции ДПКВ изображён на рис. 1, а её структурная схема - на рис. 2. Конструкция датчика основана на применении диска с окнами (метками) и двух фотопрерывателей. 36 окон расположены равномерно и формируют угловую шкалу поворота коленчатого вала с шагом 10°. Одинарное окно, используется для привязки отсчёта к положению поршня в верхней мёртвой точке (ВМТ). При пересечении каждой метки через рабочую зону фотопрерывателя формируется импульс, поэтому за один оборот коленчатого вала получается 36 базовых импульсов. Такого разрешения достаточно для первичной обработки сигнала микроконтроллером, после чего программная интерполяция формирует промежуточные значения угла [4]. Конфигурация диска выбрана с учётом конструктивных ограничений: габариты, рабочая зона и необходимость устойчивого формирования импульсного сигнала от двух фотопрерывателей. Фотопрерыватели 2 и 3 установлены на печатной плате 1, а диск 4 закреплён на валу компрессора. При вращении диска фотопрерыватели передают сигналы в микроконтроллер и далее выполняется цифровая обработка сигналов.

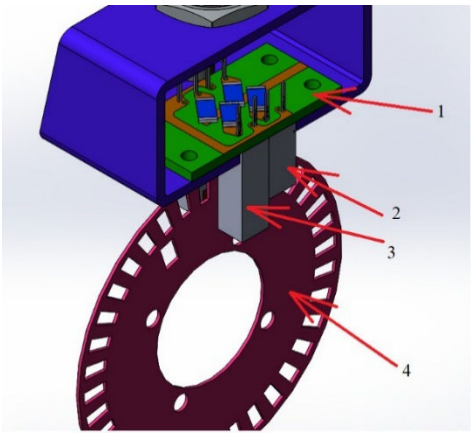


Рис. 1. Трехмерная модель ДПКВ с диском. 1 – плата, 2 и 3 – фотопрерыватели, 4 – диск с 37 метками

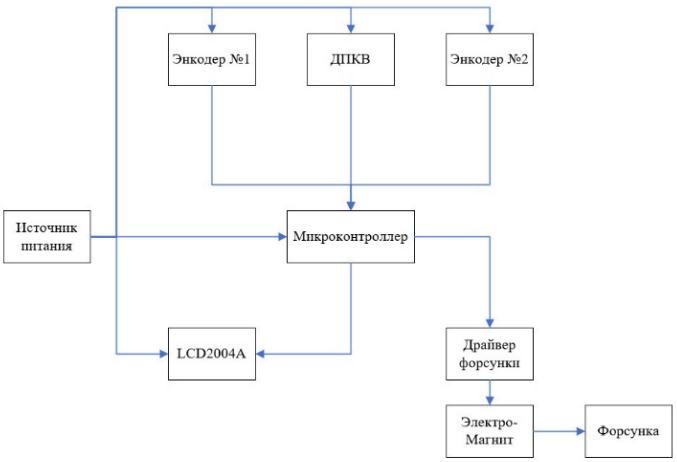


Рис. 18. Структурная схема системы

Принципиальная схема разработанного ДПКВ изображена на рис.3.

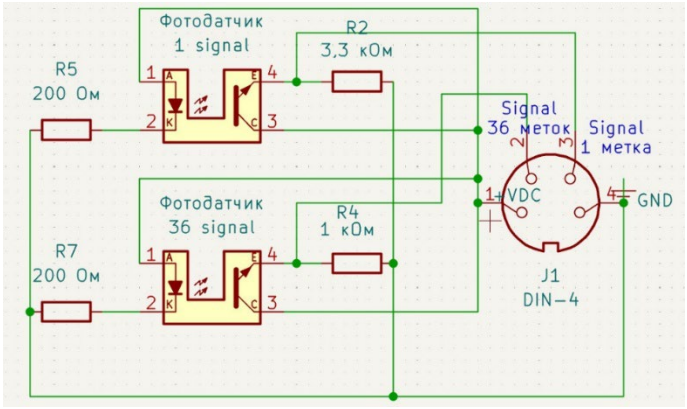


Рис. 3. Принципиальная схема ДПКВ

На основе поступающих импульсов в микроконтроллер и реализованных алгоритмов обработки, вычисляется текущий угол поворота коленчатого вала с требуемой дискретностью.

Для индицирования система подключается к *AVL INDIMODUL*, предназначенному для регистрации, синхронизации и последующего анализа сигналов.

На данный модуль осуществляется подача трёх сигналов с микроконтроллера:

1. **Сигнал, состоящий из 3600 импульсов за оборот.**

Он формирует дискретную шкалу угла с шагом 0,1° ПКВ, необходимую для регистрации цикловых событий, в том числе начало и конец впрыска. Для определения промежуточных значений микроконтроллер измеряет временной интервал между каждой парой соседних меток, вычисляет локальную угловую скорость и равномерно делит этот участок на 100 интервалов по 0,1°. Таким образом из 36 базовых импульсов фотопрерывателя формируется 3600 расчётных импульсов за оборот с учётом изменения скорости коленчатого вала.

2. **Сигнал, соответствующий пересечению синхронизирующей метки**.

При обработке сигнала микроконтроллер обнуляет счётчик угла, привязывает сформированную шкалу к положению ВМТ и выдаёт отдельный синхроимпульс на *AVL INDIMODUL* с устойчивой формой фронта. Благодаря этому модуль получает не только угловую сетку 0,1° ПКВ, но и однозначную привязку этой сетки к одному обороту компрессора.

3. **Сигнал впрыска**.

Данный сигнал, подаваемый на форсунку, дублируется на *AVL INDIMODUL* как отдельный канал события и накладывается на построенную угловую шкалу, что позволяет определить моменты начала и окончания управляющего сигнала впрыском, оценить корректность работы системы управления и использовать полученные данные при последующем исследовании компрессора. При обработке в *AVL* этот канал сопоставляется с угловой координатой, сформированной по сигналам 3600 импульсов и синхронизации.

По итогу проведенных работ были получены кривые давления и сила тока на электромагнит форсунки, представленные на рис. 4. Как можно видеть, при наложении около 50 последовательных кривых силы тока видно, что момент впрыска сохраняет устойчивое положение.

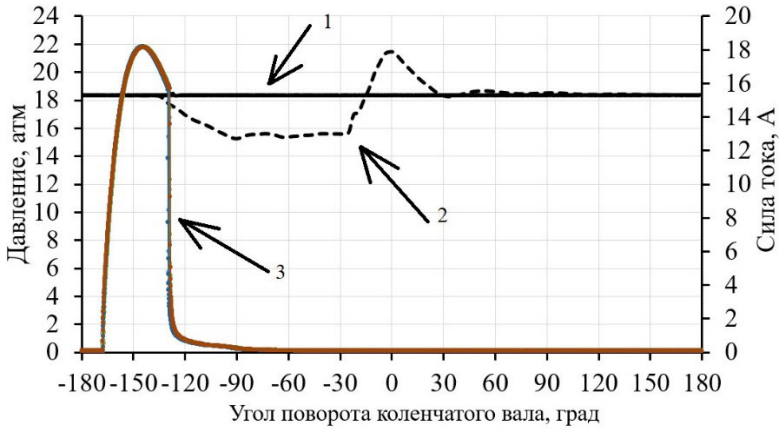


Рис. 4. Индицирование компрессора. 1 – абсолютное давление в форсунке, 2 – относительное давление в форсунке, 3 – сила тока в форсунке

Библиографический список

1. Peden R. A., Paul R. Engine crankshaft position sensor: patent US4782692A. Publ. 08.11.1988. URL: https://patents.google.com/patent/US4782692A/en (дата обращения 11.04.2026).

2. Ando K. Engine control unit using pulses of different frequencies: patent US6445998B2. Publ. 03.09.2002. URL: https://patents.google.com/patent/US6445998B2/en?oq=US6445998B2 (дата обращения 11.04.2026).

3. Марков, В. А. Системы автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок и тенденции их совершенствования / В. А. Марков, В. И. Шатров. –

URL: https://vestnikmach.bmstu.ru/catalog/pmc/heng/1103.html (дата обращения 12.04.2026).

4. st.com : [сайт]. – 2025. – URL: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f767zi.html (дата обращения: 18.04.2026).

© Салимханов К.М., Мелков А.А., Маматов Т.Ф., 2026

УДК 621.43.66

И.В. СУББОТИН
Subbotaclass809@gmail.com
Науч. руководит. – д.т.н. Н.Ю. ДУДАРЕВА

Уфимский университет науки и технологий

МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Аннотация: работа посвящена исследованию возможностей и перспектив материалов и покрытий, используемых в производстве деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания. Рассматриваются условия эксплуатации деталей цилиндропоршневой группы, требования к материалам и покрытиям, применяемым в современных двигателях, а также современные тенденции и перспективы развития в данной области.
Ключевые слова: цилиндропоршневая группа, покрытия, материалы, применение, двигатель внутреннего сгорания.

Современные условия эксплуатации двигателей внутреннего сгорания (ДВС) предъявляют повышенные требования к надежности, долговечности и экономичности функционирования всех деталей и узлов двигателя. Одним из основных узлов является цилиндропоршневая группа (ЦПГ), состоящая из поршня, поршневых колец, гильзы цилиндра и поршневого пальца. Именно элементы ЦПГ функционируют в условиях экстремальных температур, высокого давления рабочих сред, механического воздействия и химически агрессивной среды, которую создают процессы горения топлива.

Материалы и покрытия, используемые в изготовлении деталей ЦПГ, играют ключевую роль в обеспечении эффективной работы ДВС. Их выбор определяет уровень производительности двигателя, удельную мощность, экологичность выбросов, расход топлива и общий срок службы ДВС. Основная задача конструкторов и инженеров состоит в поиске оптимальных решений, позволяющих минимизировать износ, трение, потери механической энергии и поддерживать стабильность показателей работы двигателя даже в сложных режимах эксплуатации.

Сегодня используются разнообразные конструкционные материалы и специальные защитные покрытия, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. К традиционным материалам относятся алюминиевые сплавы, легированные стали, чугуны и металлокерамические композиции. Однако прогресс в области материаловедения привел к появлению инновационных технологий и композитных составов, обладающих улучшенными характеристиками прочности, термостабильности и стойкости к износу.

Был проведен анализ материалов, которые используются в ДВС, были проанализированы их достоинства и недостатки с точки зрения их применения для деталей ЦПГ. Итоговый анализ представлен в табл. 1.

Таблица 1

Материалы деталей ЦПГ ДВС [2]

Вид материала	**Твердость НВ**	**Прочность, σв, МПа**	**Плотность, г/см^3**	**Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)**	**Деталь ЦПГ ДВС**
Серый чугун	229-235	290-390	6,8-7,4	62,8	Поршни, поршневые кольца
Высоко-прочный чугун	140-350 (в зависимости от марки)	350-1000	7,1-7,3	30-40	Поршни, поршневые кольца
Сталь	Низкоуглеродистые 120-150 Высокоуглеродистые до 600 и выше	225-1000 (в зависимости от марки и термообработки)	7,7– 7,9	50-90	Поршни, поршневые кольца, поршневые пальцы
Титановые сплавы	131-388 (в зависимости от марки сплава и его термообработки)	240 – 2000 (в зависимости от марки, состава термообработки)	4,4-4,8	6-25	Клапаны, шатун, поршневые пальцы, клапанные пружины
Алюминиевые сплавы	15-150	70-80 (для чистого алюминия) 400-500+ (для высокопрочных сплавов)	2,65-2,81	160-237	Поршни, поршневые пальцы
Алюминие	114-124	300-500+	2,68-2,71	100-200	Поршни,

вые сплавы, полученные методом 3D печати					шатун, прочие детали (головки цилиндров, корпус)

С учетом физико-механических свойств материалов (табл. 1) был составлен список достоинств и недостатков для вышеприведенных материалов. Он представлен в табл. 2.

Таблица 2

Достоинства и недостатки материалов деталей ЦПГ ДВС [1,2]

Вид материала	**Твердость**	**Прочность**	**Плотность**	**Коэффициент теплопроводности**
Серый чугун	+	+	–	–
Высоко-прочный чугун	+	+	–	–
Сталь	+	+	–	+
Титановые сплавы	+	+	+	–
Алюминиевые сплавы	–	+ +	+	+
Алюминиевые сплавы, полученные методом 3D печати	+	+	+	+

Также был проведен анализ покрытий, которые используются для деталей ДВС, проанализированы их достоинства и недостатки с точки зрения их применения для деталей ЦПГ. Итоговый анализ представлен в табл. 3.

Таблица 3

Свойства покрытий для деталей ДВС [3,4,5]

Вид покрытия	**Количественные показатели**			**Качественные показатели**			**Детали ДВС**
	Толщина, мкм	Твердость НВ, ГПа	Коэф. трения	Износостойкость	Коррозионная стойкость	Задиростойкость	
Хромирование	200	6-10	0,5-0,8	+	+	+	гильза
Никасил	6-40	4,9-5,9	0,1-0,15	+	–	+	гильза
МДО	50-270	15-18	0,04-0,1	+	+	+	Поршень (днище, юбка)
Керамическое	15-150	10-22	0,1-0,3	+	+	+	Поршень (днище)

Молибден	5-25	0,5-0,8	0,03-0,06	–	–	+	Поршень (юбка), поршневые кольца

Вывод: Анализ свойств материалов и покрытий показал, что наиболее перспективными для ЦПГ ДВС являются алюминиевые сплавы, так как они обладают низкой плотностью, хорошей теплопроводностью и прочностью. В свете современных подходов особый интерес представляют алюминиевые сплавы, полученные методом 3D печати. Но в связи с низкой износостойкостью поверхности деталей из алюминиевых сплавов требуют применения защитных покрытий. С этой целью могут использоваться керамические покрытия или микродуговое оксидирование (МДО). Такие покрытия сочетают высокую твёрдость, которая обеспечивает малый износ, с высокой коррозионной стойкостью и задиростойкостью.

Библиографический список

1. Баранов, С. В. Технология обработки материалов. – Москва: Машиностроение, 2015. – 325 с.
2. Васильев, И. А. Современные материалы для двигателей. – Санкт-Петербург: Политехника, 2018. – 290 с.
3. Громов, А. П. Специальные покрытия для автомобилей. – Екатеринбург: УралГАУ, 2019. – 180 с.
4. Егоров, О. В. Научные основы износостойкости. – Москва: Наука, 2020. – 400 с.
5. Жуков, Н. Р. Поверхностные технологии в машиностроении. – Казань: Идея Пресс, 2017. – 350 с.

© Субботин И.В.,2025

УДК 621.833.1:629.7

Д.Р. ВАЛЕЕВ
mkmk325@mail.ru
Науч. руководов. – д-р техн. наук, проф. М.Д. ГАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРЯМОЗУБОЙ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ РЕДУКТОРА АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в статье выполнен расчет цилиндрической прямозубой передачи редуктора авиационного поршневого двигателя, выполненный с применением программного комплекса КОМПАС-GEARS. Определены основные

геометрические параметры, ее прочности и долговечности зубчатой пары, выполнена оценка работоспособности передачи.

Ключевые слова: цилиндрическая передача, прямозубое зацепление, зубчатая пара, авиационный редуктор, КОМПАС-GEARS.

Зубчатые передачи применяются в тех случаях, где необходимо передать вращение и крутящий момент с заданным изменением частоты вращения. В машиностроении они являются одним из наиболее надежных и распространенных решений, благодаря компактности и высокой нагрузочной способности. В авиационной технике требования к зубчатым передачам значительно выше, поскольку они входят в состав силовой установки, от работы которой зависит не только эффективность, но и безопасность полета.

На кафедре двигателей внутреннего сгорания (ДВС) «Уфимского университета науки и технологий» разработан поршневой ДВС для малой авиации со следующими характеристиками: крутящий момент 270 Н·м при частоте вращения 5800 мин$^{-1}$. Данный двигатель имеет частоту вращения выше, чем оптимальная частота вращения воздушного винта, поэтому между двигателем и винтом устанавливается редуктор. Он понижает обороты вала воздушного винта до оптимальных 2500-2700 мин$^{-1}$ и согласовывает режим работы двигателя с режимом работы винта.

Целью работы является разработка цилиндрической прямозубой передачи внешнего зацепления редуктора авиационного поршневого ДВС и оценка ее работоспособности при заданных исходных параметрах.

Для достижения цели необходимо: определить основные геометрические параметры передачи, обеспечить требуемое передаточное число, проверить прочность зубьев по контактным напряжениям и изгибу, а также оценить ресурс работы. Расчет выполнен в программном комплексе КОМПАС-GEARS в соответствии с ГОСТ 16532-70 [2], ГОСТ 21354-87 [3] и нормам прочности зубчатых передач, используемых в авиационных газотурбинных двигателях для гражданской авиации [6].

При расчете приняты исходные параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Исходные параметры для расчета

Наименование и обозначение параметра		Шестерня	Колесо
Число зубьев	z	32	69
Модуль, мм	m	4	
Ширина зубчатого венца, мм	b	48	48
Коэффициент смещения исходного контура	χ	+0,5	+0,5
Степень точности	–	7-В	7-В
Марка материала	–	Сталь 38Х2МЮА ГОСТ 4543-2016	Сталь 38Х2МЮА ГОСТ 4543-2016
Твердость активных поверхностей зубьев, HRC	–	61	61

Крутящий момент на шестерне, Н·м	T_{max}	270
Частота вращения шестерни, мин$^{-1}$	n_1	5800
Коэффициент безопасности(контакт)	S_H	1,35
Коэффициент безопасности(изгиб)	S_F	1,75
Коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности	Z_R	0,95

Число зубьев z шестерни и колеса принято на стадии предварительным параметрического подбора как рациональное значение, обеспечивающее компактность общих габаритов узла, и по передаточному числу соответственно. Модуль зуба m также принят на стадии параметрического подбора из стандартного первого ряда модулей с учетом передаваемого крутящего момента, частоты вращения и габаритных ограничений [5]. Ширина венца b принята как компромисс между ростом нагрузочной способности и минимальным ростом массы и размеров узла. Это значение находится в допустимом диапазоне 25…50 мм и позволяет сохранить компактность редуктора [8].

В передаче приняты равные положительные коэффициенты смещения исходного контура χ (см. табл. 1). Выбор коэффициента выполнен на этапе предварительного проектирования. Такое решение способно повысить изгибную прочность.

Степень точности 7-*B* для кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев зубчатых колес в передаче принята как оптимальный вариант, исходя из стоимости и окружной скорости [7]. Сопряжение *B* в степени точности 7-*B* для зубчатых колес в передаче подразумевает вид допуска b, обеспечивающий гарантированный боковой зазор зубьев, исключающий заклинивание передачи при возможных погрешностях изготовления и температурных деформациях стали от нагрева при разности температур зубчатых колес и корпуса, принимаемой равной до 25°С в соответствии с ГОСТ 1643-81 [1].

Материалом зубчатых колес выбрана сталь 38Х2МЮА по ГОСТ 4543-2016 [4]. Высокая твердость поверхности зубьев достигается путем азотирования стали, обеспечивающего повышение износостойкости и контактной выносливости за счёт формирования упрочнённого поверхностного слоя, при сохранении вязкой сердцевины зуба с твердостью порядка 30 HRC, что снижает риск хрупкого разрушения при работе нагруженной зубчатой передачи. Твердость активных поверхностей зубьев данного материала соответствует требованиям к высоконагруженным авиационным передачам 59…61 HRC [6].

Коэффициенты безопасности по контактным напряжениям и изгибу выбраны с повышенными значениями – 1,35 и 1,75 вместо минимальных значений 1,2 и 1,4 соответственно [3]. Такое решение обусловлено тем, что выход из строя авиационного редуктора связан с тяжелыми последствиями, поэтому запас по прочности должен быть выше минимально необходимого уровня.

При расчете на прочность при действии максимальной нагрузки цилиндрической зубчатой передачи внешнего зацепления расчетная нагрузка задавалась крутящим моментом на шестерне T_{max} при частоте вращения шестерни n_1.

При расчете на долговечность выбраны следующие режимы нагружения передачи: первый с 10% продолжительности работы при $T_1 = 300$ Н·м и $n_1 = 5800$ мин$^{-1}$ и второй с 90% продолжительности работы при $T_1 = 300$ Н·м и $n_1 = 5500$ мин$^{-1}$. Такой режим отражает условия эксплуатации редуктора в составе проектируемого авиационного поршневого ДВС.

Перед основным расчетом в КОМПАС-GEARS определено передаточное число $u \approx 2{,}16$. При этом частота вращения вала воздушного винта $n_2 \approx 2690$ мин$^{-1}$ при первом режиме.

Рассчитанные в программном комплексе основные геометрические параметры, ее прочности и долговечности передачи представлены в табл. 2 и 3. Геометрия полученной зубчатой пары представлена на рис. 1.

Таблица 2

Основные геометрические параметры зубчатой пары

Наименование и обозначение параметра		Шестерня	Колесо
Межосевое расстояние, мм	a_w	205,752±0,09	
Делительный диаметр, мм	d	128	276
Диаметр вершин зубьев, мм	d_a	139,505	287,505
Диаметр впадин зубьев, мм	d_f	122	270
Начальный диаметр, мм	d_w	130,378	281,127
Коэффициент торцового перекрытия	ε_a	1,522	

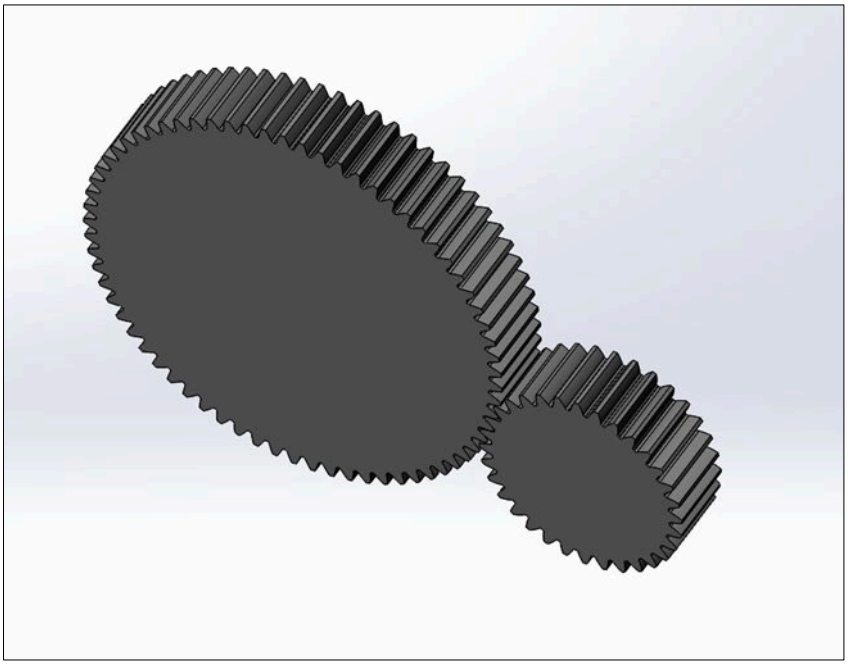


Рис. 1. Геометрия полученной зубчатой пары

Таблица 3

Параметры прочности и долговечности

Наименование и обозначение параметра		Шестерня	Колесо
Окружная скорость, м/с	υ	38,872	
Окружная сила на делительном диаметре, Н	F_t	4218,75	
Расчетное контактное напряжение, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{Hmax}$	923,48	
Допускаемое контактное напряжение, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{HPmax}$	2346	2346
Коэффициент запаса по контактным напряжениям	n_H	2,54	2,54
Расчетное напряжение изгиба, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{Fmax}$	399,075	402,282
Допускаемое напряжение изгиба, МПа	$\boldsymbol{\sigma}_{FPmax}$	1029	1029
Коэффициент запаса по напряжениям изгиба	n_F	2,578	2,558
Ресурс по контакту, час	L_H	1089	2348
Ресурс по изгибу, час	L_F	1170	2348

Значение коэффициента торцового перекрытия ε_a (см. табл. 1) превышает минимально допустимый уровень 1,3 [6]. Для авиационной передачи это особенно значимо, поскольку обеспечивает снижение динамических нагрузок и способствует более плавной работе редуктора.

Запасы прочности по контактным напряжениям n_H и изгибу n_F (см. табл. 3) превышают минимально допустимые значения 1,1 и 1,6 [6] соответственно и

указывают на достаточный запас прочности. Следовательно, выбранная геометрия зубчатой пары обеспечивает требуемую надежность при заданных условиях нагружения. Применение стали 38Х2МЮА с высокой твердостью активных поверхностей зубьев (61 HRC) повышает стойкость к износу и способствует увеличению ресурса по контакту.

Более нагруженным элементом с меньшим ресурсом по контакту L_H и изгибу L_F (см. табл. 3) оказалась ведущая шестерня, что типично для зубчатых передач данного типа. Она работает в более тяжелых условиях и достигает предельного состояния раньше.

Применение равного положительного смещения исходного контура оказалось конструктивно обоснованным для быстроходной передачи (окружная скорость $\upsilon > 10$ м/с [9]). Оно повысило сопротивление зубьев изгибу у основания. Ширина венца также выбрана рационально: она обеспечивает необходимую нагрузочную способность без избыточного увеличения массы и размеров редуктора.

Выполнен расчет цилиндрической прямозубой передачи редуктора авиационного поршневого ДВС. Расчет проведен в КОМПАС-GEARS в соответствии с ГОСТ 16532-70, ГОСТ 21354-87 и нормам прочности зубчатых передач, используемых в авиационных газотурбинных двигателях для гражданской авиации.

В заключение, определенные геометрические параметры, коэффициент перекрытия, запасы прочности и ресурс работы подтверждают работоспособность передачи в заданных условиях. Принятая компоновка обеспечивает сочетание прочности, простоты конструкции, низкой стоимости и компактности, что особенно важно для авиационного редуктора. Следовательно, может быть использована при дальнейшем проектировании силовой установки малой авиации.

Библиографический список

1. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Москва, Издательство стандартов, 1981. – 75 с.

2. ГОСТ 16532-70. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии. Москва, Издательство стандартов, 1983. – 43 с.

3. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Москва, Издательство стандартов, 1988. – 129 с.

4. ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Москва, Стандартинформ, 2019. – 53 с.

5. ГОСТ 9563-60. Основные нормы взаимозаменяемости. Колеса зубчатые. Модули. Москва, Издательство стандартов, 1988. – 5 с.

6. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации. 6-е изд. ЦИАМ, 2004. – 260 с.
7. Курсовое проектирование деталей машин: Учеб. пособие для учащихся машиностроительных специальностей техникумов / С. А. Чернавский, К. Н. Боков, И. М. Чернин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 416 с.: ил.
8. Детали машин: Учеб. для студентов втузов / М. Н. Иванов; под ред. В. А. Финогенова. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.: ил.
9. Детали машин: учебник для вузов / [Л. А. Андриенко, Б. А. Байков, М. Н. Захаров и др.]; под ред. О. А. Ряховского. – 5-е изд., испр. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 465 с.: ил.

© Валеев Д.Р., 2026

УДК 621.432.3

И.Р. ВАЛИУЛЛИН
virek05@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. А.О. БОРИСОВ

Уфимский университет науки и технологий

БЕНЗИНОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С НАДДУВОМ И РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДАВЛЕНИЯ

Аннотация: в статье рассматривается газотурбинный наддув как эффективный способ повышения мощности, топливной экономичности поршневых двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены методы регулирования турбокомпрессоров, а также способы борьбы с детонацией в бензиновых двигателях, включая изменение угла опережения зажигания и управление давлением наддува с использованием датчика детонации.
Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; турбонаддув; газотурбинный наддув; регулирование давления; турбокомпрессор.

Наддув, или процесс увеличения плотности свежего заряда на входе, то есть перед его попаданием в цилиндры двигателя, является одним из наиболее эффективных способов повышения характеристик поршневых двигателей, а также снижения содержания вредных веществ в выхлопных газах. Кроме того, данная технология способствует минимизации объема токсичных веществ в отработавших газов. Газотурбинный наддув становится все более распространенным в двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием и распределенным или непосредственным впрыском бензина.

Важным направлением повышения эффективности двигателей с наддувом является усовершенствование агрегатов наддува, систем охлаждения наддувочного воздуха и систем автоматического регулирования.

Газотурбинным наддувом (турбонаддувом) называется способ повышения плотности свежего заряда на впуске, при котором для привода компрессора используется энергия отработавших газов поршневого двигателя. Агрегат, реализующий этот принцип, называется турбокомпрессором. Двигатели, оснащённые такой системой, называются комбинированными поршневыми двигателями, турбодвигателями или турбопоршневыми двигателями. Конструктивно они представляют собой объединение двух машин: поршневой, в которой термодинамические процессы протекают циклически; газотурбинной, для которой характерно непрерывное течение газа через лопаточные решётки.

На рис.1 представлен общий вид турбокомпрессора, применяемого для наддува автомобильного двигателя. Основными элементами агрегата являются корпус подшипников, центробежный компрессор и газовая турбина (как правило, радиально-осевого типа). Принцип работы. Отработавшие газы из выпускного коллектора поршневого двигателя через подводящее устройство поступают в улитку корпуса турбины. В улитке и сопловом аппарате (при его наличии) происходит преобразование потенциальной энергии давления в кинетическую — скорость газового потока увеличивается перед входом на рабочее колесо турбины. На лопатках колеса кинетическая энергия газа преобразуется в механическую работу вращения, которая через вал передаётся рабочему колесу компрессора. Атмосферный воздух через входной патрубок поступает на лопатки рабочего колеса компрессора, где приобретает кинетическую энергию. Затем в диффузорах (безлопаточном, лопаточном) и улитке компрессора происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную — давление воздуха повышается до величины давления наддува.

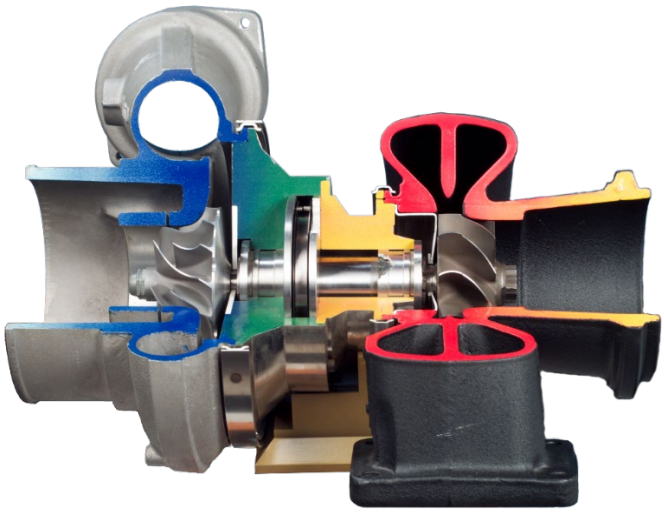


Рис1. Общий вид турбокомпрессора

На выходе из компрессора часто устанавливается теплообменник для охлаждения наддувочного воздуха, что позволяет дополнительно повысить плотность заряда и снизить тепловую напряжённость деталей двигателя.

Газодинамическая связь между поршневым двигателем и турбиной обеспечивает подвод рабочего тела с запасом тепловой энергии, достаточным для получения механической работы, необходимой для привода компрессора. Важно отметить, что применение турбокомпрессора позволяет утилизировать энергию выпускных газов более эффективно по сравнению с попытками организовать продолженное расширение газов в цилиндре или при использовании приводного (механического) компрессора. Благодаря этому турбонаддув обеспечивает повышение литровой мощности и улучшение топливной экономичности двигателя при сохранении приемлемых габаритов и массы.

Различают три способа наддува:

1. Импульсный.
2. Изобарный.
3. Смешанный (с переменным давлением газа перед турбиной).

В импульсных системах наддува энергия газов, которые выходят из цилиндров двигателя, преобразуется в работу турбины. Для этого внутренний диаметр патрубков выпускного коллектора должен быть схож с диаметром выпускных каналов головки цилиндра. Кроме того, один выпускной коллектор должен объединять выходы не более чем трёх цилиндров, причём интервалы их работы должны быть максимально равномерными. Поскольку четырёхтактный цикл занимает 720 градусов поворота коленчатого вала, а фазы выпуска обычно составляют около 240 градусов, в этом случае фазы выпуска либо не перекрываются, либо перекрываются минимально. Это обеспечивает равномерное давление газа в выпускном коллекторе.

В изобарных системах наддува отработавшие газы направляются в один общий выпускной коллектор большого объёма. В результате этого процесса кинетическая энергия отработавших газов теряется, и использовать снижение давления в выпускном коллекторе для уменьшения работы выталкивания не представляется возможным. Однако это исключает ситуацию, когда во время принудительного выпуска из цилиндра возникает пик давления в выпускном коллекторе, что увеличивает работу выталкивания. Кроме того, благодаря выравниванию давления перед турбиной, её коэффициент полезного действия возрастает по сравнению с импульсной системой, где турбина функционирует в пульсирующем газовом потоке.

Смешанный наддув, объединяющий импульсные и изобарные системы, сочетает в себе преимущества обоих подходов. С одной стороны, он использует кинетическую энергию выхлопных газов и снижает затраты на выталкивание за счет пульсаций давления в выпускном коллекторе. С другой стороны, система уменьшает колебания давления на входе в турбину, что повышает её эффективность.

В данной системе отработавшие газы поступают через два патрубка от двух групп цилиндров, каждая из которых имеет свой выпускной коллектор. В месте соединения этих патрубков установлен специальный элемент, который плавно сужает сечение на выходе, превращая его в сопло. Это увеличивает скорость выходящих газов. Когда газы с высокой скоростью покидают один патрубок, они создают разрежение на выходе другого патрубка, что приводит к снижению давления в выпускном коллекторе и уменьшению работы, необходимой для выталкивания газов из следующего цилиндра. В смесительной камере колебания скоростей и давления потоков становятся менее выраженными. За смесительной камерой может быть установлен диффузор, который преобразует скорость газов в давление.

Для регулирования компрессоров и турбин могут использовать следующие способы:

1. Дросселирование воздуха на вход в компрессор или на выходе из него.
2. Изменение угла входа потока воздуха в компрессор (поворотные лопатки).
3. Поворот лопаток лопаточного диффузора.
4. Перепуск воздуха из нагнетающего патрубка во всасывающий, в турбину или в атмосферу.
5. Дросселирование газа на входе в турбину или на выходе из нее.
6. Изменение высоты соплового аппарата турбины.
7. Применение регулируемого соплового аппарата.
8. Перепуск части выпускных газов в атмосферу.
9. Одновременное регулирование турбины и компрессора.

Наддув двигателей с принудительным воспламенением смеси повышает их мощность и улучшает динамику без значительного увеличения расхода топлива.

Экономичность автомобиля можно повысить, установив двигатель с меньшим рабочим объемом, который при обычных условиях эксплуатации работает с меньшим дросселированием и соответственно имеет более высокий КПД. Чтобы сохранить скоростные и динамические характеристики, двигатель оснащают наддувом.

Существуют различные методы наддува:

1. Газодинамический;
2. Турбонаддув;
3. С приводным нагнетателем;
4. Комбинированный.

В автомобильных двигателях внутреннего сгорания чаще всего используются газодинамический и турбонаддув. Сегодня турбонаддувом оборудованы 30% двигателей рабочим объемом от 1,2 до 1,5 литров.

Для достижения оптимальных параметров двигателя применяется регулирование наддува, которое решает следующие задачи:

1. Контроль давления наддува для уменьшения механических и тепловых нагрузок на детали;
2. Предотвращение детонации;
3. Повышение скоростных характеристик двигателя;
4. Улучшение экологических показателей;
5. Компенсация потерь мощности и экономичности при подъеме на высоту.

Таким образом, при переходе на бензиновые двигатели появляется дополнительная задача — борьба с детонацией. Для её решения применяются различные методы:

1. Изменение угла опережения зажигания.
2. Регулировка давления наддува.
3. Обогащение топливовоздушной смеси.
4. Впрыскивание воды для охлаждения смеси.

Угол опережения зажигания корректируется с помощью датчика детонации, который устанавливается на блоке цилиндров. Датчик фиксирует уровень детонации и сравнивает его с допустимыми значениями. Если детонация превышает допустимый уровень, система автоматически уменьшает угол опережения зажигания.

Однако снижение угла опережения зажигания может негативно сказаться на производительности и экономичности двигателя, а также привести к повышению температуры отработавших газов. Это, в свою очередь, может повлиять на срок службы и надёжность турбины. Поэтому часто вместе с изменением угла опережения зажигания регулируют и давление наддува.

В бензиновых двигателях давление наддува регулируется с учётом данных от датчика детонации.

Когда электромагнитный клапан закрыт, на мембрану клапана воздействует давление наддува. В результате клапан открывается, и часть отработанных газов перенаправляется мимо турбины. Это приводит к снижению давления наддува.

Если электромагнитный клапан открыт, мембрана клапана испытывает атмосферное давление, что удерживает клапан закрытым. В этом случае все отработавшие газы поступают на турбину, обеспечивая максимальное давление наддува.

Блок управления двигателем контролирует время открытия и закрытия электромагнитного клапана, основываясь на данных с датчика детонации, датчика давления наддува и тахометра. Это позволяет регулировать давление наддува.

На малых нагрузках электромагнитный клапан остаётся закрытым, что поддерживает низкий уровень наддува. При быстром открытии дроссельной заслонки клапан открывается на короткое время, что временно повышает давление наддува. При высоких нагрузках и оборотах двигателя клапан открывается, обеспечивая высокий уровень наддува.

Управление только давлением наддува с помощью датчика детонации не получило широкого распространения. Вместо этого чаще используют комбинированный подход, включающий регулирование давления наддува и угла опережения зажигания. Такой метод позволяет улучшить работу двигателя.

Библиографический список

1. Вахитов, Ю. Р. Агрегаты наддува двигателей: учебное пособие / Ю. Р. Вахитов. – Уфа: УГАТУ, 2012. – 158 с.
2. Синявский, В.В, Иванов, И. Е. Форсирование двигателей. Системы и агрегаты наддува: учебное пособие/ в.В. Синявский, И.Е. Иванов. – М.: МАДИ, 2016. – 112 с.

© Валиуллин И.Р., 2026

УДК 629.3.018:656.13.073

Г.А. ЗУЛКАРНАЕВА
zgulnazira@yandex.ru
Науч. руководов. – ст. преподаватель Д.Р. РЕЗВАНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ЗОНЫ ТО-1 АТП

Аннотация: в статье рассматриваются теоретические и практические аспекты проектирования и организации участков автотранспортных предприятий (АТП). Проведён анализ структуры и функций АТП, показана актуальность модернизации технической базы и внедрения инновационных технологий. Рассмотрены основные виды технического обслуживания, а также предложены направления повышения эффективности деятельности АТП.
Ключевые слова: автотранспортное предприятие; техническое обслуживание; проектирование; производственная структура; эффективность; цифровизация; организация труда.

Актуальность темы обусловлена возрастающими требованиями к качеству и надежности транспортных услуг, а также необходимостью оптимизации производственных процессов в автотранспортных предприятиях (АТП). В современных условиях устойчивое развитие автомобильного транспорта невозможно без совершенствования организационно-производственной структуры и технической базы предприятий.

Целью исследования является анализ принципов проектирования и организации участков АТП, а также определение путей повышения эффективности их функционирования.

Основными задачами исследования являются:

– изучение структуры и функций автотранспортных предприятий;

– определение видов и особенностей технического обслуживания автомобилей;

– анализ факторов, влияющих на организацию производственных участков;

– выявление направлений совершенствования материально-технической базы АТП.

Производственная структура автотранспортного предприятия включает в себя эксплуатационные, технические и вспомогательные подразделения. Наиболее значимым элементом этой структуры являются участки технического обслуживания и ремонта, обеспечивающие поддержание подвижного состава в исправном состоянии. Их рациональное проектирование позволяет сократить простои техники, повысить производительность и качество выполняемых работ.

При проектировании участков учитываются следующие факторы:

– тип и количество обслуживаемых автомобилей;

– режим работы предприятия и график обслуживания;

– численность и квалификация персонала;

– наличие диагностического и ремонтного оборудования;

– требования по охране труда и технике безопасности.

Эффективная организация участков предполагает рациональное размещение рабочих мест, минимизацию транспортных перемещений, внедрение автоматизированных систем управления производственными процессами. Использование современных технологий, таких как системы мониторинга состояния автопарка и планирования ремонтных работ, позволяет повысить точность диагностики, сократить время обслуживания и снизить затраты.

Важным элементом функционирования АТП является система технического обслуживания автомобилей, которая включает несколько уровней: ежедневное обслуживание (ЕТО), периодические ТО-1 и ТО-2, а также сезонное техническое обслуживание. Каждый вид ТО направлен на поддержание работоспособности и продление срока службы транспортных средств.

Ежедневное техническое обслуживание (ЕТО) включает осмотр автомобиля, проверку уровней жидкостей, состояния шин и освещения. ТО-1 предусматривает контроль состояния тормозной системы, рулевого управления, двигателя и трансмиссии. ТО-2 выполняется реже, но охватывает комплексный осмотр и замену рабочих жидкостей, фильтров, а также регулировку узлов. Сезонное ТО направлено на адаптацию автомобиля к изменению климатических условий.

Современные тенденции развития АТП связаны с внедрением цифровых технологий, автоматизацией документооборота, использованием GPS-мониторинга, электронных журналов и баз данных по техническому состоянию автомобилей. Цифровизация процессов способствует снижению издержек и повышению прозрачности управления.

Перспективы развития автотранспортных предприятий определяются направлением государственной транспортной стратегии, ориентированной на обновление автопарка, улучшение экологической безопасности и повышение эффективности обслуживания. Особое значение имеет внедрение альтернативных источников энергии и развитие инфраструктуры для электромобилей.

Таким образом, проектирование и организация участков АТП должны основываться на принципах системного подхода, учёте современных технологических требований и использовании цифровых инструментов управления. Внедрение инноваций, повышение квалификации персонала и модернизация материально-технической базы позволяют обеспечить стабильную и эффективную работу автотранспортных предприятий.

Выводы.

В результате проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

1. Эффективность работы АТП во многом зависит от грамотного проектирования и организации участков технического обслуживания.

2. Современные требования к транспортным услугам требуют внедрения автоматизации и цифровизации процессов.

3. Повышение квалификации кадров и модернизация технической базы являются ключевыми направлениями развития отрасли.

4. Системный подход к организации производственных процессов способствует снижению затрат и улучшению качества услуг.

5. Внедрение экологичных и энергоэффективных технологий — приоритетное направление устойчивого развития автотранспортных предприятий.

Библиографический список

1. Барабанова М.А. Перспективы развития конкурентоспособности автотранспортных предприятий. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-konkurentosposobnosti-avtotransportnyh-predpriyatiy/viewer

2. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – Утверждена распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. №1734-р (в ред. от 11 июня 2014 г. №1032-р).

3. Денисов И.В. Методические указания к лекционным занятиям по дисциплине «Организационно-производственные структуры транспорта». – ВлГУ, 2015.

4. Пеньшин Н.В. Конкурентоспособность услуг автомобильного транспорта в условиях посткризисной модернизации экономики России. – Тамбов: ТГТУ, 2010. – 156 с.
5. Харисов В.И., Барабанова М.А. Особенности развития материально-технической базы предприятий автомобильного транспорта Республики Башкортостан // Евразийский союз ученых. – №6. – 2021.

© Зулкарнаева Г.А., 2025

СЕКЦИЯ 1.5. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

УДК 517.984, 54.534

Е.А. КИРИЛЛОВА
elize.none@yandex.ru
Науч. руковод. – канд. физ.-мат. наук, доц. Г.Ф. САФИНА

Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ УЧАСТКА ПОЛОЙ ТРУБЫ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ УПРУГИХ КРЕПЛЕНИЙ

Аннотация: в работе рассмотрена прямая спектральная задача осесимметричных колебаний участка полой трубы с учетом параметров ее упругих креплений. По частотному уравнению задачи исследовано влияние коэффициентов относительной жесткости упругих креплений на спектральные числа и частоты осесимметричных колебаний трубы. Полученные зависимости приведены в виде графиков и таблиц на численных примерах с расчетами в математическом пакете.
Ключевые слова: участок трубы, осесимметричные колебания, частотное уравнение, параметры жесткости, граничные условия, зависимости.

Представленная работа относится к исследованиям прямых и обратных граничных задач, связанных с колебательными процессами механических систем и технических конструкций [1-5]. Чаще прямые задачи рассматривают зависимости частот колебаний конструкций как от физических и геометрических их характеристик, так и от условий их креплений – параметров граничных условий.

Прямые задачи по поиску частот свободных колебаний полой трубы с различными условиями креплений рассмотрены в работах [1, 4].

В продолжении работ, исследуем влияние на значения частот колебаний участка полой трубы параметров жесткости ее упругих креплений с учетом свободных осесимметричных колебаний.

Прямая задача для осесимметричных колебаний участка полой трубы длины l сводится к задаче с дифференциальным уравнением [1,4]

$$y^{(4)}(x) - \lambda^4 y(x) = 0. \tag{1}$$

и с граничными условиями

$$\begin{aligned} &y''(0) = 0; \quad y'''(0) + B_0 l^{-3} y(0) = 0; \\ &y''(l) = 0; \quad y'''(l) + B_l l^{-3} y(l) = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

В (1), (2): $\lambda^4 = \omega^2 \frac{\rho h_\Sigma}{D_1} - \frac{\mathrm{E}_2 h_2}{D_1 R^2}$ – спектральное число, содержащее частоту ω_i осесимметричных колебаний и характеристики трубы: R, h (h_Σ), D – радиус, толщину (с учетом каркаса), цилиндрическую жесткость; E, ρ – модуль упругости и плотность материала трубы, B_0, B_l – коэффициенты относительных жесткостей упругих креплений участка трубы (в сечениях $x = 0$ и $x = l$).

Так как $\lambda^4 > 0$, тогда соответствующее (1) характеристическое уравнение имеет по 2 действительных и мнимых корня и решение уравнения (1) примем в виде

$$y(x) = C_1 ch\lambda x + C_2 \cos \lambda x + C_3 sh\lambda x + C_4 \sin \lambda x ,$$

где $C_i (i = \overline{1,4})$ – амплитуды осесимметричных колебаний трубы.

Частотное уравнение к задаче (1), (2) находим стандартными приемами (с учетом поиска ненулевых значений амплитуд колебаний $C_i (i = \overline{1,4})$) в виде

$$\begin{aligned} &\lambda^6 (1 - ch\lambda l \cos \lambda l) + \lambda^3 (B_0 + B_l)(sh\lambda l \cos \lambda l - ch\lambda l \sin \lambda l) + \\ &+2 B_0 B_l sh\lambda l \sin \lambda l = 0. \end{aligned} \qquad (3)$$

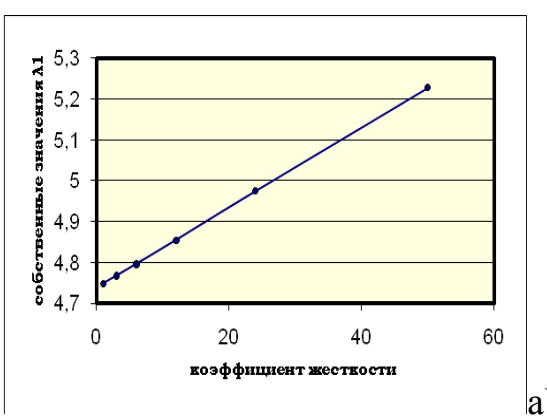
Подставляя в (3) известные характеристики трубы, а также известные коэффициенты относительных жесткостей упругих креплений участка трубы можно определять с помощью математического пакета соответствующие спектральные числа $\lambda_i (i = \overline{1,\infty})$ и частоты колебаний $\omega_i (i = \overline{1,\infty})$ полой трубы.

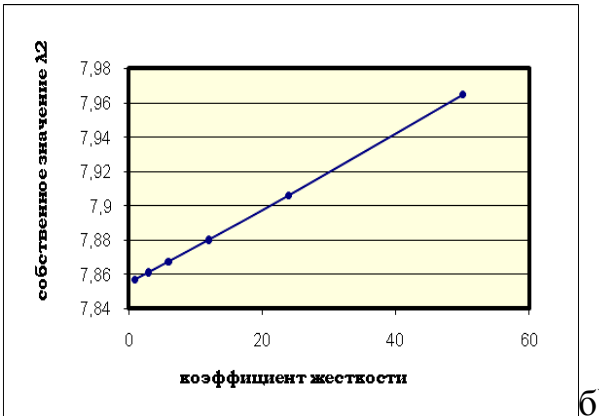
В работе исследовано влияние коэффициентов относительной жесткости упругих креплений участка полой трубы на спектральные числа (а, значит, и на частоты колебаний) задачи (1), (2).

Численные расчеты по уравнению (3) показывают, что рост параметров граничных условий (2) – коэффициентов B_0, B_l, ведет к росту спектральных чисел и собственных частот осесимметричных колебаний трубы.

Например, для задачи (1), (2) на рисунке 1(а, б) представлены графики зависимости спектральных чисел λ_1 и λ_2, соответственно, от меняющихся параметров (B_l при B_0=1) упругих креплений участка трубы при следующих характеристиках:

$\rho = 7{,}8 \cdot 10^3 кг/м^3$, $h_\Sigma = 0{,}05 м$, $D_1 = 100 H \cdot м$, $E_2 = 2 \cdot 10^{11} H/м^2$, $h_2 = 0{,}03 м$, $R = 0{,}2 м$. (4)



а)


б)

Рис.1. Зависимость λ_1(а) и λ_2 (б) от относительной жесткости B_l для задачи (1), (2) при характеристиках (4) трубы

Такое изменение касается не только первых двух спектральных чисел, но и всего спектра собственных значений (и соответственно спектра частот осесимметричных колебаний трубы).

В следующих таблицах 1 и 2 даны спектральные числа $\lambda_i (i=\overline{1,4})$ задачи (1), (2), соответствующие параметрам жесткостей граничных условий (2) при и характеристиках (4) участка трубы.

Таблица 1

Зависимость спектральных чисел $\lambda_i (i=\overline{1,4})$ задачи (1), (2) от параметра B_l (B_0=1) при характеристиках (4) трубы

B_0	B_l	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
1	1	4,7488	7,8573	10,9971	14,1378
1	3	4,7677	7,8614	10,9986	14,1385
1	6	4,7965	7,8677	11,0008	14,1396
1	12	4,8552	7,8803	11,0054	14,1417

Таблица 2

Зависимость спектральных чисел $\lambda_i (i=\overline{1,4})$ задачи (1), (2) от параметров B_0 B_l при характеристиках (4) трубы

B_0	B_l	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
1	1	4,7488	7,8573	10,9971	14,1378
3	3	4,7801	7,8808	11,0045	14,1401
6	6	4,8786	7,9542	11,0134	14,1568
12	12	4,9984	7,9366	11,1233	14,1787

Влияния параметров граничных условий на спектральные числа и частоты колебаний рассмотрены и при других физических характеристиках трубы, отличных от (4).

Проведенный анализ полученных зависимостей должно учитываться при постановке и решении обратной спектральной задачи, через которую решается проблема сохранения безопасного спектра частот осесимметричных колебаний трубы. Практическую же задачу по сохранению прежних (безопасных) частот колебаний полой трубы можно решить с помощью соответствующих изменений в параметрах жесткостей граничных условий с получением аналитических формул для этих параметров.

Библиографический список

1. Антоненко Э. В. Свободные колебания и устойчивость оболочек с упругими краевыми ребрами / Э. В. Антоненко // Прикладная механика. – 1975. – Т. 11 – Вып. 6 – С.44–50.

2. Ахтямов, А.М. Теория идентификации краевых условий и ее приложения / А.М. Ахтямов. – М.: Физматлит, 2009. – 272 с.

3. Костюков В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. – Омск: ОмГТУ, 2011. – 360 с.

4. Сафина Г.Ф. Акустическое диагностирование характеристик роторов и валов. Монография / Г.Ф. Сафина. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. – 186 с.

5. Сафина Г.Ф. Диагностирование жесткостей опор валов обрабатывающего механизма по частотам его асимметричных колебаний // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. № 3 (365). – С. 21-25.

© Кириллова Е.А., 2026

УДК 517.984, 54.534

Ю.С. КОНЯЕВ
iury.conyaev2016@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. физ.-мат. наук, доц. Г.Ф. САФИНА

Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА MAPLE К ПОИСКУ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ВАЛА С ДИСКАМИ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Аннотация: в работе рассмотрен численный метод для решения прямой спектральной задачи по крутильным колебаниям вала с грузами. На практическом примере для вала с тремя грузами рассмотрен численный метод для определения частот колебаний вала и к алгоритму решения использованы функционал и команды математического пакета Maple.

Ключевые слова: вал с дисками, частоты колебаний, численный метод, табличная форма, алгоритм, пакет Maple.

Представленная работа продолжает исследования в моделировании свободных колебательных процессов механических систем и технических устройств [1-6]. Для поиска частот крутильных колебаний вала с дисками применяется табличная форма численного метода, с алгоритмизацией расчетов с помощью функционала математического пакета.

Вал с n-дисками (грузами) приведен на рисунке 1, для которого обобщенные координаты $\varphi_i (i = \overline{1,n})$ – углы закручивания вала (в местах насадки дисков), $k_i (i = \overline{1,n-1})$ – жесткости участков вала между дисками ($e_i = 1/k_i$ – податливости участков), $I_i (i = \overline{1,n})$ – моменты инерции дисков.

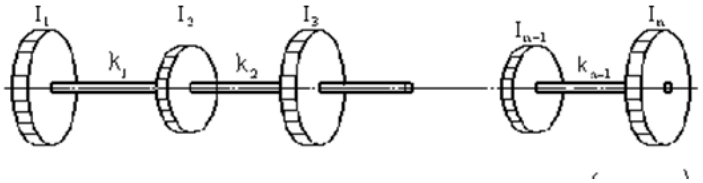


Рис. 1. Вал с дисками

К поиску частот колебаний вала с дисками применим численный метод, в котором вал разделяется на безынерционные участки (между дисками) с упругой податливостью $e_i = 1/k_i$ $k_i (i = \overline{1,n-1})$ и использует следующие модели для угловых отклонений θ_i дисков приведенного вала [3. 5]

$$\begin{cases} \theta_2 = \theta_1 - e_1 p^2 I_1 \theta_1, \\ \theta_3 = \theta_2 - e_2 p^2 (I_1\theta_1 + I_2\theta_2), \\ .... \\ \theta_n = \theta_{n-1} - e_{n-1} p^2 (I_1\theta_1 + ... + I_{n-1}\theta_{n-1}). \end{cases} \quad (1)$$

Приближенный расчет частот крутильных колебаний приводит к частотному уравнению относительно квадрата частоты p^2:

$$I_1\theta_1 p^2 + I_2\theta_2 p^2 + I_3\theta_3 p^2 ... + I_n\theta_n p^2 = 0, \quad (2)$$

которое с учетом (1) дает отдельные частотные уравнения, соотносимые с аналитическими их видами для валов с любым конечным числом дисков.

Например, для вала с тремя дисками численным методом получено частотное уравнение: $I_1\theta_1 p^2 + I_2\theta_2 p^2 + I_3\theta_3 p^2 = 0$, соответствующее (с учетом (1)) с видом частотного уравнения, полученного стандартным аналитическим методом [6]:

$$p^4 - \left(k_1 \frac{I_1 + I_2}{I_1 I_2} + k_2 \frac{I_2 + I_3}{I_2 I_3} \right) p^2 + \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I_1 I_2 I_3} k_1 k_2 = 0.$$

Применение численного метода рассмотрим на конкретном примере вала с тремя дисками с моментами инерции $[кг \cdot м \cdot с^2]$ и жесткостями $[кг \cdot м]$ участков вала:

$$\begin{aligned} I_1 &= 10,78; & c_1 &= 10,48 \cdot 10^4; \\ I_2 &= 12,56; & c_2 &= 24,56 \cdot 10^4. \\ I_3 &= 12,12; \end{aligned} \qquad (3)$$

Определим частоты колебаний вала. Выбираем за единицу податливость первого участка: $e_1 = \dfrac{10^{-4}}{10,48}\left[\dfrac{1}{кг \cdot м}\right]$. Введем переменную $p^2 = \alpha \cdot 10^4$ и рассмотрим безразмерные произведения $I_i \alpha \cdot 10^4 e_1$, $i = 1,2,3$.

С учетом (3) тогда имеем следующие числовые значения:

$$\begin{aligned} I_1 p^2 &= 1,03\alpha, \\ I_2 p^2 &= 1,21\alpha, & e_1 &= 1, \\ I_3 p^2 &= 1,25\alpha, & e_2 &= 0,43. \end{aligned} \qquad (4)$$

Для нахождения частотного уравнения колебаний вала с тремя дисками получена с учетом (1) схема численного метода в виде таблицы 1.

Таблица 1

Схема численного метода с учетом формул (1)

1	2	3 4	5	6
	$-1,03\alpha$	$\leftarrow \quad -1,03\alpha$	1	1
1-2	$-1,03\alpha$	$1 \quad \rightarrow$	$-1,03\alpha$	
	$-1,21\alpha + 1,25\alpha^2$	$\leftarrow \quad -1,21\alpha$	$1 - 1,03\alpha$	2
2-3	$-2,24\alpha + 1,25\alpha^2$	$0,43 \quad \rightarrow$	$-0,96\alpha + 0,53\alpha^2$	
	$-1,25\alpha + 2,49\alpha^2 - 0,66\alpha^3$	$\leftarrow \quad -1,25\alpha$	$1 + 1,99\alpha + 0,53\alpha^2$	3
3-4	$-3.49\alpha + 3,74\alpha^2 - 0,66\alpha^3$			

Таким образом, получили частотное уравнение: $-3.49\alpha + 3,74\alpha^2 - 0,66\alpha^3 = 0$, из которого определяются введенные безразмерные параметры α, и далее, соответствующие им частоты колебаний вала с дисками.

Приведем далее программную реализацию метода с пояснениями шагов в Maple. Задаем известные числовые параметры:

```
> restart;
> i1p2:=1.03*alpha; i2p2:=7.90*alpha; i3p2:=1.36*alpha;
```

$$i1p2 := 1.03\,\alpha$$
$$i2p2 := 7.90\,\alpha$$
$$i3p2 := 1.36\,\alpha$$

Определяем податливости участков вала между дисками:

```
> e1:=1; e2:=0.30;
```

$$e1 := 1$$
$$e2 := .30$$

Составляем рекуррентные формулы (1) для амплитудных углов отклонений вала:

```
> t1:=1; t2:=t1-e1*i1p2*t1; t3:=t2-e2*i1p2*t1-e2*i2p2*t2;
```

$$t1 := 1$$

$$t2 := 1 - 1.03\ \alpha$$

$$t3 := 1. - 1.3390\ \alpha - 2.3700\ \alpha\,(1 - 1.03\ \alpha)$$

Образуем частотное уравнение для вала с 3-мя дисками:

```
> y:=-(i1p2*t1+i2p2*t2+i3p2*t3);
```

$$y := -1.03\ \alpha - 7.90\ \alpha\,(1 - 1.03\ \alpha) - 1.36\ \alpha\,(1. - 1.3390\ \alpha - 2.3700\ \alpha\,(1 - 1.03\ \alpha))$$

Находим корни биквадратного относительно p^2 частотного уравнения:

```
> p2:=10^4*fsolve(y,alpha);
```

$$p2 := 0.,\ 10678.66796\ ,\ 29025.10590$$

Определяем собственные частоты колебаний вала с 3-мя дисками

```
> s22:=sqrt(s2); s33:=sqrt(s3);
```

$$s22 := 103.3376406$$

$$s33 := 170.3675612$$

Видим, что колебательный процесс для вала с тремя дисками является двухчастотным. Численный метод с применением пакета Maple дает результат с достаточно хорошей точностью, сравнимый с результатами аналитических приемов получения частотных уравнений.

Библиографический список

1. Ахтямов, А.М. Теория идентификации краевых условий и ее приложения / А.М. Ахтямов. – М.: Физматлит, 2009. – 272 с.
2. Юрко, В.А. Введение в теорию обратных спектральных задач / В.А. Юрко. – М.: Физматлит, 2007. – 384 с.
3. Маслов, Г.С. Расчеты колебаний валов / Г.С. Маслов. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
4. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Т.1 / Под ред. А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1983. – 415 с.
5. Сафина, Г.Ф. Диагностирование характеристик механических систем: учебное пособие. / Г.Ф. Сафина. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2016 г. – 100 с.
6. Сафина Г.Ф. Акустическое диагностирование характеристик роторов и валов. Монография / Г.Ф. Сафина. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. – 186 с.

© Коняев Ю.С., 2026

УДК 621.83

И.А. АБДРАХМАНОВ, К.П. ШУЛЬГА
Abdrakmhanov_insaf@mail.ru
Науч. руководитель – д-р. техн. наук, проф. О.В. ДАРИНЦЕВ

Уфимский университет науки и технологий

НЕТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

Аннотация: в статье рассмотрены нетрадиционные механические передачи, преобразующие вращательное движение в прямолинейное. Выполнен анализ четырёх альтернативных схем: двойной эксцентриковый кулачок, безредукторный магнитный винт, гибкий вал с винтовым зазором и шлицевой шариковый механизм. Показаны преимущества и ограничения каждого способа. Определены области практического применения в робототехнике и точном машиностроении.
Ключевые слова: механические передачи; прямолинейное движение; нетрадиционные кинематические схемы; эксцентриковый кулачок; магнитный винт; гибкий вал; шлицевая передача.

Введение. Традиционные способы преобразования вращательного движения в прямолинейное – кривошипно-шатунный механизм и винтовая передача – обладают фундаментальными недостатками: высокие боковые силы, трение скольжения, ограничения по длине хода. В современной робототехнике и станкостроении возрастают требования к миниатюризации, снижению вибраций и повышению удельной силы. Поэтому актуальным является поиск нетрадиционных методов реализации механических передач для прямолинейного движения. Цель проведенной работы – систематизировать и проанализировать нетрадиционные способы преобразования вращения в поступательное движение.

Анализ преобразующих механизмов. В работе рассмотрены четыре нетрадиционных технических решения. Первое устройство – механизм на основе двойного эксцентрикового кулачка, работающий по принципу муфты *Oldham*. Ход механизма в четыре раза превышает эксцентриситет, при этом снижаются вибрации за счёт балансировки масс. Основной недостаток – высокие требования к точности профилирования кулачка, рис.1.

Второй способ – безредукторный магнитный винт (*RotLin*-актуатор). Ротор содержит винтовые постоянные магниты, взаимодействующие с транслятором без механического контакта. Это обеспечивает высокую удельную силу и отсутствие люфта. К недостаткам относят, так называемый, зубцовый момент (*cogging torque*) и сложность управления при отсутствии датчика силы, рис. 2.

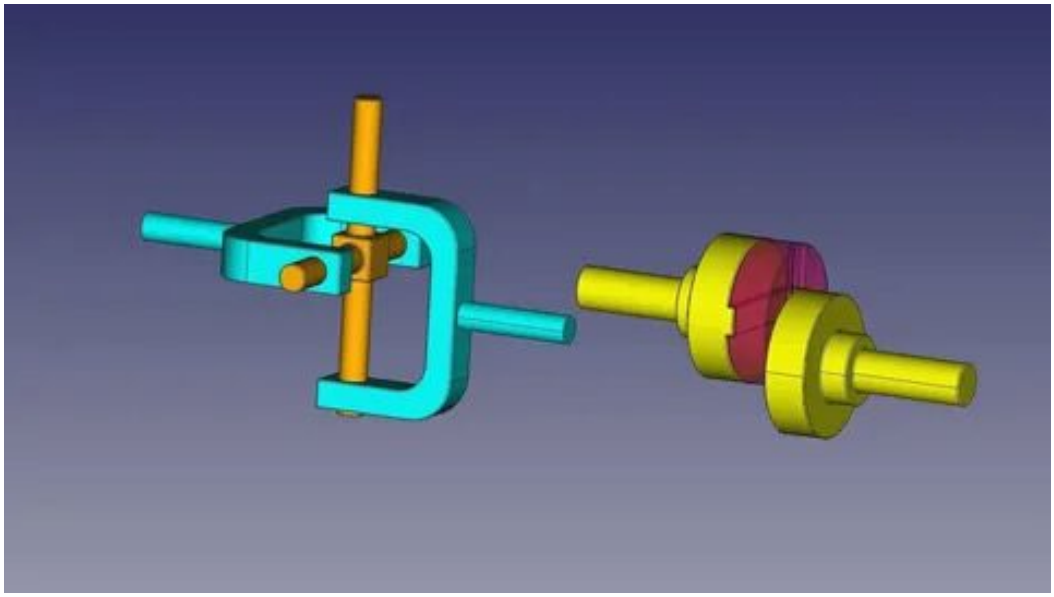


Рис. 1. Механизм на основе двойного эксцентрикового кулачка

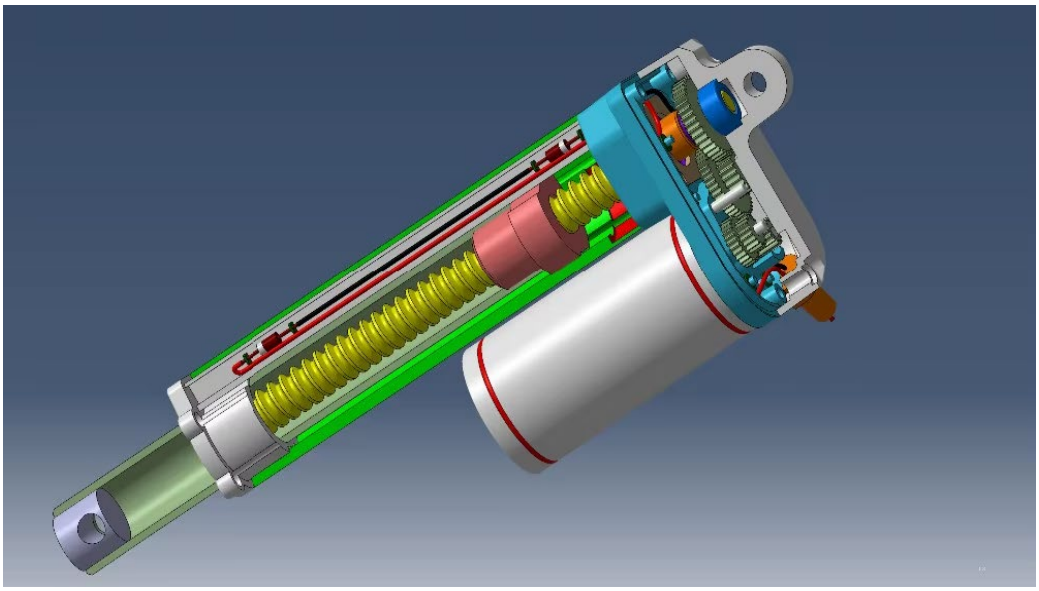
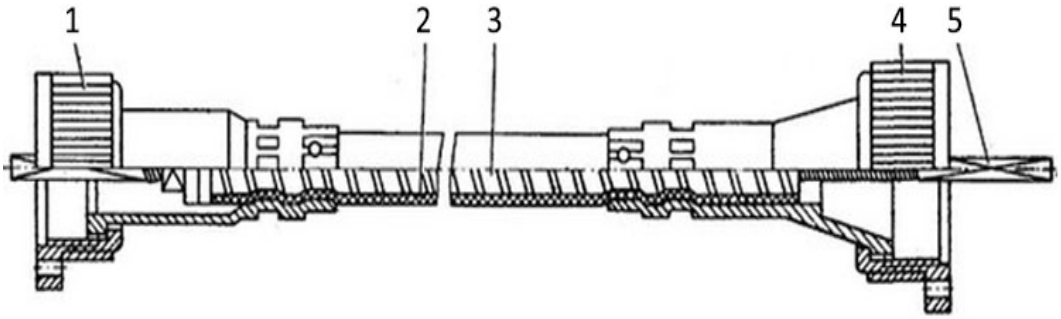


Рис. 2. Безредукторный магнитный винт

Третий способ – гибкий вал с винтовым зазором. На наружном слое намотки вала выполнен винтовой зазор, а гладкая гайка снабжена поперечными штифтами. Преимущество – возможность передачи движения по искривлённой траектории. Недостатки – низкая нагрузочная способность и быстрый износ штифтов, рис. 3.

Четвёртый способ – шлицевой вал с шариками (*ball spline*). Возвратные канавки готического профиля обеспечивают циркуляцию шариков между валом и внешним цилиндром. Механизм одновременно передаёт линейное и вращательное движение. Нагрузочная способность в 10 раз выше по сравнению с обычной шариковинтовой втулкой, а срок службы – в 700 раз больше. Недостатки – сложность изготовления и высокая стоимость, рис 4.



1, 4 — накидные гайки; 2 — защитная оболочка;
3 — броневая защита троса; 5 — трос вала

Рис. 3. Гибкий вал с винтовым зазором

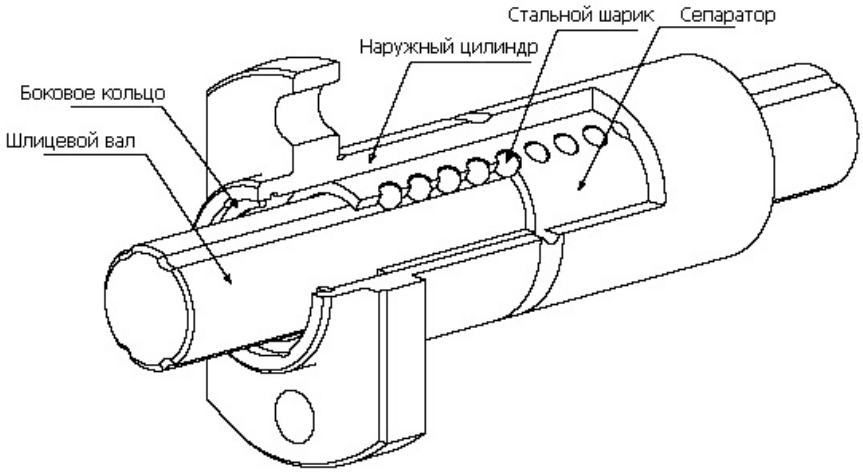


Рис. 4. Шлицевой вал с шариками

Результаты анализа и заключение. Сравнительный анализ показал, что выбор нетрадиционной передачи зависит от условий эксплуатации, области применения и специфики требований к габаритам или нагрузочной способности механизмов. Для *pick-and-place* роботов, чей режим работы отличается высокими нагрузкой, скоростями и повторяемостью, оптимален шлицевой механизм. Для высокоточных медицинских устройств, основное требование к которым заключается в максимальной изоляции контактных поверхностей от стерильной рабочей зоны, – магнитный винт. Для гибких элементов технических эндоскопов, устройств с высокими требованиями к размерам и подвижности элементов, – гибкий вал с винтовым зазором. Двойной эксцентриковый кулачок перспективен в механизмах с ограниченным ходом и высокими требованиями к наличию рабочих шумов определенного спектра.

Таким образом, в ходе проведенной работы были систематизированы четыре нетрадиционных способа механических передач для реализации прямолинейного движения. Показано, что отказ от жёстких кинематических пар в пользу эксцентриковых, магнитных или шлицевых элементов позволяет решить актуальные задачи миниатюризации исполнительных устройств и снижения вибраций, особенно для возвратно-поступательных движений, или в

моменты старта-останова. Как показал анализ научных публикаций, материалов специализированных российских и международных конференций, наиболее перспективными для высокотехнологичных отраслей с их жесткими требованиями ко всем механическим элементам являются бесконтактные магнитные винты и комбинированные шлицевые системы. Основные недостатки которых заключаются в сложности изготовления, что является не столь важным ограничением при текущем взрывном развитии технологий: от многокоординатных обрабатывающих центров до селективного лазерного спекания.

Библиографический список

1. Yamagata University. Design of a rotational-to-linear motion transformer using a double eccentric crank / Yamagata University // CiNii Research. – 2024.
2. Sensor-less Back-driving Control of Direct-drivable RotLin Linear Series Elastic Actuator // CiNii Research. – 2021.
3. Flexible rotary to linear and non-linear drive mechanism: пат. 4395924 США. – 1983.
4. One Axis Linear and Rotary Motion Positioning // Tech Briefs / NB Corporation. – 2025.
5. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – Москва: Наука, 1988. – 640 с.

© Абдрахманов И.А., Шульга К.П., 2026

УДК 517.9

И.Д. ЕРМИЛОВ, Р.И. ШАЙХУТДИНОВ
Karhop12131213a@gmail.com
Науч. руководитель – ст. преподаватель Р.И. ШАЙХУТДИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНОВОК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О БРАХИСТОХРОНЕ

Аннотация: в работе используются тригонометрические подстановки при решении задачи о брахистохроне.
Ключевые слова: брахистохрона, тригонометрическая подстановка, циклоида, параметрическое уравнение.

В работе рассмотрена задача о нахождении в вертикальной плоскости кривой, по которой тяжелая частица из заданного начального положения достигнет конечной точки за минимальное время (Рис. 1).

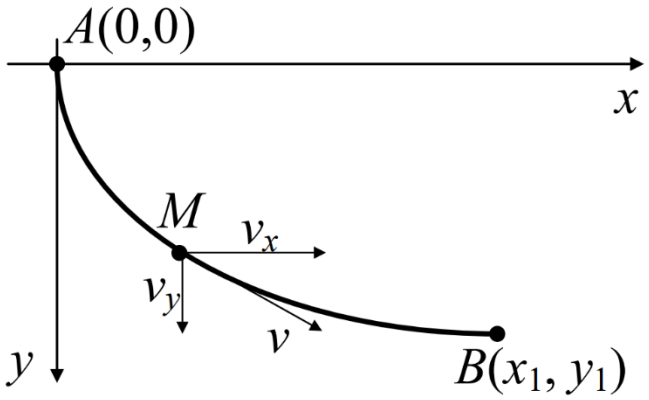


Рис. 1

Скорость и координата точки при таком движении связаны через закон сохранения полной механической энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = mgy.$$

Вектор скорости движения разложим по координатам:

$$\bar{v} = (v_x, v_y),\ |v|^2 = v_x^2 + v_y^2,\ y'(x) = \frac{v_y}{v_x}.$$

Имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} v_x^2 + v_y^2 = 2gy, \\ y'(x) = \dfrac{v_y}{v_x}, \end{cases}$$

откуда получаем

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \sqrt{2gy(1+y')} \Rightarrow dt = \sqrt{\frac{(1+y'^2)}{2gy}}\,dx.$$

Время движение точки выразим через интеграл

$$t(y) = \int_0^t dt = \int_0^{x_1} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2gy}}\,dx \to min,$$

при граничных условиях $y(0) = 0,\ y(x_1) = y_1$.

Решение примет вид:

$$\frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2gy}} - \frac{y'^2}{2gy(1+y'^2)} = C.$$

Последнее преобразуем

$$y\left(1+y'^{2}\right)=C_1, \text{ где } C_1=\frac{1}{2gC^2}.$$

Введем параметр θ такой, что $y'=ctg\,\theta$. Тогда получаем:

$$y=\frac{C_1}{1+y'^{2}}=C_1\sin^2\theta=\frac{C_1}{2}(1-\cos 2\theta),$$

$$dx=\frac{dy}{y'}=\frac{2C_1\sin\theta\cos\theta\,d\theta}{\operatorname{ctg}\theta}=2C_1\sin^2\theta\,d\theta=C_1(1-\cos 2\theta)d\theta,$$

$$x=C_1\left(\theta-\frac{\sin 2\theta}{2}\right)+C_2=\frac{C_1}{2}(2\theta-\sin 2\theta)+C_2.$$

Следовательно, в параметрической форме уравнение искомой линии есть уравнение циклоиды:

$$x=\frac{C_1}{2}(\theta_1-\sin\theta_1),\qquad y=\frac{C_1}{2}(1-\cos\theta_1).$$

Библиографический список

1. Сумбатов А.С. Задача о брахистохроне (классификация обобщений и некоторые последние результаты). Труды МФТИ. Механика. 2017. Т. 9, № 3. С. 66-75;
2. Гельфанд И.М., Фомин С.В. Вариационное исчисление. М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1961;
3. Дронг В. И. и др. Курс теоретической механики. – 2005.
4. Смирнов В. И. Вариационное исчисление. – Рипол Классик, 2013.
5. Šalinić S. Contribution to the brachistochrone problem with Coulomb friction //Acta mechanica. 2009. Т. 208. №. 1. С. 97-115.

© Ермилов И.Д., Шайхутдинов Р.И., 2026

УДК 517.9

Д.Г. ФЕДОРОВА, Е.Д. ДЕМЧЕНКО
Fedorova2805D@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. физ.-мат. наук, доц. Р.Д. МУРТАЗИНА

Уфимский университет науки и технологий

КРИВАЯ С ОПРЕДЕЛЕННЫМ УСЛОВИЕМ НА КАСАТЕЛЬНУЮ ЛИНИЮ

Аннотация: в работе выводится уравнение кривой, для которой касательная между точкой касания и точкой пересечения с осью абсцисс делится в некотором отношении осью ординат.
Ключевые слова: касательная, точка касания, дифференциальное уравнение.

Пусть касательная к кривой между точкой касания и точкой пересечения с осью Ox делится в отношении $k:n$ осью ординат Oy (Рис.1).

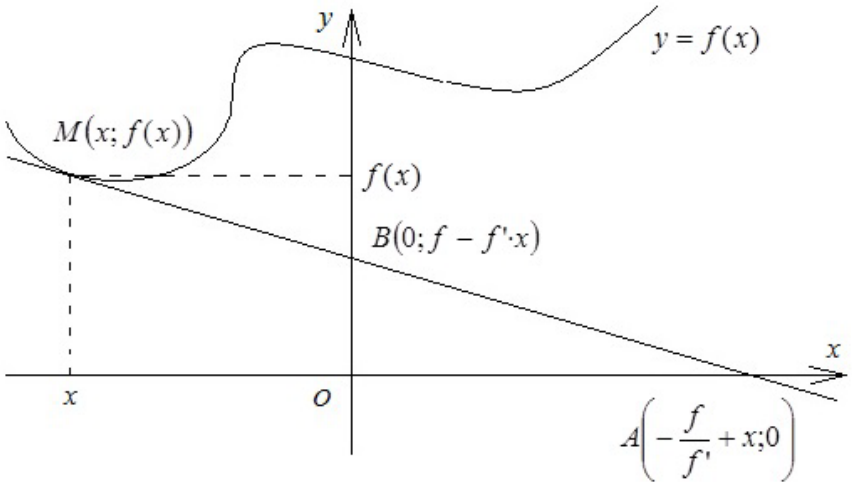


Рис. 1

Уравнение касательной

$$Y - f(x) = f'(x) \cdot (X - x).$$

При $Y = 0$

$$\overrightarrow{OA} = X = -\frac{f(x)}{f'(x)} + x.$$

Отсюда точка A имеет координаты $\left(-\frac{f(x)}{f'(x)} + x; 0\right)$.

При $X = 0$

$$\overrightarrow{OB} = Y = f(x) - f'(x) \cdot x.$$

Отсюда точка B имеет координаты $(0; f(x) - f'(x) \cdot x)$.

Так как

$$\overrightarrow{MB} = (-x; -f'(x) \cdot x),$$

$$\overrightarrow{BA} = \left(-\frac{f(x)}{f'(x)} + x; -f(x) + f'(x) \cdot x\right)$$

и, $\overrightarrow{MB}$ и $\overrightarrow{BA}$ коллинеарны, то

$$\frac{-x}{-\frac{f(x)}{f'(x)} + x} = \frac{-f'(x) \cdot x}{-f(x) + f'(x) \cdot x} = \frac{k}{n}.$$

Из последнего соотношения получаем дифференциальное уравнение вида

$$f'(x) \cdot x \cdot n = k(f(x) - f'(x) \cdot x)$$

или, перепишем

$$f'(x) \cdot x \cdot (n + k) = k \cdot f(x).$$

Общее решение уравнения с разделяющимися переменными

$$\frac{dy}{y} = \frac{k}{n + k} \cdot \frac{dx}{x}$$

имеет вид

$$y = C \cdot x^{\frac{k}{n+k}}.$$

На Рис. 2 приведен график функции при $C = -2$ и $\frac{k}{n+k} = \frac{1}{3}$.

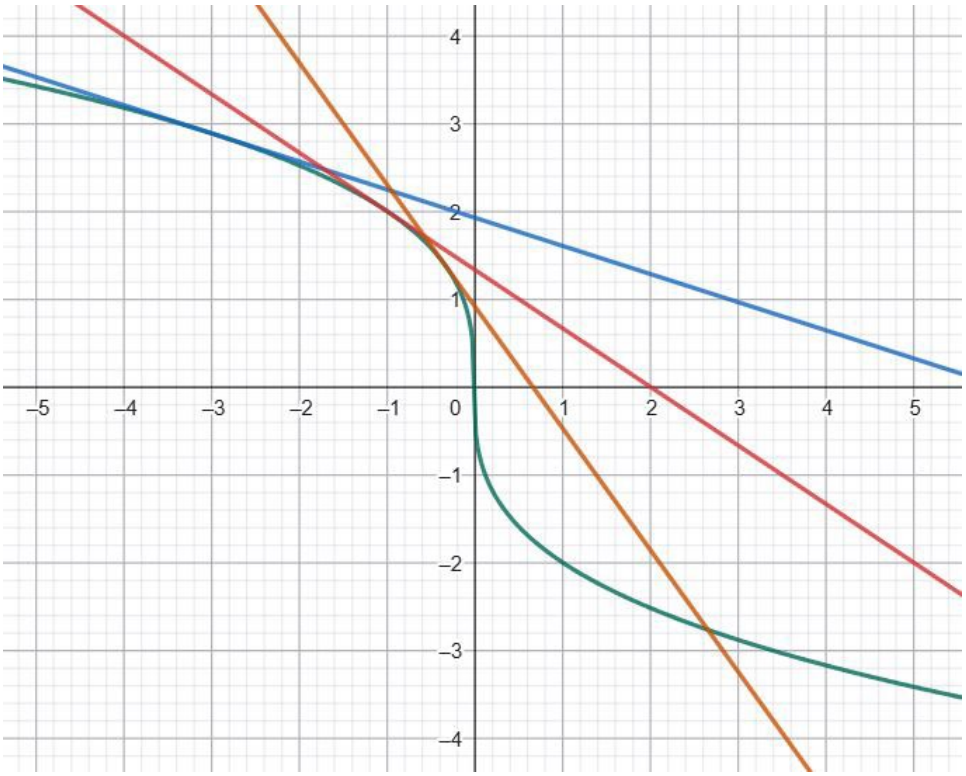


Рис. 2

Библиографический список

1. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 2010;

2. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. Санкт-Петербург: МИФРИЛ, 1996;

3. Муртазин Н.Э., Муртазина Р.Д., Мухутдинова А.А., Низамова А.Д. Изменение области гидродинамической устойчивости в зависимости от параметра термовязкости. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 95. С. 97-107;

4. Муртазина Р.Д., Низамова А.Д. О влиянии линейной зависимости вязкости от температуры на устойчивость течения термовязкой жидкости в плоском канале. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2026. № 100. С. 126-136;

5. Низамова А.Д., Муртазина Р.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Введение в тензорный анализ и кинематику сплошных сред. М.: Русайнс. 2022.

© Федорова Д.Г., Демченко Е.Д., 2026

УДК 517.9

Е.Р. ПОКОТИЛО, Р.Д. МУРТАЗИНА
egor250707@intrernet.ru
Науч. руководв. – канд. физ.-мат. наук, доц. Р.Д. Муртазина

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ПРОГИБА И ДЕФОРМАЦИЙ БАЛОК ПОД НАГРУЗКОЙ

Аннотация: в работе рассмотрена изогнутая балка с закрепленными концами. Приведен сравнительный анализ точного решения и численных решений методами инвариантного погружения и пристрелки.
Ключевые слова: прогиб, деформация балки, численный метод пристрелки, инвариантное погружение.

Рассмотрим дифференциальное уравнение оси VOx изогнутой балки

$$V''=\frac{1}{El_x}\cdot\left(\frac{qxl}{2}-\frac{qx^2}{2}\right)$$

с закрепленными концами $V(x=0)=V(x=l)=0$. Здесь El_x - жесткость [Н·м], q – нагрузка [Н/м], l – длина балки [м].

При жесткости 2 Н·м, нагрузке 60 Н/м, длине балки 1 м, высоте сечения 0,001 м. максимальная ошибка инвариантного погружения $5{,}71\cdot10^{-4}$, максимальная ошибка пристрелки $1{,}25\cdot10^{-3}$. Результаты расчета прогиба балки методами инвариантного погружения и стрельбы:

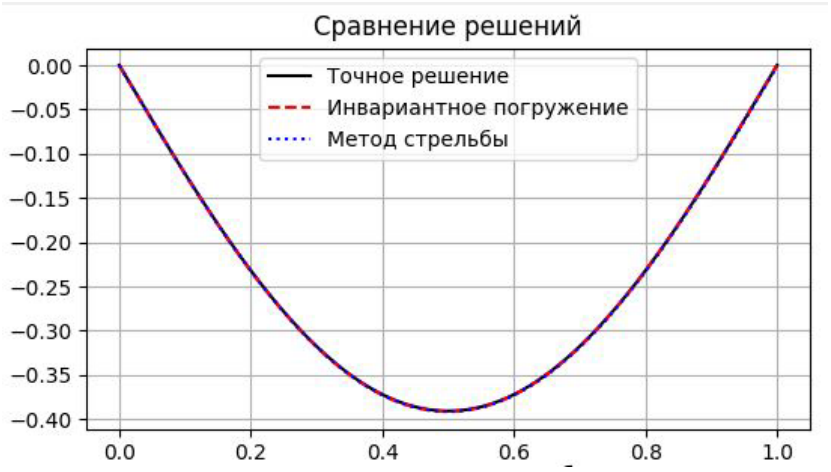


Рис. 1

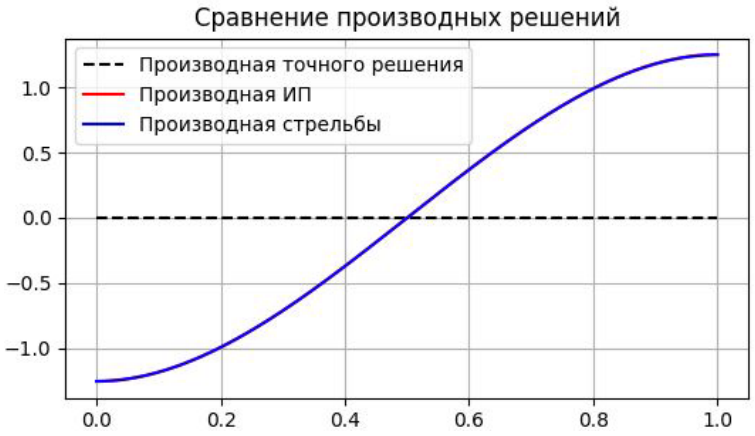


Рис. 2

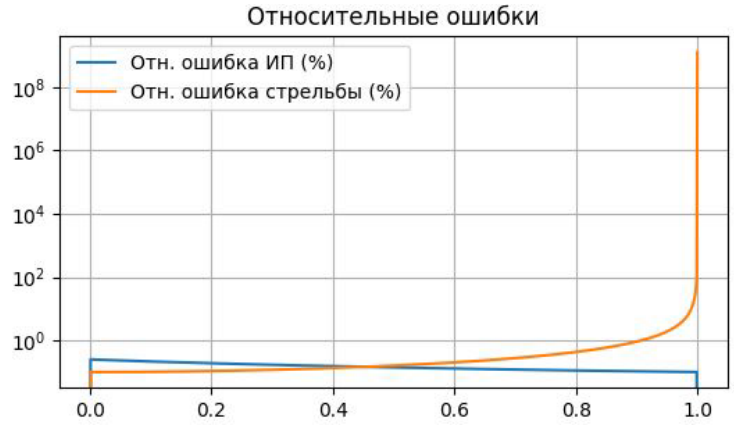


Рис. 3

При жесткости 4 Н·м, нагрузке 60 Н/м, длине балки 1 м, высоте сечения 0,001 м. максимальная ошибка инвариантного погружения $2{,}85 \cdot 10^{-4}$, максимальная ошибка пристрелки $6{,}24 \cdot 10^{-4}$. Результаты расчета прогиба балки методами инвариантного погружения и стрельбы:

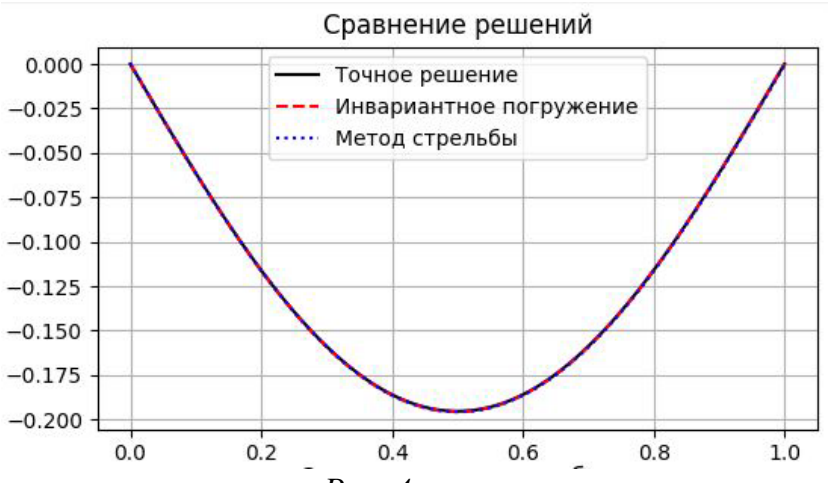


Рис. 4

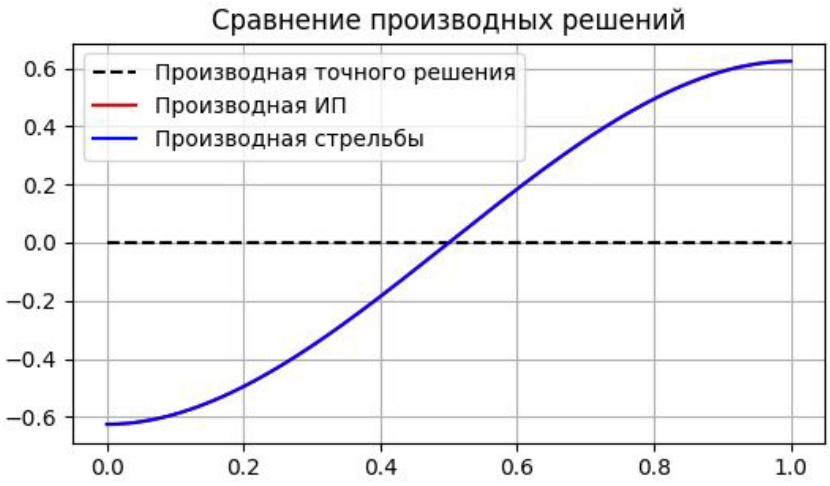


Рис. 5

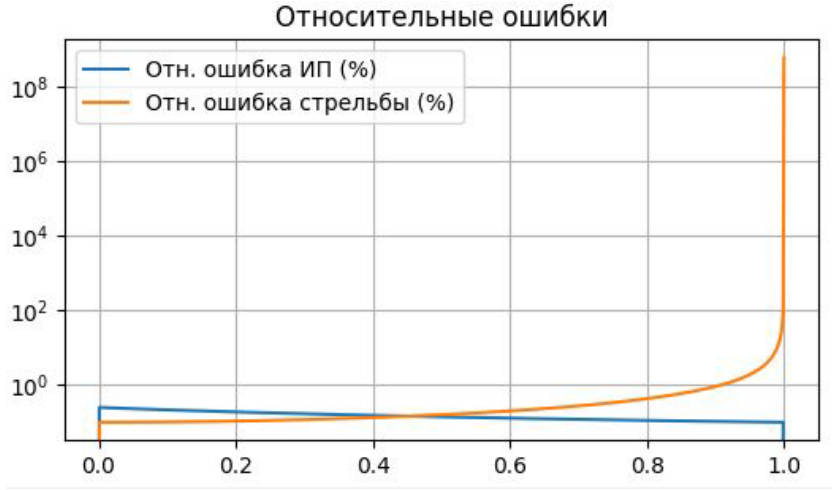


Рис. 6

При жесткости 2 Н·м, нагрузке 60 Н/м, длине балки 2 м, высоте сечения 0,001 м. максимальная ошибка инвариантного погружения $4{,}56 \cdot 10^{-3}$, максимальная ошибка пристрелки $9{,}99 \cdot 10^{-3}$. Результаты расчета прогиба балки методами инвариантного погружения и стрельбы:

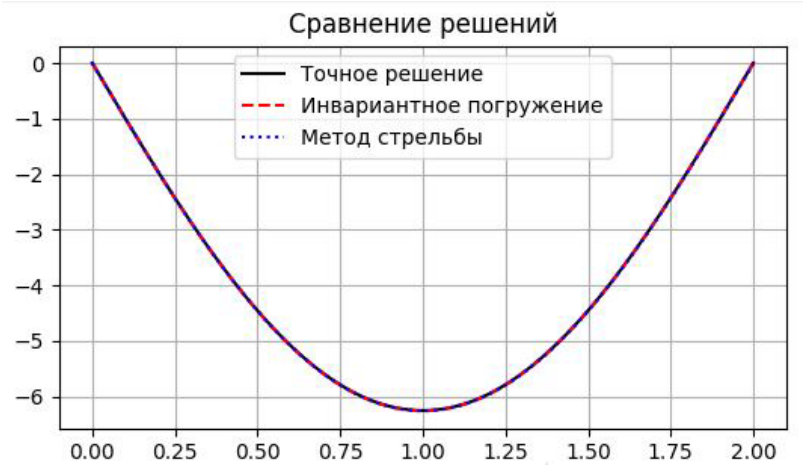


Рис. 7

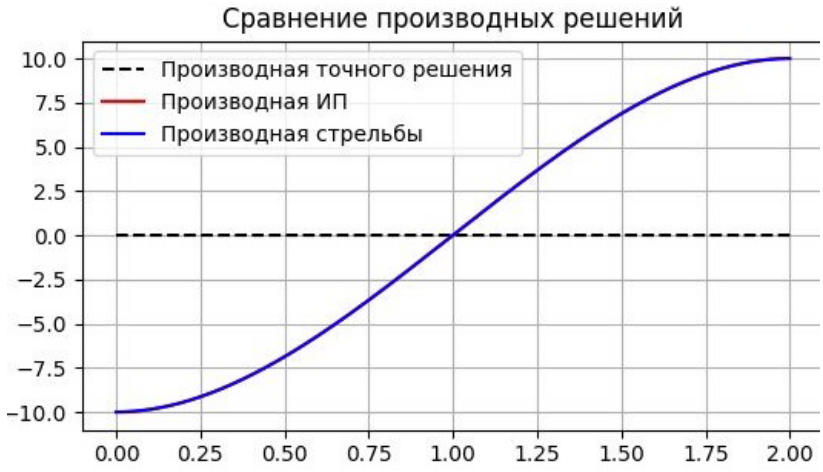


Рис. 8

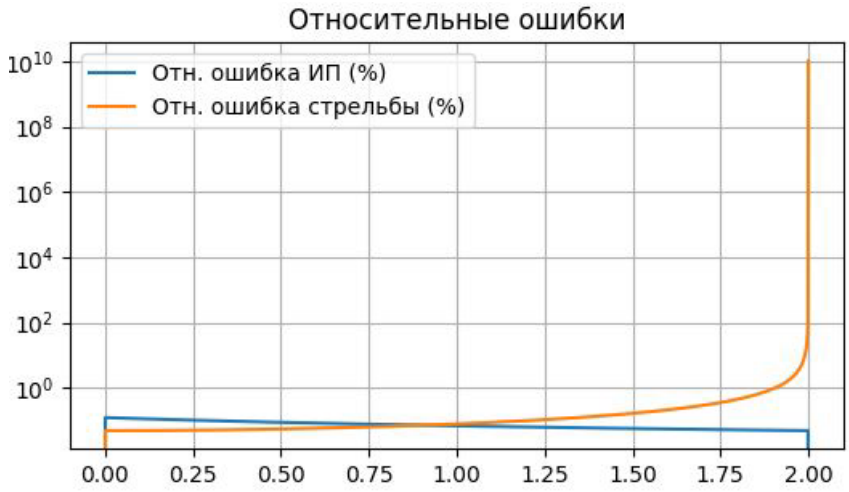


Рис. 9

При жесткости 2 Н·м, нагрузке 120 Н/м, длине балки 1 м, высоте сечения 0,001 м. максимальная ошибка инвариантного погружения $1{,}14 \cdot 10^{-3}$, максимальная ошибка пристрелки $2{,}50 \cdot 10^{-3}$. Результаты расчета прогиба балки методами инвариантного погружения и стрельбы:

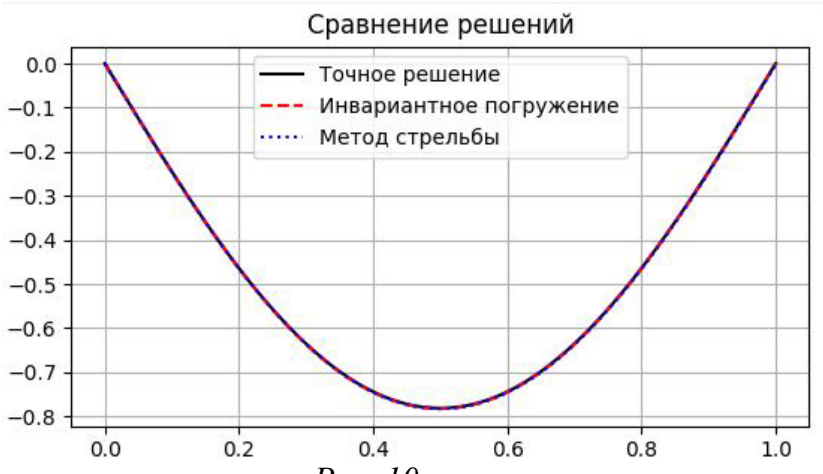


Рис. 10

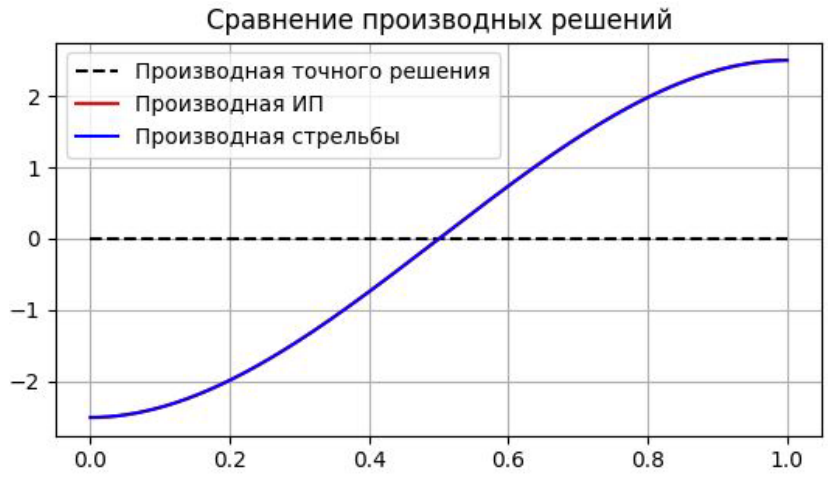


Рис. 11

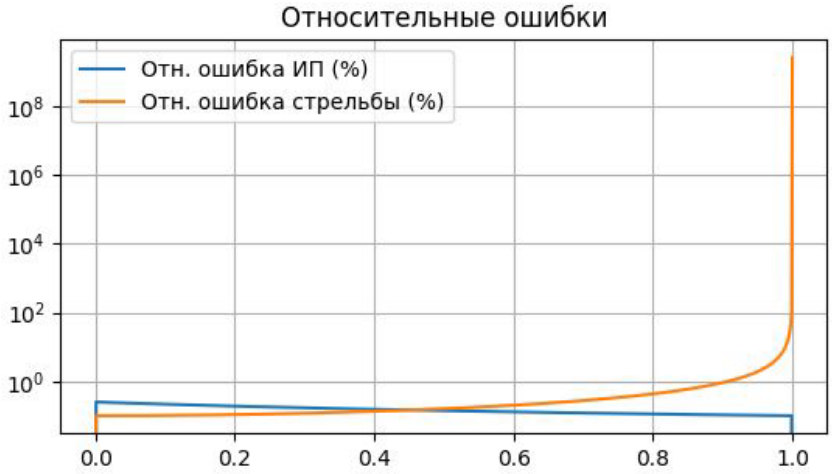


Рис. 12

Библиографический список

1. Касти Дж., Калаба Р. Методы погружения в прикладной математике. М.: МИР. 1976;

2. Грешнов В.М., Шайхутдинов Р.И. Физико-феноменологическая модель дислокационной ползучести металлов. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17. № 1 (54). С. 33-38;

3. Шайхутдинов Р.И. Установившаяся ползучесть бруса в теории необратимых деформаций металлов. Мавлютовские чтения. Материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции. Уфа: УГАТУ. 2021. С. 444-447;

4. Шайхутдинов Р.И. О напряженном состоянии корсетных образцов в случае их изгиба. Мавлютовские чтения. Материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции. Уфа: УГАТУ. 2021. С. 390-393;

5. Шайхутдинов Р.И. Установившаяся ползучесть дисков в необратимой теории деформаций. Перспективы развития двигателестроения, материалы международной научно- технической конференции имени Н.Д.

Кузнецова. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. 2023. С. 426-427;

6. Shaikhutdinov R.I. A creep model with a real structural parameter for deformable solids. Appl. Mech. 2025. 6 (4). 91;

7. Муртазина Р.Д., Шайхиев Э.Р., Биткулов М.Д., Кузьмин И.Л., Макаров М.И. Программа для расчета распределения температуры в плите с источником. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025698026, 29.12.2025. Заявка № 2025697042 от 17.12.2025.

© Покотило Е.Р., Муртазина Р.Д., 2026

УДК 621.865.8

Д.Ф. САФИН
Danilsafin617@gmail.com
Науч. руководитель – д-р. техн. наук, проф. О.В. ДАРИНЦЕВ

Уфимский университет науки и технологий

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ШАГАЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация: в данной статье исследуются инженерно-технические аспекты проектирования узлов шагающих роботов, с анализом противоречий между механической прочностью и массой исполнительных органов. Рассмотрены преимущества шагающего способа локомоции перед традиционными колесными системами в условиях неопределенности рельефа, в заключении представлены решения, повышающие надежность суставов и стоп благодаря использованию эластичных актуаторов и композитных материалов.
Ключевые слова: шагающие механизмы, робототехника, динамическая устойчивость, эластичные актуаторы, кинематические пары, биомиметика.

Введение. На современном этапе развития техники мобильные робототехнические системы находят применение в самых разнообразных сферах: от исследования других планет до проведения поисково-спасательных операций в зонах природных или техногенных катастроф. Одной из наиболее сложных задач является обеспечение высокой проходимости в условиях отсутствия подготовленных дорог и ровных поверхностей, наличии завалов. Наиболее распространенные в последнее время колесные и гусеничные движители часто оказываются неэффективными при встрече с препятствиями [1], соразмерными с их собственными габаритами, а также они малоэффективны при перемещении по лестничным маршам.

Шагающий движитель, в отличие от непрерывных движителей, обладает дискретным характером взаимодействия с опорной поверхностью, что позволяет аппарату, меняя длину шага, «выбирать» наиболее надежные точки опоры, переступая через препятствия или трещины. Однако реализация этой концепции требует сложной координации движений множества степеней свободы, что накладывает особые требования к конструкции каждого отдельного узла. В данной статье мы проанализируем основные конструктивные решения, позволяющие преодолеть существующие инженерные барьеры.

Анализ проблем и актуальность. Основной проблемой проектирования шагающих машин является высокая энергоемкость процесса передвижения. При каждом шаге конечность должна быть поднята, перенесена и опущена, что связано с совершением работы против сил тяжести и инерции [2]. В отличие от качения колеса, где положение центра масс остается практически неизменным, при шагании наблюдаются значительные колебания корпуса, что требует постоянных затрат энергии на стабилизацию, рис.1.

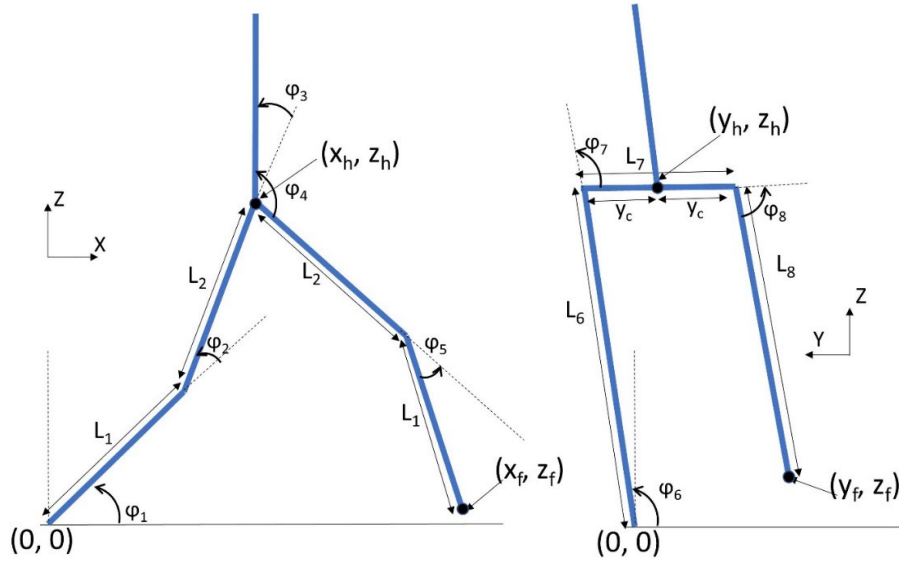


Рис.1. Пятизвенная и трехзвенная модели робота в сагиттальной и фронтальной плоскостях [3]

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки нового поколения мобильных платформ, способных нести полезную нагрузку в условиях Арктики, горных разработок и разрушенных инфраструктурных объектов. Исследование отдельных узлов — коленных, тазобедренных сочленений и опорных модулей стоп — позволяет создать базу для повышения общей надежности таких систем. Инженерная задача заключается в поиске компромисса между мощностью приводов, жесткостью каркаса и общей массой конструкции.

Особое внимание следует уделить проблеме ударных нагрузок. При контакте стопы с жесткой поверхностью возникают пиковые напряжения, которые могут привести к усталостному разрушению металлических деталей и

выходу из строя прецизионных редукторов. Решение этой задачи требует применения инновационных демпфирующих систем и алгоритмов управления, имитирующих податливость биологических тканей.

Кинематическая оптимизация узлов. Кинематика конечности определяет не только траекторию движения, но и распределение нагрузок внутри механизмов. Применение рычажных систем позволяет преобразовывать вращательное движение сервомоторов в сложные кривые. Классическим примером является лямбда-образный механизм, обеспечивающий фазу прямолинейного движения стопы относительно корпуса. Это критически важно для минимизации вертикальных колебаний центра масс аппарата.

Геометрические параметры звеньев определяются исходя из необходимости достижения максимального рабочего пространства. Математическое описание траектории движения в общем виде представлено зависимостью:

$$Y = F(X, L_1, L_2, \cdots, L_n, \Theta), \quad (1)$$

где L_i — длины соответствующих сегментов конечности. Оптимизация данных параметров в современных системах проводится с использованием методов компьютерного моделирования, что позволяет снизить пиковые крутящие моменты в сочленениях до 25% [4]. Узел сочленения должен обладать минимальным люфтом и высокой способностью к восприятию радиальных и осевых нагрузок.

Современные способы решения проблемы. Прорывным решением в области механики шагающих роботов стало внедрение эластичных актуаторов (*Series Elastic Actuators — SEA*). Конструктивно такой узел отличается наличием упругого элемента между выходным звеном редуктора и нагрузкой. Это позволяет не только демпфировать ударные нагрузки, но и использовать пружину как аккумулятор энергии, которая высвобождается в фазе отталкивания, значительно повышая КПД системы.

Свойства материалов, используемых для создания высоконагруженных узлов шагающих систем, играют решающую роль. В таблице 1 приведены характеристики наиболее распространенных конструкционных материалов, применяемых при проектировании силовых элементов.

Таблица 1

Характеристики материалов для изготовления узлов шагающих систем

Наименование материала	Т, °С	σ_B, кг/мм^2	Коэф. удельной прочности
Сталь ЭИ 961	600	54	Высокий
Сталь ЭИ 69	800	23	Средний
Титановый сплав ВТ6	400	95	Максимальный
Углепластик (CFRP)	150	120	Максимальный

Для детального анализа долговечности узлов сочленения используется моделирование на базе диаграмм деформирования. На рис. 2 представлены результаты выполнения экспериментов с моделью кинематического упрочнения, которая применяется для оценки износа деталей в условиях циклических нагрузок, характерных для шагающего движения.

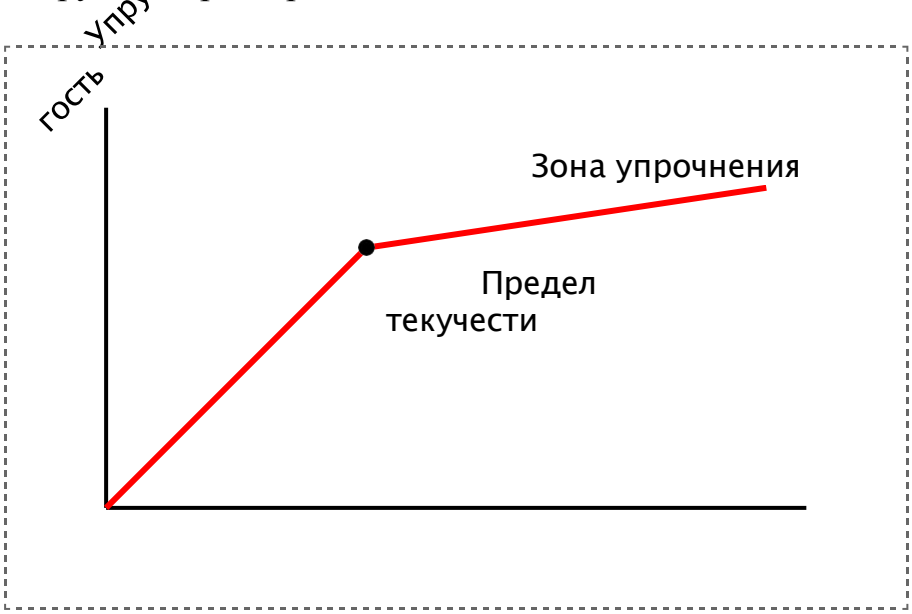


Рис. 2. Диаграмма деформирования материала узла при нагружении (модель *BKIN*)

Внедрение систем технического зрения и сенсорики в конструкцию стопы позволяет реализовать адаптивную локомоцию. Использование тензометрических датчиков внутри узла стопы дает возможность системе управления мгновенно реагировать на изменение плотности грунта.

Заключение. Проектирование узлов шагающих механизмов требует комплексного подхода, объединяющего классическую механику и современные цифровые технологии, что в текущий период часто называется инжиниринговым подходом. В ходе исследования было показано, что применение эластичных приводов и оптимизация кинематических параметров звеньев позволяют значительно снизить энергопотребление и повысить динамическую устойчивость. Дальнейшее развитие данного направления связано с применением интеллектуальных материалов, способных менять свою жесткость в зависимости от внешних условий, что откроет новые горизонты для создания сверхпроходимых автономных систем.

Библиографический список

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. — М.: Наука, 1988. — 640 с.
2. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением шагающего аппарата. — М.: Наука, 1984. — 312 с.

3. Хусаинов, Р. Р. Оптимизация параметров движения двуногого шагающего робота / Р. Р. Хусаинов, А. С. Климчик, Е. А. Магид // Известия ВолГТУ. – 2018. – № 13(223). – С. 119-125.
4. Белецкий В. В. Двуногая ходьба: моделирование и управление. — М.: Наука, 1984. — 288 с.

© Сафин Д. Ф., 2026

УДК 621.8

И.У. ШАЙХУТДИНОВ, Н.А. ВРОНСКИЙ
irikpasau@gmail.com
Науч. руководв. – д-р техн. наук, проф. О.В. ДАРИНЦЕВ

Уфимский университет науки и технологий

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ (МОДЕРНИЗАЦИЯ) ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПОДШИПНИКАХ

Аннотация: в данной работе была рассмотрена модернизация лабораторной установки ТМЛ–06М, для изучения динамических реакций в подшипниках. Были проанализированы конструктивные особенности коллекторного двигателя постоянного тока ДПР-72-Н1 и шагового двигателя ШД-60. Проведено сравнение технических характеристик.
Ключевые слова: лабораторная установка, динамические силы, подшипник качения, коллекторный двигатель, шаговый двигатель, математическое моделирование, учебное оборудование.

Введение. В статье рассматривается модернизация лабораторной установки ТМЛ-06М путем замены коллекторного двигателя на шаговый для повышения точности изучения динамических реакций в подшипниках.

Проведен параметрический анализ характеристик приводов ДПР-72-Н1 и ШД-60, выявлены преимущества шагового двигателя в части снижения вибраций и стабильности работы.

Анализ характеристик коллекторного двигателя ДПР-72-Н1. Двигатель серии ДПР традиционно применяется на лабораторных стендах благодаря простоте регулирования скорости изменения напряжения якоря.

Уравнение механической характеристики привода:

$$\omega = \frac{U}{K_Ф} - \frac{R}{(K_Ф)^2} \cdot M, \quad (1)$$

где ω - угловая скорость вала (рад/с), U - напряжение, подводимое к якорю (В), $K_Ф$ - конструктивный параметр (постоянная двигателя), зависящий от

магнитного потока, R - суммарное сопротивление цепи якоря (Ом), M - электромагнитный момент двигателя (Н·м).

При использовании установки ТМЛ-06М появляются различные ограничения, связанные с искрением щеток и зависимости магнитного потока от тока возбуждения.

Пульсации момента определяются выражением:

$$\Delta M = k \cdot I_{\text{а}} \cdot sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где k - коэффициент пропорциональности (конструктивный параметр двигателя), $I_{\text{а}}$ - амплитуда пульсаций тока якоря, ω - круговая частота пульсаций (связанная с частотой коммутации или частотой питающей сети после выпрямителя), φ - начальная фаза.

Данная формула содержит синусоидальную функцию, наличие которой говорит о том, что двигатель работает не плавно, а рывками: вал периодически, то ускоряется, то замедляется. Эти «подергивания» происходят очень часто.

Рис. 1. ДПР-72-Н1 Коллекторный двигатель

Такие рывки цикличны, а это означает, что они неизбежно становятся механической вибрацией. Дополнительные расходы энергии на трение скольжения в щеточно-коллекторном механизме приводят к потере КПД и погрешности измерения динамических сил. Нестабильность электрических параметров при нагреве медной обмотки приводит к увеличению сопротивления и, как следствие, падению частоты вращения при неизменном напряжении, что требует постоянной калибровки. В ходе проведенного анализа установлено, что в коллекторном двигателе ток переключается каждый раз, когда щетка переходит с одной пластины на другую, это неизбежно приводит к серии ритмичных ударов. При большом количестве пластин, эти удары создают высокочастотный гул. Такая «частотная завеса», усложняет обнаружение собственных частотных колебания ротора.

Уравнение теплового баланса:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t + Q_{\text{мех}}, \quad (3)$$

где I - ток якоря, R - электрическое сопротивление обмотки, t - время работы привода, $Q_{\text{мех}}$ - механические потери энергии (трение в подшипниках и щеточном узле).

Уравнение (3) показывает рост температуры якоря, что приводит к изменению сопротивления и механических характеристик.

Особенности применения шагового двигателя ШД-60.

Шаговый двигатель отличается от коллекторного двигателя наличием прерывистых «шагов», обеспечивающих предсказуемое поведение вала и его точное позиционирование, без использования датчиков обратной связи.

Уравнение электромагнитного момента:

$$M = k_t \cdot I \cdot \sin(p \cdot \theta), \quad (4)$$

где k_t - коэффициент момента, I - ток в обмотках статора, p - число пар полюсов (или число зубцов ротора, определяющее дискретность), θ - угол поворота ротора.

Рис. 2. ШД-60 Шаговый двигатель

Использование микрошага при управлении питанием, позволит реализовать имитацию плавного тока, что снижает ступенчатость вращения. Динамическое поведение описывается системой дифференциальных уравнений:

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + b\frac{d\theta}{dt} + k\theta = M_{\text{эл}} - M_{\text{нагр}}, \quad (5)$$

где J - момент инерции ротора, b - коэффициент вязкого трения, k - коэффициент жёсткости электромагнитной связи, θ - угол поворота ротора, $M_{\text{эл}}$ - электромагнитный момент двигателя, $M_{\text{нагр}}$ - момент сопротивления нагрузки.

Отсутствие щёточного узла исключает механический износ и токовые пульсации, связанные с коммутацией, что позволяет получить максимально стабильные характеристики вращения. Для стенда ТМЛ06-М, замена ДПР-72-Н1 на ШД-60 дает возможность задавать собственные программируемые циклы разгона и торможения, а также фиксировать угловое положение с точностью до сотых долей градуса (порядка 0,01º - 0,05º). Расчётные оценки показывают снижение высокочастотной составляющей вибраций на 30–40 % по сравнению с коллекторным аналогом.

Уравнение потерь мощности:

$$P_{\text{пот}} = I^2 \cdot R_{\Phi} + P_{\text{гист}} + P_{\text{вихр}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{гист}}$ - магнитные потери на гистерезис (перемагничивание сердечника), $P_{\text{вихр}}$ - потери на вихревые токи (токи Фуко) в железе статора.

Данное уравнение демонстрирует предсказуемый характер нагрева, не влияющий на статическую точность позиционирования.

Сравнительный анализ характеристик приводов на основе аналитического моделирования.

В рамках работы, сравнение характеристик ДПР-72-Н1 и ШД-60 проводилось математическим моделированием, на основе их паспортных данных и формул.

При анализе мощности коллекторного двигателя ДПР-72-Н1, КПД снижается при увеличении частоты вращения из-за нелинейных потерь на трение щеток. Уравнение баланса мощностей для него выглядит так:

$$P_{\text{входная}} = P_{\text{механические}} + P_{\text{медные}} + P_{\text{стальные}} + P_{\text{щет}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{входная}}$ - общая электрическая мощность, потребляемая из сети, $P_{\text{механические}}$ - потери на трение в подшипниках и сопротивление воздуха,$P_{\text{медные}}$- тепловые потери в обмотках при протекании тока, $P_{\text{стальные}}$- магнитные потери в железе (гистерезис и вихревые токи), $P_{\text{щет}}$ - потери на трение и коммутацию в щеточно-коллекторном узле.

Наличие члена $P_{\text{щет}}$ (трение щеток) делает систему нестабильной. В шаговом двигателе этот параметр равен нулю, что делает работу системы стабильнее.

Для шагового привода зависимость момента от скорости была определена через математическую зависимость:

$$M(\omega) = a - b\omega - c\omega^2, \quad (8)$$

Это позволило теоретически определить границы, при которых двигатель работает без пропуска шагов, что невозможно сделать для коллекторного мотора без датчиков обратной связи.

Проведенные расчеты показали, что шаговый двигатель «переносит» энергию колебаний в область низких частот. В отличие от высокочастотного шума щеточного элемента, такие колебания легко фильтровать программно, что позволяет получить «чистый» результат измерений. Динамическая нагрузка на подшипник описывается формулой:

$$F_{\text{дин}} = m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 \cdot cos(\omega t), \quad (9)$$

где m - масса ротора, ε - смещение центра тяжести (дисбаланс), ω - угловая скорость, $\cos(\omega t)$ - показатель ритмичности вращения.

Используя микрошаговый режим, получаем снижения пульсаций угловой скорости ω, благодаря этому амплитуда вибраций на корпусе значительно снижается.

Вывод и заключение. Теоретический расчет полностью подтверждает преимущество установки с шаговым двигателем для изучения динамических реакций в подшипниках.

На основе проведенного теоретического и параметрического анализа можно предположить, что усовершенствование установки ТМл06-М путем

замены коллекторного двигателя ДПР-72-Н1 на шаговый ШД-60 позволит полностью исключить влияние щеточно-коллекторного узла. Это позволит избавиться от непредсказуемых потерь энергии на трение и решает проблему с температурным дрейфом характеристик, что позволяет сделать работу системы стабильнее.

Использование микрошагового режима управления («имитация плавного тока») обеспечивает высокую точность поддержания заданной скорости вращения. Математический анализ показал, что отсутствие микрорывков угловой скорости (ω) снижает динамические нагрузки на подшипники и переносит вибрации в низкочастотную область, что позволяет программно отфильтровать помехи и получить «чистый» результат измерений.

Использование современного шагового привода и комплектной процессорной системы управления позволит реализовать точное позиционирование вала и задавать программируемые циклы разгона и торможения, что нельзя было сделать на старой, коллекторной базе с аналоговым управлением.

Библиографический список

1. Иванов А.В. Электромеханические системы автоматизации / А.В. Иванов, С.К. Петров. — Москва: Изд-во МГТУ, 2021. — 312 с.

2. Кузнецов Д.А. Математическое моделирование динамических процессов в подшипниковых узлах / Д.А. Кузнецов // Вестник машиностроения. — 2022. — № 5. — С. 45–52.

3. Сидоров В.Н. Шаговые и сервоприводы в лабораторном оборудовании: учеб.-метод. пособие / В.Н. Сидоров, О.П. Лебедев. — Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. — 184 с.

4. ГОСТ Р 57898-2017. Оборудование учебное лабораторное. Общие технические требования. — Москва: Стандартинформ, 2018.

5. Морозов Е.С. Вибрационная диагностика вращающихся механизмов / Е.С. Морозов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. — 210 с.

© Шайхутдинов И.У., Вронский Н.А., 2026

СЕКЦИЯ 1.6. ПРИКЛАДНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА И ЦИФРОВАЯ ЛОГИСТИКА

УДК 621.438:629.3.063.7

А.М. БАГАУТДИНОВ
alsenbagautdinov@yandex.ru
Науч. руководит. – канд. техн. наук, доц. Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИВОДА ГИДРОПОДЪЕМА ГТУ С НЕРЕГУЛИРУЕМЫМ НАСОСОМ

Аннотация: в статье рассматривается модернизация привода гидроподъёма газотурбинной установки путём замены нерегулируемого насоса на регулируемый. Предложен новый тип насоса с новой схемой привода с регулируемым насосом, разработана математическая модель гидропривода.
Ключевые слова: энергетика; газовая турбина, гидростатический подъем; маслоснабжение; надежность; насос; характеристика; гидравлика; подшипник; ротор газотурбинной установки.

В энергетике ключевую роль играют газотурбинные установки (ГТУ) за счёт большей удельной мощности, уменьшения эксплуатационных затрат, более высокого КПД и быстрого пуска в сравнении с паровыми турбинами [1].

Однако у данных турбин есть общая особенность – запуск и останов производится с помощью устройства гидроподъема. Данное устройство представляет собой гидропривод с насосом высокого давления, который нагнетает масло в карманы подшипника газовой турбины. Масло под высоким давлением приподнимает тяжелый ротор газовой турбины, весящий десятки тонн на доли миллиметра для исключения сухого контакта ротора с подшипником [2]. В классических схемах системы маслоснабжения турбин обычно применяются нерегулируемые насосы постоянной подачи, делалось это с целью экономии на закупку оборудования и ограничения пространства под рампой газовой турбины, где располагается вспомогательное оборудование [3].

В рамках модернизации привода гидроподъема ГТУ предлагается нерегулируемый винтовой насос заменить на регулируемый пластинчатый насос со встроенным регулятором давления. Такая модернизация позволит обеспечить адаптивную подачу масла в зависимости от нагрузки и повысить энергоэффективность гидросистемы, а также снизить нагрузку на элементы гидросистемы и улучшает точность поддержания давления во время всплытия ротора ГТУ.

Рассмотрим пример модернизации насоса гидроподъема на газовой турбине ГТЭ-160 «Силовые машины» (рис. 1).

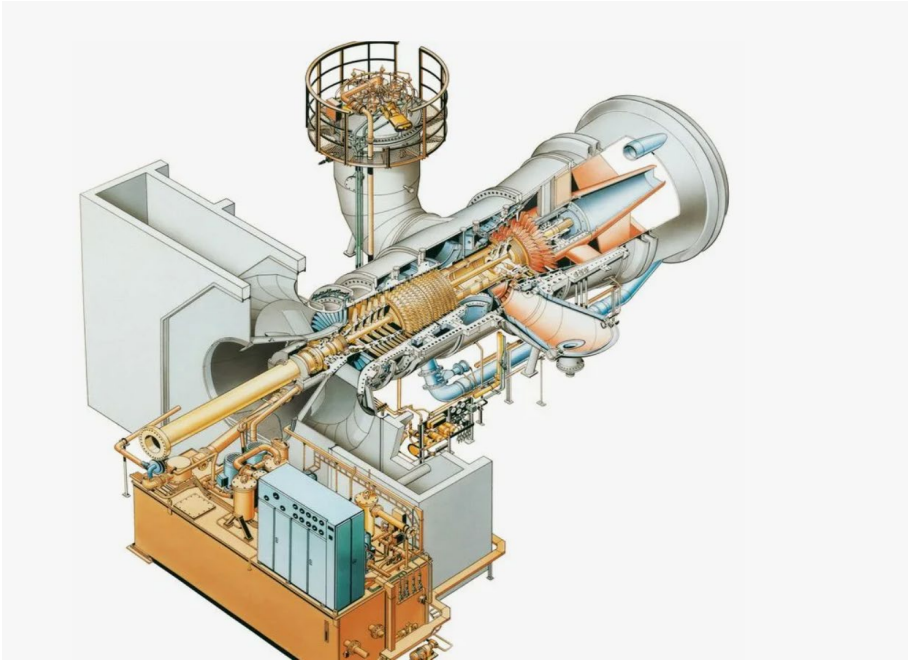


Рис. 1. ГТЭ-160 «Силовые машины»

ГТЭ-160 это одновальный турбоагрегат, мощностью 157–160 МВт, работающий на природном газе, а также имеется возможность работы на жидком топливе. Двухопорный ротор соединяет турбину, компрессор и электрогенератор. Общая масса ротора около 45 тонн и длина более 10 метров.

Изначально данный турбоагрегат оснащался зарубежным вспомогательным оборудованием, но в силу текущей ситуации в стране требуется замена на оборудование отечественного производства. На данную турбину в качестве системы гидроподъема применялся пластинчатый нерегулируемый насос серии T6 от Parker. Дальнейшая эксплуатация насоса имеет риски, в связи с трудностями с подбором запчастей и замена на новое оборудование имеет больший смысл. В качестве замены насоса гидроподъема для ГТЭ-160 предложен регулируемый пластинчатый насос местного производства.

Для построения гидравлической схемы составлено техническое задание:

– усилие ротора – 300000Н;

– площадь карманов подшипника – 0.02м;

– давление гидросистемы –16МПа;

– температура рабочей жидкости от +45÷ +55 °С;

– количество подшипников – 4;

– тонкость фильтрации жидкости – от 10 мкм.

С учётом новых требований к регулируемой объемной гидромашины составлена принципиальная гидравлическая схема системы маслоснабжения ГТУ, куда также входит устройство гидроподъема ротора (рис. 2, 3).

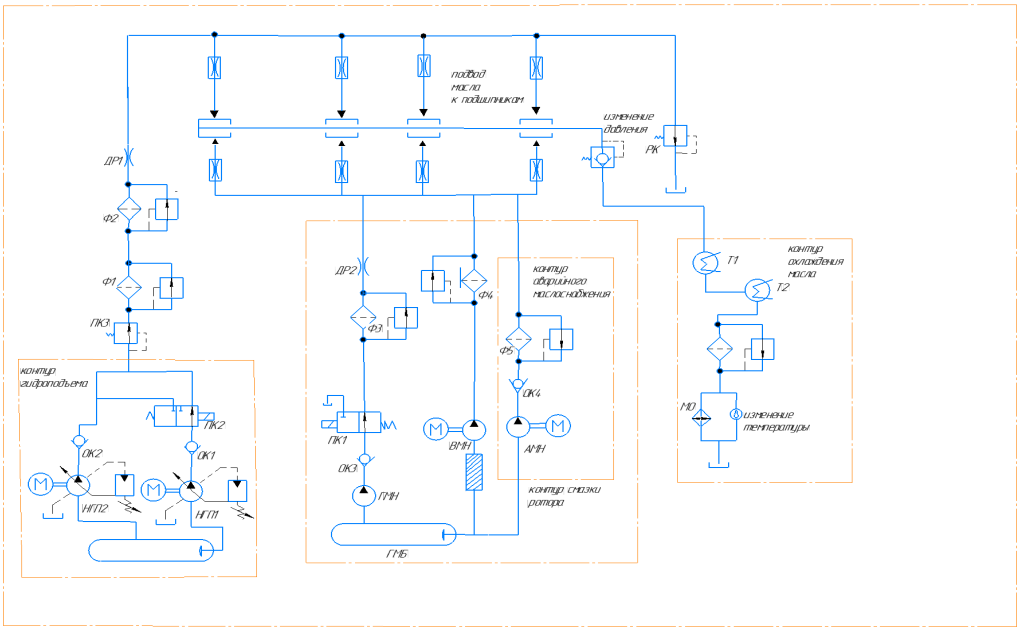


Рис. 2. Схема принципиальная гидравлическая системы маслоснабжения ГТУ

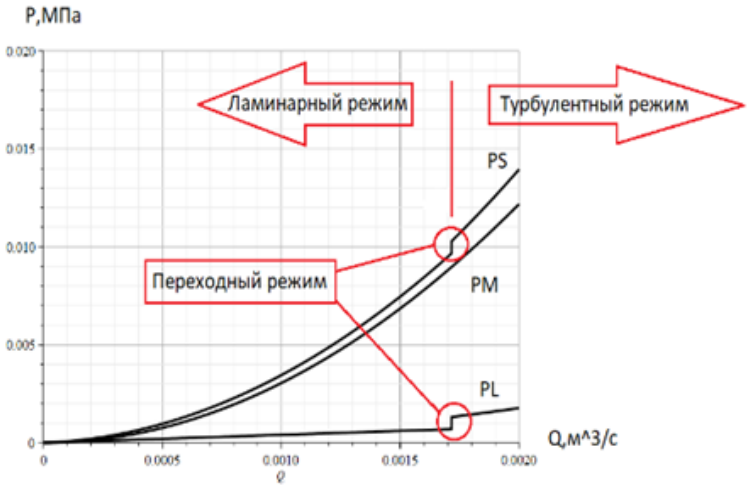


Рис.3 График гидравлических потерь при температуре на линии нагнетания при t = +50 °С.

Насос гидроподъема включается до пуска ГТУ, чтобы обеспечить необходимую смазку, заполняя карманы подшипника и облегчая процесс раскрутки ротора ГТУ на начальных оборотах до 500 об/мин.

Выбран регулируемый пластинчатый насос с регулятором давления непрямого действия (рис. 4). Изменение эксцентриситета насоса происходит в зависимости от нагрузки выходного звена, при максимальной нагрузке эксцентриситет максимальный.

Ниже приведены технические характеристики насоса:

– подача насоса Q=60 л/мин = 0,001 м^3 /с;

– частота вращения приводного вала, 1500 об/мин = 25 об/с;

– смещение статора 3 мм;

– давление насоса P=22 МПа;

– рабочая жидкость – ТП-22С ГОСТ 9972-2020;

– пульсация подачи насоса не более 7 %;

– масса насоса должна быть не более 20 кг;

– насос переменной производительности должен иметь возможность регулировать характерный рабочий объём;

– насос может быть не реверсивным;

– коэффициент полезного действия насоса не менее 0,9;

– КПД гидромеханический не менее 0,87;

– КПД объёмный не менее 0,92.

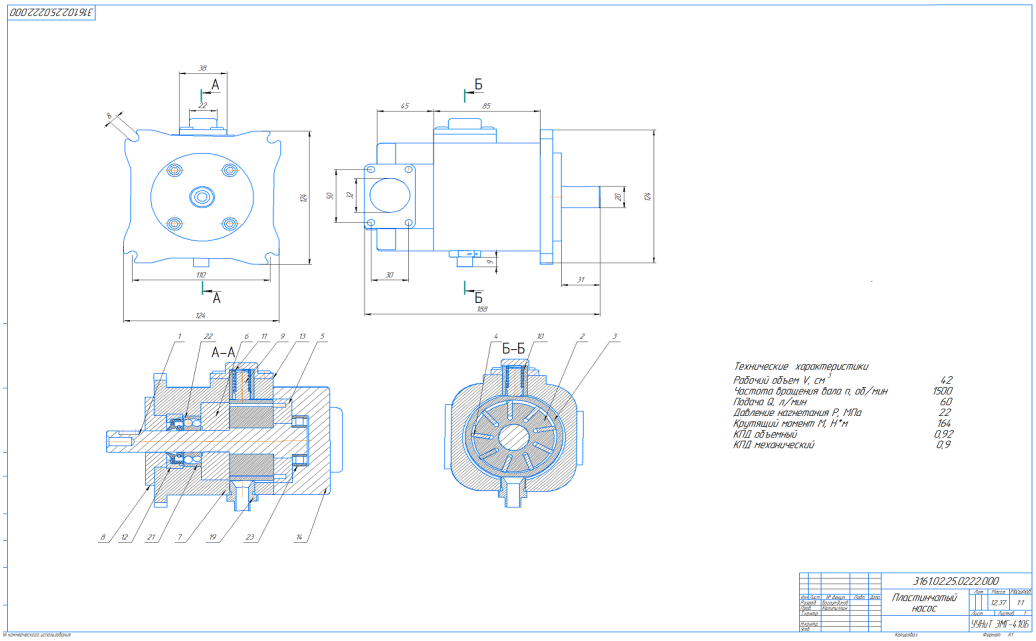


Рис. 4. Сборочный чертеж пластинчатого насоса

Конструкция насоса выполнена таким образом, чтобы на сверхвысоких давлениях до 25 МПа под действием радиальных сил пластинка не подвергалась сильной деформацией. Наклон пластины относительно радиального направления даёт ей кинематическое преимущество: при вращении она скользит по поверхности статора под небольшим углом, что уменьшает поперечные силы на кромки пластины, снижает ударные контакты и обеспечивает более плотное прилегание к стенке рабочей камеры.

Для анализа основных параметров гидропривода составляется математическая модель, в которой отражаются статические характеристики.

Уравнение баланса сил подшипника ГТУ:

$$P_n \cdot A_{eff} - F_r = 0. \quad (1)$$

Уравнение эксцентриситета пластинчатого насоса:

$$e_{max} - k_{reg} \cdot (P_n - P_r) = 0. \quad (2)$$

В результате были получены расчётные параметры: $P_r=15\cdot10^6$, $e=2.5\cdot10^{-4}$.

Статические характеристики строятся с целью обозначения начальных и граничных условий системы (рис. 5, 6).

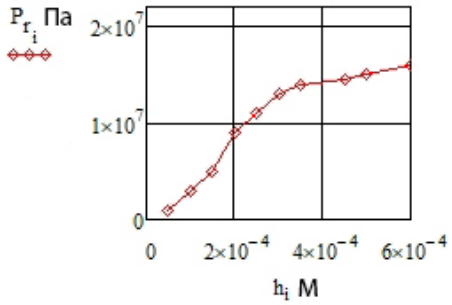


Рис. 5. Статическая характеристика привода – зависимость давления в карманах подшипника от высоты подъема ротора ГТУ

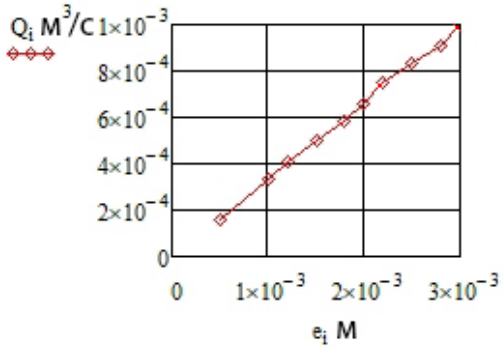


Рис. 6. Статическая характеристика привода – зависимость расхода насоса от величины эксцентриситета

Далее составляется динамическая модель, выписываем основные уравнения контура гидроподъема.

Уравнение баланс сил на роторе ГТУ:

$$m\frac{d^2}{dt^2} = A_{eff} \cdot P_{dr} - F_r - k_v\frac{d}{dt} - k_{oc} \cdot \frac{dy}{dt}. \quad (3)$$

Уравнение баланс расходов насоса:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{E}{V}\left(Q_n \cdot \frac{e}{e_{max}} - \mu \cdot f_{dr} \cdot \sqrt{\frac{2\cdot|P_n - P_{dr}|}{\rho}} - A_{eff} \cdot \frac{d}{dt}\right). \quad (4)$$

Уравнение баланс сил на золотнике распределителя:

$$m_z\frac{d^2}{dt^2} = \left(k_{emp} \cdot I \cdot \frac{y_{max}\cdot dy}{I_{max}\cdot dt} - c_z \cdot x_z - k_{tr} \cdot v_x\right). \quad (5)$$

Уравнения электрической цепи:

$$L\frac{dI}{dt} = U - R_{om} \cdot I \cdot \frac{y_{max}\cdot dy}{I_{max}\cdot dt} - v_x \cdot k_{erc}). \quad (6)$$

Уравнение баланса сил регулятора насоса:

$$m_s\frac{d^2}{dt^2} = (A_s \cdot P_s - c_s \cdot x_s - k_{v1} \cdot v_s). \quad (7)$$

Уравнение баланса расходов на дросселе и на регуляторе:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{E}{V}\left(0.05\mu \cdot b \cdot x_z \cdot \sqrt{\frac{2\cdot|P_n - P_s|}{\rho}} - A_s \cdot v_s\right). \quad (8)$$

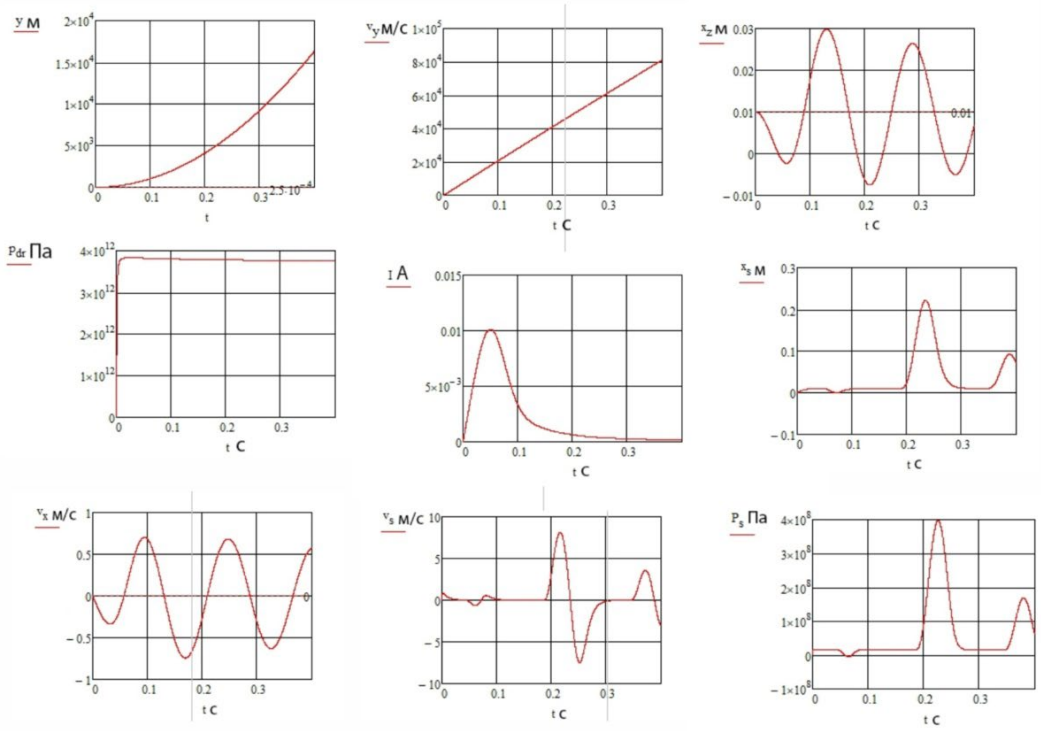


Рис. 7. Динамические характеристики привода

В заключении хочется отметить, модернизация насоса системы гидроподъема ротора ГТУ позволило отказаться от лишней арматуры, за счёт быстродействия регулятора давления. Характеристики насоса (рис. 7) подобраны таким образом, чтобы безотказно работать и точность регулирования позволит приподнимать ротор без гидравлических потерь. Тонкая регулировка системы с регулируемым насосом более энергоэффективна в сравнении с нерегулируемым насосом, где были большие потери на сливе избытка рабочей жидкости и тепловые потери, которые снижали качество рабочей жидкости.

Библиографический список

1 Цанев, С. В. и др. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с.

2 Башта, Т. М. Объемные гидравлические приводы летательных аппаратов // М.: Издательство «Машиностроение», 1968. – 628с.

3 Вильнер, Я. М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам // Минск: Издательство «Высшая школа», 1976. – 96с.

© Багаутдинов А.М., 2026

УДК 338.467

Л.С. БАЯЗИТОВА
lejlabaazitova42@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

КОНКУРЕНЦИЯ СЛУЖБ ДОСТАВКИ ГОТОВОЙ ЕДЫ В СОВРЕМЕННОМ МЕГАПОЛИСЕ

Аннотация: в современных городах, таких как Уфа, наблюдается рост популярности услуг по доставке готовой еды, что связано с быстрым темпом жизни и нехваткой времени у жителей [2]. Данная работа предназначена для сравнительного анализа двух сервисов доставки еды – «Яндекс.Еда» и «Самокат». В исследовании рассматриваются их главные преимущества и недостатки, условия работы курьеров, а также актуальные рыночные тенденции [1]. В результате выявлены ключевые сильные и слабые стороны обеих моделей, что позволяет сделать прогнозы о будущем развитии сектора доставки еды на фоне меняющихся потребительских предпочтений и экономической ситуации [3].
Ключевые слова: Яндекс.Еда, Самокат, город Уфа, бизнес-модели, курьерские службы, задачи, тенденции на рынке, предпочтения потребителей, услуги экономики, способы оплаты, конкуренция, качество сервиса.

В нашем современном обществе мегаполисы обретают особое значение, отличаясь динамичным ритмом жизни. Жители крупных городов часто сталкиваются с нехваткой времени, что приводит к тому, что бытовые задачи нередко передаются на плечи сторонних исполнителей. Одним из наиболее быстро развивающихся направлений является доставка готовой еды. Согласно статистике на 2025 год [3], общая выручка сектора общественного питания в России достигла 4,29 триллиона рублей, а выручка от доставки составила примерно 788 миллиардов рублей, что указывает на ежегодный рост более 20 %. В крупных городах, превышающих миллион жителей, почти 72 % ресторанов предлагают услуги по доставке [3].

Важным элементом нашего исследования является Уфа, столица Башкортостана с населением свыше 1,1 миллиона. В этом городе на доставку приходится около 60 % общего оборота ресторанов, а количество заведений, работающих с курьерскими службами, увеличилось на 18 % [3].

Цель данной работы состоит в сравнении двух различных моделей доставки еды: «Яндекс.Еда» и «Самокат» в контексте их работы в Уфе. Мы хотим проанализировать их сильные и слабые стороны, а также рассмотреть тенденции развития рынка в текущих экономических условиях [1].

Теоретические основы анализа рынка доставки еды

Фокус исследования направлен на платформы, предоставляющие доставку готовых блюд конечным потребителям. Специалисты выделяют три ключевых бизнес-модели [1]:

– Агрегаторы – они служат промежуточным звеном, объединяя предложения разных ресторанов на единой платформе.

– Вертикально интегрированные сервисы – такие компании самостоятельно готовят блюда и организуют их доставку.

– Собственные службы доставки ресторанов – создаются с целью удовлетворения нужд конкретного заведения.

Изменения в потребительских предпочтениях становятся заметными. Умение готовить теряет актуальность, а традиционные семейные ужины становятся все менее популярными. Кроме того, рост числа одиноких людей делает порционные и «одноразовые» блюда особенно привлекательными [2].

По данным 2025 года [3], в сравнении с предыдущим годом, наблюдается значительный рост продаж горячих блюд (на 18,48 %), салатов (на 56,06 %) и супов (на 13,75 %).

Сравнительный анализ «Яндекс.Еда» и «Самокат»

«Яндекс.Еда» функционирует как агрегационная платформа, подключающая рестораны-партнеры и клиентов через мобильное приложение или сайт. Доставка может осуществляться как собственными курьерами, так и через сторонние службы. Основным преимуществом является широкий ассортимент – множество ресторанов и разнообразие блюд. Оплата труда курьеров осуществляется по сдельной системе, что дает им возможность зарабатывать больше в часы пик [1].

В противоположность этому, «Самокат» представляет собой вертикально интегрированный сервис с фокусом на быструю доставку. Компания управляет собственными складами (даркторами), откуда курьеры отправляют ограниченный выбор (около 2000–2500 наименований товаров, включая готовую еду), что обеспечивает быструю доставку в пределах 15-30 минут и почасовую оплату труда курьеров [2].

Условия труда курьеров: сравнение

Условия работы курьеров напрямую влияют на качество предоставляемых услуг. Представленная таблица (табл. 1) иллюстрирует основные различия в условиях работы в Уфе.

Данные различия демонстрируют различные подходы к мотивации курьеров. «Яндекс.Еда» нацелена на высокую производительность, однако такая система может вызывать стресс из-за штрафов. В то время как «Самокат»

предоставляет более стабильные и комфортные условия, благодаря чему курьеры меньше подвержены стрессу.

Таблица 1

Различия в условиях работы в Уфе

Параметр сравнения	«Яндекс.Еда»	«Самокат»
Максимальный доход (пеший), руб./мес.	до 113 340	до 128 960
Максимальный доход (вело), руб./мес.	до 163 920	До 150 000
Способ оплаты труда	Сдельная (за каждый заказ + бонусы)	Почасовая оплата
Гибкость графика работы	Высокая	Средняя (минимальная смена – 2 часа)
Система штрафов	Присутствует	Отсутствует
Наличие мест для отдыха	Нет	Есть (отдельная зона для отдыха)
Выдача специальной одежды	Не предусмотрена	Предусмотрена
Режим работы	Свободное перемещение по городу	Ограниченный радиус (1,5–3 км)
Время оформления	Быстрое (до 30 минут)	Стандартное

В плане ассортимента, «Яндекс.Еда» предлагает клиентов большой выбор заведений, тогда как «Самокат» более ограничен, но предлагает обширный выбор готовых блюд [2].

Ключевым показателем для потребителей становится скорость доставки, которую «Самокат» обеспечивает благодаря расположению своих складов. Среднее время ожидания в «Яндекс.Еде» составляет 33–40 минут, что связано с процессом приготовления и необходимостью доставки из ресторанов.

Кроме того, важно учитывать рост цен, который может достигать 40 % по сравнению с меню ресторанов из-за комиссионных и затрат на доставку.

В результате проведенного исследования мы можем выделить несколько ключевых выводов:

– Преимущества и недостатки «Яндекс.Еды» заключаются в большом разнообразии предложений для клиентов и гибком графике для курьеров. Однако высокая зависимость от ресторанов и системы штрафов создают определенные риски [1].

– Сильные стороны «Самоката» – это высокая скорость доставки, стабильная система оплаты и хорошие условия труда для курьеров. Тем не менее, ограниченный ассортимент и высокая цена за каждую единицу товара могут стать недостатками при больших заказах [2].

– Общий рост рынка доставки в Уфе продиктован изменением привычек потребителей, стремящихся сэкономить время.

– Основные тренды на ближайшие несколько лет: усиление конкуренции в области качества обслуживания, рост сегмента быстрой доставки и повышение прозрачности цен.

– Будущее сервисов доставки заключается в умении находить баланс между потребностями клиентов, курьеров и бизнес-процессами. Те компании, которые будут предлагать персонализированный подход и высокое качество сервиса при конкурентоспособных ценах, окажутся более успешными в будущем [3].

Библиографический список

1. Горшкова, В. Анализ рынка доставки еды в России: тенденции и перспективы // Журнал пищевой промышленности. – 2023.

2. Загребина, Е. Доставка еды как новый тренд в России: статистика и прогнозы // Экономика и социум. – 2023.

3. Росстат. Основные показатели деятельности ресторанов в России. – 2025.

© Баязитова Л.С., 2026

УДК 621.45.034

Е.Э. БИКМУХАМЕТОВА
elizavetabikmuh@gmail.com
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Н.С. СЕНЮШКИН

Уфимский университет науки и технологий

КАМЕРА СГОРАНИЯ ГТУ НА РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ТОПЛИВА

Аннотация: в данной статье рассматривается применение метано-водородных топлив в камере сгорания (КС) газотурбинной установки (ГТУ). Приведен расчет КС, работающей на разных топливах, в программном комплексе ANSYS. Проведен сравнительный анализ при увеличении содержания водорода в топливной смеси.
Ключевые слова: камера сгорания, водород, виды топлива, метан, горение.

Производство электроэнергии и тепла увеличивается с каждым годом. В энергетике активно применяются ГТУ. В связи с импортозамещением разработка и модернизация на основе иностранных прототипов является актуальной. Одним из важнейших требований к современным ГТУ является высокий КПД, устойчивость работы в широком диапазоне параметров, что

требует области устойчивого горения. Особое внимание уделяется уменьшение эмиссии загрязняющих веществ.

При горении в ГТУ образуются вредные вещества такие как оксиды азота NO_x и углерода CO_x. В настоящее время выбросы оказывают огромное воздействие на окружающую среду и человека. Выбросы в энергетике составляют примерно 60% от общего объема вредных выбросов в различных отраслях [1].

Существует несколько путей уменьшения эмиссии. Первый способ – это улучшение организации горения в камере сгорания. Такие способы снижения эмиссии как сжигание бедной топливовоздушной смеси, рециркуляция продуктов сгорания в зону горения являются наиболее изученными. Эти методы имеют ряд недостатков. Пламя бедной смеси достаточно сложно стабилизировать в широком диапазоне расходов, что необходимо для эффективной работы в режимах, отличающихся от номинального. В КС могут возникать термоакустические явления, которые приводят к вибрационному горению, погасанию пламени или его проскоку внутрь горелочного устройства и разрушению конструктивных элементов камеры сгорания [2].

Второй же вариант - использование многотопливных камер сгорания и применение альтернативных видов топлива. Одним из наиболее перспективных видов альтернативного топлива является водород. Водород один из самых экологически чистых топлив. Это связано с тем, что при сжигании водорода не выделяется углекислый газ, а образуется только водяной пар [3]. Свойства водорода обеспечивают возможность повышения КПД энергоустановок.

Применение 100 % водорода как топлива является достаточно сложным, т.к. химические свойства водорода значительно отличаются от метана. Поэтому многие производители ГТУ и специалисты в области энергетики рассматривают использование топливных смесей.

Применение метано-водородных топлив является промежуточным этапом использования водорода. Рассмотрим основные способы получения водорода. Самым экологичным источником получения водорода является электролиз. Под воздействием электричества на воду выделяется только чистый водород (H_2) и кислород (O_2). Минусом является высокая стоимость и необходимость использования электричества [4]. Наиболее дешевым является паровая конверсия метана, переработка нефтепродуктов и угля. В настоящее время это самый используемый метод производства водорода, так получается около 85% водорода. Это технология обладает высокой эффективностью процесса. Основным недостатком метода являются выбросы в атмосферу больших количеств CO_2, утилизация которого требует значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов [5]. В нашей работе мы будем рассматривать получение водорода в качестве побочного эффекта нефтеперерабатывающих предприятий, таким образом экологическое воздействие на природу не изменяется, при этом стоимость является не высокой.

Водород имеет и свои особенности, такие как самовоспламенение, высокий перепад давления, измененный уровень термоакустических амплитуд и частот, проскок пламени [6].

Проведение такого исследования должно позволить расширить диапазон устойчивого горения метано-водородных топлив и снизить выбросы загрязняющих веществ. Это требует постановки новых расчетных и экспериментальных исследований особенностей горения водородных смесей с метаном в камере сгорания ГТУ. Обоснования возможности создания новых энергетических устройств.

Объектом исследования в работе выбрана микротурбина Capstone C30 (рис. 1). Преимуществами данной турбины являются простая конструкция, быстрота и легкость монтажа, подключения к топливным и электрическим коммуникациям. Низкий уровень шума (до 60 дБ) и вибраций позволяющий размещать установку в самых различных местах. Система дистанционного мониторинга и контроля параметров. Возможность работы микротурбины на широком спектре топлив, в том числе с содержанием водорода [7].

В микротурбине применяется камера сгорания кольцевого типа. Газ смешивается с воздухом в точке впрыска, после чего, поступая в жаровую трубу, происходит воспламенение. Оснащена камера сгорания Capstone C30 тремя форсунками. При невысоких нагрузках ниже 6 кВт работает только одна форсунка, остальные подключаются при увеличении требуемой мощности свыше 6 кВт [8].

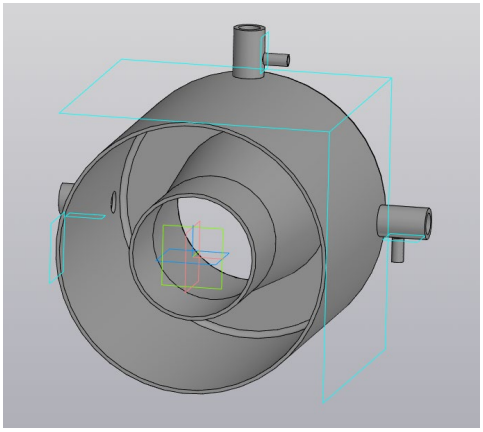


Рис. 1. Модель камеры сгорания Capstone C30

Параметры Capstone C30 занесены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры микротурбины при использовании метана

Параметр	Значение DVIGwT
Расход топлива на входе в КС, кг/с	0,002
Температура топлива на входе в КС, К	293
Давление топлива на входе в КС, кПа	2500

Расход воздуха на выходе из компрессора, кг/с	0,151
Температура воздуха на выходе из рекуператора, К	580
Давление воздуха за компрессором, кПа	607,95

Для расчета использован программный комплекс ANSYS Fluent разработана сеточная модель КС Capstone. Форма ячеек тетраэдрическая, максимальный размер не превышает 3 мм, общее количество ячеек 931297.

В работе рассчитаны пять случаев горения топливных смесей различного состава. Состав топливных смесей приведен в табл. 2.

В качестве входных граничных условий для расчета в ANSYS используется скорость потока и давление на входе в КС. В качестве выходных граничных условий используется давление.

Важным параметром при расчете камеры сгорания газотурбинной установки является коэффициент избытка воздуха. Коэффициент избытка воздуха (α) в газотурбинной установке (ГТУ) – это отношение количества воздуха, которое в действительности подаётся для сгорания 1 кг топлива, к теоретически необходимому количеству воздуха для полного сгорания 1 кг топлива [9]. Значение коэффициента избытка воздуха для микротурбины Capstone выше, чем для большинства ГТУ и находится в пределе от 4 до 7.

Рассчитаем коэффициент избытка воздуха для нашего случая. Для полного сгорания метана требуется определенное количество воздуха. Реакция горения метана:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O.$$

Массовое соотношение кислорода на 1 кг метана:

$$\frac{m_{O_2}}{m_{CH_4}} = \frac{2 \cdot 32}{16} = 4.$$

Массовое содержание кислорода в воздухе составляет примерно 23%. Исходя из этого можем определить теоретически необходимый расход воздуха на 1 кг метана для полного горения:

$$L_0 = \frac{4}{0{,}23} = 17{,}2 \ \frac{\text{кг возд}}{\text{кг топл}}.$$

Определим фактическое количество воздуха на 1 кг топлива:

$$L_{\text{факт}} = \frac{G_{\text{возд}}}{G_{\text{топл}}} = \frac{0{,}151}{0{,}002} = 75{,}5 \ \frac{\text{кг возд}}{\text{кг топл}}.$$

Коэффициент избытка воздуха будет равен:

$$\alpha = \frac{L_{\text{факт}}}{L_0} = \frac{75{,}5}{17{,}2} = 4{,}39.$$

Данное значение является допустимым для стабильного горения. Для расчета выбран нестационарный метод моделирования с учетом турбулентных течений. Использована k-ε модель турбулентности. В качестве топлива принята топливная смесь метан и воздух.

В результате получено поле распределения температур (рис. 2):

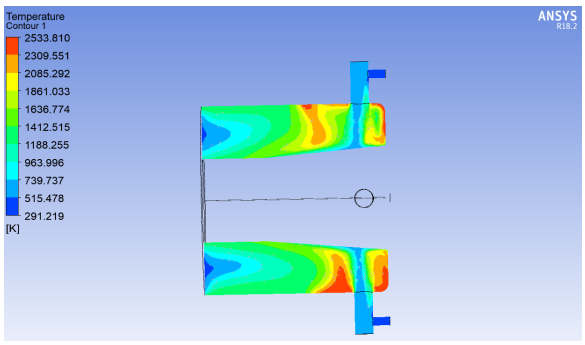


Рис. 2. Поле распределения температур при горении метана XY плоскость

Так как одной из главных задач является уменьшение вредных выбросов получили визуализацию образования углекислого газа (рис. 3).

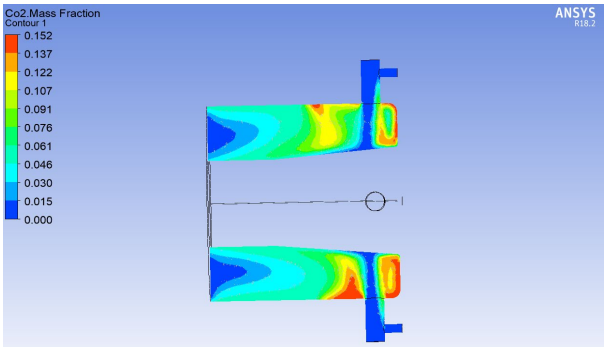


Рис. 3. Образование CO_2 при горении метана XY плоскость

Далее представлен расчет камеры сгорания на метано-водородном топливе. Чтобы расчеты можно было сравнить приняли во всех случаях равный расход воздуха $G_{\text{возд}} = 0{,}151$ кг/с. Для горения необходимо учитывать стехиометрическое соотношение.

В табл. 2 представлены параметры для расчета горения камеры сгорания на метано-водородной смеси:

Таблица 2

Параметры на входе в КС

№ расче-та	Содержа-ние метана в топливной смеси, %	Содержа-ние водорода в топливной смеси, %	Плотность топливной смеси, г/см^3	Коэффи-циент избытка воздуха в КС	Расход топлива перед КС, кг/с	Низшая теплотворная способность, кДж/кг
1	100	0	0,7140	4,390	0,00200	50000
2	90	10	0,6516	4,420	0,00178	57000
3	80	20	0,5892	4,464	0,00158	64000
4	70	30	0,5268	4,490	0,00139	71000
5	60	40	0,4644	4,522	0,00120	78000

В результате получены поля распределения температур (рис. 4, 5).

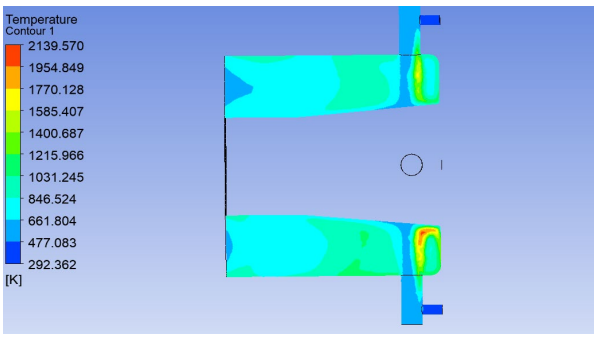


Рис. 4. Поле распределения температур при горении 80 % метана 20 % водорода

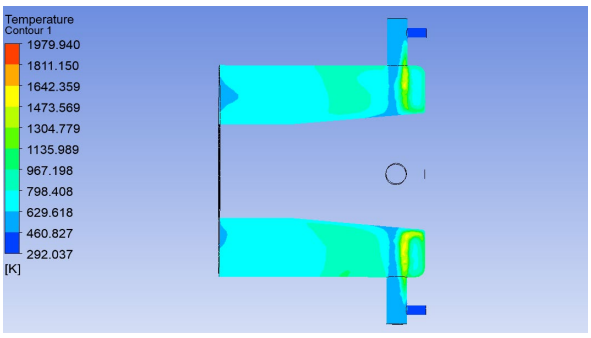


Рис. 5. Поле распределения температур при горении 70 % метана 30 % водорода

На рис. 6, 7 представлено образование CO_2 при работе КС на метано-водородном топливе.

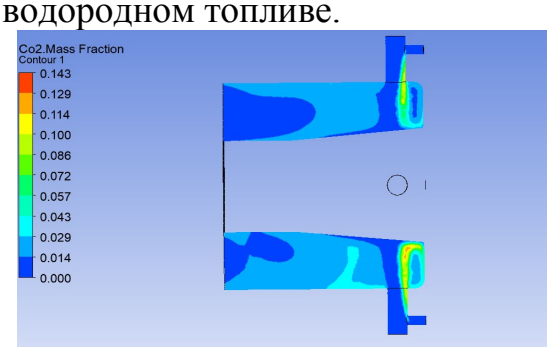


Рис. 6. Образование CO_2 при горении 80 % метана 20 % водорода

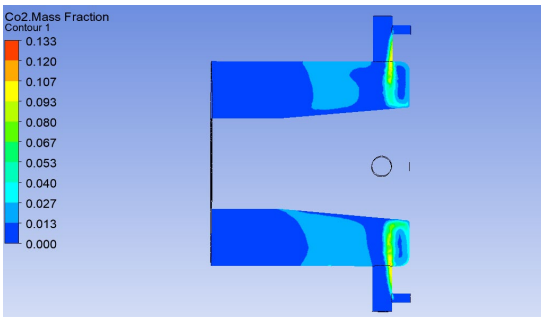


Рис. 7. Образование CO_2 при горении 70 % метана 30 % водорода

Для наглядности были построен график (рис. 8) на котором четко отображается влияние добавления водорода в топливную смесь на выбросы в окружающую среду.

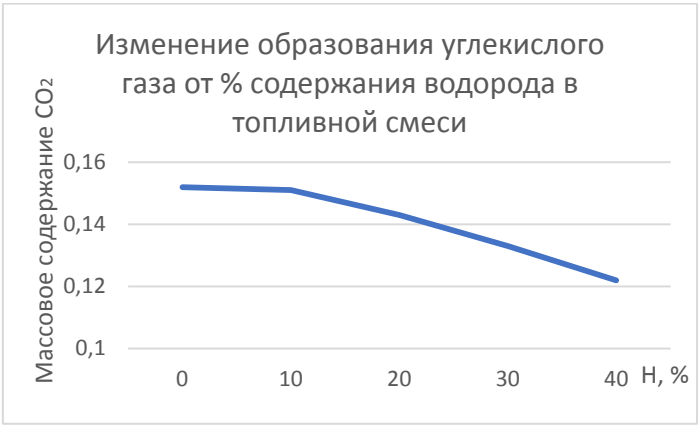


Рис. 8. Образование CO_2 в зависимости от содержания водорода в топливной смеси

Анализируя полученные результаты можем сделать следующие выводы о том, что при добавлении водорода в топливную смесь с метаном образование углекислого газа уменьшается. При добавлении 30% водорода выбросы диоксида углерода снизились примерно на 15 %. Также при горении метано-

водородной смеси снизилась температура пламени, при этом температура на выходе из КС практически не меняется, что говорит о том, что КПД установки не изменяется. Добавление водорода позволило уменьшить локальный перегрев стенок. Данный эффект может позволить увеличить срок эксплуатации камеры сгорания, а соответственно и всей ГТУ. Работа ГТУ на метано-водородном топливе возможна, а изучение влияния добавления водорода актуальным.

Библиографический список

1. Рабочие процессы газо- и паротурбинных установок тепловых электрических станций. Рабочие процессы газотурбинных установок: Учеб. пособие / К.Д. Андреев, С.Ю. Оленников, В.Г. Полищук, В.А. Рассохин, Н.П. Соколов – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 227 с.

2. Чикишев, Л. М., Аркович, Д. М. Малоэмиссионные камеры сгорания ГТУ. Современные тренды, диагностика и оптимизация (обзор) / Л. М. Чикишев, Д. М. Аркович // Теплоэнергетика. – 2024. – № 1. – С. 50–72.

3. Burov V.D., Rybakov B.A., Savitenko M. A. Combustion of hydrogen-containing gases in gas turbine plants / Burov V.D., Rybakov B.A., Savitenko M. A. [Электронный ресурс] // АНО "Водородные технологические решения": [сайт]. – URL: https://ww-h2.com/en/services/combustion-of-hydrogen-containing-gases-in-gas-turbine-plants-2/.

4. Алфаяад, А. Г. Возможность применения водорода как топлива для будущей работы газовой турбины [Текст] / А. Г. Алфаяад // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2022. – № 4. – С. 18–24.

5. Шафиев, Д. Р., Трапезников, А. Н., Хохонов, А. А., Агарков, Д. А., Бредихин, С. И., Чичиров, А. А., Субчева, Е. Н. Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ [Текст] / Д. Р. Шафиев, А. Н. Трапезников, А. А. Хохонов, Д. А. Агарков, С. И. Бредихин, А. А. Чичиров, Е. Н. Субчева // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – № 12. – С. 53–57.

6. Хакимов, Р. Р. Энергетические газотурбинные установки на метано-водородном топливе / Р. Р. Хакимов, Ф. Г. Бакиров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2022. – Т. 26, № 4(98). – С. 4–15. – DOI 10.54708/19926502_2022_264984. – EDN CLJRXF.

7. Микротурбинные установки Capstone / [Электронный ресурс] // БПЦ Инжиниринг: Брошюра Capstone.

8. The Capstone Microturbine Generator / [Электронный ресурс] // Gas Turbine World: [сайт]. – URL: https://gasturbineworld.co.uk/capstone-microturbine/.

9. Теория газотурбинных двигателей / [Электронный ресурс] // Turbinist.ru: [сайт]. – URL: https://www.turbinist.ru/page,2,5322-teoriya-gazoturbinnyh-dvigateley.html.

© Бикмухаметова Е.Э., 2026

УДК 621.226:625.76

Р.Р. ВАЛЕЕВ
vrinal@yandex.ru
Науч.руководов. – д-р техн. наук, проф. В.А. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ГИДРОСИСТЕМА СПЕЦТЕХНИКИ ДЛЯ СНЯТИЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Аннотация: в статье рассматривается разработка гидравлической системы самоходной дорожной фрезы. Предложен регулируемый аксиально-поршневой насос, разработана математическая модель рабочего контура – подъема опускания отвала.
Ключевые слова: фреза холодного типа; дорожная фреза; аксиально-поршневой насос; характеристика; гидравлика; математическая модель.

Дорожная фреза представляет собой специализированную строительную технику, используемую при ремонте и реконструкции дорожных покрытий. Её основная функция заключается в разрушении и измельчении слоев асфальта или бетона с последующей загрузкой образовавшегося материала (гранулята) в транспортные средства для дальнейшей переработки или утилизации.

Основным рабочим элементом дорожной фрезы выступает фрезерный барабан, на поверхности которого закреплены резцедержатели с твердосплавными резцами. В процессе работы барабан вращается вокруг своей оси, разрушая верхний слой дорожного покрытия и измельчая его до состояния крошки. Полученный материал с помощью конвейерной системы подается в транспортное средство. Глубина обработки регулируется гидроцилиндрами, которые обеспечивают изменение положения и подачи рабочего барабана [1].

Протяженность автомобильных дорог в Российской Федерации достигает 4402777 километров, тогда как число зарегистрированных легковых автомобилей, по состоянию на 1 января 2026, составляет 47448872 единиц. Уже эти цифры наглядно демонстрируют колоссальную нагрузку, которой ежедневно подвергается дорожная инфраструктура.

Особенно интенсивное воздействие наблюдается в промышленных и горнодобывающих регионах, где по дорогам регулярно перемещаются тяжёлые грузовики и специализированная техника большой массы. В подобных условиях износ дорожного покрытия происходит значительно быстрее [2].

Рассмотрим пример самоходной дорожной фрезы на гусеничном ходу «BOMAG» (рис. 1).

BOMAG (FAYAT Group) Является одним из ведущих производителей техники для дорожного строительства. В ассортименте компании представлено

девять моделей современных дорожных фрез, отличающихся по своим техническим характеристикам и области применения.

Рис. 1. Большая самоходная фреза «BOMAG»

Для построения гидравлической схемы (рис. 2) составлено техническое задание.

Система рабочего передвижения фрезы:

– максимальные момент и обороты рабочего передвижения фрезы: $M_{max} = 2800$ Н · м; $n_{max} = 62$ об/мин;

Система обеспечения основных функций фрезы:

– максимальное усилие и скорость подъема и опускания рабочего органа: $R_{max} = 24{,}2$кН; $V_{max} = 0{,}2$м/с;

– максимальное усилие и скорость автоматического поддержания заданного уровня:$R_{max} = 32{,}3$кН; $V_{max} = 0{,}1$м/с;

– максимальные момент и обороты вращения рабочего органа: $M_{max} = 5000$ Н · м; $n_{max} = 75$ об/мин.

Температура окружающей среды: -30÷+40 °С.

Регулируемый аксиально-поршневой насос (рис. 3) должен быть установлен в горизонтальном положении. Поршневая группа насоса находится на валу, сборка начинается с установки подшипника, распределительного кольца со штифтами, блока цилиндров с пружиной и стопором, регулирующих плунжеров, вал в корпус, затем собирается поршневая группа с прилегающими деталями. Затем устанавливается подшипник в крышку корпуса, и крышка соединяется с корпусом, следом устанавливается фланец.

Ниже приведены технические характеристики насоса [3]:

– подача насоса Q=180 л/мин = 0,003 м^3/с;

– номинальная частота вращения, 1200 об/мин = 20 об/с;

– давление насоса P=25 МПа;

– коэффициент полезного действия насоса не менее 0,9;

– КПД гидромеханический не менее 0,94;

– КПД объёмный не менее 0,98.

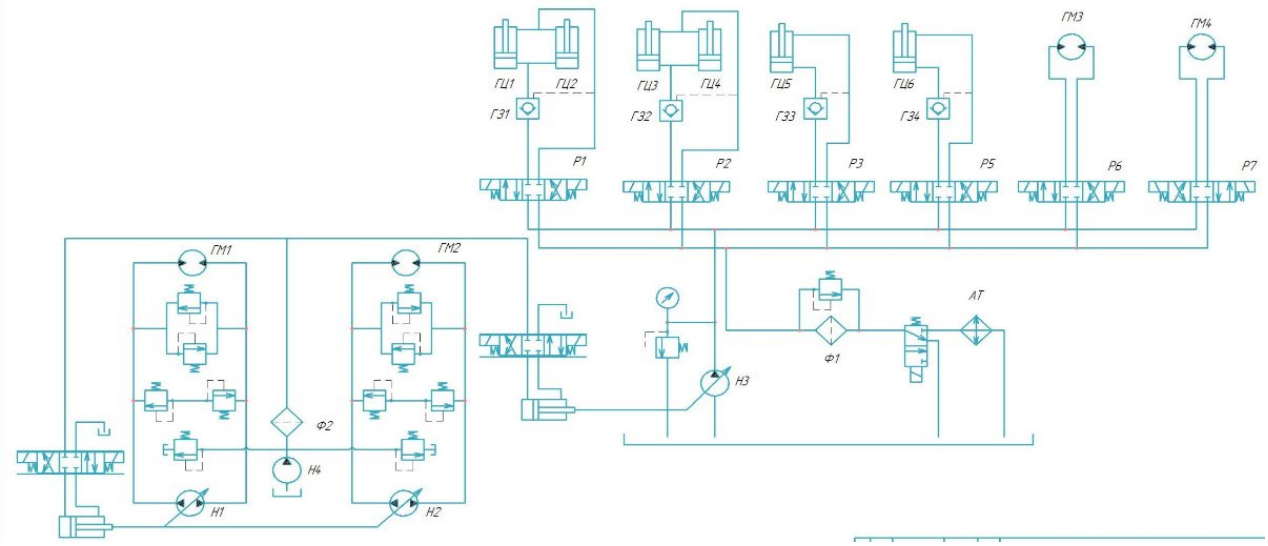


Рис. 2. Схема принципиальная гидравлическая самоходной дорожной фрезы

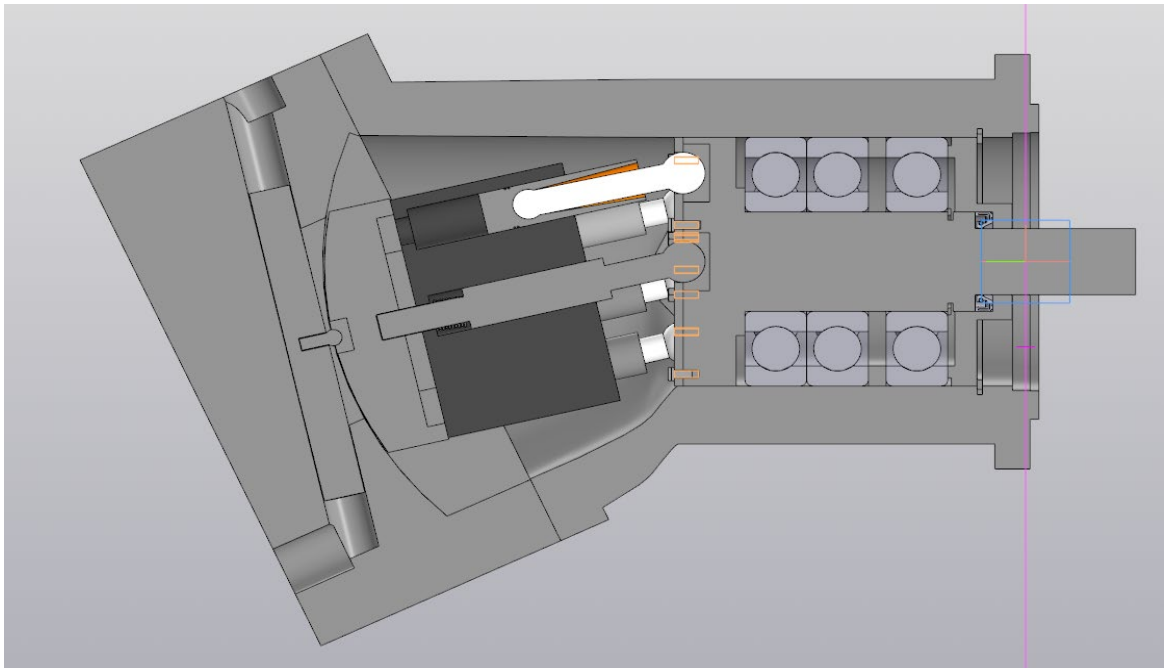


Рис. 3. Аксиально-поршневой насос с наклонным блоком в разрезе

Перед первым пуском следует залить очищенное масло. При эксплуатации насоса в масле не должно быть частиц более 20 мкм, а температура масла не должна превышать 60 ˚С.

Для анализа основных параметров гидропривода составляется математическая модель, в которой отражаются статические характеристики.

Уравнение баланса сил на золотнике:

$$P_{dr} \cdot A_z - y_0 \cdot C_2 = 0. \quad (1)$$

Уравнение баланса сил на сервопоршне:

$$P_u \cdot A_{sp} - x_0 \cdot C_1 - R_{sp} = 0. \quad (2)$$

Уравнение баланса сил на гидроцилиндре:

$$P_n \cdot A_{p1} - P_{sl} \cdot A_{p2} - R_p = 0. \qquad (3)$$

Статические характеристики строятся с целью обозначения начальных и граничных условий системы (рис. 4, 5).

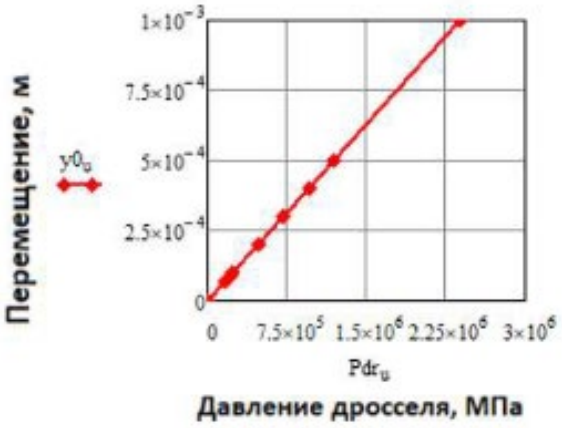


Рис. 4. Влияние перемещения золотника на давление после дросселя

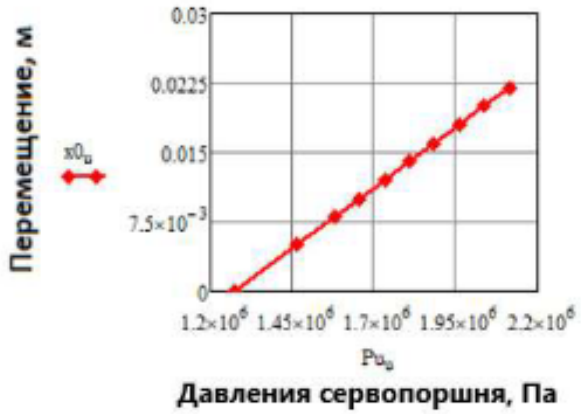


Рис. 5. Влияние перемещения сервопоршня на давление на входе в сервопоршень

Далее составляется динамическая модель (рис. 6), выписываем основные уравнения контура гидроподъема.

Уравнение движения гидроцилиндра:

$$m_p \frac{d^2}{dt^2} z_0(t) = P_n(t) A_{p1} - P_{sl}(t) A_{p2} - k_{v1} \frac{d}{dt} z_0(t) - R_p - \Delta R. \qquad (4)$$

Уравнение для определения давления питания:

$$\frac{d}{dt} P_n(t) = \frac{E}{V} \left(\frac{Q_{n \cdot (\gamma - x_0(t))}}{\gamma} \right) - \mu \cdot F_{dr} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_n(t) - P_u(t)|}{\rho}} - \\ - A_{p2} \frac{d}{dt} z_0(t). \qquad (5)$$

Уравнение движения золотника:

$$m_z \frac{d^2}{dt^2} y_0(t) = P_n(t) A_z - y_0(t) C_2 - k_{v2} \frac{d}{dt} y_0(t). \qquad (6)$$

Уравнения движения сервопоршня:

$$m_{sp}\frac{d^2}{dt^2}x_0(t) = P_u(t)A_{sp} - (x_0(t) + x_n)C_1 - k_{v3}\frac{d}{dt}x_0(t). \quad (7)$$

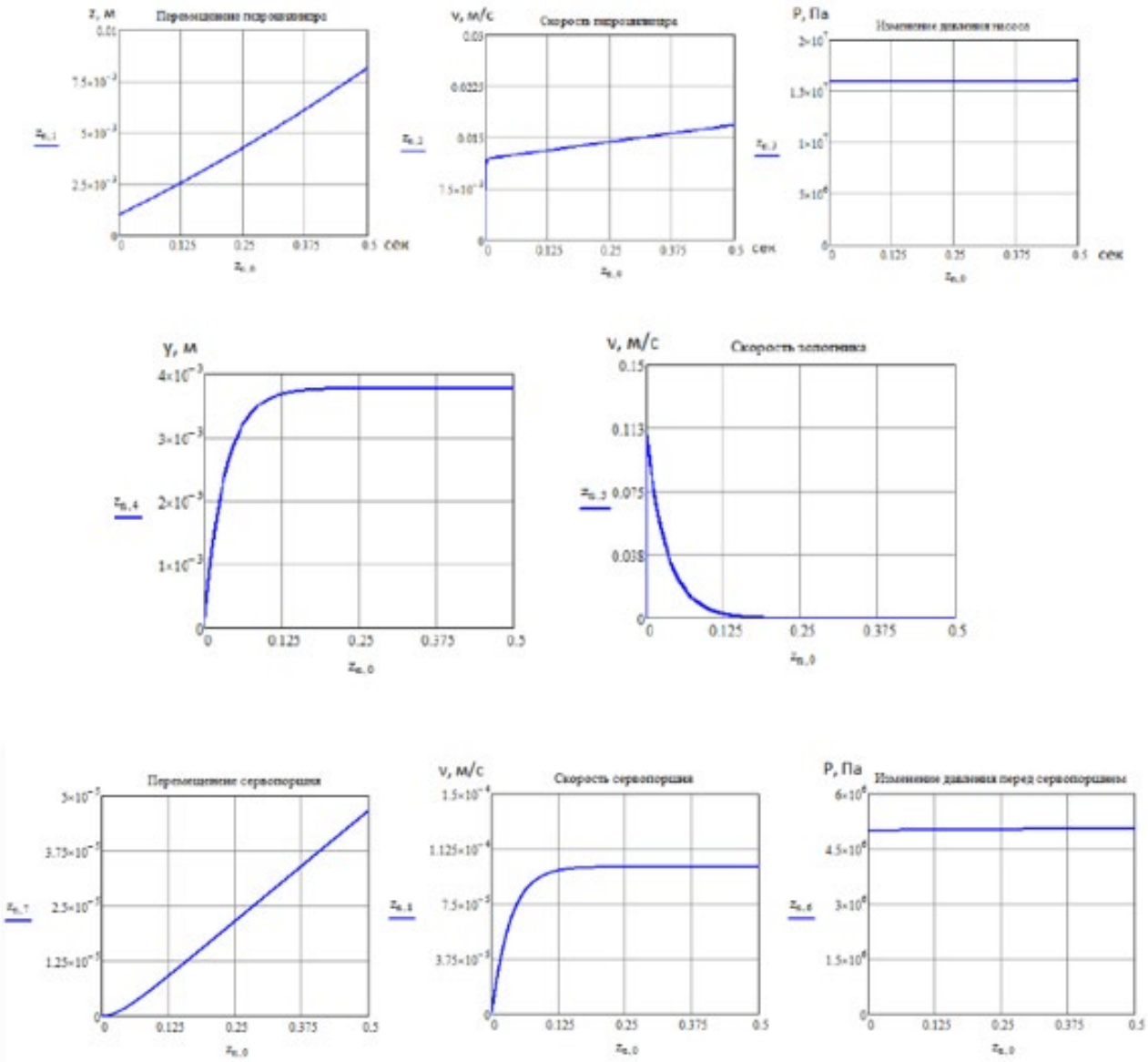


Рис. 6. Динамические характеристики привода

В заключении хочется отметить, проведен анализ дорожно-ремонтной техники, что позволило определить актуальные требования к оборудованию. Разработана гидравлическая схема дорожной фрезы с регулятором расхода, обеспечивающим стабильную скорость работы при различных типах покрытия. Также спроектирован регулируемый аксиально поршневой насос. Разработана математическая модель контура подъема опускания отвала, построены статические и динамические характеристики расчетного контура.

Библиографический список

1 Цанев, С. В. и др. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с.

2 Башта, Т. М. Объемные гидравлические приводы летательных аппаратов // М.: Издательство «Машиностроение», 1968. – 628с.

3 Вильнер, Я. М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам // Минск: Издательство «Высшая школа», 1976. – 96с.

© Валеев Р.Р., 2026

УДК 621.694

И.Р. ГАЗЕТДИНОВ
ilsatgazetdinov25@gmail.com
Науч. руководв. – канд. техн. наук Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В ГАЗОВОМ СЕПАРАТОРЕ

Аннотация: в данной статье рассматривается численное моделирование рабочего процесса газового сепаратора в программном обеспечении ANSYS CFX с целью оценки эффективности разделения фаз.
Ключевые слова: газовый сепаратор; CFX.

Природный газ является одним из ключевых источников энергии, и перед подачей потребителю он требует обязательной подготовки, включающей отделение жидкой фазы (преимущественно воды) в газовых сепараторах (рис. 1).

Принцип действия сепаратора основан на закручивании потока, при котором жидкая фаза отделяется от газообразной под действием центробежной силы. Капли жидкости сепарируются на стенках корпуса, стекают по желобам и отводятся по отдельному каналу. Газ, увлеченный вместе с жидкостью, возвращается в основной поток через байпасную линию. Трехмерная модель сепаратора (рис. 2) была подготовлена для численного моделирования в модуле CFX.

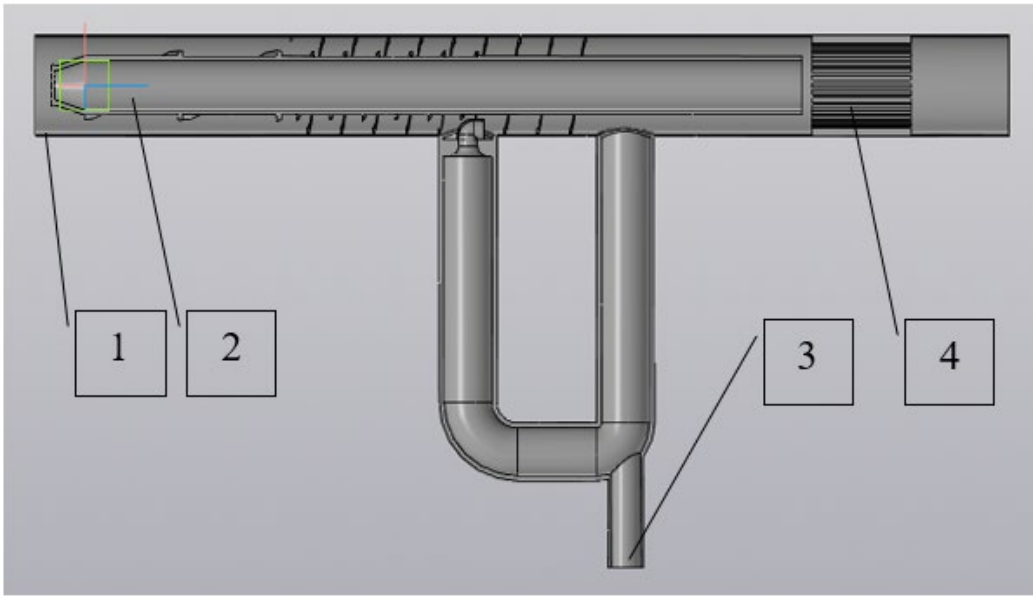


Рис. 1. Трехмерная модель сепаратора в разрезе:
1 – корпус, 2 – завихритель, 3 – выход жидкой фазы,
4 – выпрямитель потока газа

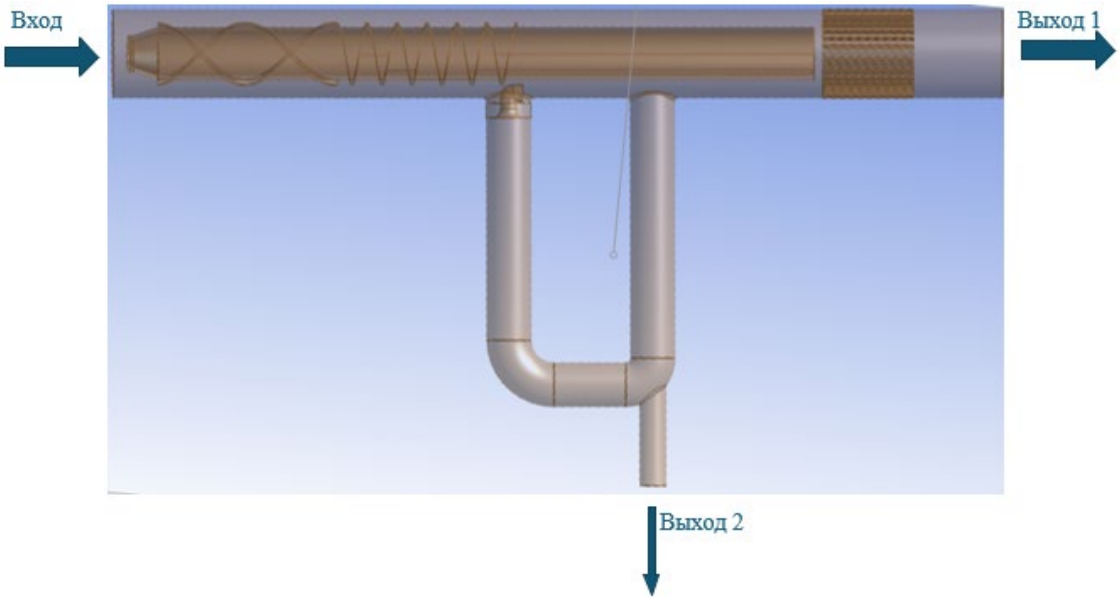


Рис. 2. Трехмерная модель сепаратора, подготовленная для численного моделирования в модуле CFX

Для упрощения расчетов и снижения вычислительной нагрузки приняты следующие допущения:

– процесс считается изотермическим;

– расчет выполняется в стационарной постановке, соответствующей установившемуся режиму работы устройства;

– стенки абсолютно гладкие.

Для описания турбулентного течения используется модель SST (Shear Stress Transport) k-ω (рис. 3). Данная модель обеспечивает высокую точность

как вблизи стенок (благодаря формулировке k-ω), так и в свободном потоке (за счёт перехода к k-ε вдали от стенок). Это особенно важно для корректного воспроизведения вихревых структур и градиентов скорости, возникающих при завихрении потока.

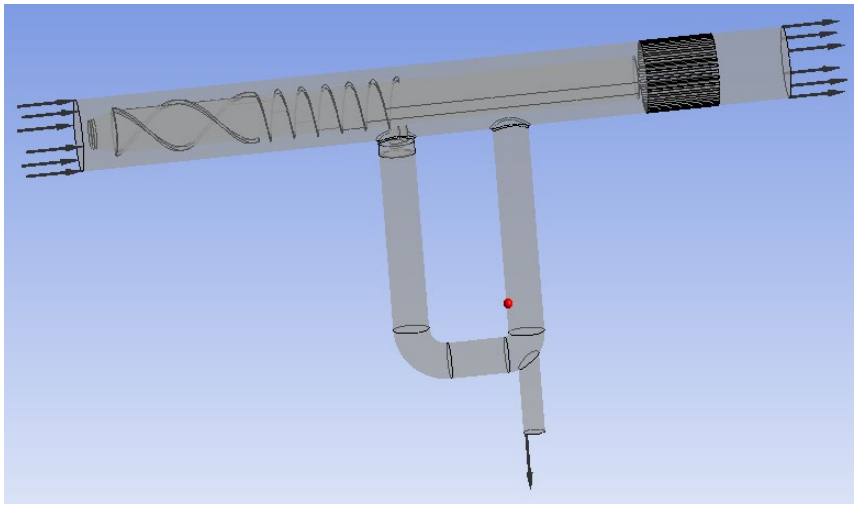


Рис. 3. Модель с заданными граничными условиями

Расчетная сетка построена на основе тетраэдрических элементов. Для обеспечения приемлемой точности в самом узком сечении тракта размещается не менее трех ячеек. Сгущение сетки выполнено в областях закрутки потока для качественного разрешения вихревых структур (рис. 4). Для ускорения вычислений количество элементов было ограничено диапазоном до 3 миллионов (максимальный размер ячейки должен быть не более 3 мм).

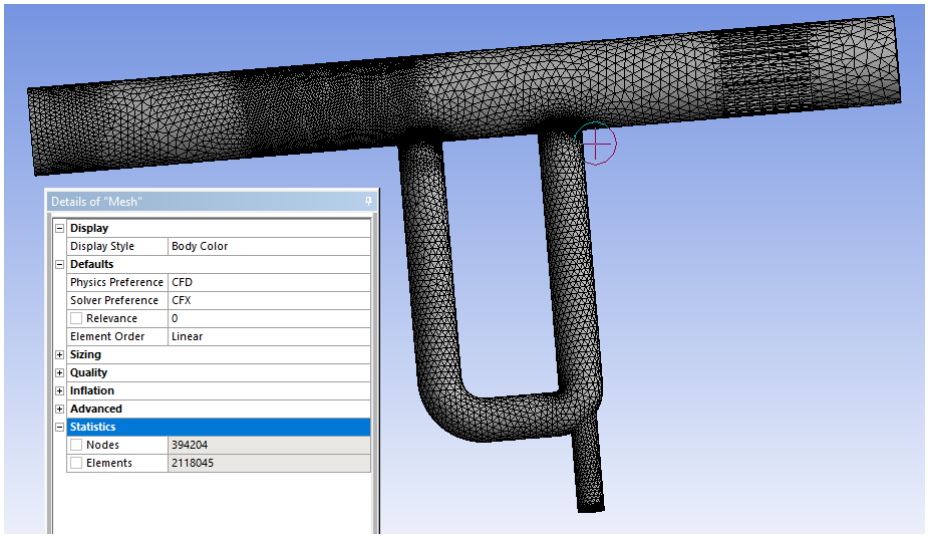


Рис. 4. Расчетная сетка модели.

Выбор модели при моделировании двухфазного потока зависит от содержания жидкой фазы в потоке для малого объёма подходит модель Ейлера-Лагранжа (Eulerian-Lagrangian), также известная в ANSYS CFX как Particle Model в этой постановке газовая фаза рассматривается как сплошная среда, для

которой решаются уравнения Навье-Стокса в том числе уравнение (1), а капли жидкости отслеживаются как отдельные частицы, движущиеся под действием аэродинамических и инерционных сил. Такой подход позволяет эффективно оценить траектории капель, их осаждение на стенки и общий баланс уноса, при этом значительно сокращая затраты на вычисления, поскольку обратное влияние капель на газ не учитывается [1].

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j\right) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность газовой смеси; u_j – компонента скорости в j -ом направлении;

Однако в зонах интенсивного завихрения у стенок, где объемная доля жидкости может становиться значительной, капли начинают оказывать обратное влияние на распределение скоростей и турбулентность газового потока. В этом случае требуется применение модели Эйлера-Эйлера, в которой обе фазы описываются как взаимопроникающие сплошные среды с решением отдельных уравнений сохранения массы и импульса. Этот подход позволяет учесть межфазное взаимодействие (силы сопротивления, подъемные силы, турбулентное диспергирование), что особенно важно в условиях сильных центробежных ускорений, характерных для сепаратора [2].

Также существует модель смеси (Mixture Model) – упрощенная версия многофазного подхода, предполагающая наличие общей скорости у фаз или заданного алгебраического проскальзывания. Несмотря на вычислительную эффективность, она недостаточно точна для задач с выраженным разделением фаз и высокими градиентами скорости и чаще применяется на предварительных стадиях проектирования [3].

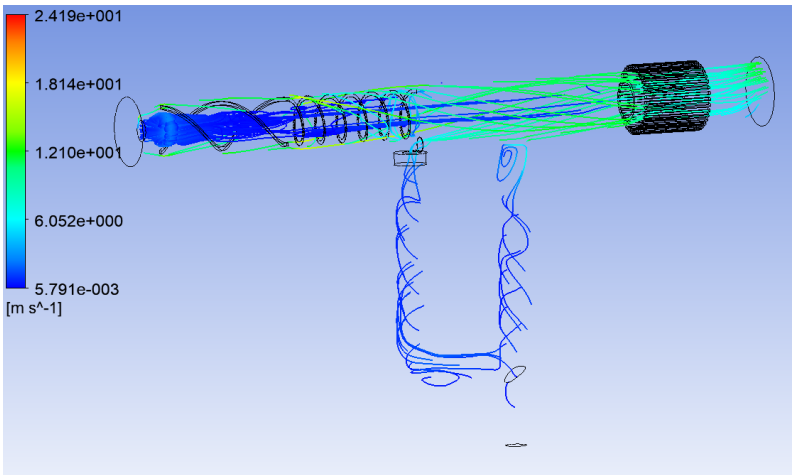


Рис. 5. Линии скорости движения газа в газовом сепараторе

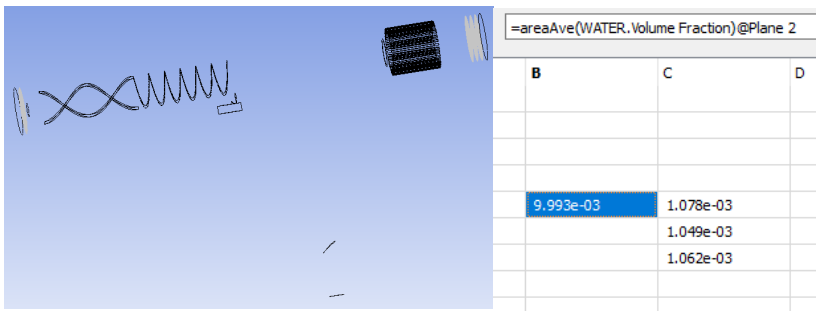


Рис. 6. Области и количество примеси в газовом сепараторе.

На рис. 5 показаны линии тока скорости газа в сепараторе. По результатам моделирования установлено, что вихревое движение потока, создаваемое закручивающим устройством, эффективно разделяет фазы. Капли жидкости под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам корпуса и отводятся в нижний дренажный канал. Газ, проходящий через байпасную линию, имеет значительно меньшую скорость и практически не содержит жидкой фазы.

Области и количественное содержание примеси в газе (рис. 6) показывают, что среднее содержание жидкой фазы сократилось в 9,4 раза.

Полученные данные подтверждают работоспособность предложенной численной модели и демонстрируют высокую эффективность влагоотделения. Среднее содержание жидкости в газе после прохождения сепаратора снижается на порядок. Результаты моделирования целесообразно использовать для дальнейшей оптимизации геометрии устройства с целью повышения степени очистки газа.

Библиографический список

1. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика [Текст]: учебник для вузов / Г. Н. Абрамович. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1969. – 600 с.

2. Проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие / П. В. Пугачев, Д. Г. Свобода, А. А. Жарковский. − СПб.: Изд-во Политехн. унта, 2016. – 120 с.

3. Кудоярова, В. М. Решение прикладных задач теплообмена и гидрогазодинамики в пакете ANSYS учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», [«Тепловые электрические станции» и «Авиационная и ракетно-космическая теплотехника»] / В. М. Кудоярова, А. Е. Кишалов; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Уфим. гос. нефт. техн. ун-т». – Уфа: ФГБОУ «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2016. – 219 с.

© Газетдинов И.Р., 2026

УДК 621.438:629.3.063.7

Е.В. ГЕРАСИМОВ
egor-2004.gerasimov@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

ГИДРОПРИВОД СВАЕБОЙНЫХ МАШИН

Аннотация: В статье рассматривается исследование и разработка гидропривода сваебойных машин, применяемых в строительстве для погружения свай в грунт, в работе рассмотрены современные конструкции сваебойного оборудования, проанализированы требования к гидравлическим системам, обеспечивающим эффективную и надежную работу машин в различных условиях эксплуатации. Спроектирован регулируемый аксиально-плунжерный насос с наклонным диском, разработана математическая модель гидропривода.
Ключевые слова: гидравлический молот, свайные работы, управление, автоматизация, эффективность, безопасность, строительная техника.

Сваебойные машины являются важным элементом в строительной индустрии России. Они позволяют эффективно возводить свайные фундаменты, что является критически важным этапом для надежности зданий и сооружений. В России активно развивается строительная отрасль, особенно в городах с высокой плотностью населения. Увеличение объемов монолитного и кирпичного строительства требует применения современной техники для нулевого цикла работ. На рынке существует тенденция к увеличению производительности (энергии удара) и мобильности сваебойных установок. Также наблюдается рост спроса на гидравлические молоты взамен дизельных, что повышает эффективность и экологичность работы.

Основными недостатками гидропривода являются [1]:

1. Использование нерегулируемого насоса и как следствие снижение общего КПД гидросистемы.

2. Высокие энергетические потери: При дроссельном регулировании скорости избыток мощности превращается в тепло, что приводит к перегреву рабочей жидкости (особенно летом).

Для построения гидравлической схемы составлено техническое задание:

– гидроцилиндр подъема молота: R=80000 Н, ϑ=0,1–0,2 м/с;

– гидроцилиндр мачты: R=150000 Н, ϑ=0,02–0,05 м/с;

– гидроцилиндр аутригера: R=70000 Н, ϑ=0,05 м/с;

– привод поворота лебедки: M=10000 Н*м, n=1,5 об/мин;

– привод поворота гусениц: M=25000 Н*м, n=1,5 об/мин;

– рабочее давление в системе с объёмным регулированием не более 30 МПа;

– потери давления в гидросистеме должны составлять не более 10 %.

С учётом новых требований к регулируемой объемной гидромашины составлена принципиальная гидравлическая схема сваебойной машины (рис. 1).

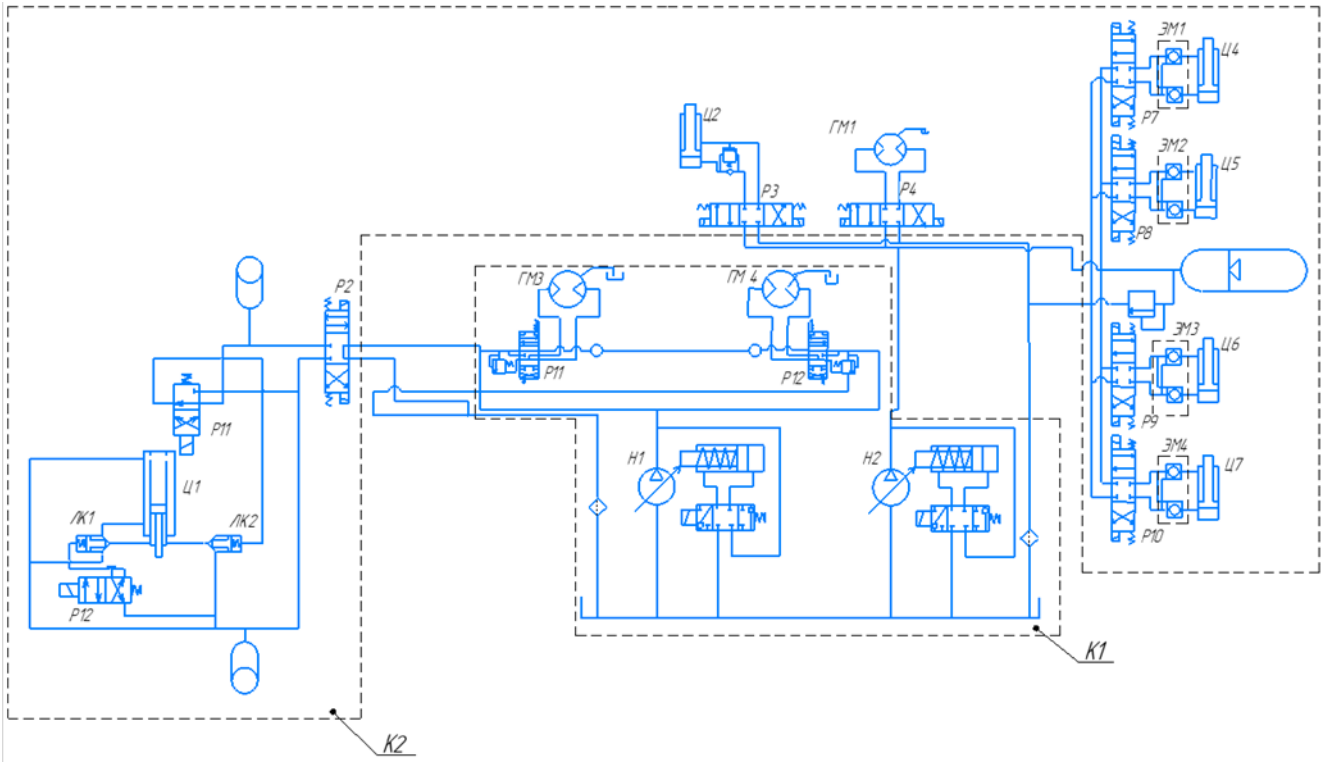


Рис. 1. Схема принципиальная гидравлическая сваебойной машины

Основной поток рабочей жидкости создается двумя регулируемыми насосами Н1 и Н2, объединенными в блок К1. Насосы оснащены системой регулирования мощности, что позволяет изменять скорость работы исполнительных механизмов в зависимости от нагрузки. Контур управления рабочим оборудованием (Блок К2): данный контур отвечает за работу главного гидроцилиндра Ц1 для подъема гидромолота и гидроцилиндра Ц2 для подъема мачты. Управление осуществляется через гидрораспределитель Р2 и Р3 соответственно. Для предотвращения самопроизвольного опускания оборудования и обеспечения безопасности в систему включены обратные управляемые клапаны (гидрозамки) ЛК1 и ЛК2. Пневмо-гидроаккумуляторы в этой цепи служат для демпфирования ударных нагрузок при работе молота. Выбран регулируемый аксиально-поршневой насос с наклонным диском (рис. 2, 3).

Ниже приведены технические характеристики насоса:

– номинальное давление насоса P_H = 35 МПа;

– максимальная подача насоса $Q_{эф}$ = 0,00095 м^3/с;

– номинальная частота вращения n = 30 об/с;

– угол наклона γ= 18˚;

– общий КПД насоса $\eta = 0{,}88 \div 0{,}9$;

– объёмный КПД насоса η_o = 0,96;
– механический КПД насоса $\eta_{\text{мех}}$ = 0,94.

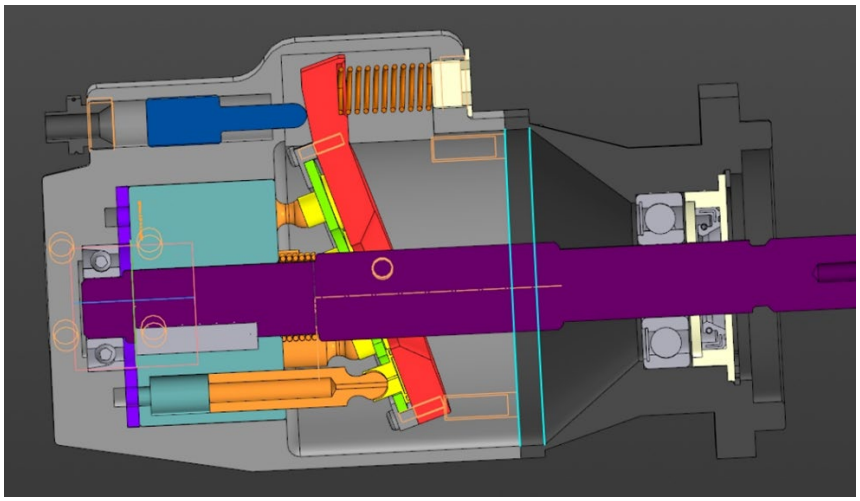


Рис. 2. Аксиально-плунжерный насос с наклонным диском

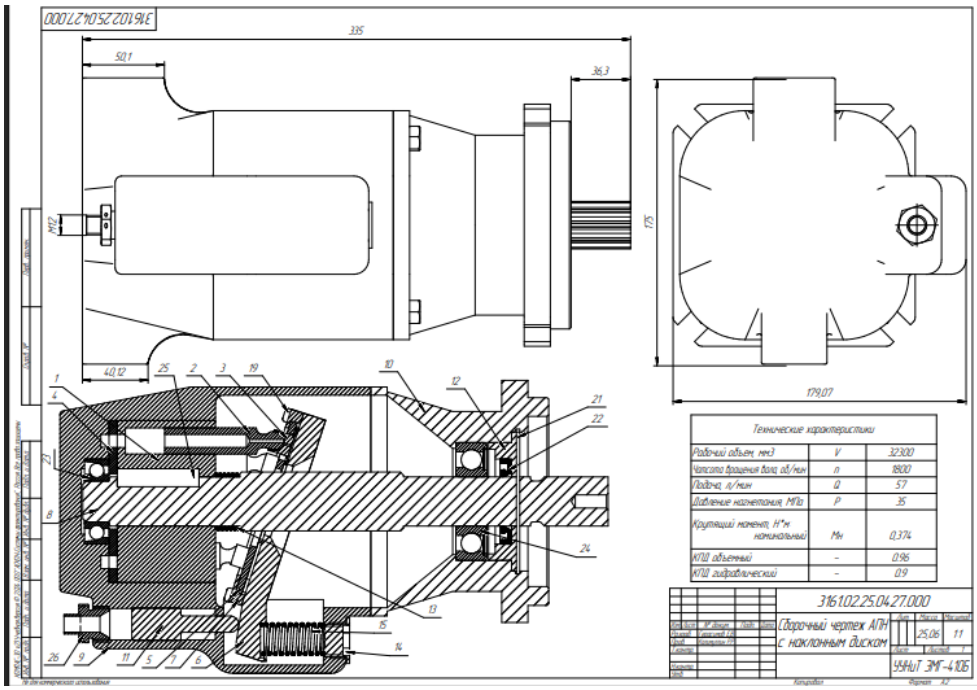


Рис. 3. Сборочный чертеж аксиально-плунжерного насоса с наклонным диском

Для анализа основных параметров гидропривода составляется математическая модель [2], в которой отражаются статические характеристики.

Уравнение баланса сил на золотнике

$$\mathrm{P_{dr}} \times \mathrm{A_z} - y_0 \times \mathrm{C_2} = 0; \quad (1)$$

Уравнение баланса сил на сервопоршне

$$\mathrm{P_u} \times \mathrm{A_{sp}} - \mathrm{x_0} \times \mathrm{C_1} - \mathrm{R_{sp}} = 0; \quad (2)$$

Уравнение баланса сил на гидроцилиндре

$$\mathrm{P_n} \times \mathrm{A_{p1}} - \mathrm{P_{sl}} \times \mathrm{A_{p2}} - \mathrm{R_p} = 0; \quad (3)$$

В результате были получены расчётные параметры: $x_0 = 1.4 \times 10^{-3}$, $y_0 = 1 \times 10^{-3}$, $P_{dr} = 4.244 \times 10^6$, $P_u = 5.093 \times 10^6$.

Статические характеристики строятся с целью обозначения начальных и граничных условий системы (рис. 4).

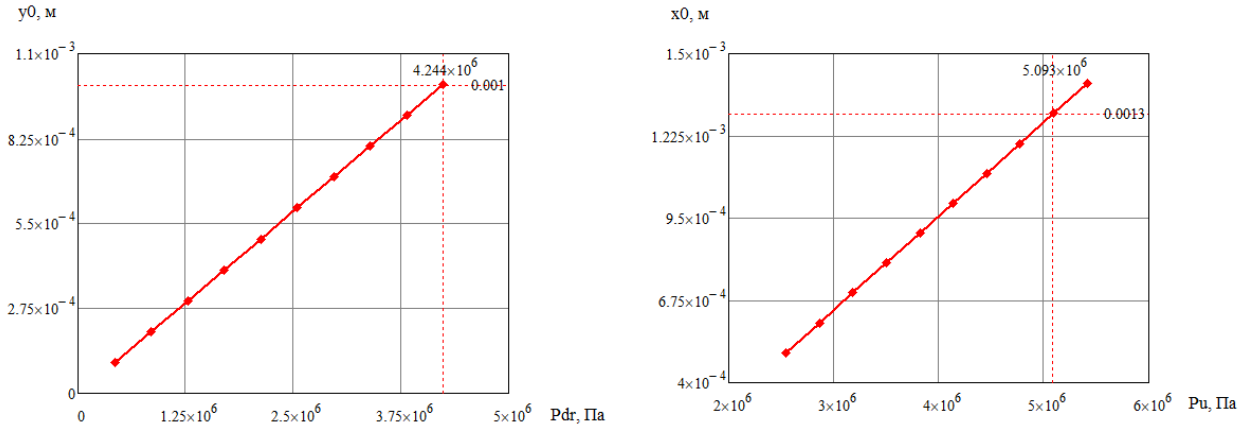


Рис. 4. Статическая характеристика привода

Далее составляется динамическая модель (рис. 5–7), выписываются основные уравнения контура гидроподъема:

- уравнение движения гидроцилиндра:

$$m_p \frac{d^2}{dt^2} z_0(t) = P_n(t) A_{p1} - P_{sl}(t) A_{p2} - k_{v1} \frac{d}{dt} z_0(t) - R_p - \Delta R; \quad (4)$$

- уравнение для определения давления питания:

$$\frac{d}{dt} P_n(t) = \frac{E}{V} \left(\frac{Q_n \times (\gamma - x_0(t))}{\gamma} - \mu \times F_{dr} \times \sqrt{\frac{2 \times |P_n(t) - P_u(t)|}{\rho}} - A_{p2} \frac{d}{dt} z_0(t) \right); \quad (5)$$

- уравнение движения золотника:

$$m_z \frac{d^2}{dt^2} y_0(t) = P_n(t) A_z - y_0(t) C_2 - k_{v2} \frac{d}{dt} y_0(t); \quad (6)$$

- уравнение движения сервопоршня:

$$m_{sp} \frac{d^2}{dt^2} x_0(t) = P_u(t) A_{sp} - (x_0(t) + x_n) C_1 - k_{v3} \frac{d}{dt} x_0(t); \quad (7)$$

- уравнение для определения давления на входе в серовопоршень:

$$\frac{d}{dt} P_r(t) = \frac{E}{V} \left(\mu \cdot b \cdot \left(y_0(t) + \frac{A_z \cdot P_u(t)}{C_2} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_n(t) - P_u(t)|}{\rho}} - A_{sp} \frac{d}{dt} x_0(t) \right); \quad (8)$$

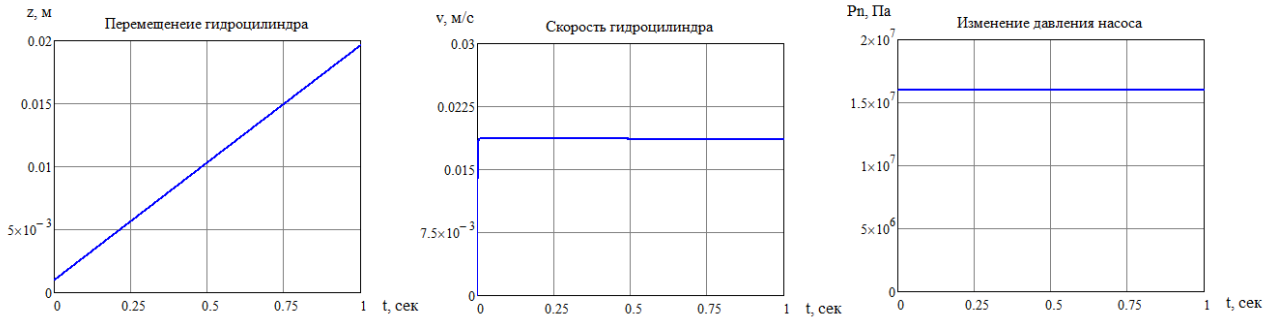


Рис. 5. Динамические характеристики гидроцилиндра

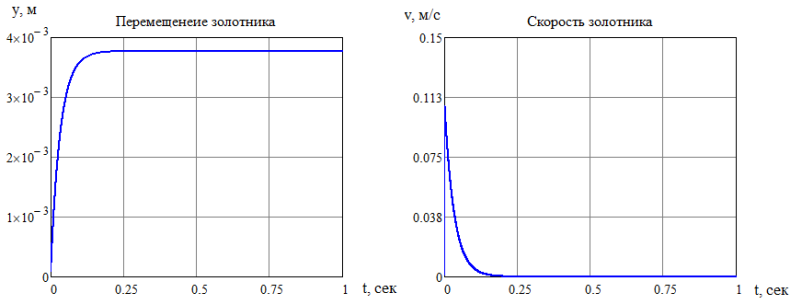


Рис. 6. Динамические характеристики золотника

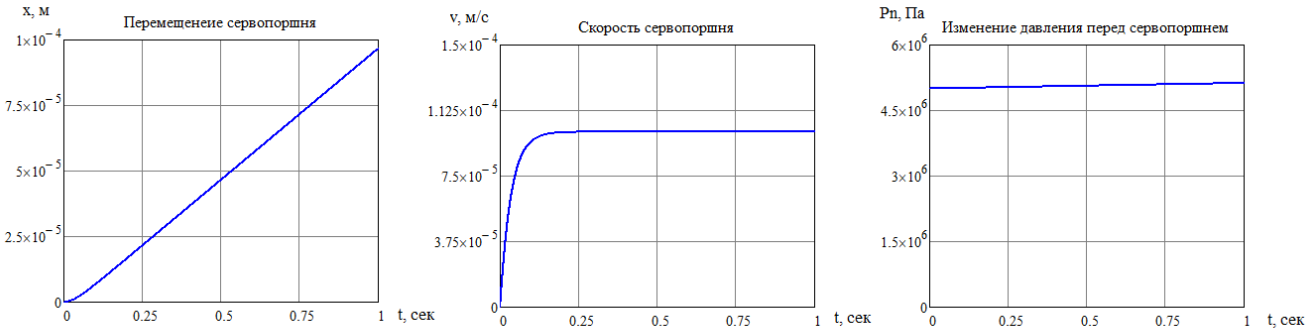


Рис. 7. Динамические характеристики сервопоршня

Система управления гидравлическим сваебойным молотом является высокотехнологичным комплексом, который обеспечивает эффективную и безопасную забивку свай [3]. Гибкость настроек, возможность автоматизации и постоянный мониторинг делают гидравлические молоты современным и востребованным решением в строительной отрасли [4]. Дальнейшее развитие систем управления, вероятно, будет включать интеграцию с системами точного позиционирования и комплексными системами управления строительной площадкой. Таким образом, инвестиции в разработку и внедрение передовых систем управления гидравлическими сваебойными машинами являются важным фактором повышения конкурентоспособности и эффективности современного строительного производства.

Библиографический список

1. Галеева, Р. А.; Сунарчин, Р. А. Гидравлические приводы летательных аппаратов // Издательство: Уфимский ордена Ленина авиационный институт им. Серго Орджоникидзе, 1984. – 174 с.
2. Башта, Т. М. Объёмные гидравлические приводы летательных аппаратов // Издательство: М. «Машиностроение», 1968. – 628 с.
3. Лекции.Орг – Валочно-трелевочные машины [Электронный ресурс] // URL: https://lektsii.org/14-55555.html.
4. Строительство – Валочно-трелевочные машины [Электронный ресурс] // URL: http://industrial-wood.ru/mehanizaciya/5441-valochno-trelevochnye-mashiny.html.

© Герасимов Е.В., 2026

УДК 339.543

Д.Р. ГИЛЕМХАНОВ
danilgilemhanov2@gmail.com
Научный руковод. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ИМПОРТ ЕВРОПЕЙСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ ИЗ ЕВРОПЫ В РОССИЮ

Аннотация: в статье рассмотрены особенности параллельного импорта европейских автомобилей в Россию, причины его распространения, преимущества и риски.
Ключевые слова: параллельный импорт; автомобили; рынок; Европа; Россия.

Ситуация на российском автомобильном рынке в последние годы изменилась настолько, что прежние правила покупки машин перестали работать. То, что раньше считалось обычным – визит в автосалон и выбор из доступных моделей – стало скорее исключением [1]. Особенно это коснулось европейских автомобилей, которые долгое время воспринимались как эталон качества и надежности. Когда привычные каналы поставок перестали функционировать, рынок начал искать обходные решения. Одним из таких решений стал параллельный импорт. Если раньше о нём знали в основном специалисты, то теперь с этим понятием сталкивается практически каждый, кто интересуется покупкой автомобиля.

Параллельный импорт нельзя назвать чем-то совершенно новым. По сути, это покупка автомобиля за пределами страны с его последующей доставкой без

участия официальных представителей бренда. Машина остаётся той же самой – с тем же качеством, тем же происхождением – меняется только путь, по которому она попадает к покупателю [2].

Интересно, что раньше подобные схемы воспринимались как временное или нишевое решение. Сейчас же они стали привычной частью рынка, и отношение к ним заметно изменилось.

Причины роста интереса к параллельному импорту не сводятся к одному фактору. Здесь важно рассматривать всю ситуацию целиком.

Прежде всего, исчезновение официальных поставок привело к тому, что выбор автомобилей резко сократился. При этом спрос никуда не исчез – люди по-прежнему хотят покупать машины, к которым привыкли. Кроме того, изменилась логистика. Даже если автомобиль можно приобрести, его доставка требует больше времени и усилий. Это создаёт дополнительные сложности, но не останавливает рынок полностью. Наконец, есть фактор привычки. Многие водители не готовы пересаживаться на другие марки, если у них уже был положительный опыт эксплуатации европейских автомобилей [3].

Чаще всего речь идёт о машинах, которые сложно заменить аналогами. Это автомобили среднего и высокого класса, где важны не только базовые характеристики, но и уровень комфорта, управляемость, оснащение. При этом интерес проявляется как к новым автомобилям, так и к тем, которые уже использовались, но находятся в хорошем состоянии. Второй вариант нередко оказывается более доступным и потому пользуется стабильным спросом.

Современные поставки редко идут напрямую. В большинстве случаев автомобиль проходит через одну или несколько стран, прежде чем попасть к конечному покупателю.

Такой маршрут может показаться сложным, но именно он позволяет сохранить доступ к европейским автомобилям. Участники рынка приспосабливаются к условиям, выстраивая цепочки, которые работают в текущей ситуации. Разумеется, это влияет на сроки. Ожидание становится более длительным, однако для многих это оправдано.

– Покупка автомобиля через параллельный импорт требует более внимательного подхода. Здесь уже недостаточно просто выбрать модель – необходимо учитывать множество дополнительных факторов.

– Важно проверить состояние автомобиля, его историю, убедиться в отсутствии юридических проблем. Затем следует этап доставки, который сам по себе может быть достаточно сложным.

– Отдельного внимания заслуживает оформление. Таможенные процедуры, сборы, регистрация – всё это требует времени и понимания процесса.

Поэтому многие предпочитают обращаться к специалистам, которые сопровождают сделку на всех этапах.

Главное достоинство параллельного импорта – это возможность выбора. Даже в условиях ограничений человек не оказывается в ситуации, когда ему приходится брать «то, что есть». Кроме того, появляется гибкость. Можно

искать конкретную комплектацию, нужный цвет или редкую модель, которая официально не поставляется. Есть и ещё один момент: наличие альтернативных каналов делает рынок менее зависимым от одной системы поставок. Это повышает его устойчивость [4].

Однако у такого способа покупки есть и обратная сторона.

– Отсутствие официальной поддержки со стороны производителя означает, что в случае проблем рассчитывать придётся в первую очередь на собственные ресурсы.

– Также нельзя забывать о стоимости. Дополнительные этапы доставки и оформления неизбежно отражаются на цене. Иногда итоговая сумма оказывается выше ожидаемой.

Отдельная тема – надёжность посредников. Ошибка при выборе партнёра может привести к неприятным последствиям, поэтому к этому вопросу стоит относиться особенно внимательно [5].

На сегодняшний день можно сказать, что параллельный импорт перестал быть временной мерой. Он стал частью новой реальности автомобильного рынка. Люди адаптировались, участники рынка выработали рабочие схемы, а сам процесс стал более понятным. Несмотря на сложности, интерес к европейским автомобилям сохраняется, и это напрямую влияет на развитие данного направления.

Будущее параллельного импорта нельзя назвать однозначным. Слишком многое зависит от внешних условий. Тем не менее, уже сейчас видно, что этот механизм доказал свою жизнеспособность. Даже если ситуация изменится, полностью исчезнуть он вряд ли сможет. Скорее всего, в дальнейшем он станет более упорядоченным и прозрачным, что сделает его удобнее как для покупателей, так и для участников рынка [6].

Параллельный импорт – это пример того, как рынок способен приспосабливаться к новым условиям. Он не решает всех проблем, но позволяет сохранить доступ к тем товарам, которые остаются востребованными. Для покупателя это означает больше возможностей, но и больше ответственности. Нужно внимательнее подходить к выбору, учитывать дополнительные риски и затраты. В итоге можно сказать, что этот механизм уже занял своё место и в ближайшее время вряд ли утратит актуальность.

Библиографический список

1. Гражданский кодекс Российской Федерации. – М.: Проспект, 2024.

2. Минпромторг РФ. Аналитический отчет по автомобильному рынку. – М., 2024.

3. European Automobile Manufacturers Association. Annual Report 2024 [Электронный ресурс] // URL: https://www.acea.auto/publication/economic-and-market-report-global-and-eu-auto-industry-full-year-2024/.

4. Иванов, И. И. Параллельный импорт: правовые аспекты. – М.: Юрайт, 2023.

5. OECD. International Trade Report 2023 [Электронный ресурс] // URL: https://www.oecd.org/en/publications/international-trade-by-commodity-statistics/volume-2023/issue-1_d7d84434-en.html.
6. Петров, П. П. Автомобильный рынок России. – СПб.: Питер, 2024.

© Гилемханов Д.Р., 2026

УДК 621.22-226

А.О. ГРАЧЕВ, Р.Г. МАНУКЯН
grachevalex2002@mail.ru, mavrokia@yandex.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ С МАЛЫМИ ПРОХОДНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ

Аннотация: в статье представлен расчет гидравлического распределителя с малыми каналами. Разработана математическая модель гидравлического распределителя с кольцевой, эллиптической формами щели и с зависимостью коэффициентом расхода от числа Рейнольдса. Проведен параметрический анализ влияния геометрии щелей и режимных параметров на статические и динамические характеристики. Переход к разной форме щели увеличивает рабочий ход золотника.
Ключевые слова: математическая модель; гидравлический распределитель; гидродинамическая сила; малые каналы; форма щели.

Введение

Золотниковые гидравлические распределители (ГР) являются наиболее распространенным типом управляющей аппаратуры в гидроприводах. Существующие расчетные методики и математические модели разработаны для золотников диаметров более 6 мм при давлениях от 7 до 35 МПа и расходах до 150 л/мин [1]. Для распределителей с малыми каналами, применяемые в компактных гидросистемах характерен малый рабочий ход золотника менее 1 мм, что затрудняет обеспечение точного управления. Расширить диапазон перемещений без увеличения расхода возможно за счет перехода на другую форму щели [2].

Математическая модель

Математическое моделирование является наиболее распространённым методом современной науки. Сущность этого метода состоит в замене исходного объекта математической моделью с последующим изучением на компьютерах (рис. 1). В результате вычислительного эксперимента исследователи получают более детальное и реалистичное описание реального объекта, чем в случае приближённых аналитических методов, но в пределах точности используемых моделей [3].

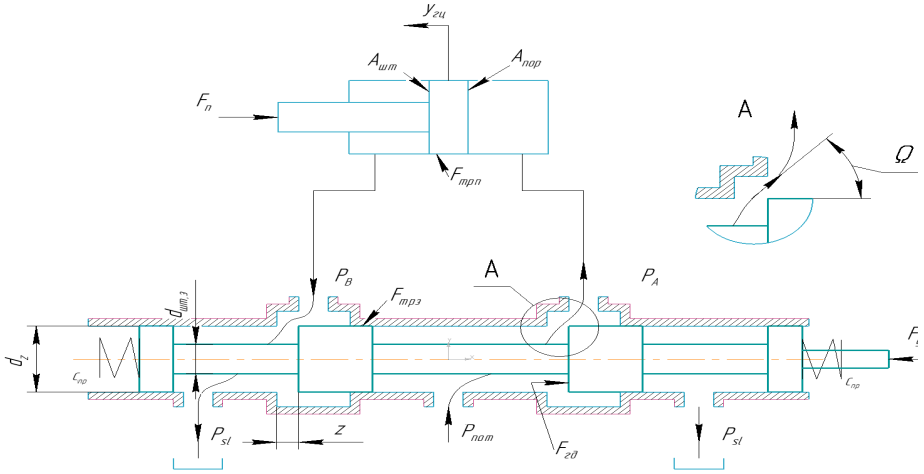


Рис. 1. Расчетная схема управлением выдвижения:
A_{por}, A_{sht} – площадь поршня и штока; F_n – сила действующая на шток ГЦ; $F_{гд}$ – гидродинамическая сила; $C_{пр}$ – пружина; P_{nom} – давление напорной линии; P_a – давление в напорной магистрали; P_b – давление в сливной магистрали; θ – угол наклона; вектора гидродинамической силы к оси золотника; d_z – диаметр золотника

Динамическая математическая модель – это система дифференциальных уравнений, описывающая изменение величин с течением времени [4]. Разработанная математическая модель учитывает коэффициент вязкости и работу всей системы.

Начальные условия берутся из решения статической модели [5]:

– перемещение золотника $x_z = 0.25$ мм;

– скорость гидроцилиндра (ГЦ) $v = 0.05$ м/с;

– давление в поршне $P_1 = 9.94 \cdot 10^6$Па;

– давление в штоке $P_2 = 2.43 \cdot 10^6$Па;

– расход в поршневую область $Q_1 = 1.08$ л/мин;

– расход в поршневую область $Q_2 = 0.81$ л/мин.

Уравнения динамической модели представлены в виде обыкновенных дифференциальных уравнений [6, 7].

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x};$$

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{1}{m_z}(F_{\text{гидр}} - \text{C}_{\text{пр1}}(z_1 + x) + \text{C}_{\text{пр2}}(z_2 + x) - k_v\dot{x});$$

$$\frac{ds}{dt} = v;$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_p}(P_1 A_{por} - P_2 A_{sht} - F_n(t)); \quad (1)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{E}{V_1}(\mu(Re) A_{\text{откр}} \sqrt{\frac{2|\mathrm{P}_{nom} - \mathrm{P}_1|}{\rho}} - A_{por} v);$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{E}{V_2}(\mu(Re) A_{\text{откр}} \sqrt{\frac{2|\mathrm{P}_2 - \mathrm{P}_{sl}|}{\rho}} - A_{sht} v),$$

где $F_{\text{гидр}} = 2\mu(Re)\pi \cos\theta A_{\text{откр}} (P_{nom} - \mathrm{P}_1 + \mathrm{P}_2 - \mathrm{P}_{sl})$; $A_{\text{откр}}$ – площадь открытия будет изменять по формулам (2), изменение коэффициента расхода по формуле (3).

Геометрия щели – кольцевая щель заменялась на треугольную (открытие идет от вершины треугольника):

$$(A = n\frac{b}{2H}x^2), \quad (2)$$

где n – количество окон; b – основание треугольника; H – высота треугольника; x - перемещение золотника.

Зависимость $\mu(Re)$ задана с резким переходом:

$$\mu(Re) = \mu_{\text{лам}} + \frac{\mu_{\text{турб}} - \mu_{\text{лам}}}{1 + e^{-(Re - Re_{\text{кр}})}}, \quad (3)$$

где $\mu_{\text{лам}} = 0{,}3$; $\mu_{\text{турб}} = 0{,}61$; $Re_{\text{кр}} = 150$; $k = 100$ – параметр крутизны перехода.

Описываемая математическая модель реализована в среде MATLAB в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, записанной в форме Коши (матрица первых производных). Для численного интегрирования используется встроенный решатель ode45 (явный метод Рунге-Кутты 4-го порядка с адаптивным шагом), который автоматически регулирует размер временного шага в зависимости от требуемой точности. Для жёстких систем применяется решатель ode15s (неявный метод переменного порядка), что обеспечивает устойчивость и высокую точность даже при быстрых переходных процессах. Количество расчётных точек определяется автоматически в зависимости от сложности динамики.

Решив систему уравнений (1) методом, описанным выше, получаем динамические переходные процессы (рис. 2).

Начальными условиями были нагрузка на шток F_n, изменяемая скачкообразно в момент времени 0,3 секунды с 2 кН до 2.5 кН.

Анализ переходных процессов динамической модели

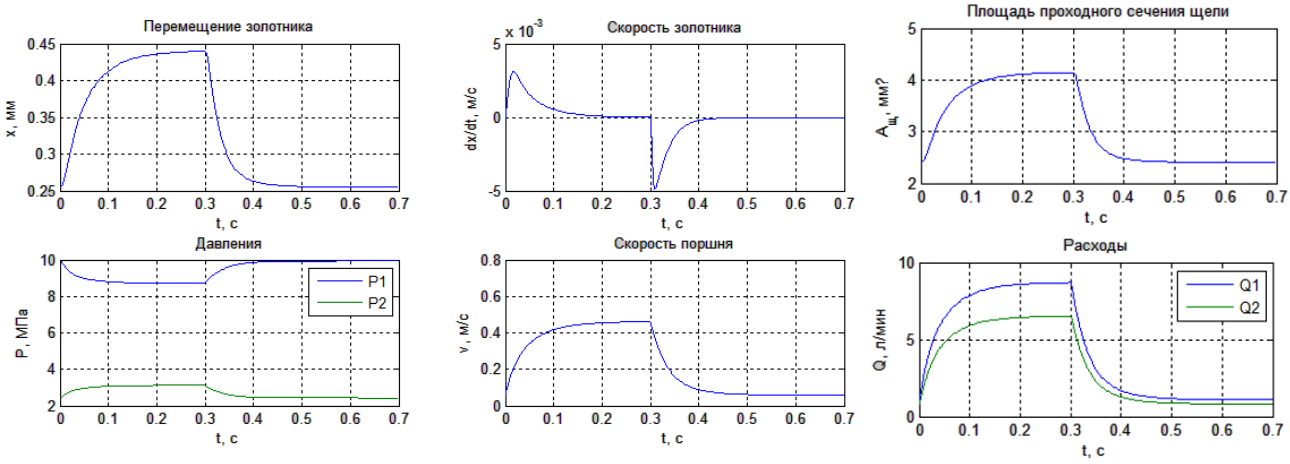


Рис. 2. Динамические характеристики расчетной схемы для кольцевой щели и с $\mu = 0{,}635$

Проанализировав рис. 3 при увеличении количества щелей, перемещение золотника увеличилось до 0,7 мм, время выхода на режим увеличился до 0,1 с. Переходный процесс становится более плавным.

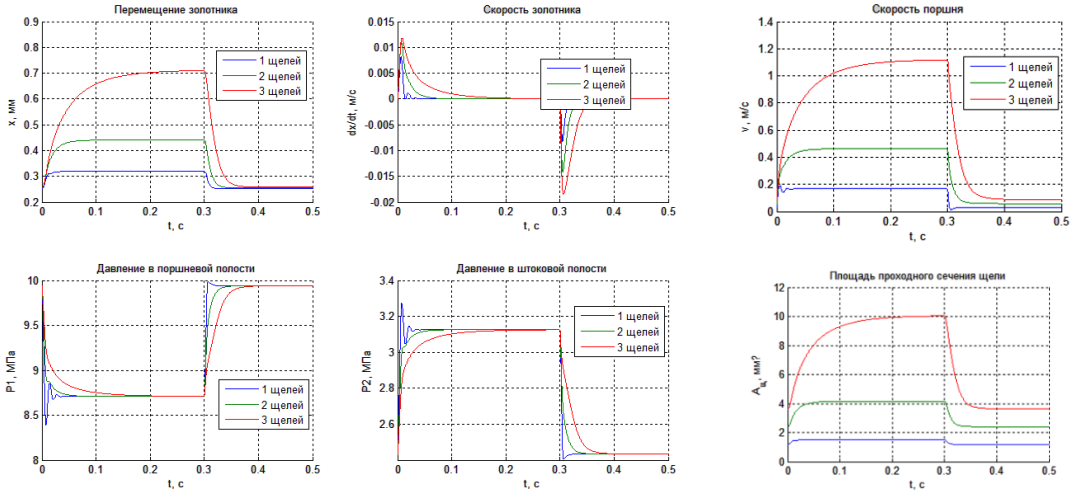


Рис. 3. Динамические характеристики расчетной схемы для эллипсообразной щели и с $\mu = 0.635$

Введение в математическую модель зависимости μ(Re) позволило устранить завышение расхода через щель в области переходных и ламинарных режимов течения, характерных для малых открытий золотника [8]. Проанализировав рис. 4, 5 при изменении нагрузки на шток ГЦ с 2 кН до 2.5 кН, характерный переход с турбулентного на ламинарный режим, в промежутке с 0,1 до 0,15 с.

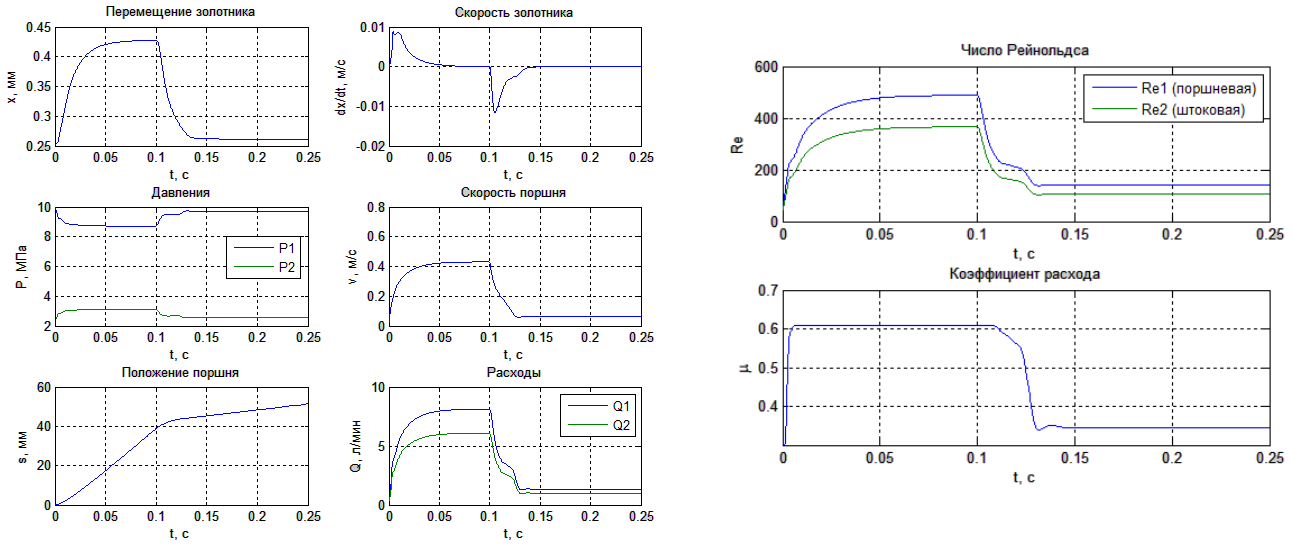


Рис. 4. Динамические характеристики расчетной схемы с расчетом коэффициента расхода и изменение числа Рейнольдса и коэффициента расхода

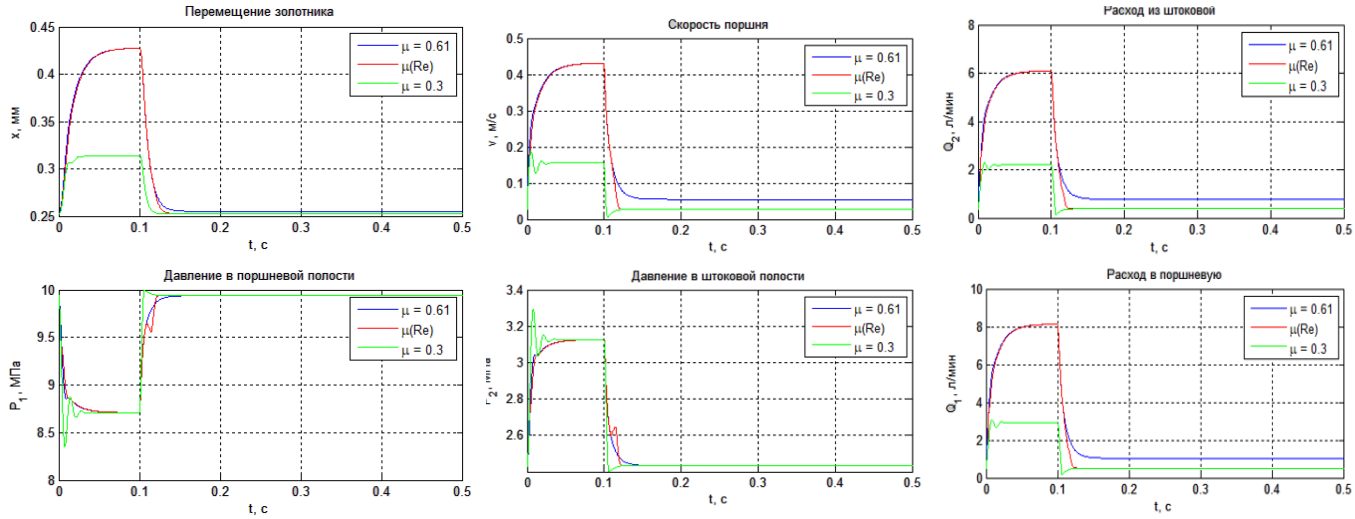


Рис. 5. Динамические характеристики расчетной схемы сравнения расчетов с разными коэффициентами расхода.

Вывод

Подводя результаты работы получаем, изменение формы щели позволяет увеличить рабочих ход золотника без увеличения расхода в гидроцилиндр. Учет зависимости коэффициента расхода μ(Re) от числа Рейнольдса позволил уточнить изменение давления и расхода в гидравлическом распределителе. Анализ переходных процессов при разных количествах элипсообразных окон обеспечивают более плавный переходный процесс, время выхода на установившийся режим возрастает незначительно.

Библиографический список

1. Железнякова, Ю. И. Моделирование динамики работы золотникового гидравлического клапана / Ю. И. Железнякова, Д. Л. Стасенко // Современные проблемы машиноведения: Сборник научных трудов. В 2-х частях / Под общей редакцией А.А. Бойко. Том Часть 1. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 2023. – С. 52–55. – EDN JQEZTH.

2. «Разработка системы подачи топлива к газотурбинному приводу на базе газотурбинного двигателя ГТДЭ-117» Грачев А.О., Петров П.В. Мавлютовские чтения: материалы XVII Всероссийской молодежной научной конференции.

3. Петров, П. В. Основы автоматизированного проектирования гидромеханических устройств: Монография / П. В. Петров, В. А. Целищев. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – 241 с.

4. Петров, П. В. Необходимость исследования нелинейных гидромеханических систем в обобщенных параметрах / П. В. Петров, Д. Д. Чернов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2019. – № 4(265). – С. 28–33.

5. Грачев, А. О., Петров, П. В., Кудерко, Д. А./ Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации // сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации. Иркутск, 2023. – С. 129–137.

6. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.

7. Овчинников, М. Е. Разработка математической модели электрогидравлического привода управления положением закрылков / М. Е. Овчинников // Гагаринские чтения 2024: сборник тезисов докладов 50-ой Международной молодежной научной конференции, Москва, 09–12 апреля 2024 года. – Москва: ООО "Издательство «Перо», 2024. – С. 150–151. – EDN JLTUIT.

8. Грачев, А. О. Предварительный расчет параметров гидрораспределителя / А. О. Грачев, Р. Г. Манукян // Мавлютовские чтения: Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2026. – С. 433–438. – EDN ZYMLWI.

© Грачев А.О., 2026

УДК 658.7

К.П. ГУСЕВА
gusk_2005@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ЛОГИСТИКА МАРКЕТПЛЕЙСОВ В РОССИИ

Аннотация: Статья исследует фундаментальную трансформацию логистических систем российских маркетплейсов к середине 2026 года. Основное внимание уделено переходу к полной роботизации складских мощностей, внедрению предиктивной аналитики на базе искусственного интеллекта (ИИ) и масштабированию автономных систем доставки в условиях дефицита линейного персонала.
Ключевые слова: Маркетплейсы; Логистика 4.0; последняя миля; беспилотный транспорт; роботизация складов; предиктивная аналитика; e-commerce Россия 2026; цифровая трансформация.

За последние пять лет российский сектор электронной коммерции продемонстрировал стремительный рост, сравнимый с десятилетним развитием в более зрелых экономиках. Если в 2019 году онлайн-площадки воспринимались в основном как удобные витрины для покупок, то к 2024-2026 годам они эволюционировали в полноценные логистические экосистемы. Логистика из вспомогательной функции превратилась в краеугольный камень конкурентоспособности и серьезное препятствие для выхода на рынок новых игроков [1].

Настоящее исследование ставит своей целью провести всесторонний анализ текущей ситуации, определить ключевые операционные модели и проследить эволюционные тенденции в логистических стратегиях, ведущих российских маркетплейсов – Wildberries, Ozon, Яндекс Маркета и Мегамаркета в условиях меняющейся экономической среды.

Архитектура логистических моделей: FBO, FBS и их модификации

Основой функционирования любого крупного маркетплейса являются три фундаментальные модели (рис. 1), пропорциональное соотношение которых определяет стратегический вектор развития компании [2]:

1. FBO (Fulfillment by Operator) – в рамках этой модели товары хранятся непосредственно на складах маркетплейсов:

а) преимущества – обеспечивает максимальную скорость доставки и повышает видимость товаров в поисковой выдаче, освобождая продавцов от операционных задач;

б) недостатки – связаны со значительными расходами на хранение, особенно для товаров с низкой оборачиваемостью, и несет риск перегрузки складских мощностей платформы.

2. FBS (Fulfillment by Seller) – здесь товар находится на складе самого продавца, а маркетплейс берет на себя исключительно доставку до конечного потребителя:

а) преимущества – позволяет продавцу сохранять полный контроль над запасами и эффективно управлять продажами на нескольких площадках, используя единый склад;

б) недостатки – предусматривает штрафы за отмену заказов и требует от продавца оперативной передачи товаров в сортировочные центры.

3. DBS (Delivery by Seller) и RealFBS – в этих моделях продавец самостоятельно отвечает, как за хранение, так и за доставку товара. Маркетплейс в данном случае выступает исключительно в роли рекламной площадки. Эта схема особенно актуальна для крупногабаритных товаров (КГТ) и категорий, требующих специфических условий транспортировки (например, скоропортящиеся продукты или опасные грузы).

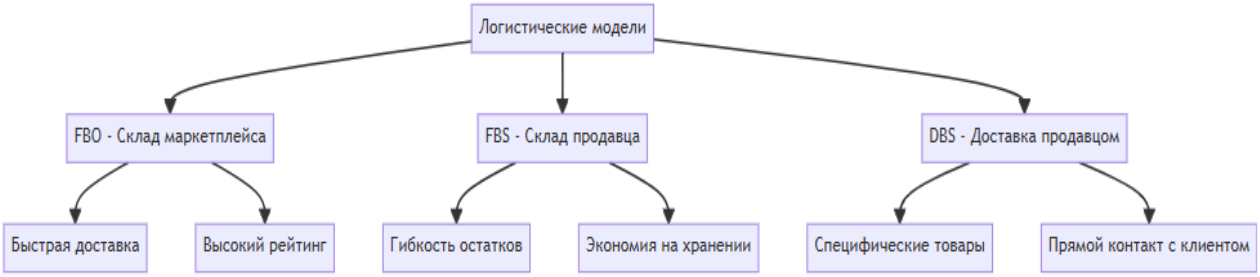


Рис. 1. Логистические модели

Инфраструктурный бум и региональная экспансия

До 2022 года логистическая инфраструктура маркетплейсов была сконцентрирована преимущественно в столичных регионах и Санкт-Петербурге. Сегодня наблюдается явный сдвиг в сторону регионального развития. К 2026 году процесс децентрализации логистики был практически завершен [3]. Ведущие игроки (Wildberries, Ozon, Яндекс Маркет) сформировали единую «Логистическую сеть России», состоящую из трех уровней:

1. Мега-хабы (Кластеры) – объекты площадью свыше 200 000 кв. м, расположенные в ключевых региональных центрах (Екатеринбург, Новосибирск, Казань, Краснодар, Хабаровск). Эти центры выполняют функции глубокой сортировки и мелкооптового хранения.

2. Региональные сортировочные центры – обеспечивают доставку товаров на следующий день для 85 % населения страны.

3. Гиперлокальные хабы – представляют собой дарксторы и микро-фулфилмент-центры, расположенные непосредственно в городских кварталах.

К 2026 году стоимость земельных участков в черте городов-миллионников выросла на 60 %. Это стимулировало массовое строительство многоэтажных складских комплексов, оснащенных автоматизированными лифтовыми системами для перемещения товаров – модель, успешно апробированная в Гонконге и Японии [4].

Пункты выдачи заказов (ПВЗ) стали неотъемлемым элементом логистической цепи. Россия обладает уникальной плотностью таких пунктов. К 2024 году общее количество точек Wildberries и Ozon превысило 100 тысяч. Функционал ПВЗ значительно расширился: они превратились не только в места получения заказов, но и в пункты приема возвратов, примерочные, а в некоторых случаях – и в финансовые центры (выдача карт, прием платежей).

Автоматизация как фактор выживания в условиях дефицита кадров

Современный бизнес сталкивается с острой нехваткой линейного персонала, включая курьеров и складских работников. В этой ситуации автоматизация становится не просто преимуществом, а критически важным условием для поддержания операционной деятельности. Ярким примером является внедрение «умных» почтоматов в новых жилых комплексах Москвы и Санкт-Петербурга. Девелоперы обязуются устанавливать эти устройства, позволяющие курьерам оставлять заказы в ячейках на этаже получателя, исключая необходимость личного ожидания клиента.

Роботизация складских операций: Скорость и надежность

Применение роботов-сортировщиков и передовых конвейерных систем кардинально сократило время комплектации заказов, снизив его с 40 до 15 минут. Яндекс Маркет демонстрирует лидерство в этой области, активно внедряя собственные разработки складских роботов. Это не только повышает эффективность, но и снижает зависимость от зарубежных поставщиков и сервисных контрактов. Интеллектуальные системы осуществляют непрерывный мониторинг состояния критически важных компонентов, таких как подшипники в сортировочных машинах. Благодаря внедрению «цифровых двойников» всей складской инфраструктуры (рис. 2), прогнозируемая вероятность внезапных остановок производственных линий к 2026 году снизится до минимальных 0,01 % [5].

Современные алгоритмы демонстрируют высокую точность в прогнозировании потребительского спроса на конкретные товары в определенных регионах. Это открывает возможности для реализации инновационной модели «динамических запасов». Продукция заблаговременно перемещается в распределительные центры (дарксторы), расположенные вблизи потенциальных покупателей, еще до фактического поступления заказа.

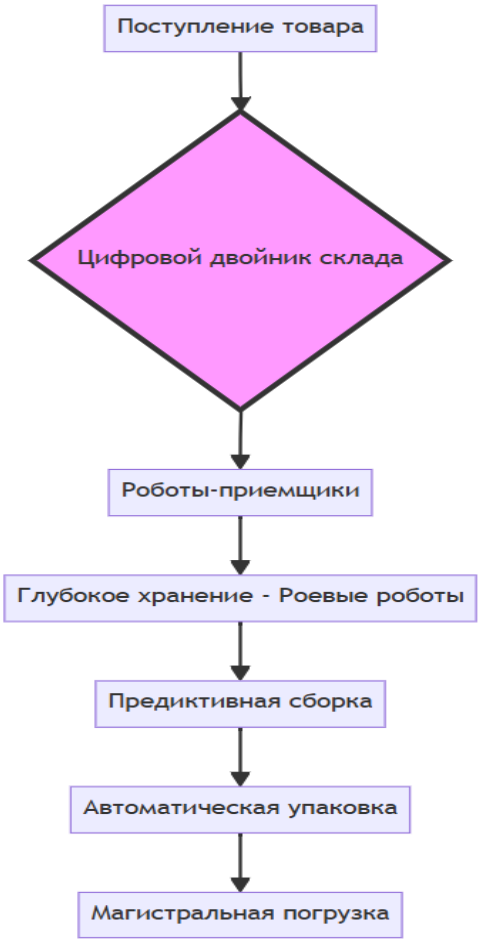


Рис. 2. Складская инфраструктура

Ключевые вызовы российской логистики маркетплейсов:

1. Кадровый дефицит и его последствия - значительный рост заработной платы курьеров (более 40 % в 2023–2024 годах) подталкивает платформы к активному использованию искусственного интеллекта для оптимизации маршрутов. Основная цель – максимизировать количество доставок, выполняемых одним курьером за определенный временной интервал.

2. Экологическая трансформация – в крупных городах, особенно в Москве, наблюдается постепенный переход к использованию экологически чистого транспорта, такого как электровелосипеды и электрофургоны. Это направлено на снижение углеродного следа и решение проблем, связанных с ограничениями на въезд грузового транспорта.

Развитие беспилотных транспортных коридоров (БТК) – к 2026 году федеральные трассы М-11 «Нева» и М-12 «Восток» станут ключевыми артериями для автономных грузоперевозок. Маркетплейсы активно формируют собственные парки беспилотных тягачей, что уже привело к снижению стоимости магистральных перевозок на 18 % и устранению фактора человеческой усталости, обеспечивая непрерывную круглосуточную работу [6].

Санкционное давление и глобальные геополитические сдвиги привели к кардинальной перестройке логистических маршрутов:

1. Усиление китайского направления – происходит прямая интеграция с логистическими узлами в Китайской Народной Республике. Модель работы AliExpress активно адаптируется такими игроками, как Ozon Global и Wildberries.

2. Развитие параллельного импорта – логистические подразделения маркетплейсов успешно осваивают «длинные плечи» поставок через Турцию, ОАЭ и страны СНГ. Для ускорения таможенного оформления внутри компаний создаются собственные таможенные брокерские службы.

Системные риски в логистике маркетплейсов

Несмотря на впечатляющие достижения, логистическая деятельность маркетплейсов сопряжена с рядом системных угроз:

1. Каннибализация прибыли – стремление поддерживать низкие цены на товары часто приводит к субсидированию доставки со стороны маркетплейсов, что может вызывать отрицательную маржинальность логистического сегмента.

2. Регуляторные вызовы – обсуждение законодательных инициатив по регулированию деятельности маркетплейсов может привести к ограничению их права на наложение штрафов на пункты выдачи заказов (ПВЗ) и продавцов, что потребует пересмотра всей финансовой модели логистики.

3. Проблемы безопасности и хищений – усложнение логистических цепочек повышает вероятность потерь и подмены товаров. Это требует повсеместного внедрения систем видеонаблюдения на всех этапах транспортировки.

К 2026 году логистическая инфраструктура маркетплейсов в России претерпит кардинальные изменения, превратившись в передовой сектор, определяющий вектор развития всей розничной торговли. Произойдет смена парадигмы: вместо экстенсивного расширения географического охвата, фокус сместится на интенсивное использование каждого квадратного метра складских помещений для достижения максимальной производительности.

Перспективы развития отрасли неразрывно связаны с глубокой синергией логистических операций и финансовых технологий (финтех), а также с повсеместным внедрением автономных транспортных решений. Компании, которые смогут преодолеть кадровый дефицит за счет автоматизации и роботизации, станут лидерами рынка в предстоящее десятилетие.

Мы вступаем в эпоху «невидимой логистики», когда для потребителя процесс получения заказа всего через два часа после импульса к покупке станет абсолютно незаметным.

Следующий этап эволюции (2027–2030 годы) ознаменуется массовым применением стратосферной доставки с использованием дронов и формированием глобальных, интегрированных торговых маршрутов, где скорость логистических потоков фактически нивелирует значение национальных границ.

Библиографический список

1. Аналитический отчет Data Insight (март 2026). «Рынок e-commerce в России: итоги 2025 года и горизонты 2027». – М.: Изд-во «Цифровая Экономика», 2026.
2. Иванов, П. С., Смирнова, Е. В.. «Роверизация городов: как автономные системы доставки изменили облик российских мегаполисов». Вестник современной логистики, 2025. – №3. – С. 14–28.
3. Беспалов, Р. А. «Транспортная логистика маркетплейсов: от классического фулфилмента к распределенным нейросетям». – СПб.: Питер, 2024. – 320 с.
4. Государственная стратегия развития беспилотных авиационных и транспортных систем РФ до 2030 года. – Редакция от февраля 2026 г.
5. Технологический дайджест Яндекс Маркета Core (2026). «Алгоритмы роевого интеллекта в управлении складскими роботами». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://yandex.cloud/ru/blog/digest-march-2026?&utm_referrer=https%3A//yandex.ru/.
6. Материалы конференции «E-Logistics Russia 2026». Сборник докладов под ред. проф. Кравченко. – М.: Техносфера, 2026.

© Гусева К.П., 2026

УДК 658.78

Д.А. ДМИТРИЕНКО
happydine@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

АВТОМАТИЗАЦИЯ СКЛАДСКОГО КОМПЛЕКСА: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Аннотация: в статье рассматриваются современные тенденции автоматизации складских комплексов и их влияние на эффективность логистических процессов. Раскрываются основные факторы, определяющие рост интереса предприятий к автоматизированным системам хранения, перемещения и обработки грузов. Особое внимание уделено российскому рынку складской автоматизации, развитию промышленных роботов и практическим эффектам внедрения цифровых решений. Для иллюстрации экономической стороны вопроса представлена укрупненная модель оценки проекта автоматизации склада, включающая структуру инвестиций, операционный эффект и сравнение вариантов финансирования. Сделан вывод о том, что автоматизация складского

комплекса должна рассматриваться не только как технологическое обновление, но и как инвестиционное решение, требующее комплексной оценки.
Ключевые слова: автоматизация склада; складской комплекс; логистика; экономическая эффективность; роботизация; цифровизация; инвестиционная оценка; складская инфраструктура.

Современная складская логистика находится в состоянии активной технологической трансформации. Рост электронной коммерции, увеличение номенклатуры товаров и повышение требований к скорости обработки заказов делают традиционные складские процессы менее устойчивыми к нагрузкам. Если ранее склад рассматривался в основном как место хранения запасов, то сейчас он все чаще выполняет функцию динамичного распределительного узла, в котором важны скорость, точность и управляемость потоков. По данным отраслевых публикаций, на современных распределительных центрах в России до 20 % операций уже выполняются автоматически, а к 2030 году этот показатель может увеличиться до 35 %, что указывает на постепенный переход рынка к более высокому уровню автоматизации [1].

Актуальность автоматизации складов усиливается не только за счет роста объемов заказов, но и за счет изменения характера самих логистических операций. Предприятия сталкиваются с необходимостью обрабатывать большее количество мелких заказов, быстрее комплектовать партии, снижать вероятность ошибок и обеспечивать прозрачность движения товаров внутри склада. В этих условиях автоматизация становится не отдельным техническим улучшением, а частью общей логики цифровизации логистики, поскольку позволяет связать складские операции с информационными системами управления запасами, транспортом и клиентским сервисом [2].

Российский рынок также демонстрирует рост интереса к промышленной роботизации. В 2025 году в стране был запущен национальный проект «Средства производства и автоматизации», а в Пермском крае на базе компании «Промобот» началось производство шестиосевого коллаборативного робота Promobot M13, предназначенного для упаковки, сварки, сборки и перемещения деталей весом до 13 кг. Хотя данный пример относится к промышленной роботизации в широком смысле, он важен и для складской логистики, поскольку показывает развитие отечественной технологической базы и расширение сферы применения роботизированных решений в производственно-логистических процессах [3].

Складская автоматизация включает широкий круг решений, среди которых можно выделить автоматизированные системы хранения и извлечения, автономные транспортные платформы, сортировочные комплексы, конвейерные линии, системы машинного зрения и программные платформы управления складом. Их внедрение позволяет снизить долю ручных операций, повысить точность обработки заказов и обеспечить более рациональное использование складских площадей. В справочных материалах Robotrends складские роботы рассматриваются как роботизированные системы,

применяемые для управления автоматизированными логистическими средствами на складах и промышленных предприятиях, что подчеркивает связь между роботизацией и управлением материальными потоками [4].

Практический опыт российских компаний показывает, что полная автоматизация склада пока не является массовой моделью, однако гибридный подход становится все более востребованным. В материале Robotrends об опыте Wildberries отмечается, что более перспективной считается схема, при которой автоматизация охватывает около половины процессов, тогда как остальные операции все еще требуют участия человека. Такой подход выглядит более реалистичным для российского рынка, поскольку позволяет внедрять технологии постепенно, снижая риски чрезмерных затрат и сохраняя возможность гибкой адаптации складских процессов [5].

Важно учитывать, что автоматизация склада не ограничивается закупкой оборудования. Значительная часть эффекта зависит от качества интеграции технологических решений с существующей инфраструктурой предприятия. Если автоматизированное оборудование не связано с системой управления складом, не учитывает реальные маршруты движения товаров и не встроено в общую цифровую архитектуру, его эффективность снижается. Поэтому при оценке автоматизации необходимо рассматривать не только стоимость техники, но и расходы на переоборудование зон хранения, программную интеграцию, обучение персонала и настройку процессов [2].

Для иллюстрации экономической стороны внедрения автоматизированных складских решений рассмотрена укрупненная модель складского комплекса, ориентированного на обработку заказов в условиях растущей логистической нагрузки. Модель позволяет оценить примерную структуру инвестиционных затрат, возможный операционный эффект и влияние схемы финансирования на реализуемость проекта. Такой подход не предполагает окончательного инвестиционного обоснования, однако дает представление о том, какие параметры оказываются наиболее значимыми при принятии управленческого решения.

Расчет показывает, что в проектах автоматизации основной объем первоначальных вложений приходится на технологическое оборудование, переоборудование складских зон, программную интеграцию и внедрение системы управления. В рассматриваемой модели общий объем инвестиций составляет около 285 млн руб., при этом наибольшая доля затрат связана с системами перемещения грузов и автоматизированным хранением. Это объясняется тем, что автоматизация меняет не только отдельные операции, но и саму логику движения товарных потоков внутри склада. Укрупненная структура инвестиционных затрат представлена в табл. 1.

Таблица 1

Укрупненная структура инвестиционных затрат проекта автоматизации склада

Направление затрат	Оценка затрат, тыс. руб.	Характер затрат
Переоборудование складских зон	15 000	инфраструктурные
Системы перемещения грузов	144 000	технологические
Автоматизированные системы хранения	45 000	технологические
Интеграция, программное обеспечение и внедрение	81 189	организационно-цифровые
Итого	285 189	-

Операционный эффект в модели формируется за счет увеличения объема обрабатываемых заказов, сокращения времени выполнения повторяющихся операций и повышения управляемости складских процессов. При этом в первый год после внедрения целесообразно учитывать неполную загрузку системы, поскольку автоматизированный склад требует настройки оборудования, отладки программных связей и адаптации новых процедур обработки заказов. Поэтому эффект автоматизации проявляется не мгновенно, а постепенно, по мере выхода складского комплекса на устойчивый режим работы. Укрупненная оценка операционного эффекта приведена в табл. 2.

Отдельное значение имеет выбор схемы финансирования. Полная покупка оборудования позволяет избежать регулярных платежей в последующие периоды, однако требует значительного стартового капитала. Лизинговая схема, напротив, снижает первоначальную нагрузку и распределяет расходы по годам, что может быть предпочтительно для предприятий, которые стремятся внедрять автоматизацию поэтапно. В рассматриваемой модели стартовые вложения при частичном лизинге снижаются примерно с 285 млн руб. до 119 млн руб., что повышает финансовую гибкость проекта. Сравнение вариантов реализации представлено в табл. 3.

Таблица 2

Укрупненная оценка операционного эффекта проекта

Показатель	1 год	3 год	5 год
Объем обработанных заказов, тыс. ед.	1500	3500	4500
Уровень загрузки склада	частичный	полный	полный
Расчетный операционный эффект, тыс. руб.	13 375	100 500	133 500

Таблица 3

Сравнение вариантов реализации проекта

Показатель	Полная покупка	Частичный лизинг
Стартовые вложения, тыс. руб.	285 189	118 869
Финансовая нагрузка	высокая в начале проекта	распределена по годам
Гибкость реализации	ниже	выше

Полученные результаты показывают, что проекты автоматизации склада требуют комплексной оценки, поскольку их эффективность зависит не только от стоимости оборудования, но и от уровня загрузки объекта, темпов выхода на проектную мощность, качества интеграции и выбранной финансовой схемы. Даже укрупненная модель демонстрирует, что лизинг может выступать инструментом снижения стартовой инвестиционной нагрузки, а операционный эффект становится заметным только при достаточном объеме складских операций.

В то же время автоматизация склада не должна рассматриваться исключительно через призму сокращения затрат. Ее значение шире: она повышает управляемость процессов, снижает зависимость от ручного труда, делает склад более устойчивым к пиковым нагрузкам и позволяет лучше контролировать движение товаров. В условиях роста требований к скорости доставки и точности комплектации именно эти факторы становятся важными для конкурентоспособности логистической системы. Современные зарубежные публикации также подчеркивают, что автоматизация складов в 2026 году становится не дополнительной опцией, а необходимым условием сохранения эффективности цепей поставок [2].

Перспективы развития складской автоматизации связаны с переходом от отдельных технических решений к более сложным цифровым системам. В ближайшие годы можно ожидать роста интереса к гибридным складам, в которых человек выполняет функции контроля, настройки и принятия решений, а повторяющиеся операции передаются автоматизированным системам. Такой подход соответствует практике крупных компаний, где полная замена человека не всегда является экономически оправданной, но перераспределение функций между персоналом и техникой позволяет повысить общую эффективность складского комплекса [5].

Таким образом, автоматизация складского комплекса является одним из ключевых направлений развития современной логистики. Она позволяет повысить производительность, улучшить использование складских площадей и сделать логистические процессы более управляемыми. При этом экономическая оценка таких проектов должна учитывать не только объем стартовых вложений, но и схему финансирования, уровень загрузки склада и способность предприятия встроить автоматизированные решения в существующую систему управления. Представленная укрупненная модель показывает, что

автоматизация может быть экономически обоснованной при поэтапном подходе и достаточной интенсивности складских операций.

Библиографический список

1. К 2030 году более трети операций на российских складах будут выполнять роботы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.retail.ru/news/k-2030-godu-bolee-treti-operatsiy-na-rossiyskikh-skladakh-budut-vypolnyat-roboty-30-maya-2025-265272/.

2. Why Warehouse Automation Is No Longer Optional in 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.warehousingexpress.com/blogs/why-warehouse-automation-is-no-longer-optional-in-2025.

3. От сварки до фасовки: где трудятся российские промышленные роботы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mk.ru/nationalprojects/sredstva-proizvodstva-i-avtomatizatsii/2026/04/15/ot-svarki-do-fasovki-gde-trudyatsya-rossiyskie-promyshlennye-roboty.html.

4. Складские роботы. [Электронный ресурс] // Robotrends. Режим доступа: https://robotrends.ru/robopedia/skladskie-roboty.

5. Автоматизация складов - опыт Wildberries. [Электронный ресурс] // Robotrends. Режим доступа: https://robotrends.ru/pub/2503/avtomatizaciya-skladov---opyt-wildberries.

© Дмитриенко Д.А., 2026

УДК 629.7.036

Е.А. ЕРМОШИН
Ezeka192@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАСЧЁТ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СРЕДНЕМАГИСТРАЛЬНОГО ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЁТА

Аннотация: В статье рассматривается расчёт гидравлической системы среднемагистрального пассажирского самолёта.
Ключевые слова: гидравлическая система, среднемагистральный самолет, авиационная техника, управление закрылками, шасси, рулевые поверхности, тормозная систем, компоненты системы, насосы, резервуары.

Гидравлические системы играют ключевую роль в обеспечении надежности и безопасности современных авиационных технологий. В среднемагистральных самолетах, которые выполняют рейсы на расстояния от 1500 до 6000 километров, эффективное управление различными системами, такими как шасси, закрылки и рулевые поверхности, невозможно без высококачественной гидравлики [1]. Эти системы обеспечивают не только контроль над аэродинамическими характеристиками самолета, но и его маневренность и безопасность во время взлета, полета и посадки (рис. 1).

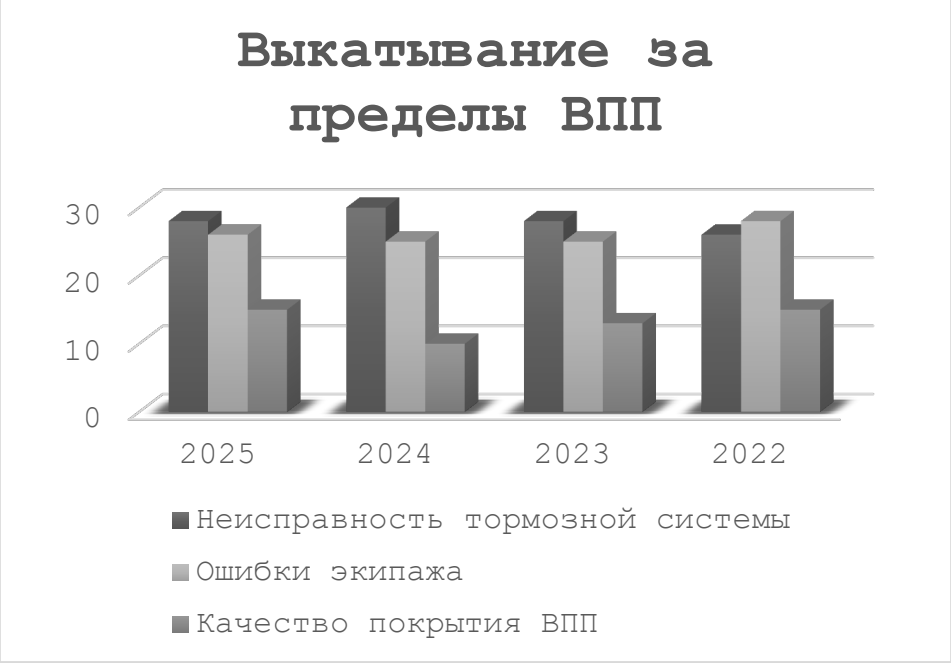


Рис. 1. Статистика выкатывания за пределы ВПП самолётов 2022–2025 гг.

В данной работе особое внимание уделяется интерцепторам как одному из ключевых элементов гидравлической системы управления самолетом. Интерцепторы выполняют важнейшие функции в обеспечении управляемости и безопасности полета, включая снижение подъемной силы, повышение эффективности торможения после посадки и участие в управлении креном (рис. 2). Их значимость особенно проявляется в системе гашения скорости и пробега (системе торможения и «отложения» подъемной силы), где интерцепторы обеспечивают быстрое и эффективное уменьшение подъемной силы крыла, что позволяет увеличить нагрузку на шасси и повысить эффективность колесных тормозов [2].

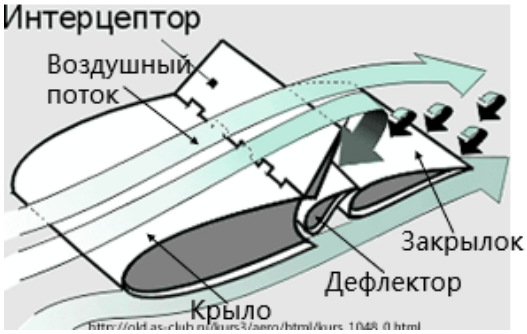


Рис. 2. Схема расположения интерцептора на крыле самолёта

Разработана новая принципиальная схема контура интерцепторов (рис. 3).

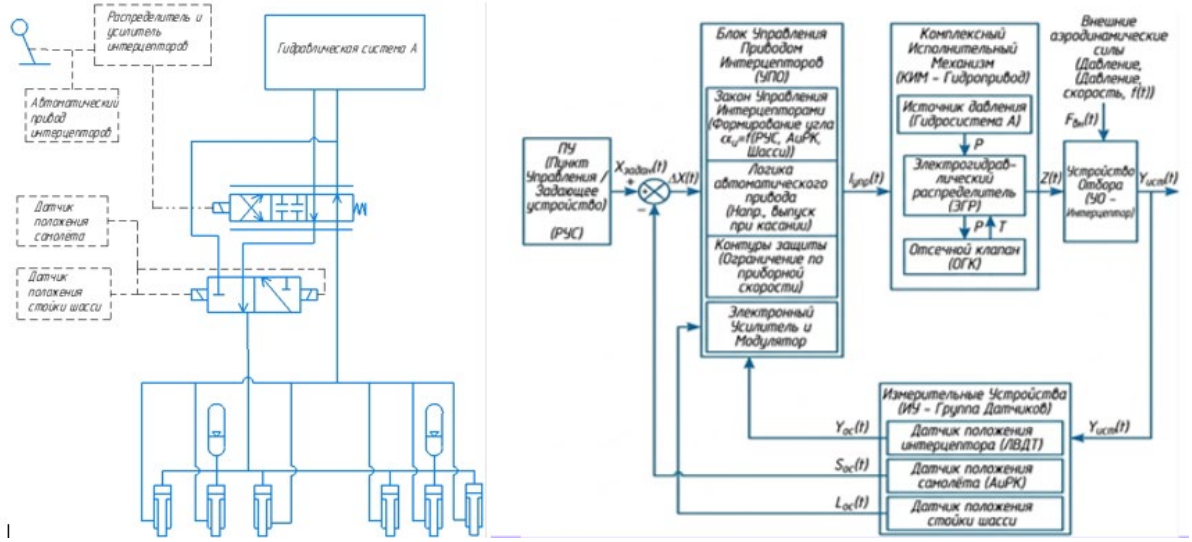


Рис. 3. Схема гидравлическая принципиальная привода интерцепторов и функциональная схема управления

Серийно выпускаемые изделий имеют больший расход и давление, в связи с чем требуется разработка топливного насоса для данной системы (рис. 4).

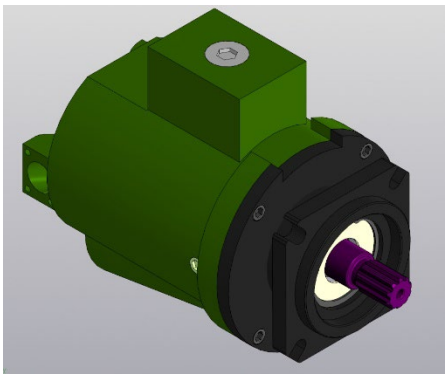


Рис. 4. Насос (3д модель)

Тогда требуемый рабочий объем насоса (табл. 1) рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{Q_T}{n} = \frac{0{,}00214}{25} = 0{,}0000854 \text{ м}^3. \quad (1)$$

Таблица1

Технические характеристики предполагаемого насоса

Рабочий объем см^3/об	85,4
Номинальная частота вращения вала n, об/мин	1500
Номинальная подача Q, л/мин	128,4
Номинальное (максимальное) давление нагнетания $P_{ном}$, МПа	16(21)

Подобранные диаметры трубопроводов приведены в табл. 2.

Таблица ***Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.***

Действительные диаметры напорного и сливного трубопроводов системы с насосом

Напорная линия		Сливная линия		Всасывающая линия	
d, мм	v, м/с	d, мм	v, м/с	d, мм	v, м/с
32	2,5	40	1,8	50	1

Путевые потери давления жидкости (рис. 5) определяются по формуле Дарси-Вейсбаха [3]:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho\, v^2}{2}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент гидравлических потерь, l – суммарная длина трубопровода, ρ – плотность рабочей жидкости, d – диаметр трубопровода, v – скорость движения жидкости в трубопроводе.

Для математического описания системы подачи топлива (рис. 6) принимаются допущения, обычно применяемые в практике расчетов систем подачи топлива [4]:

1. Модуль объемной упругости рабочей жидкости, коэффициент ее вязкости, коэффициент расхода, управляемого золотника, а также давление подачи и слива являются постоянными величинами.

2. Температура жидкости в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется.

3. Гидравлические потери в подводящих магистралях к изделию малы и ими можно пренебречь.

4. Трубопроводы короткие, гладкие, жесткие, что позволяет не учитывать волновые явления.

5. Изменением плотности жидкости при увеличении давления можно пренебречь.

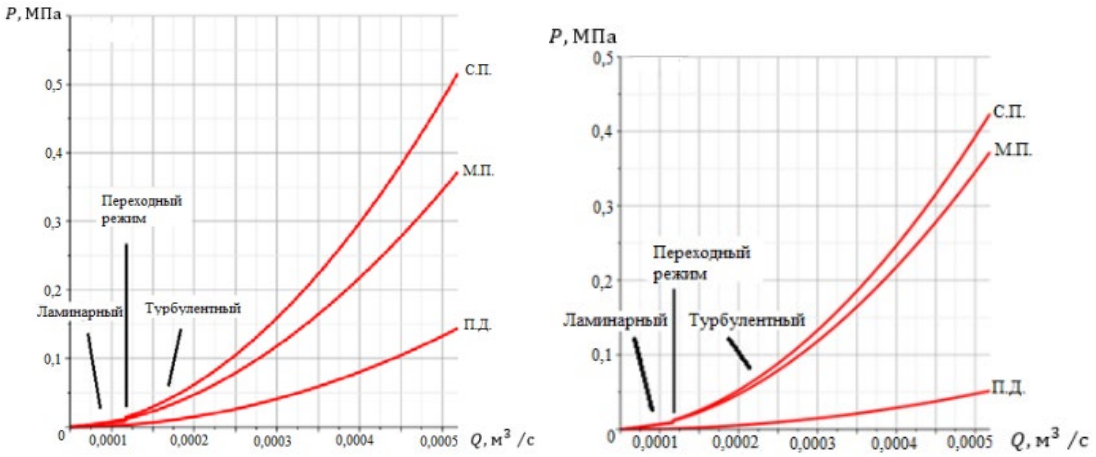


Рис. 5. График гидравлических потерь при номинальной температуре +135°*C*

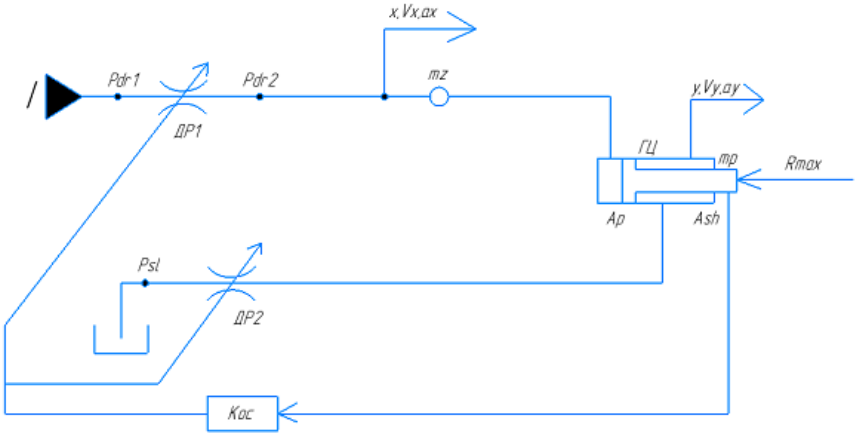


Рис. 6. Расчётная схема контура управления интерцепторами

Уравнения баланса расходов на линии нагнетания гидроцилиндра:

$$\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left(\left|P_n - P_z\right|\right)} = \sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left(\left|P_z - P_{dr1}\right|\right)}\,.$$

Уравнения баланса расходов на линии слива гидроцилиндра:

$$\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left(\left|P_{dr2} - P_{sl}\right|\right)} = \sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot\left(\left|P_z - P_{dr1}\right|\right)}\,.$$

Уравнение баланса сил в линии нагнетания:

$$I_{max}\cdot k_{emp} - c\cdot x_{max} = 0\,.$$

Уравнение баланса сил в линии слива:

$$P_{dr1}\cdot A_p - P_{dr2}\cdot A_{sh} - R_{max} = 0\,.$$

Динамическая математическая модель представляет собой совокупность уравнений, которые описывают изменение параметров системы во времени. Такая модель позволяет учитывать взаимосвязь всех элементов и отражает поведение системы в целом, а не отдельных её частей (рис. 7–9).

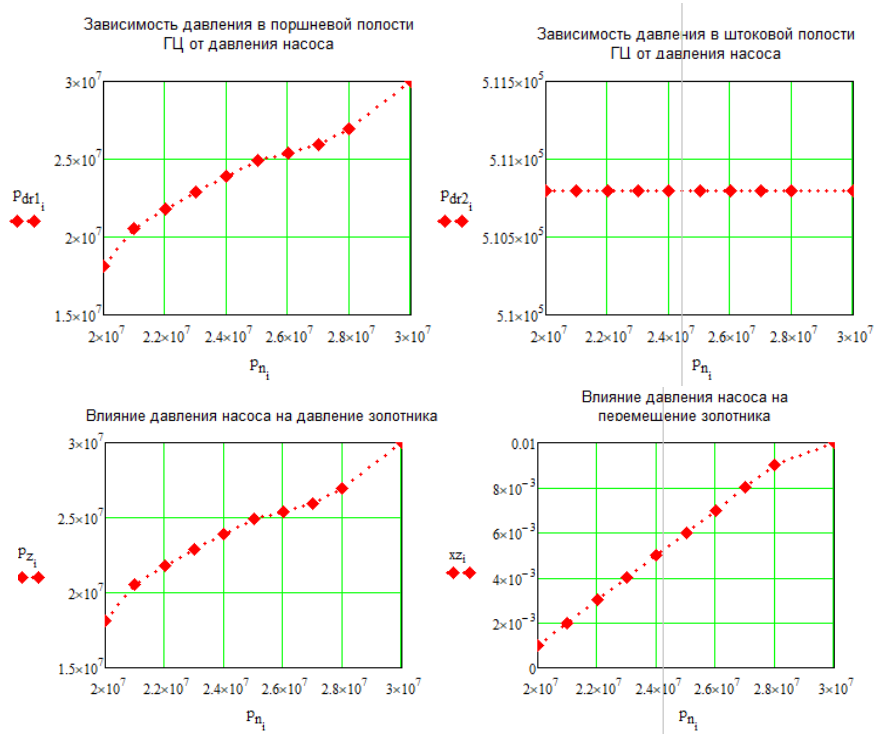


Рис. 7. Графики статической математической модели

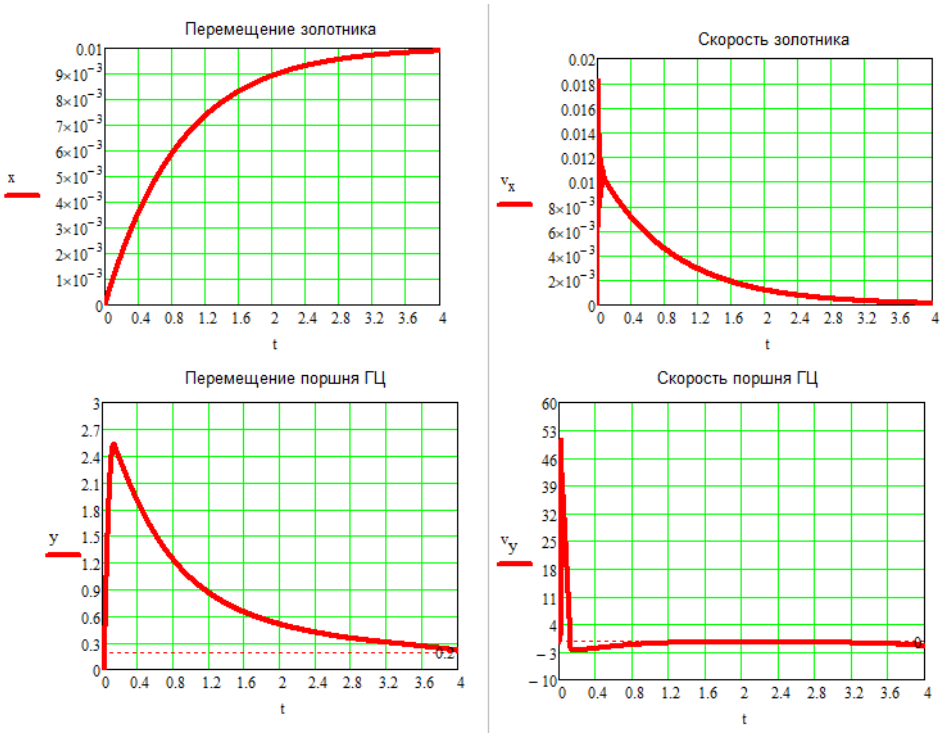


Рис. 8. Графики динамической математической модели

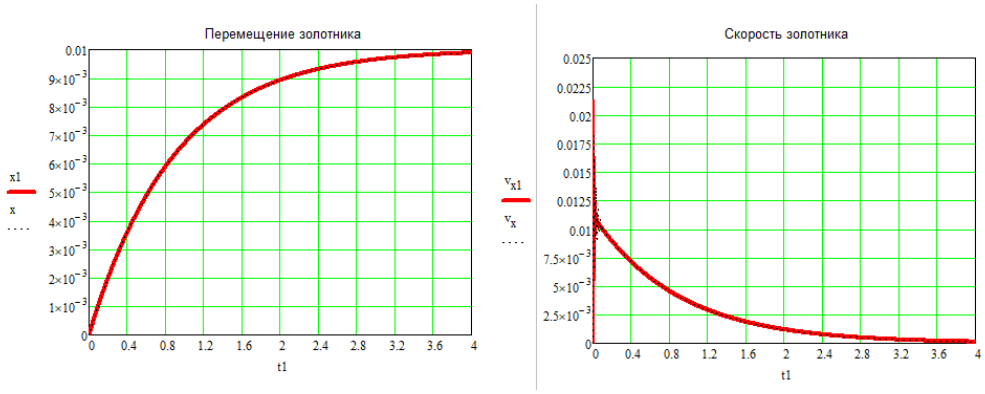


Рис. 9. Графики безразмерной математической модели

Библиографический список

1. Жуковский, Н. Е. Аэродинамика – М.: Наука, 1950. – 800 с. – URL: https://biblioclub.ru.

2. Кудрявцев, И. В. Гидравлические системы летательных аппаратов – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с. – URL: http://irbis.fips.ru:8080.

3. Целищев, В. А. Расчет и проектирование объемного гидравлического привода: учебное пособие [электронный ресурс] / Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа: УГАТУ, 2022 – URL: https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022 79.pdf.

4. Петров, П. В., Калимуллин, Р. Р. Основные принципы автоматизированного проектирования гидравлических систем // Справочник. Инженерный журнал, 2017. – № 9 (246). – С. 33–37.

© Ермошин Е.А., 2026

УДК 656.073.435

Л.В. ЗИМАНОВ
zimanovluka2@gmail.com
Науч. руководд. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ТИПА СТЕКЛОВОЗА «JUMBO» В СОВРЕМЕННОЙ ЛОГИСТИКЕ

Аннотация: в статье рассмотрены особенности применения специализированного подвижного состава типа стекловоза «JUMBO» в современных логистических системах. Определена роль данного типа

подвижного состава в оптимизации логистических цепочек. Рассмотрены особенности погрузки и транспортировки стекловоза.

Ключевые слова: аспекты, стекловоз, специализированный подвижной состав, джамбо, логистическая.

Современные города меняются на глазах. Дома с огромными стеклянными стенами, торговые центры, где потолок это сплошное стекло, всё это стало обычным делом. Но чтобы построить такое здание, нужно сначала привезти на стройку эти гигантские стекла. И это настоящая логистическая задача.

В мире стекла есть понятие «джамбо» (JUMBO). Стекловоз JUMBO в промышленности обозначает самый поставляемый формат листового стекла. Размеры такого стекла составляют 6000 мм в длину и 3200 мм в ширину. В отдельных случаях может достигать до 9–12 метров. Поставляется партиями 20 тонн на специальных грузовых автомобилях для перевозки стекла (стекловоз), которые называются флоатлайнерами или «джамбовозами» [1].

Ниже представлена фото, как выглядит стекловоз для перевозки джамбо-стекла (рис. 1).

Перевозка JUMBO-стекла принципиально отличается от транспортировки стандартных грузов. Главные проблемы, с которыми сталкиваются логисты, включают:

1) Эффект парусности – большая боковая площадь создают значительное аэродинамическое сопротивление, что при порывах ветра может привести к опрокидыванию транспортного средства [2].

2) Прогиб – при недостаточной поддержке концы длинных листов начинают вибрировать и изгибаться во время движения. Для ламинированного стекла это особенно критично, так как может вызвать расслоение PVB-пленки [2].

3) Высокий центр тяжести – длинный лист высотой 3-4 метра на неровной дороге начинает трястись и прогибаться. Если это специальное закалённое или многослойное стекло, вибрация может его испортить ещё до того, как оно доедет до стройки [2].

4) Повреждение покрытия – у современного энергосберегающего стекла есть особое покрытие. Если его случайно поцарапать или просто не так положить, покрытие испортится, и стекло станет обычным [3].

Рис. 1. Стекловоз JUMBO [1]

Обычная фура с открытым верхом тут не подойдёт. Нужен специальный «стекловоз».

Некоторые особенности перевозки стекла на «джамбовозе»:

1. Вертикальная установка – это снижает давление на поверхность стекла и минимизирует риск появления трещин.

2. Низкий центр тяжести – это обеспечивает сохранность перевозимого изделия, так как прицеп не кренит на поворотах и не подвержен раскачиванию на ухабах и неровностях.

3. Защита груза – некоторые модели «джамбовозов» закрытые, груз в них защищён от внешнего воздействия. Если груз перевозится открытым способом, он должен быть специально упакован, но не все методики упаковки подходят для стекла.

4. Рама полуприцепа-стекловоза устроена так, чтобы обеспечивать неподвижность груза – крупных листов стекла. Стекло перевозится в таком прицепе строго в вертикальном положении.

Некоторые особенности конструкции рамы:

1. Фиксация стекла – стекло погружается на раму и фиксируется.

2. Поддерживающие края внутри фургона, на которые «ложится» основание рамы и фиксируется.

3. Специальные механизмы внутри стекловоза, которые полностью обездвиживают стекло. По нажатию кнопки оператором с обеих стенок машины отделяются специальные зажимы, которые надежно защищают груз от перемещений.

4. Тросовая система – обеспечивает дополнительные крепления [4].

Защита от аварий. Инновационные системы безопасности и управления

Работа со стеклом – это всегда риск. Упавшая пачка стекла – это миллионные убытки и опасность для людей. Поэтому современные стекловозы оснащаются «умными» системами безопасности, включающие:

1) защита от падения. Она устроена так, что если у машины откажет гидравлика, сломается насос – стекло не упадёт. Его удержат механические ловушки. Это как двойной ремень безопасности;

2) умные датчики. На стекловозах устанавливаются лазеры и камеры. Они видят препятствия на дорогах, вокруг машины. Если человек или стена окажутся слишком близко, машина сама сбросит скорость или остановится;

3) комфорт для водителя. Комфортная подвеска для перевозки хрупких грузов способствует плавности хода и удобству управления [4].

Экологические аспекты

Современная логистика JUMBO-стекла все больше ориентируется на принципы устойчивого развития. Это выражается в нескольких направлениях:

Переход на электрические и газовые двигатели – снижение выбросов CO_2 и вредных веществ при работе на производственных площадках и в городской среде.

Многооборотная тара – отказ от одноразовой деревянной упаковки снижает количество отходов и вырубку лесов.

Оптимизация маршрутов и обратной загрузки – использование складных конструкций позволяет сократить количество «порожних» пробегов, снижая общий углеродный след перевозок [2].

Особенности транспортировки и погрузочно-разгрузочных работ

Стекловоз JUMBO оснащён пневматической подвеской. Вес прицепа составляет 6150 кг. Средняя длина платформы прицепа 7–8 метров, классическая ширина 2–2,55 метра [5].

При перевозке хрупких материалов необходимо учитывать следующие особенности:

1) стекло перевозится строго в вертикальном положении;

2) полуприцеп-стекловоз является закрытым, груз защищён от внешних воздействий;

3) специальная рама внутри обеспечивает неподвижность груза;

4) погрузка и выгрузка стекла осуществляются с помощью автоматической гидравлической платформы;

5) дополнительную фиксацию обеспечивает тросовая система [5].

Процесс погрузки включает следующие этапы (рис. 2):

1) стекло устанавливается на раму и надёжно фиксируется;

2) рама размещается на открытой площадке;

3) оператор открывает задние двери стекловоза и подаёт автомобиль задним ходом к раме;

4) рама со стеклом оказывается внутри фургона;

5) дно машины поднимается, становясь основанием рамы [5].

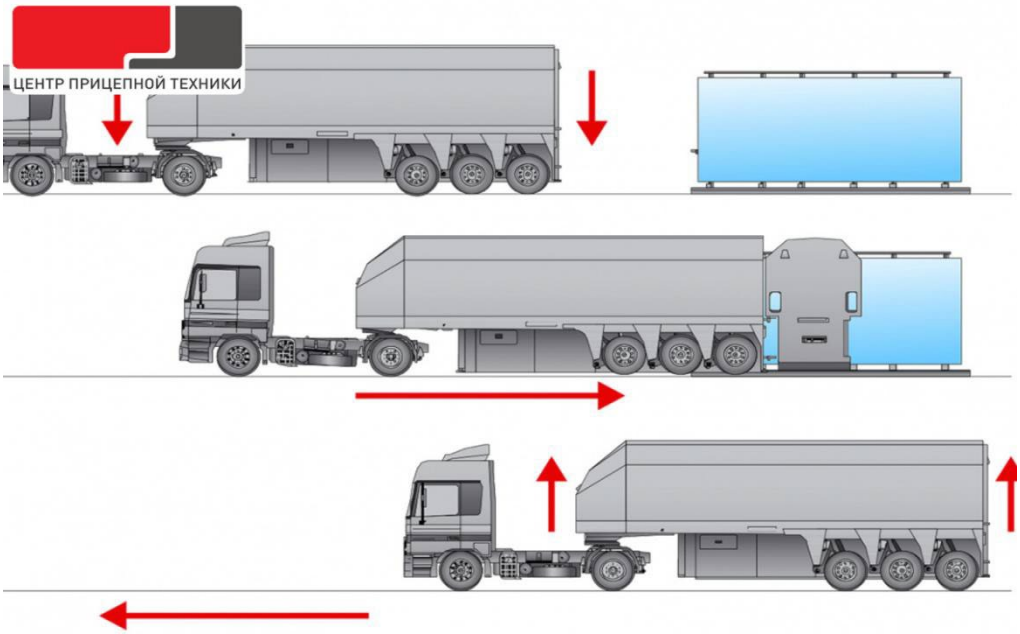


Рис. 2. Стекловоз, погрузка-выгрузка [6]

Разгрузка выполняется в обратном порядке: опускается дно, раскрываются зажимы, стекловоз отъезжает вперёд, оставляя раму со стеклом на земле. Весь процесс погрузки-выгрузки при отлаженной технологии занимает 15–30 минут. Ключевое требование – исключить любые удары, вибрацию и перекосы, которые могут разрушить хрупкое стекло [5].

В статье были рассмотрены особенности стекловоза JUMBO. Грамотный выбор типа полуприцепа, прицепа и оптимального способа погрузки-выгрузки напрямую влияет на сохранность дорогостоящего груза, соблюдение сроков доставки и рентабельность перевозок в целом.

Библиографический список

1. Энциклопедия. ISSN: 2587-9413 терминов, определений и пояснений строительных материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://enciklopediyastroy.ru/%d0%b4%d0%b6%d0%b0%d0%bc%d0%b1%d0%be/ (дата обращения: 23.03.2026).

2. GSRGLASS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://glassstoragerack.com/id/blog/2511-solusi-logistik-untuk-turek-html (дата обращения: 23.03.2026).

3. GSRGLASS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://glassstoragerack.com/es/2602-flat-glass-racks-vs-wooden-crates-for-jumbo-glass#respond (дата обращения 25.03.2026).

4. Типы и размеры транспортных средств для автомобильных перевозок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://breakbulk.com/articles/jumbo-revolutionizes-deckmarking (дата обращения: 23.03.2026).

5. Особенности перевозки крупноформатного стекла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://promtrans-rf.ru/transportirovka-stekla/ (дата обращения: 23.03.2026).
6. Стекловоз инлоудер Langendorf FloatLiner SGL 23 Serie [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://stgroup-cpt.ru/katalog/semi/inloudery/903-steklovoz-inlouder-langendorf-floatliner-sgl-23-serie.html?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения: 25.03.2026).

© Зиманов Л.В., 2026

УДК 621.22:621.879.4

И.Е. КАЛЕДИН
kaledin.ilia@yandex.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГУСЕНИЧНОГО ПОГРУЗЧИКА

Аннотация: В статье рассматривается гидравлическая система гусеничного погрузчика и особенности её проектирования. На основании расчётов разработана принципиальная гидравлическая схема, обеспечивающая работу ходовой части и навесного оборудования машины. Выполнен выбор основных параметров гидропривода, включая характеристики насоса, гидромоторов и исполнительных механизмов. Проведён анализ функционирования системы при различных режимах работы. Разработана математическая модель гидравлической системы, позволяющая оценить её статические и динамические характеристики. Полученные результаты подтверждают работоспособность системы и соответствие заданным техническим требованиям, а также направлены на повышение надёжности и эффективности гидропривода.
Ключевые слова: гусеничный погрузчик; гидравлическая система; гидропривод; аксиально-плунжерный насос; гидромотор; гидроцилиндр; математическая модель; гидравлическая схема; давление; расход рабочей жидкости.

Гусеничный погрузчик представляет собой специализированную строительную машину, предназначенную для выполнения погрузочно-разгрузочных работ в условиях бездорожья и на слабонесущих грунтах. Благодаря высокой проходимости и устойчивости такие машины находят широкое применение при строительстве, землеройных работах, в сельском хозяйстве и при эксплуатации в труднодоступных районах. Основным преимуществом гусеничных погрузчиков по сравнению с колесными аналогами является возможность эффективной работы в сложных условиях, включая сезонную распутицу, неровный рельеф и рыхлые грунты [1].

Гидравлическая система является одним из ключевых элементов конструкции гусеничного погрузчика, определяющим его производительность, надежность и эффективность. За счёт давления рабочей жидкости, создаваемого насосом, осуществляется преобразование энергии двигателя в механическое движение исполнительных механизмов.

Таким образом, актуальной задачей является разработка и расчет гидравлической системы гусеничного погрузчика с учётом требований к надежности, эффективности и функциональности. В рамках данной работы рассматриваются вопросы выбора параметров гидропривода, разработки принципиальной схемы и построения математической модели системы.

Описание конструкции и гидравлической системы гусеничного погрузчика

Гусеничный погрузчик представляет собой сложную техническую систему, включающую ходовую часть, несущую раму, кабину оператора и рабочее оборудование. Ходовая часть выполнена в виде гусеничного движителя, обеспечивающего высокую проходимость и устойчивость машины при работе на слабонесущих и неровных грунтах. Рабочее оборудование включает стрелу и ковш, приводимые в действие гидравлическими цилиндрами. Управление машиной осуществляется из кабины оператора с использованием органов управления, обеспечивающих контроль движения и работы исполнительных механизмов. В разработанной системе применяется аксиально-плунжерный насос с переменной производительностью, обеспечивающий подачу рабочей жидкости под давлением в гидролинии (рис. 1). Использование регулируемого насоса позволяет изменять подачу в зависимости от нагрузки, что повышает энергетическую эффективность системы и снижает потери мощности [2].

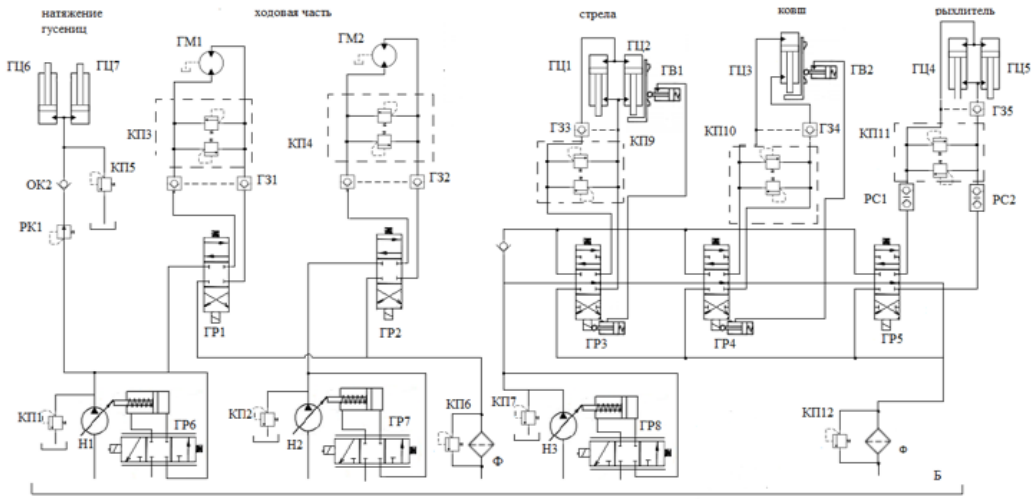


Рис. 1. Схема принципиальная гидравлическая системы гусеничного погрузчика

Состав гидравлической системы включает:

– гидроцилиндры подъема и опускания стрелы;

– гидроцилиндр управления ковшом;
– гидроцилиндры рыхлителя и натяжения гусениц;
– гидромоторы привода гусеничного хода;
– гидрораспределители с электромагнитным управлением;
– предохранительные и обратные клапаны;
– систему фильтрации рабочей жидкости.

Рабочая жидкость из гидробака подается насосом в напорную магистраль и далее поступает в гидрораспределители. В зависимости от положения золотников распределителя поток жидкости направляется к соответствующему исполнительному механизму – гидроцилиндру или гидромотору. При этом осуществляется движение стрелы, ковша, рыхлителя или гусеничного хода. После выполнения работы жидкость возвращается в бак через сливную магистраль, проходя через фильтрующие элементы.

Для защиты системы от перегрузок используются предохранительные клапаны, ограничивающие максимальное давление в гидролиниях. Обратные клапаны предотвращают обратный поток жидкости, а гидрозамки обеспечивают фиксацию положения исполнительных механизмов и предотвращают их самопроизвольное перемещение [3].

Особенностью разработанной гидросистемы является возможность регулирования подачи рабочей жидкости, что позволяет эффективно использовать мощность двигателя, снижать тепловые потери и повышать общий коэффициент полезного действия гидропривода.

Расчёт и выбор основных параметров гидравлической системы

При проектировании гидравлической системы гусеничного погрузчика ключевое значение имеет выбор параметров насосного агрегата, определяющего энергетические характеристики всей системы.

В качестве источника энергии принят регулируемый аксиально-поршневой насос с наклонным диском. Основными исходными параметрами насоса являются: номинальное давление до 20 МПа, максимальная подача 0,003633 м³/с, а также частота вращения приводного вала порядка 30–40 об/с. Коэффициенты полезного действия составляют: объемный КПД – 0,96, механический – 0,93, что обеспечивает высокий общий КПД гидромашины.

Определение параметров насоса производится исходя из требуемой подачи и давления в системе [4]. Теоретическая подача рассчитывается на основе эффективной подачи с учетом объемного КПД, а рабочий объем насоса определяется через частоту вращения приводного вала. В результате расчетов принят диаметр поршня порядка 25 мм (рис. 2).

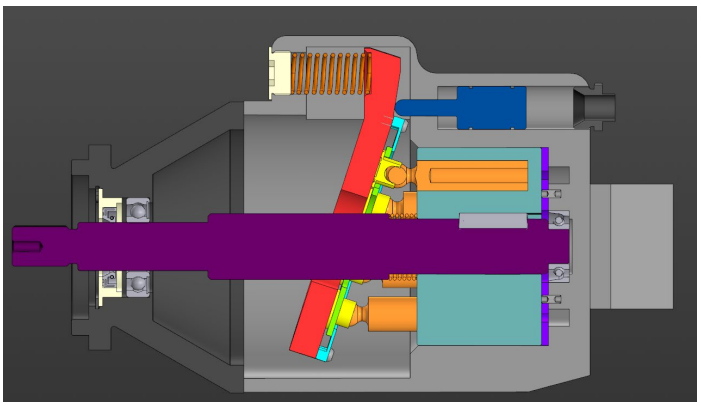


Рис. 2. АПН с наклонным диском

Ниже приведены технические характеристики насоса:

– подача насоса Q=200 л/мин = 0,003633 м^3 /с;

– частота вращения приводного вала, 2400 об/мин = 40 об/с;

– давление насоса P=20 МПа;

– насос переменной производительности с возможностью регулирования рабочего объёма (рис. 3);

– коэффициент полезного действия насоса не менее 0,9;

– КПД гидромеханический не менее 0,93;

– КПД объёмный не менее 0,92.

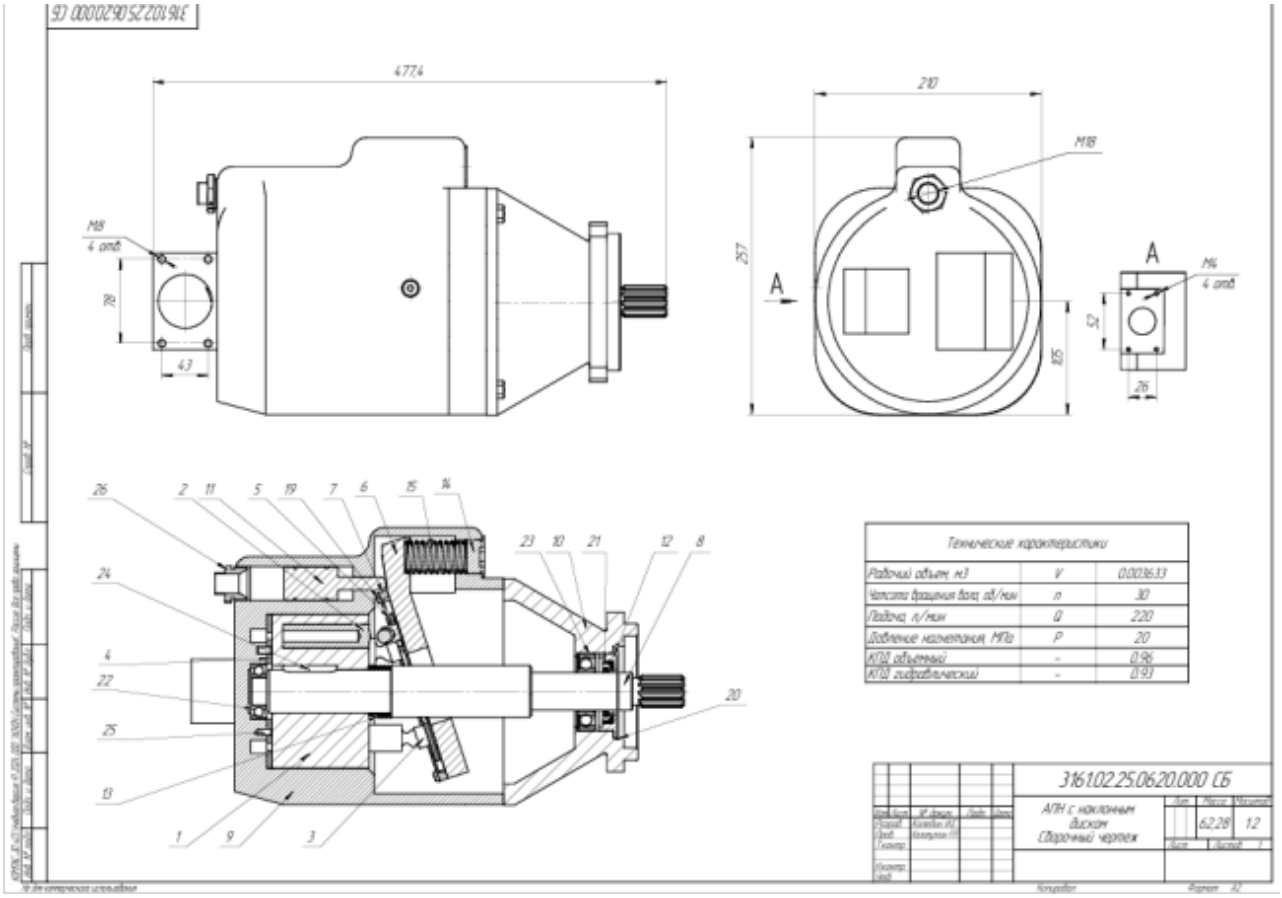


Рис. 3. Сборочный чертеж АПН с наклонным диском

Конструкция аксиально-плунжерного насоса с наклонным диском выполнена таким образом, чтобы обеспечить устойчивую работу при высоких давлениях и минимизировать потери энергии. Применение наклонного диска позволяет преобразовывать вращательное движение приводного вала в возвратно-поступательное движение плунжеров. Это обеспечивает равномерную подачу рабочей жидкости и снижает динамические нагрузки на элементы конструкции. Плунжерная группа насоса работает в условиях высоких давлений, при этом конструкция обеспечивает равномерное распределение нагрузок и уменьшение износа рабочих поверхностей.

Для анализа основных параметров гидропривода разрабатывается математическая модель, в которой отражаются статические характеристики системы [5].

Мощность насоса определяется по формулу:

$$N = P \cdot Q = M \cdot \omega = 16160 \text{ Вт.}$$

По заданной эффективной подаче $Q_{эф}$ определяется теоретическая (расчетная) подача $Q_Т$.

$$q_n = \frac{Q_Т}{n} = \frac{Q_{эф}}{n \cdot \eta_o} = 54.82 \cdot 10^{-6}, \text{м}^3.$$

Статические характеристики строятся с целью обозначения начальных и граничных условий системы (рис. 4–6).

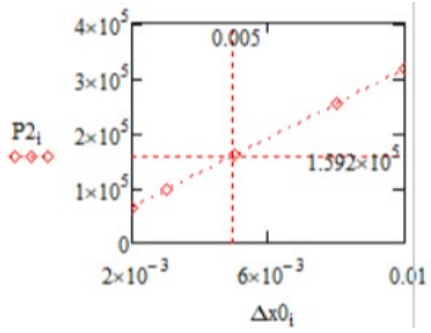


Рис. 4. Влияние перемещения на давление при постоянной пружине

Проанализировав график (рис. 4), получили, что при увеличении перемещения золотника распределителя, растет давление на регуляторе.

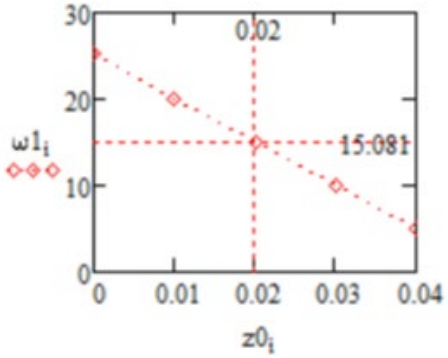


Рис. 5. Влияние перемещения на угловую скорость

Проанализировав график (рис. 5), получили, что при увеличении перемещения угловая скорость уменьшается.

Проанализировав график (рис. 6), получили, что при увеличении момента на гидромоторе растет рабочее давление.

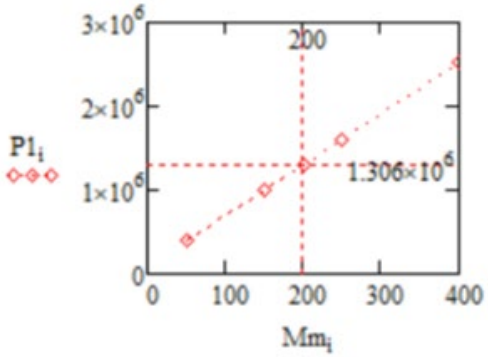


Рис. 6. Влияние момента на гидромоторе на рабочее давление

Далее составляется динамическая модель (рис. 7). Начальные условия берутся из решения статической модели.

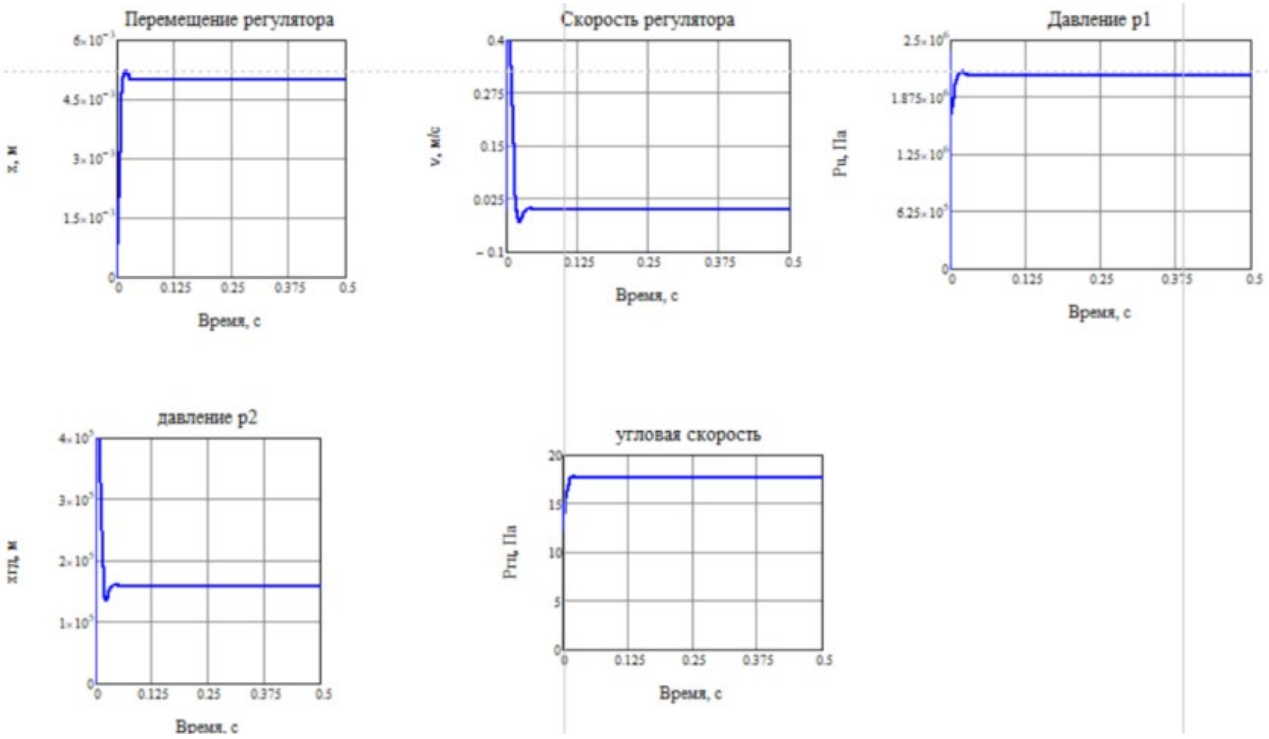


Рис. 7. Динамических характеристик гидромотора, регулятора, насоса

В работе рассмотрена гидравлическая система гусеничного погрузчика и выполнено её проектирование с учетом заданных технических требований. Проведен анализ конструкции и принципа действия гидропривода, обеспечивающего работу ходовой части и навесного оборудования машины.

В ходе работы разработана принципиальная гидравлическая схема, выполнен выбор основных элементов гидросистемы, включая регулируемый аксиально-плунжерный насос, гидромоторы, гидроцилиндры и

распределительную аппаратуру. Разработана математическая модель гидропривода, позволяющая оценить статические характеристики системы и определить её рабочие режимы. Таким образом, спроектированная гидравлическая система обеспечивает устойчивую и эффективную работу гусеничного погрузчика, а применение регулируемого насоса позволяет повысить энергетическую эффективность и снизить потери в системе.

Библиографический список

1. Башта, Т. М. Объёмные гидравлические приводы летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1968. – 628 с.
2. Кондаков, Л. А., Прокофьев, В. Н. Машиностроительный гидропривод. – М.: Машиностроение, 1978. – 495 с.
3. Вильнер, Я. М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. – Минск: Высшая школа, 1976. – 96 с.
4. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. – М.: Машиностроение, 1979.
5. ГОСТ 17411–91. Гидроприводы объемные. Общие технические требования.

© Каледин И.Е., 2026

УДК 621.438:629.3.063.7

А.В. КИРЬЯНОВ
Artemkirianov@list.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. С.Ю. КОНСТАНТИНОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГИДРОПРИВОДА МАШИНЫ АВТОКРАНА

Аннотация: в статье рассматривается модернизация привода автокрана путём замены нерегулируемого насоса на регулируемый. Предложен новый тип насоса с новой схемой привода с регулируемым насосом, разработана математическая модель гидропривода.
Ключевые слова: автокран; регулируемый насос; надежность; математическая модель; характеристика; гидравлика.

Гидравлические системы современных автокранов должны обеспечивать высокую точность и плавность выполнения рабочих операций, особенно при подъёме тяжёлых грузов и позиционировании стрелы в стеснённых условиях. Модель КС-55713 грузоподъёмностью 25 тонн широко применяется для

погрузочно-разгрузочных и строительно-монтажных работ на рассредоточенных объектах, что предъявляет повышенные требования к управляемости гидропривода и его энергоэффективности. В классических схемах гидросистемы автокранов часто применяются нерегулируемые насосы постоянной подачи и комбинированное регулирование скоростей гидродвигателей, которое производится изменением частоты вращения коленчатого вала двигателя шасси и дросселированием потока в гидрораспределителях. Такой подход приводит к избыточным потерям мощности и повышенному тепловыделению [1].

В рамках модернизации гидропривода автокрана КС-55713 (рис. 1) предлагается заменить нерегулируемый аксиально-поршневой насос на регулируемый аксиально-поршневой насос с электромагнитным управлением. Привод крановой установки осуществляется от двигателя базового автомобиля через коробку отбора мощности и может быть реализован по двухнасосной схеме. Такая модернизация позволяет обеспечить адаптивную подачу масла в зависимости от текущей нагрузки на гидросистему, исключить дросселирование на предохранительном клапане, настроенном на давление 14–16 МПа, и замедлить разогрев рабочей жидкости. Внедрение регулируемого насоса также повышает точность поддержания давления при телескопировании секций стрелы и вращении поворотной платформы.

Рис. 1. Автокран КС-55713-1к

КС-55713-1к – это автомобильный кран грузоподъёмностью 25 тонн, предназначенный для погрузочно-разгрузочных, строительно-монтажных и ремонтных работ. Кран выполнен на трёхосном шасси, оснащён четырёхсекционной телескопической стрелой длиной до 30 метров. Масса крана в транспортном положении составляет около 22 тонн, длина – более 11 метров [2].

Изначально гидросистема данного крана комплектовалась зарубежным насосным оборудованием, но в силу текущей ситуации в стране требуется замена на оборудование отечественного производства. На данный автокран в качестве основного насоса гидросистемы применялся нерегулируемый аксиально-поршневой насос серии T6 от Parker (аналогично применялись насосы Bosch Rexroth). Дальнейшая эксплуатация такого насоса связана с рисками из-за трудностей с подбором запчастей, поэтому замена на новое оборудование отечественного производства имеет больший смысл. В качестве замены насоса гидросистемы для автокрана КС-55713 предложен регулируемый аксиально-поршневой насос российского производства с электромагнитным управлением.

Для построения гидравлической схемы составлено техническое задание:

– усилие для подъема и опускание стрелы – 80 кН;

– скорость для подъема и опускание стрелы – 0,65 м/с;

– усилие для перемещения стрелы – 70 кН;

– давление гидросистемы – 21 МПа;

– температура рабочей жидкости от -45 до +70°С;

– тонкость фильтрации жидкости – от 10 мкм.

С учётом новых требований к регулируемой объемной гидромашине составлена принципиальная гидравлическая схема системы автокрана (рис. 2).

Выбран регулируемый аксиально поршневой насос с регулятором давления прямого действия. Изменение эксцентриситета насоса происходит в зависимости от нагрузки выходного звена, при максимальной нагрузке эксцентриситет максимальный.

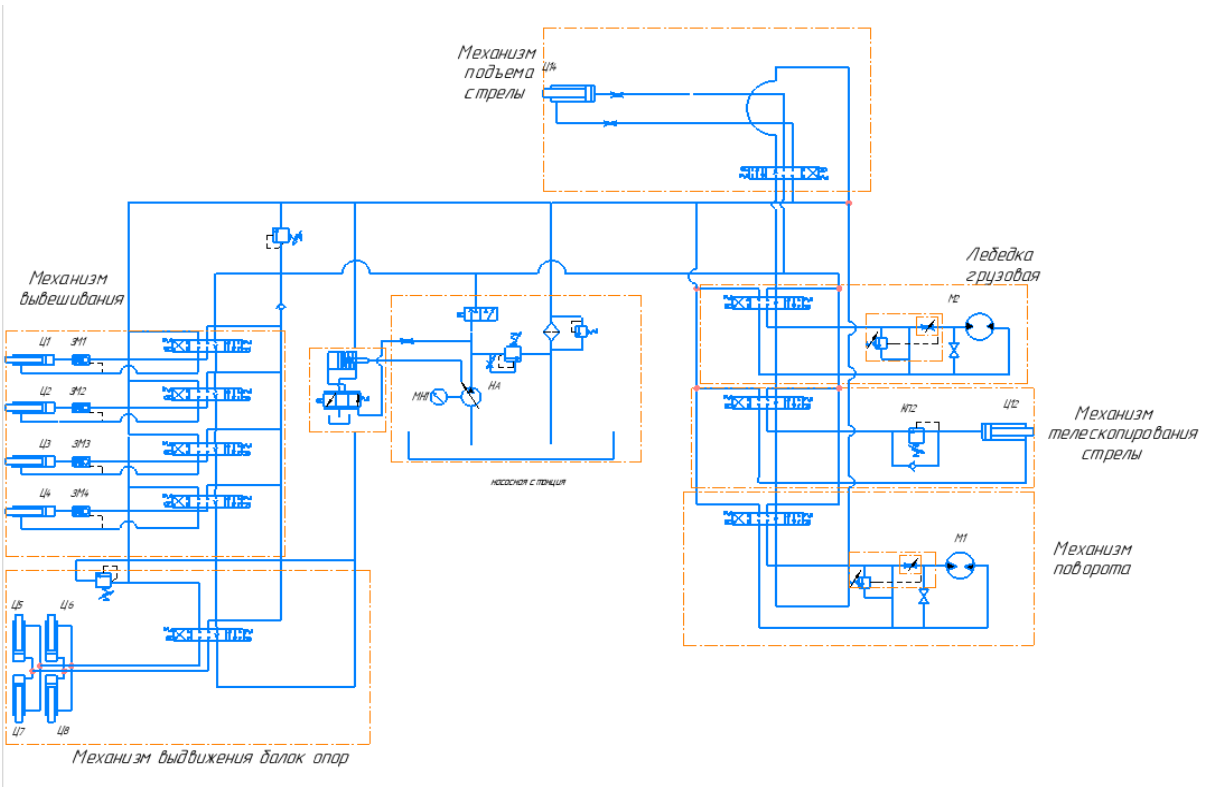


Рис. 2. Схема принципиальная гидравлическая системы автокрана

Ниже приведены технические характеристики насоса (рис. 3):

– подача насоса Q=120 л/мин = 0,002 м^3 /с;

– частота вращения приводного вала, 1500 об/мин = 25 об/с;

– давление насоса P=21 МПа;

– пульсация подачи насоса не более 7 %;

– насос переменной производительности должен иметь возможность регулировать характерный рабочий объём;

– насос может быть реверсивным;

– коэффициент полезного действия насоса не менее 0,9;

– КПД гидромеханический не менее 0,93;

– КПД объёмный не менее 0,95.

Наклон диска относительно радиального направления даёт ей кинематическое преимущество: при вращении она скользит по поверхности статора под небольшим углом, что уменьшает поперечные силы на кромки диска, снижает ударные контакты и обеспечивает более плотное прилегание к стенке рабочей камеры.

Для анализа основных параметров гидропривода составляется математическая модель, в которой отражаются статические характеристики [1].

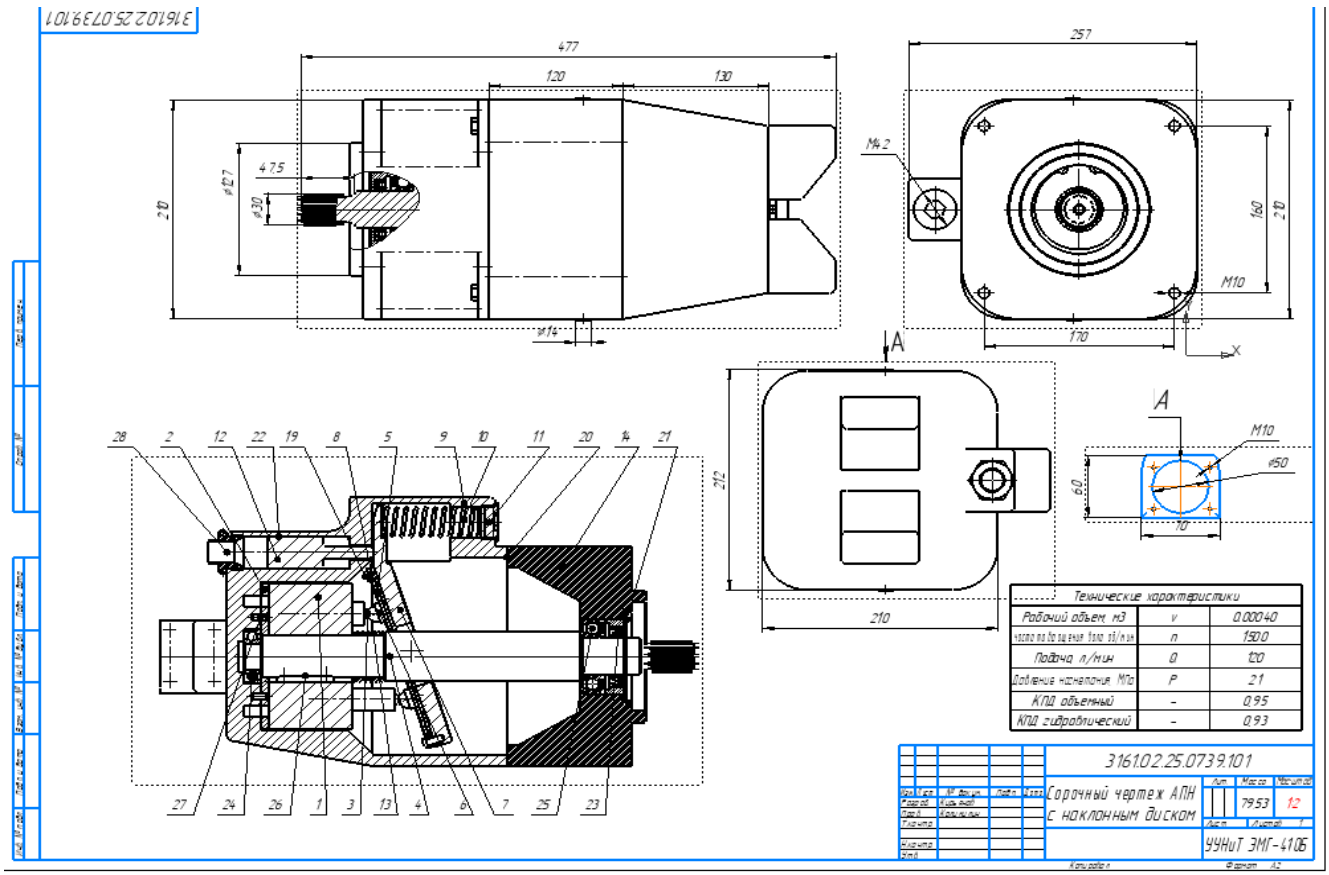


Рис. 3. Сборочный чертеж аксиально-плунжерного насоса

Баланс сил на гидроцилиндре:

$$p_n \cdot F_p - p_{sl} \cdot F_{sht} - R = 0. \qquad (1)$$

Расход насоса:

$$Q_n = \mu \cdot f_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_n - P_d|}{\rho}}. \qquad (2)$$

Баланс расходов через золотник и дроссель:

$$\mu \cdot f_d \sqrt{\frac{2 \times |P_n - P_d|}{\rho}} - \mu \cdot b \cdot x_0 \sqrt{\frac{2 \cdot |P_n - P_3|}{\rho}} = 0. \qquad (3)$$

Баланс сил на сервопоршне:

$$P_3 \times F_{sp} - C_{sp} \times y_{sp} = 0. \qquad (4)$$

В результате были получены расчётные параметры: $x_0 = 7.585 \times 10^{-3}$, $y_{sp} = 1.963 \times 10^{-3}$, $P_n = 1.617 \times 10^7$, $P_d = 1.213 \times 10^7$

Статические характеристики строятся с целью обозначения начальных и граничных условий системы (рис. 4, 5).

Диаметр штока гидроцилиндра не влияет на давление на входе в регулятор.

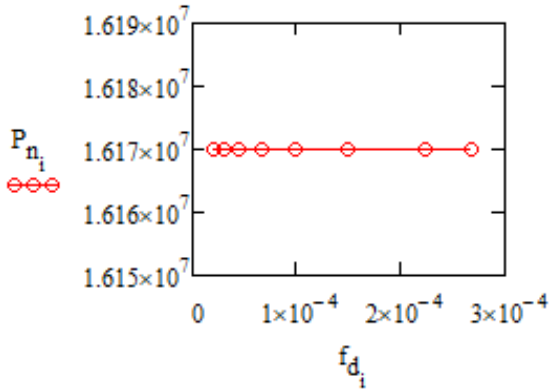


Рис. 4. Зависимость давления в штоковой полости гидроцилиндра от площади дросселя

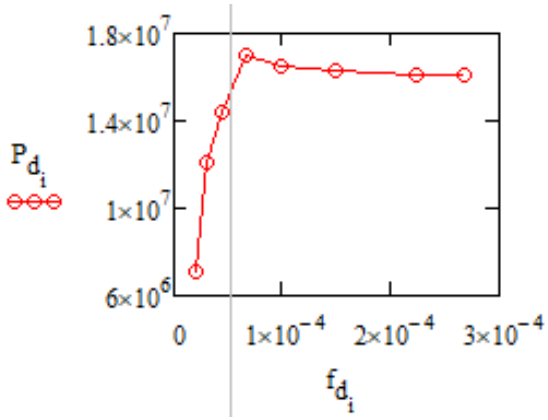


Рис. 5. Зависимость давления на входе в регулятор от диаметра дросселя

Далее составляется динамическая модель, выписываем основные уравнения контура гидроподъема:

– уравнение движения гидроцилиндра:

$$M \cdot \frac{d^2}{dt^2}(t) = F_p \cdot P_n(t) - F_{sht} \cdot P_{sl} - k_{v1} \cdot \frac{dy}{dt}(t) - R \quad (5)$$

– уравнение неразрывности для гидроцилиндра и золотника:

$$\frac{V}{E} \cdot \frac{dP_{n(t)}}{dt} = Q_n \cdot \frac{(\gamma - \Delta y_{sp})}{\gamma} - \mu \cdot f_d \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}|P_n(t) - P_d(t)|} - F_p \cdot \frac{dy(t)}{dt} \quad (6)$$

– уравнение неразрывности для сервопоршня и золотника:

$$\frac{V}{E} \cdot \frac{dP_d(t)}{dt} = \mu \cdot f_d \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}|P_n(t) - P_d(t)|} - \mu \cdot (x_0 - \frac{F_z \cdot P_d}{C_z} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}|P_n(t) - P_3|} - F_{sp} \quad (7)$$

– уравнение движения гидроцилиндра:

$$m_{sp} * \frac{d^2 y_{sp}(t)}{dt^2} = P_3 * F_{sp} - C_{sp} * (y_{sp}(t) + \Delta y_{sp}) - k_{v1} \times \frac{dy}{dt}(t) \quad (8)$$

Далее рассмотрим характерные переходные процессы

$$x_z = f(t), v_{xz} = f(t), y_p = f(t), v_y = f(t), k = f(t), v_k = f(t).$$

Динамические характеристики привода представлены на рис. 6.

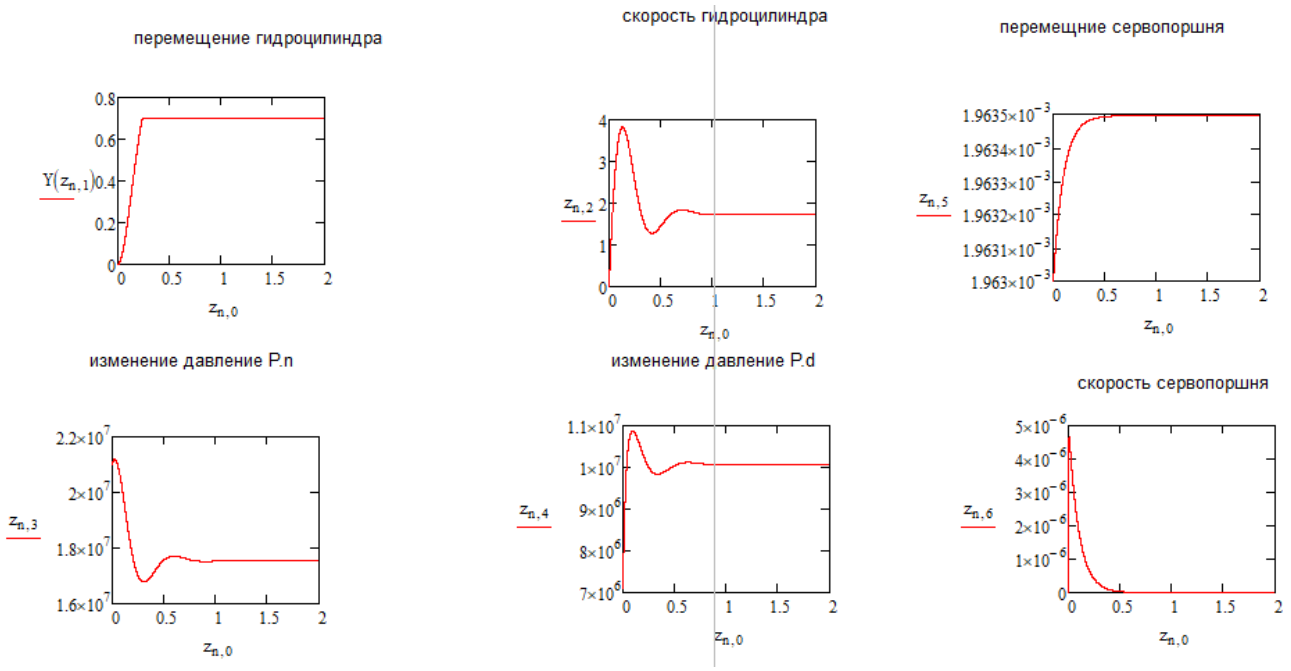


Рис. 6. Динамические характеристики привода

В заключении хочется отметить, модернизация системы автокрана позволила за счёт быстродействия регулятора давления. Характеристики насоса подобраны таким образом, чтобы безотказно работать и точность регулирования позволит приподнимать стрелу без гидравлических потерь. Тонкая регулировка системы с регулируемым насосом более энергоэффективна в сравнении с нерегулируемым насосом, где были большие потери на сливе избытка рабочей жидкости и тепловые потери, которые снижали качество рабочей жидкости.

Библиографический список

1. Башта, Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.

2. Голубчикова, Е. М. Силовые факторы в механизме аксиально-поршневой гидромашины с наклонным диском / Е. М. Голубчикова, Ю. А. Андреевец // Материалы докладов 57-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. – Витебск: ВГТУ, 2024. – Т. 2. – С. 392–394.

© Кирьянов А.В., 2026

УДК 656.025.4

А.А. КОЛПАКОВ
Aak505795@gmail.com
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ВЕДОМЫМ АВТОПИЛОТИРУЕМЫМ ЗВЕНОМ В РЕГИОНАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ

Аннотация: замещение второго водителя в автоколонне системой автономного управления (третий уровень SAE)-технологическая предпосылка, рассматриваемая в статье. Предложена гибридная конфигурация «лидер-ведомый»: пилотируемый тягач SHACMAN X6000 (дизель Weichai, 480 л. с.) и беспилотный КАМАЗ-54901 «Маяк» с лидаром, радаром и техническим зрением; выбор сделан на основе анализа маршрута Уфа – Стерлитамак.
Ключевые слова: гибридная логистическая система; беспилотный седельный тягач; колонновождение V2V; технология «плато-ing»; уровень автономности 3; КАМАЗ-54901; SHACMAN X6000; цифровой двойник трассы.

Устойчивый дефицит водителей магистральных грузовых автомобилей в Республике Башкортостан вкупе с повышением стоимости дизельного топлива (прирост за осенне-зимний период 2025–2026 гг. составил, по оперативным данным участников рынка, порядка 11 %) создаёт нетривиальную задачу для региональных операторов. Обычные меры – увеличение заработной платы или пересмотр тарифов в сторону удорожания для клиента – далеко не всегда работоспособны в условиях высокой конкуренции на коротком плече Уфа – Стерлитамак. Здесь мы сталкиваемся с ситуацией, при которой стандартное решение «тягач + прицеп + два водителя-сменщика» перестаёт быть рентабельным. Возможный выход, и это отнюдь не гипотетический сценарий, а апробированный за рубежом подход – перевод части подвижного состава в категорию высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) с организацией движения в колонне по схеме «один пилотируемый тягач + один ведомый беспилотный» [1]. Парадоксальным образом, при всей кажущейся сложности, именно такая гибридная конфигурация позволяет снизить долю

фонда оплаты труда в структуре себестоимости рейса практически вдвое, сохранив при этом объём перевозимой партии груза (два автопоезда суммарной грузоподъемностью до 44 т) [2]. В технологическом плане концепция базируется на стандартах межмашинного взаимодействия Vehicle-to-Vehicle (V2V), где ведущее транспортное средство транслирует ведомому параметры своего движения – 1 скорость, продольное и поперечное ускорение, углы поворота рулевых колёс, а также сигналы экстренного торможения [1; 3]. С практической точки зрения для предприятия ООО ТК «АльфаТрансМастер», эксплуатирующего в том числе китайские магистральники, было критичным сохранить преемственность в ремонтной базе и подготовке кадров. Поэтому пилотируемый тягач нами принят на основе SHACMAN X6000 (двигатель Weichai WP13 мощностью 480 л. с., трансмиссия ZF Traxon, пневматическая подвеска всех мостов), уже зарекомендовавший себя на рейсах с полной массой 44 тонны и обеспечивающий средний расход топлива порядка 32 л/100 км при соблюдении скоростного режима 85-90 км/ч [4, 6].

Роль ведомого БАТС отведена модели КАМАЗ-54901 «Маяк» (версия «Маяк-2»), причём выбор этот не случаен. Тягач соответствует третьему (по классификации SAE) уровню автономности: управление возможно в штатном режиме без участия водителя, однако при нештатных метеоусловиях (снегопад, обледенение сенсоров) или потере спутникового сигнала система передаёт управление оператору, находящемуся в ведущей машине [2, 3]. Стоит особо подчеркнуть, что «Маяк-2» оснащён резервированным набором средств восприятия: четыре лидара (дальность до 200 м), семь радаров миллиметрового диапазона и две стереокамеры высокого разрешения; вычислительный блок АСУД дублирован на уровне «электронного черного ящика», фиксирующего все параметры движения с частотой не менее 20 Гц [2].

Меньше всего хотелось бы впадать в технократический оптимизм, однако статистика испытаний на трассе М-11 «Нева» (беспилотный пробег Natcar превысил 2 млн км) показывает, что частота отказов систем управления не превышает одного эпизода на 15 тысяч км автопробега, что для плеча «Уфа – Стерлитамак – Уфа» (145 км в одну сторону) даёт вероятность безаварийного движения более 99,9 % [3]. Ключевой вопрос при проектировании гибридного звена – физическая дистанция между тягачами и алгоритм реагирования на «вклинивание» стороннего автомобиля.

В корейском эксперименте Hyundai Motor (тягачи Xcient) дистанция в режиме Platooning устанавливалась на уровне 16,7 м, что обеспечивало снижение аэродинамического сопротивления на 8–12 % и, соответственно, экономию топлива; при обнаружении автомобиля, перестраивающегося между звеньями колонны, система автоматически увеличивала интервал до 25-30 м [5]. Почему это существенно для нашего маршрута? Трасса Уфа – Стерлитамак (участок федеральной автодороги Р-240) характеризуется неравномерной интенсивностью: в часы пик (07:30–09:30 и 17:00–19:00) плотность потока достигает 1 200 авт./час, и постоянное «резание» колонны легковыми автомобилями неизбежно. Следовательно, простая фиксация короткой

дистанции неприменима – требуется адаптивный алгоритм, опирающийся на данные радаров бокового обзора. В работе мы закладываем два режима: «магистральный» (дистанция 25 м, активируется при устойчивом движении свыше 3 минут без смены полосы) и «городской/плотный поток» (дистанция динамическая в диапазоне 30–45 м с уменьшением жёсткости сцепления) [5]. Отдельного комментария заслуживает номенклатура груза – сухие строительные смеси и тарированная известь, перевозимые в биг-бэгах по 1 000 кг на поддонах 1 200×800 мм. Казалось бы, груз неприхотливый, но здесь скрывается подводный камень: при движении в колонне с короткой дистанцией возрастает частота циклов «разгон-торможение» (ведомый тягач вынужден повторять микроимпульсы акселерации лидера), что может привести к смещению грузовых единиц относительно паллетной решетки. Проведённый нами расчёт устойчивости (коэффициент трения резина-дерево – 0,45, максимальное продольное ускорение в режиме автоследования – 1,2 м/с²) показывает, что без дополнительных прижимных ремней не обойтись, причём требуется минимальное число точек крепления – не менее шести на каждый ряд биг-бэгов [1].

В противном случае (сценарий с двумя фиксаторами) вероятность продольного смещения достигает 0,15 при экстренном торможении с 5 м/с², а это уже прямые потери груза. Экономическая логика внедрения для парка из десяти гибридных звеньев выглядит следующим образом (табл. 1). Традиционная схема: два пилотируемых автопоезда, два водителя-междугородника (зарплата с отчислениями – 185 тыс. руб. на машину в месяц), расход топлива на 100 км – 64 л суммарно. Гибридная схема: один водитель-оператор (оклад 125 тыс. руб., так как требуется допуск к управлению ВАТС и навыки мониторинга телеметрии), второй экипаж исключён. Расход топлива за счёт «воздушного мешка» снижен на 14 % (до 55 л на 100 км в пересчёте на совокупную массу двух автопоездов). Экономия на топливе для одного рейса (290 км туда-обратно) достигает 1 250 руб., на заработной плате после учёта страховых взносов – 5 200 руб.

Таблица 1

Сравнительная калькуляция себестоимости рейса (данные усреднённые за IV кв. 2025 г.)

Статья затрат	Два пилотируемых автопоезда	Гибридное звено (1 пилот + 1 ВАТС)	Отклонение, ±
ФОТ с начислениями, руб.	10 850	4 750	-6 100
Топливо (ДТ), руб.	12 150	10 450	-1 700
Амортизация тягачей (линейный метод), руб.	4 850	5 620	+770
ТО и ремонт (включая	2 650	3 450	+800

Статья затрат	Два пилотируемых автопоезда	Гибридное звено (1 пилот + 1 ВАТС)	Отклонение, ±
калибровку сенсоров), руб.			
Итого себестоимость рейса, руб.	30 500	24 270	-6 230
Себестоимость 1 т·км, руб.	4,68	3,72	-0,96

Противоположная сторона медали – капитальные затраты: оснащение одного тягача «Маяк» системой V2V и набором сенсоров обходится в 3,8 млн руб. (с учётом монтажа и калибровки), дооснащение трассы элементами V2I – примерно 1,2 млн на километр (светоотражающие маяки, станции ретрансляции CAN-шины) [2, 3]. Однако, если ориентироваться только на текущий маршрут, установка дорожной инфраструктуры не требуется – достаточно бортовых радаров [3].

Таким образом, прямое снижение эксплуатационных затрат на рейс составляет 20,4 % – цифра, которая, согласитесь, выглядит более чем убедительной для принятия инвестиционного решения. Однако срок возврата вложений (с учётом удорожания ВАТС на 3,8 млн относительно базового КАМАЗ-54901 без «автопилота») для одного гибридного звена – примерно 28 месяцев, что для транспортного бизнеса скорее много [2, 3]. Но при масштабировании на десять звеньев и использовании лизинга со ставкой 12% годовых период окупаемости сокращается до 19 месяцев (за счёт уменьшения доли условно-постоянных расходов на администрирование и обучение). И ещё одно важно обстоятельство: постановка на учёт и допуск к движению ВАТС на дорогах общего пользования регулируются экспериментально-правовым режимом (Постановление Правительства РФ № 899), который действует как раз на трассах I и II категорий – наш маршрут Уфа – Стерлитамак соответствует этим требованиям по ширине полосы (3,75 м) и наличию металлического барьерного ограждения [3].

Резюмируя всё вышесказанное, можно утверждать, что гибридная конфигурация «один пилотируемый SHACMAN X6000 + один беспилотный КАМАЗ-54901 «Маяк-2», организованных по принципу V2V-колонны с дистанцией 25-45 м, является технически реализуемой и экономически оправданной для регионального маршрута Уфа – Стерлитамак. Сдерживающий фактор – инерция нормативной базы и отсутствие у инспекторского состава ГАИ методик проверки исправности систем автономного управления на линии (пока они не прописаны в Административном регламенте) [3].

Тем не менее, практика М-11 показывает, что институциональные барьеры преодолимы [3]. Дальнейшие направления исследований связаны с оценкой точности позиционирования в условиях отсутствия дифференциальной

коррекции (сценарий потери сигнала). Статьи затрат: два пилотируемых автопоезда, гибридное звено (1 пилот + 1 ВАТС), отклонение, амортизация тягачей (линейный метод) – 4 850 5 620 руб., +770 ТО и ремонт (включая калибровку сенсоров), 2 650 3 450 +800 руб. Итого себестоимость рейса, 30 500 24 270 -6 230 руб. Себестоимость 1 т·км, 4,68 3,72 -0,96 руб. разработкой каскадного графика переключения режимов «лидер-ведомый» между парком машин, что необходимо для снижения усталости того самого оставшегося в кабине водителя-оператора.

Библиографический список

1. Басаргин, А. А. Методы искусственного интеллекта в системах управления автопоездом : учебное пособие / А. А. Басаргин. – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – 164 с.

2. КАМАЗ представил беспилотный грузовик «Маяк-2» [Электронный ресурс] // Российский союз промышленников и предпринимателей. – 2025. – Режим доступа: https://rspp.ru (дата обращения: 02.05.2026).

3. Почему беспилотные грузовики пока не переворачивают логистику? [Электронный ресурс] // АТИ, Центр: Система грузоперевозок. – 2025. – Режим доступа: https://news.ati.su (дата обращения: 02.05.2026).

4. Закурдаев, К. Шикарная кабина и почти полтысячи лошадей: обзор китайского тягача Shacman X6000 [Электронный ресурс] // 5 Колесо. – 2023. – Режим доступа: https://5koleso.ru (дата обращения: 02.05.2026).

5. Самоуправляемые грузовики Hyundai [Электронный ресурс] // AV-service.ru. – 2019. – Режим доступа: https://av-service.ru (дата обращения: 02.05.2026).

6. Магистральный тягач Shacman X6000 – некоторые особенности конструкции [Электронный ресурс] // Рейс.РФ. – 2026. – Режим доступа: https://reis.zr.ru (дата обращения: 02.05.2026).

© Колпаков А.А., 2026

УДК 631.356.46:621.22

Ю.И. КУДАЯРОВА
yulia16092003@icloud.com
Науч. руководитель – д-р техн. наук, проф. В.А. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Аннотация: в статье рассматривается модернизация гидравлической системы картофелеуборочного комбайна, предназначенной для использования в сельскохозяйственной отрасли.
Ключевые слова: комбайн, гидравлическая система, сельское хозяйство, картофель, гидравлический расчет, гидравлические потери, насос, трубопровод, механизированный сбор.

Картофель является стратегически важным продуктом потребления в России. По производству картофеля Россия занимает четвертое место в мире. По данным Росстата, в 2025 году в РФ собрали 19,5 млн. тонн картофеля. Картофелеуборочные комбайны – это специализированная сельскохозяйственная машина, предназначенная для уборки картофеля с поля. Комбайн обеспечивает извлечение клубней из почвы, очищает от земли и ботвы, сортирует и загружает в транспортное средство (рис. 1).

Рис. 1. Картофелеуборочный комбайн Grimme Varitrom 470

Практика эксплуатации картофелеуборочных комбайнов условиях реального сельскохозяйственного производства выявляет устойчивую проблему в работе гидравлического оборудования. Одной из них является наличие в личных фермерских хозяйствах комбайны отечественного производства серии КПК-3 и его аналоги, гидравлические системы которых на данный момент являются устаревшими.

Гидросистемы отечественных комбайнов базируются на дроссельном оборудовании, обладая низкой энергоэффективностью (потери на дросселировании достигает 30-40% подводимой мощности), а также отсутствие плавного регулирования скоростей рабочих органов. Такие системы не соответствуют современным техническим требованиям [1].

Главной задачей стоит в необходимости модернизации гидравлических систем картофелеуборочных комбайнов (рис. 2).

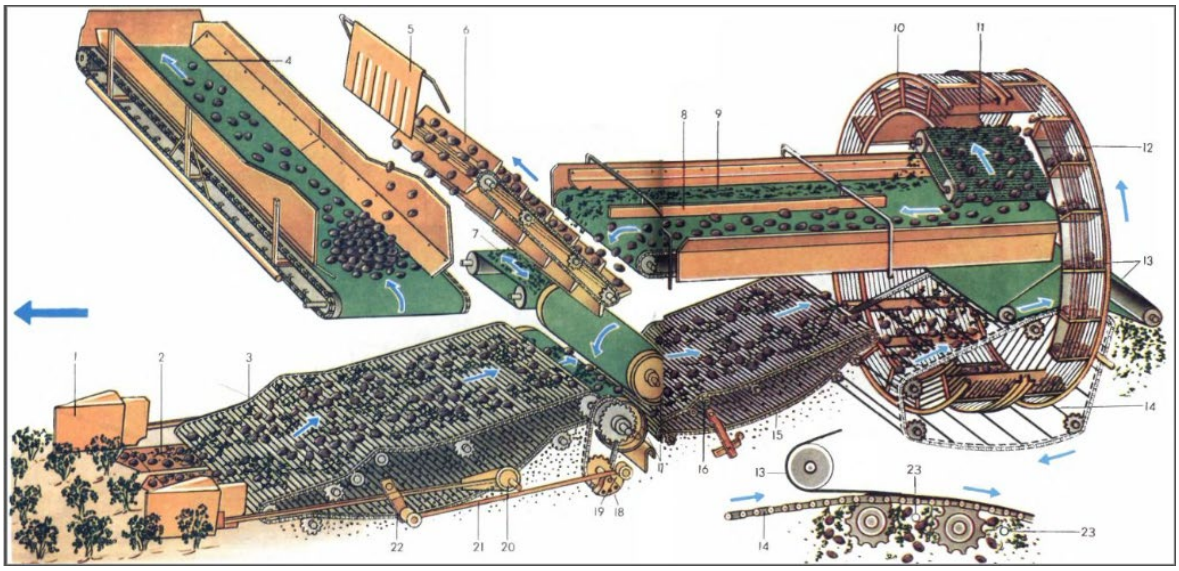


Рис. 2. Схема рабочей части картофелеуборочного комбайна

Основные пути модернизации:

– повысить надежность и ресурс гидравлического оборудования в специфичных условиях уборки картофеля;

– улучшить энергоэффективность гидропривода за счет внедрения современных методов регулирования;

– обеспечить адаптацию режимов работы рабочих органов к изменяющимся условиям окружающей среды.

В условиях импортозамещения и перехода на отечественную компонентную базу, актуальным становится вопрос внедрения и разработки гидравлических систем российского производства, что снижает зависимость от иностранных поставок в условиях санкций.

Разработана новая принципиальная гидравлическая схема системы картофелеуборочного комбайна (рис. 3).

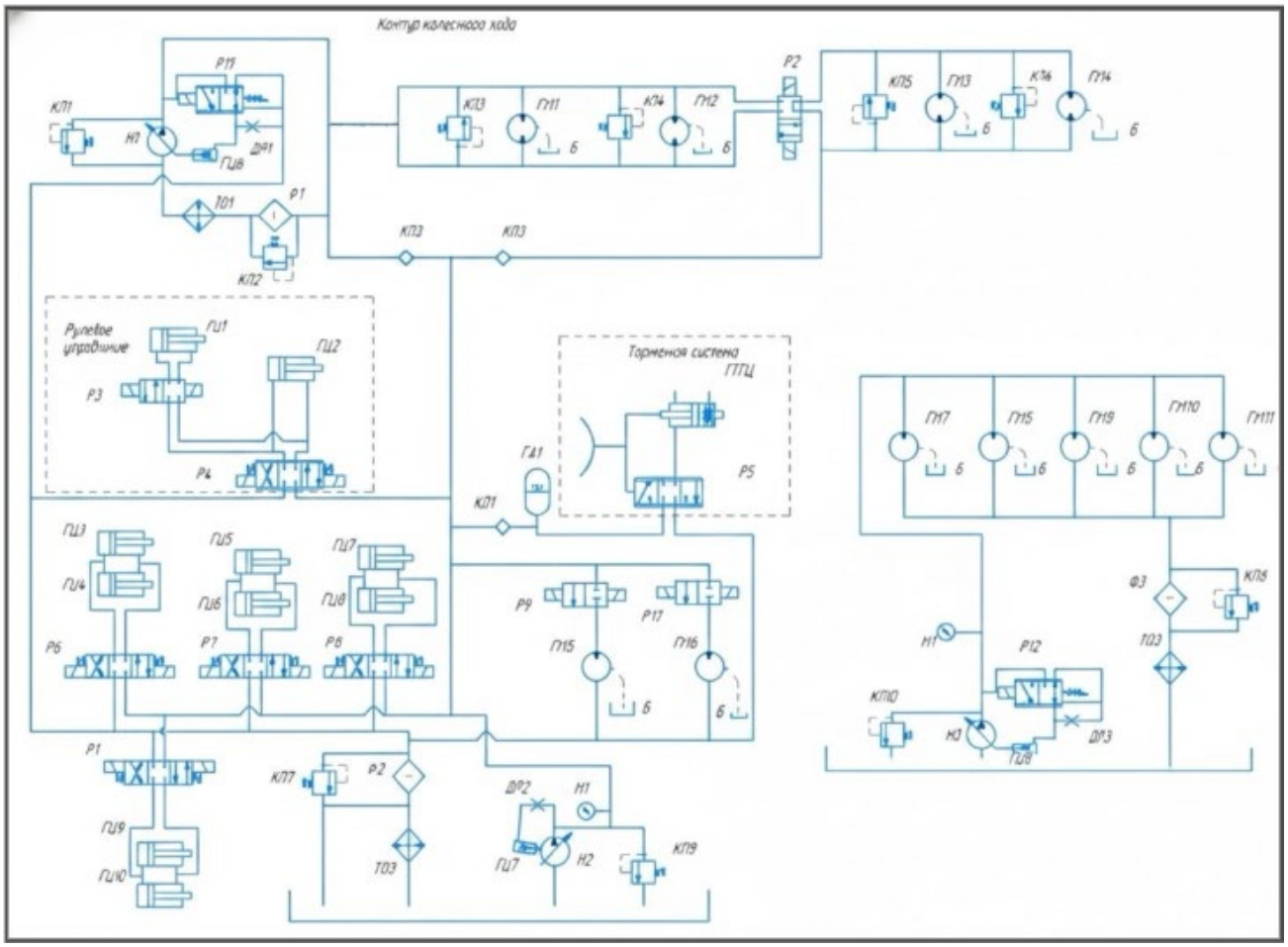


Рис. 3. Схема гидравлическая принципиальная системы картофелеуборочного комбайна

Серийно выпускаемые изделий имеют больший расход и давление, в связи с чем требуется разработка насоса для данной системы [2].

Тогда требуемый рабочий объем насоса рассчитывается по формуле 1:

$$q_n = \frac{Q_д \cdot \eta_o}{n} = \frac{0.005 \cdot 0{,}95}{30} = 0{,}000015 \text{ м}^3/\text{об}. \quad (1)$$

Рабочий объем насоса составляет 0,95 см^3/об, тогда максимальная подача рабочей жидкости по формуле 2:

$$Q_{max} = q_n \cdot n = 0{,}00000095 \cdot 30 = 0{,}0004749 \text{ м}^3/\text{с (28,45 л/мин)}. \quad (2)$$

Мощность привода насоса (табл. 1) рассчитывается по формуле 3:

$$N_n = P_n \cdot Q_{max} = 35 \cdot 10^6 \cdot 0{,}0004749 = 16{,}62 \text{ кВт}. \quad (3)$$

Таблица1

Технические характеристики предполагаемого насоса

Рабочий объем см^3/об	0,95
Номинальная частота вращения вала *n*, об/мин	1800(2000)
Номинальная (максимальная) подача *Q*, л/мин	28,5(30)
Номинальное (максимальное) давление нагнетания $P_{ном}$, МПа	35

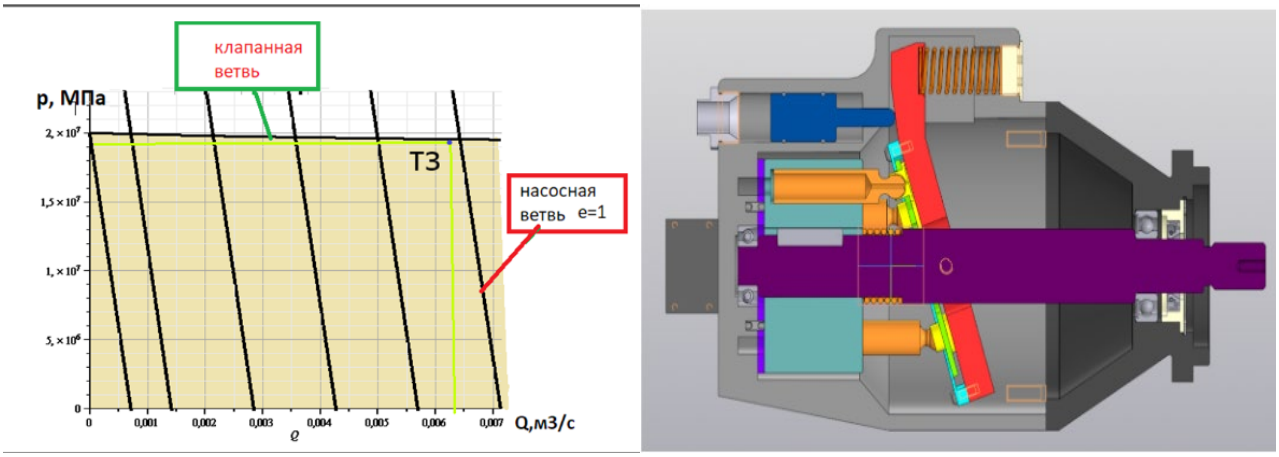


Рис. 4. Располагаемая характеристика насоса и его 3д модель

Условный проход трубопроводов определяется по выражению 4:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \vartheta}}, \quad (4)$$

где ϑ – скорость течения жидкости в авиационных трубопроводах.

Так как в разрабатываемом объекте все элементы гидропривода неподвижны, то все трубопроводы будут жесткими. Жесткие трубопроводы выбираются по ГОСТ 8732-78 и ГОСТ 8734-75 [1]. Подобранные диаметры трубопроводов приведены в табл. 2.

Таблица ***Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.***

Действительные диаметры напорного и сливного трубопроводов системы с насосом

Напорная линия		Сливная линия		Всасывающая линия	
d, мм	v, м/с	d, мм	v, м/с	d, мм	v, м/с
5,5	1	6,5	0,75	6,5	0,75

Путевые потери давления жидкости определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \, v^2}{2}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент гидравлических потерь, l – суммарная длина трубопровода, ρ – плотность рабочей жидкости, d – диаметр трубопровода, v – скорость движения жидкости в трубопроводе.

Построим график потерь в контуре рабочего оборудования при рабочей температуре +60°С (рис. 5).

Для математического описания системы подачи топлива (рис. 6) принимаются допущения, обычно применяемые в практике расчетов систем подачи топлива:

1. Модуль объемной упругости рабочей жидкости, коэффициент ее вязкости, коэффициент расхода, управляемого золотника, а также давление подачи и слива являются постоянными величинами.

2. Температура жидкости в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется.

3. Гидравлические потери в подводящих магистралях к изделию малы и ими можно пренебречь.

4. Трубопроводы короткие, гладкие, жесткие, что позволяет не учитывать волновые явления.

5. Изменением плотности жидкости при увеличении давления можно пренебречь.

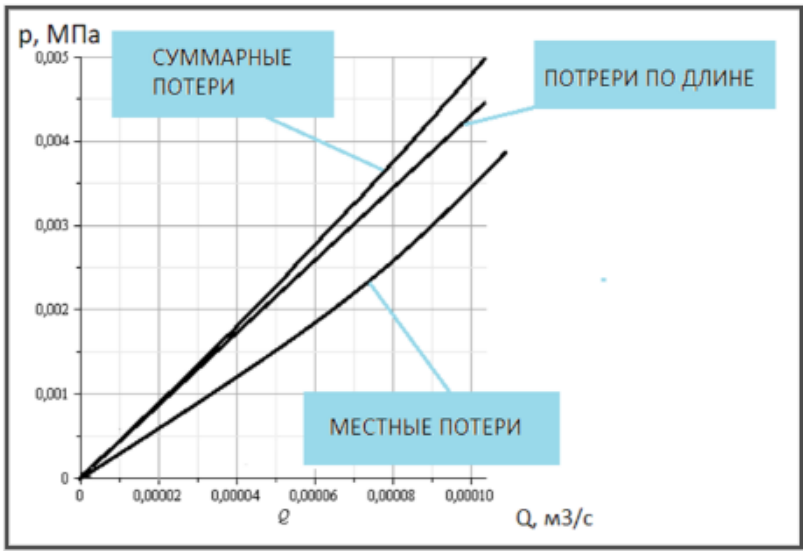


Рис. 5. График гидравлических потерь при номинальной температуре +60°С

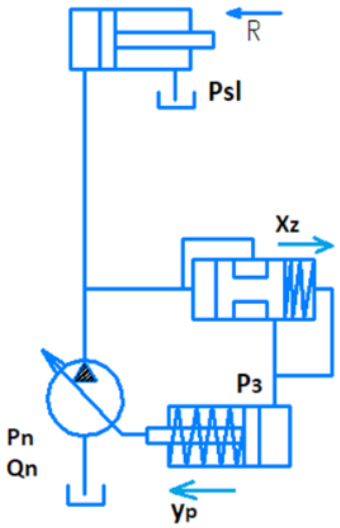


Рис. 6. Расчётная схема контура рулевого управления комбайна

На основании допущений перечислены уравнения динамической модели:

– уравнение движения гидроцилиндра:

$$m_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} k(t) = A_1 \cdot P_n(t) - A_2 \cdot P_2(t) - k_{v1} \cdot \frac{d}{dt} k(t) - R - R1;$$

– уравнение движения регулятора:

$$m_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} y_p(t) = A_3 \cdot P_2(t) - C_{pr} \cdot y_p(t) - k_{v2} \cdot \frac{d}{dt} y_p(t);$$

– уравнение движения золотника:

$$m_z \cdot \frac{d^2}{dt^2} x_z(t) = F_z \cdot P_n(t) - C_z \cdot x_z(t) - k_{v3} \cdot \frac{d}{dt} x_z(t);$$

– уравнение для определения давления на входе регулятора:

$$\frac{d}{dt} P_4(t) = \frac{E}{V_y} \cdot \left(\left(\frac{Q_n \cdot (\gamma - y_p(t))}{\gamma} \right) - A_1 \cdot \frac{d}{dt} y_p(t) \right);$$

– уравнение для определения давления на выходе золотника:

$$\frac{d}{dt} P_3(t) = \frac{E}{V_{xz}} \left(\mu_3 \cdot b_{ok} \cdot x_z(t) \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_n(t) - P_3(t)|}{\rho}} - A_3 \cdot \frac{d}{dt} y_p(t)).$$

Динамические характеристики системы подачи топлива представлены на рис. 7.

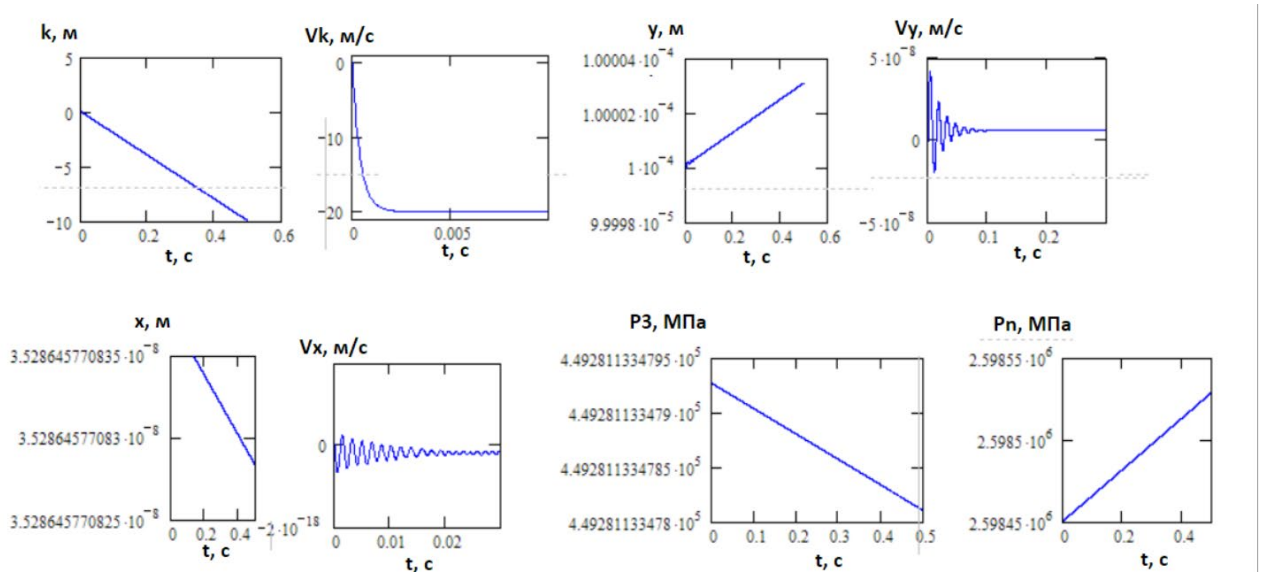


Рис. 7. Динамические характеристики

Библиографический список

1. Целищев, В. А. Расчет и проектирование объемного гидравлического привода: учебное пособие [электронный ресурс] / Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа: УГАТУ, 2022 – URL: https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022 79.pdf.

2. Петров, П. В., Калимуллин, Р. Р. Основные принципы автоматизированного проектирования гидравлических систем // Справочник. Инженерный журнал, 2017. – № 9 (246). – С. 33–37.

© Кудаярова Ю.И., 2026

УДК 656.135

К.И. ЛУКЬЯНЧИКОВ
kir.minion@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация: в статье рассматриваются актуальные на сегодняшний день предложения в области оптимизации работы транспортных предприятий с помощью внедрения цифровых решений. Описываются принципы использования цифровых инструментов в работе транспортных организаций.
Ключевые слова: транспортная логистика, оптимизация, TMS, Big Data, мониторинг, качество, IoT.

На сегодняшний день логистика в области транспорта является своего рода кровеносной системой в глобальной экономике. Она представляет собой комплексное управление материальными потоками, перемещающимися от производителей к потребителям.

Логистика включает в себя планирование, организацию и контроль процесса доставки. Уже эти процессы состоят из управления запасами, складирование, обработку заказов и прочее. В синергии друг с другом эти процессы обеспечивают доставку товаров от поставщика до потребителя [1].

Эта сфера охватывает разный спектр действий, направленных на перемещение товаров от источника до конечного потребителя. Ее основа – планирование, координация и контроль за всеми деталями перевозки: распределением, обработкой, управлением и регуляцией запасов на складе.

Одним из главных преимуществ транспортной логистики является способность уменьшать финансовые издержки путём эффективного выбора маршрутов и методов доставки. Любая транспортная компания стремится к снижению стоимости перевозки при максимальной оптимизации всех рабочих процессов [2].

В силу борьбы с издержками компании постоянно ищут инновационные пути снижения топливного расхода, оптимизации пустого пробега и простоя транспорта. В этих условиях транспортная логистика стала источником конкурентного преимущества перед конкурентами.

Современные цифровые решения кардинально повышают эффективность автомобильных грузоперевозок. Компании, инвестирующие в цифровые платформы, масштабируются и развиваются кратно быстрее тех, которые придерживается ручного метода работы.

Наиболее весомым из них является система TMS (Transportation Management System) – комплексные системы управления перевозками. Она вполне успешно автоматизирует широкий спектр задач: от расчета стоимости и выбора перевозчика до построения оптимальных маршрутов, и отслеживания выполнения рейсов в реальном времени.

Также не меньшее преимущество компаниям дают системы спутникового мониторинга и телематики. При помощи устанавливаемых на транспортные средства телематических датчиков операторы могут получать массу данных о перевозке: местоположение, расход топлива, стиль вождения, режимы работы двигателя, температура в рефрижераторе.

Помимо этого, широкое распространение получили цифровые экспедиторские платформы. При помощи них грузовладельцы с легкостью могут найти свободный транспорт, а перевозчики – оперативно заполнить пробелы в загрузке.

Для водителей лучшим решением стали мобильные приложения, позволяющие в реальном времени получать всю нужную им электронную документацию и постоянно держать связь с диспетчером.

Наиболее перспективным направлением является использование технологий больших данных (Big Data) и искусственного интеллекта (ИИ). На сегодняшний день алгоритмы ИИ способны не только строить маршруты с учетом обстановки на дороге, но и прогнозировать сроки доставки с высокой точностью.

Значительное влияние на цифровизацию логистики оказывает и государство. Через интеграцию с системами СМЭВ (Система межведомственного электронного взаимодействия), «Меркурий», Цифровой Инфраструктурный Проект (ЦИП) и другими инструментами, российская логистика становится прозрачней и более управляемой [3].

Для успешной работы крупных транспортных предприятий в долгосрочной перспективе крайне важна интеграция данных в реальном времени и тесная связка между складом, транспортом и потребителем. Применение цифровых технологий позволяет снижать операционные издержки и быстрее адаптироваться к рыночным изменениям.

В том числе необходимо и комплексное планирование маршрутов с учетом текущей дорожной обстановки, загрузки транспорта и уровня приоритетности заказов. За счёт этого достигается своевременная доставка и рост удовлетворенности клиентов.

Внедрение цифровых решений открывает широкие возможности для комплексной оптимизации всех этапов транспортно-логистического процесса. Любая комплексная оптимизация работы предприятия начинается с этапа планирования и маршрутизации.

Метод консолидации мелких партий грузов в одну укрупненную грузовую единицу является классическим, но крайне эффективным способом снижения удельной стоимости перевозки для каждого клиента.

Далее, огромный резерв для оптимизации кроется в управлении автопарком. Анализ телематических данных позволяет выявить неэффективных водителей и ненадежный транспорт. На основе полученных данных можно принимать решения о необходимости работы с персоналом и постановке на ремонт проблемного транспорта для предупреждения поломок в пути и дорожно-транспортных происшествий.

С применением цифровых технологий стало возможно опознавать отслеживать состояние транспорта и перевозимой им продукции без визуального контакта и на больших расстояниях. Такую возможность контроля обеспечивает внедрение различных RFID-меток, находящих применение во многих сферах нашей жизни.

Это специальные транспондеры, содержащие микрочип с данными и антенной, которая передаёт и получает сигналы. RFID-метки могут быть пассивными (без батареи, питающиеся от энергии считывателя) или активными (со встроенной батареей).

Пассивные метки на транспорте позволяют: присваивать различные статусы транспортным средствам в корпоративной информационной системе, применять разрешение на въезд и выезд и учитывать данные в автоматическом режиме. Активные – позволяют получать информацию про вес груза, состояние перевозимого груза и оценку технического состояния транспорта.

Также всё чаще задействуются системы на основе интернета вещей (IoT), которые позволяют в реальности через мобильные приложения получать доступ к информации. Блокчейн-технологии обеспечивают прозрачность и надежность сведений о движении партии [4].

Таким образом, современная транспортная логистика – это динамично развивающаяся высокотехнологичная отрасль. Ее актуальность в условиях глобальной экономики только возрастает. Успех в этой сфере на сегодняшний день достигается не только наличием большого автопарка, но и способностью компании эффективно использовать данные и применять передовые информационные решения. Комплексная оптимизация, охватывающая весь цикл перевозки (от интеллектуального планирования маршрута и управления парком до цифровизации документооборота), является не просто инструментом снижения затрат, а обязательным условием для устойчивой, гибкой и конкурентоспособной логистической системы.

Библиографический список

1. Значимость транспортной логистики. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://academdpo.ru (дата обращения: 18.04.2026).

2. Транспортная логистика: определение, задачи, виды. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://itctraining.ru (дата обращения: 18.04.2026).

3. Данные сайта TADVISER. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.tadviser.ru/ (дата обращения: 20.04.2026).

4. Транспортная логистика: что это такое простыми словами – виды, основы, особенности грузоперевозок транспортно-логистической компании. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://www.secuteck.ru (дата обращения: 21.04.2026).

© Лукьянчиков К.И., 2026

УДК 62-97-98

Р.Г. МАНУКЯН, А.О. ГРАЧЕВ
mavrokia@yandex.ru, grachevalex2002@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СКВАЖИННОГО ТРАКТОРА

Аннотация: в статье обоснована актуальность разработки алгоритма проектирования энергетической установки скважинного трактора для доставки геофизического оборудования в горизонтальные и многозабойные скважины.
Ключевые слова: скважинный трактор, энергетическая установка, алгоритм проектирования, тяговое усилие, гидравлическое сопротивление, сила качения, трение кабеля, геометрическая нагрузка, горизонтальная скважина, приводной модуль.

Современное развитие нефтегазовой отрасли в России характеризуется активным вовлечением в разработку трудноизвлекаемых запасов, в том числе низкопроницаемых неоднородных коллекторов (ачимовская толща, тюменская свита), а также водонефтяных зон с контактным залеганием углеводородов. Эффективная эксплуатация таких объектов возможна преимущественно с использованием горизонтальных скважин с многостадийным гидравлическим разрывом пласта (МГРП) [1, 2]. Параллельно для повышения коэффициента извлечения нефти всё шире применяются многозабойные горизонтальные скважины по технологии Fishbone, имеющие сложный профиль с несколькими боковыми ответвлениями [3].

Ключевым условием успешного применения МГРП и Fishbone-скважин является наличие достоверных исходных данных о геомеханических и фильтрационно-ёмкостных свойствах пород вдоль горизонтального ствола и в точках зарезки ответвлений. Такие данные получают с помощью геофизических исследований скважин (ГИС), включая акустический, плотностной, гамма-каротаж, а также отбор керна и проведение мини-ГРП [4, 5]. Однако в протяжённых горизонтальных скважинах (длиной более 1000 м) и

в многозабойных конструкциях спуск геофизических приборов под действием гравитации невозможен из-за высокого трения и искривлённого профиля. Единственным эффективным средством доставки становится скважинный трактор – устройство, оснащённое энергетической установкой (приводным модулем) и тяговым движителем, способное активно перемещать комплекс оборудования на любую глубину и в боковые ответвления [6].

Несмотря на наличие ряда коммерческих образцов скважинных тракторов (Welltec, Sondex, Baker Hughes, отечественные СКТ-54, Бурлак КЭМ-54), в научно-технической литературе отсутствует единая, системная методика проектирования их энергетической установки. Существующие исследования фокусируются либо на отдельных конструктивных решениях [7–9], либо на системах управления движением [10], но не предлагают комплексного алгоритма, позволяющего на этапе технического задания обоснованно выбрать параметры приводного модуля исходя из конкретных геолого-технических условий.

В данной статье представлена разработка и описание алгоритма проектирования энергетической установки скважинного трактора, который позволяет на основе исходных данных определить требуемое тяговое усилие, необходимое число секций, потребляемую мощность, тепловой режим и дать заключение о принципиальной возможности создания трактора для заданных условий.

Анализ научно-технической и патентной литературы показал, что первые отечественные разработки в области скважинных тракторов относятся к 1995 г. Активный этап патентования начался после 2000 г., всего зарегистрировано более 25 российских патентов, наибольшая активность пришлась на 2010–2018 гг. [7].

Зарубежные исследования [8–10] уделяют большое внимание системам активного управления тягой и преодолению препятствий. В работе [10] предложен алгоритм управления, использующий данные о скорости и крутящем моменте колёс, натяжении кабеля и потребляемой мощности, что позволяет увеличить непрерывное тяговое усилие на 25 %. Однако эти достижения не сопровождаются открытыми методиками проектирования.

Таким образом, на сегодняшний день отсутствует систематическая расчётная методика, учитывающая совместное влияние осевых, радиальных и тепловых нагрузок и гидравлического сопротивления в условиях ограниченного кольцевого зазора.

В рамках статьи представлен алгоритм проектирования энергетической установки скважинного трактора (рис. 1).

Важным этапом проектирования энергетической установки скважинного трактора является сбор исходных данных, складывающихся из условий внутри скважины (температура, давление, диаметр, зенитный угол, длина горизонтального/наклонного участка, состав скважины) и параметров скважинного трактора (тяговое усилие, диаметр, скорость).

В основе второго и третьего этапа расчет тягового усилия скважинного трактора. Суммарное требуемое тяговое усилие $F_{\text{тяговое}}$, которое должна развить энергетическая установка скважинного трактора для движения с заданной скоростью, складывается из нескольких составляющих:

$$F_{\text{тяговое}} = F_{\text{кач}} + F_{\text{гидрав}} + F_{\text{геом}} + F_{\text{каб}} + F_{\text{инерц}},$$

где $F_{\text{кач}}$ – сила качения колес, $F_{\text{гидрав}}$ – сила гидравлического сопротивления, $F_{\text{геом}}$ – сила геометрического сопротивления, $F_{\text{каб}}$ – сила трения кабеля, $F_{\text{инерц}}$ – сила инерционной нагрузки.

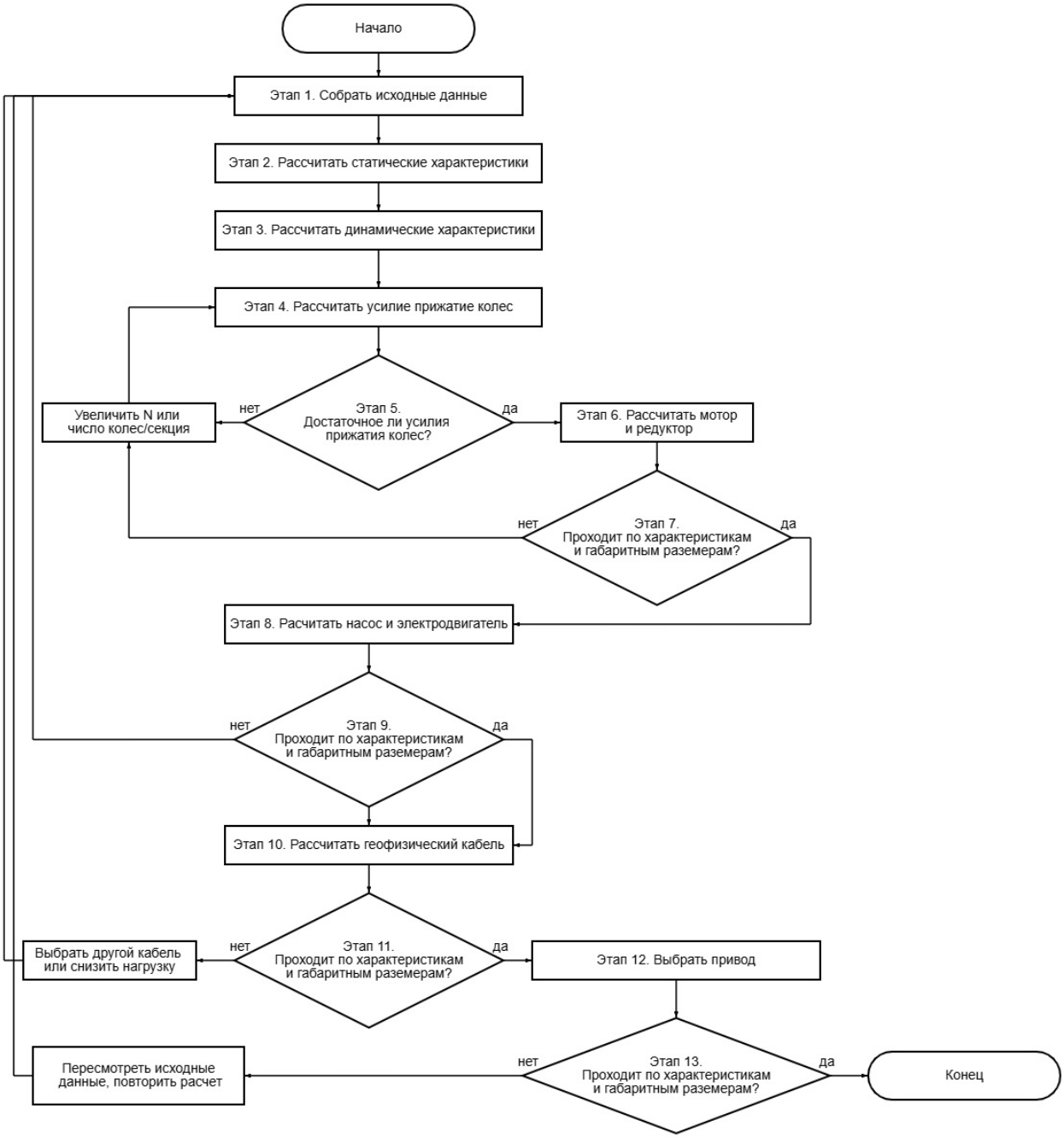


Рис. 1. Алгоритм проектирования энергетической установки скважинного трактора

По полученному тяговому усилию производится расчет моторов и редакторов колес установки, на основе полученных данных, выполняется расчет насоса и электродвигателя. На основе полученных характеристик подбираются составляющие энергетической установки по габаритным размерам, зависящих от диаметра эксплуатационной скважины.

В ходе всего алгоритма присутствуют уточняющие расчеты необходимые для оценки возможности реализации установки.

Вывод

Разработанный алгоритм проектирования энергетической установки скважинного трактора позволяет системно подойти к определению основных параметров приводного модуля на этапе технического задания. Предложенный алгоритм учитывает совокупность сил сопротивления движению (качения, гидравлического, геометрического, трения кабеля и инерционной нагрузки), что обеспечивает более точное обоснование требуемого тягового усилия. Последовательный расчёт моторов, редукторов колёс и насосно-двигательной группы с последующей габаритной привязкой к диаметру эксплуатационной скважины позволяет выбрать конфигурацию, удовлетворяющую условиям проходимости. Представленная блок-схема алгоритма (рис. 1) наглядно демонстрирует итерационные связи между этапами и может служить основой для создания инженерного программного модуля.

Библиографический список

1. Исламов, Р. А. Влияние геологической неоднородности на дизайн многостадийного гидравлического разрыва пласта в горизонтальных скважинах. // Нефтяное хозяйство. – 2025. – № 3. – С. 45–51.

2. Хисамиев, Т. Р., Ахметов, Р. Т., Хакимзянов, И. Н. Оценка эффективности многозабойных горизонтальных скважин Fishbone при разработке водонефтяных зон. // Георесурсы. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 72–80.

3. Семанов, А. С., Мелехин, А. А., Губарев, Д. С. Адаптация геолого-гидродинамических моделей на основе промысловых данных ГИС. // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 12. – С. 23–29.

4. Алиев, М. М., Чертенков, М. В., Ерёмин, Н. А. Определение упруго-прочностных свойств пород по данным ГИС для геомеханического моделирования. // Каротажник. – 2022. – № 6. – С. 18–27.

5. Sheiretov, T. Modeling of forces on wireline cables in deviated wells. – SPE paper 71709, 2001.

6. Welltec A/S. Well Tractor® product line. Technical documentation. – 2021.

7. Патенты РФ: RU 2034140 C1, RU 2175374 C1, RU 2236549 C2, RU 2354801 C2, RU 2487230 C2, RU 2599111 C2.

8. Zheng, J., Li, J., Wang, H. et al. A new wheeled tractor for open-hole wells with double-pushrod adjusting mechanism. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2023. – Vol. 218. – 111025.

9. Heaney. M., Lee, F.L., Lee, M., Gupta, S. Active traction control algorithm for wireline tractors: field performance improvement of 25%. // SPE Annual Technical Conference, 2022. – SPE-210125-MS.

10. Ляхов, А. П., Рыболовлев. Д. В., Кононов, В. Ю. Динамические нагрузки в скважинных тракторах при преодолении препятствий. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 8. – С. 30–35.

11. Zhao, J., Liu, Y., Zhang, S. Design and experimental study of a telescopic tractor for horizontal wells. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 804. – 022045.

12. Григорян, А. Г., Мельников, С. Г., Козлов, Е. В. Гидравлика буровых растворов и промывка скважин. – М.: Недра, 2019. – 384 с.

© Манукян Р.Г., 2026

УДК 621.22

Н.А. МАРКОВ, Д.Ф. МУКМИНОВ
nikita-markov-2003@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

МАСЛОСИСТЕМА НЕФТЕНАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Аннотация: в статье рассматривается возможность замены насосов типа НМШ на полупогружной насос, маслосистемы, которая служит для принудительной смазки и отвода тепла от подшипников скольжения магистральных насосных агрегатов типа НМ. Представлены уравнения и схема, описывающая работу маслосистемы. Приводятся результаты сравнения двух систем.
Ключевые слова: маслосистема, гидравлическая система, Matlab, математическая модель, нефтенасосная станция.

Введение

В маслосистеме нефтенасосной станции для перекачки масла в настоящее время применяются шестеренные насосы типа НШ. Данный тип объемных гидромашин имеет ряд конструктивных и эксплуатационных недостатков. К их

числу относятся высокая чувствительность к увеличению зазоров между шестернями и корпусом, а также существенное снижение объемного КПД при повышении температуры рабочей жидкости. Кроме того, для шестеренных насосов характерна подача пульсирующего потока, что приводит к колебаниям давления в системе и повышенному уровню шума. Следует отметить, что увеличение торцового зазора всего на 0,1 мм может вызвать снижение объемного КПД на 20 % [1].

Дополнительным недостатком насосов данного типа является значительная трудоемкость демонтажа и монтажа при проведении ремонтных и обслуживающих работ, что увеличивает продолжительность простоя оборудования. В связи с этим в схеме маслосистемы предлагается заменить насосы НМШ 8-25-6,3/2,5 и НМШ 5-25-4,0 на полупогружной насос GRUNDFOS MTR 8-5/5 A-W-A-HUUV, обладающий сопоставимыми техническими характеристиками.

Насосы серии MTR относятся к классу вертикальных полупогружных многоступенчатых насосов, предназначенных для промышленного применения. Изделия данной серии изготавливаются из высококачественных материалов и поставляются с двухлетней гарантией производителя. В отличие от погружных насосов, оборудование данного типа устанавливается вертикально и погружается в резервуар лишь частично.

Математическое описание расчетной модели

Для построения гидродинамических моделей предлагается использовать SimHydraulics – инструмент моделирования гидравлических систем, входящий в состав пакета Matlab. Ранее данный программный продукт не применялся для построения моделей трубопровода маслосистемы нефтенасосной смазочно-охлаждающей станции. Выполненный анализ показал, что комплекс Matlab/SimHydraulics позволяет исследовать как установившиеся, так и переходные режимы течения жидкости [2].

Программная среда SimHydraulics основана на принципе визуального проектирования: формирование модели осуществляется путем соединения стандартных библиотечных или пользовательских виртуальных блоков (рис. 1). Каждый блок представляет собой математическую модель соответствующего физического объекта или процесса, включая электрические, гидравлические, механические и иные системы, и описывается совокупностью алгебраических и дифференциальных уравнений. Пользователь может задавать параметры как всей модели, так и отдельных ее элементов, в том числе реологические свойства жидкости, геометрические характеристики участков трубопровода и другие исходные данные. Кроме того, в среде предусмотрены средства выбора численного метода решения, а также визуализации результатов моделирования [3].

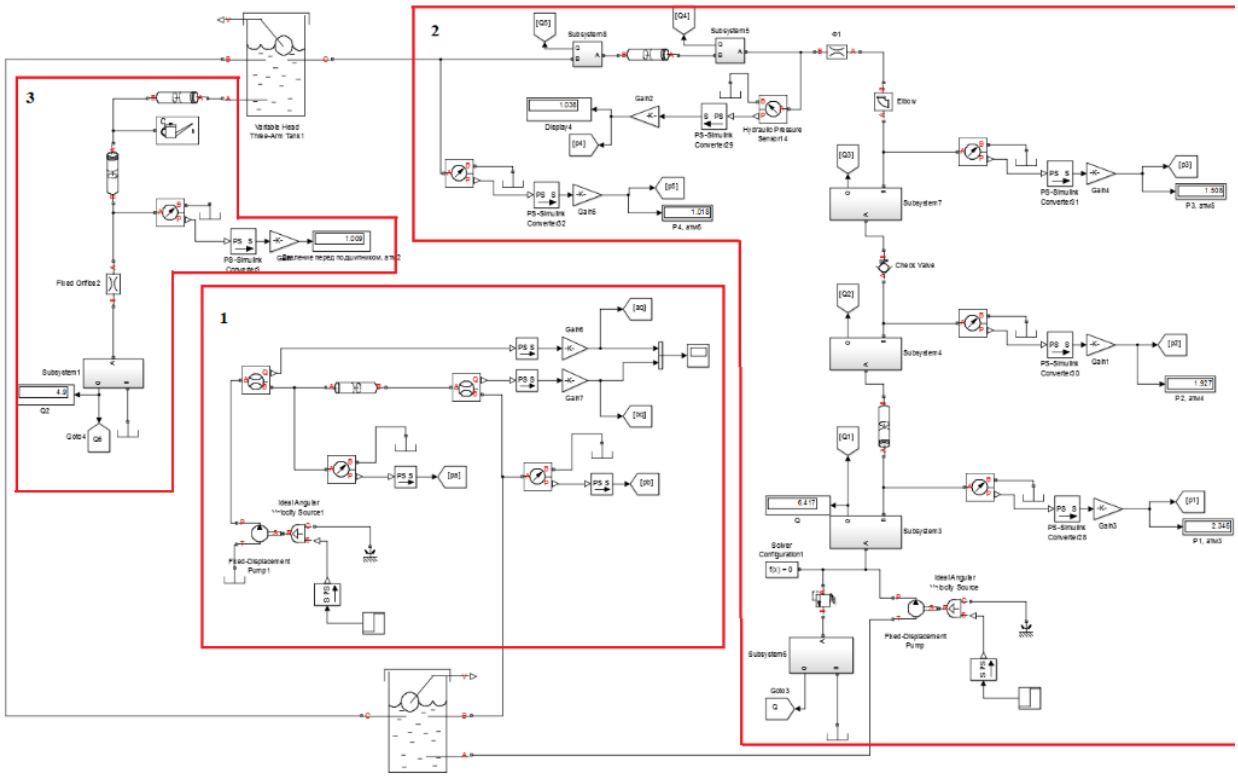


Рис. 1. Расчетная схема маслосистемы нефтенасосной

Для слабо сжимаемых жидкостей неустановившиеся течения при полном заполнении трубопровода жидкостью описываются дифференциальными уравнениями в частных производных:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \dfrac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0 \\ \rho_0 \dfrac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} + \lambda(\mathrm{Re},\varepsilon) \cdot \dfrac{1}{d} \cdot \dfrac{\rho_0 v(x,t)}{2} - \rho_0 g \cdot \sin\alpha(x) = 0 \end{cases} . \quad (1)$$

В пакете SimHydraulics дифференциальные уравнения вида (1) входят в модель, создаваемую средствами визуального моделирования.

Модель формируется соединением следующих блоков: Hydraulic_Resistive_Tube, Fluid_Inertia и Constant_Volume_Hydraulic_Chamber (рис. 1).

Блок Fluid_Inertia описывает зависимость изменения давления от расхода жидкости

Блок Constant_Volume_Hydraulic_Chamber учитывает сжимаемость жидкости и дополнительные эффекты в соответствии с представленными соотношениями.

Блок Hydraulic_Resistive_Tube учитывает падение давления из-за гидравлического сопротивления. Формулы расчета коэффициента гидравлического сопротивления представлены в табл. 1.

Таблица 1

Формулы расчета коэффициента гидравлического сопротивления

Режим течения жидкости	Формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при соответствующем режиме течения жидкости	Диапазон значений числа Рейнольдса для соответствующего режима течения
Ламинарный	$f = K_s / \mathrm{Re}$	$\mathrm{Re} \le \mathrm{Re}_L$
Переходный	$f = f_L + \frac{f_T - f_L}{\mathrm{Re}_T - \mathrm{Re}_L}(\mathrm{Re} - \mathrm{Re}_L)$	$\mathrm{Re}_L < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_T$
Турбулентный	$f = \left(-1.8 \log_{10} \left(\frac{6,9}{\mathrm{Re}} + \frac{r / D_H}{3,7} \right)^{1.11} \right)^{-2}$	$\mathrm{Re} \ge \mathrm{Re}_T$

Падение давления из-за гидравлического сопротивления может рассчитываться по формулам табл. 2.

Далее, на основании исходных данных и эксплуатационной документации была выполнена настройка модели для схемы с шестеренными насосами (рис. 2, 3). Результаты численного моделирования оказались согласованными с параметрами, приведенными в паспорте системы, что подтверждает адекватность разработанной модели [4]. Таким образом, данная модель может быть использована в качестве основы для построения новой модели модернизированной системы.

Таблица 2

Соответствие вида эмпирической зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от диапазона числа Рейнольдса в системе SimHydraulics

Режим течения жидкости	Формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при соответствующем режиме течения жидкости	Диапазон значений числа Рейнольдса для соответствующего режима течения
Ламинарный	$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$	$\mathrm{Re} < 2320$
Переходный турбулентный	$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}(1-\gamma) + \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}\gamma$	$2320 \le \mathrm{Re} < 10000$
Развитый турбулентный	$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}$	$1000 < \mathrm{Re} < \frac{27}{\varepsilon^{1,141}}$
Зона смешанного трения	$\lambda = 0,11\left(\varepsilon + \frac{64}{\mathrm{Re}} \right)^{1/4}$	$\frac{27}{\varepsilon^{1,141}} < \mathrm{Re} < \frac{500}{\varepsilon}$
Зона квадратичного трения	$\lambda = 0,11\varepsilon^{1/4}$	$\mathrm{Re} > \frac{500}{\varepsilon}$

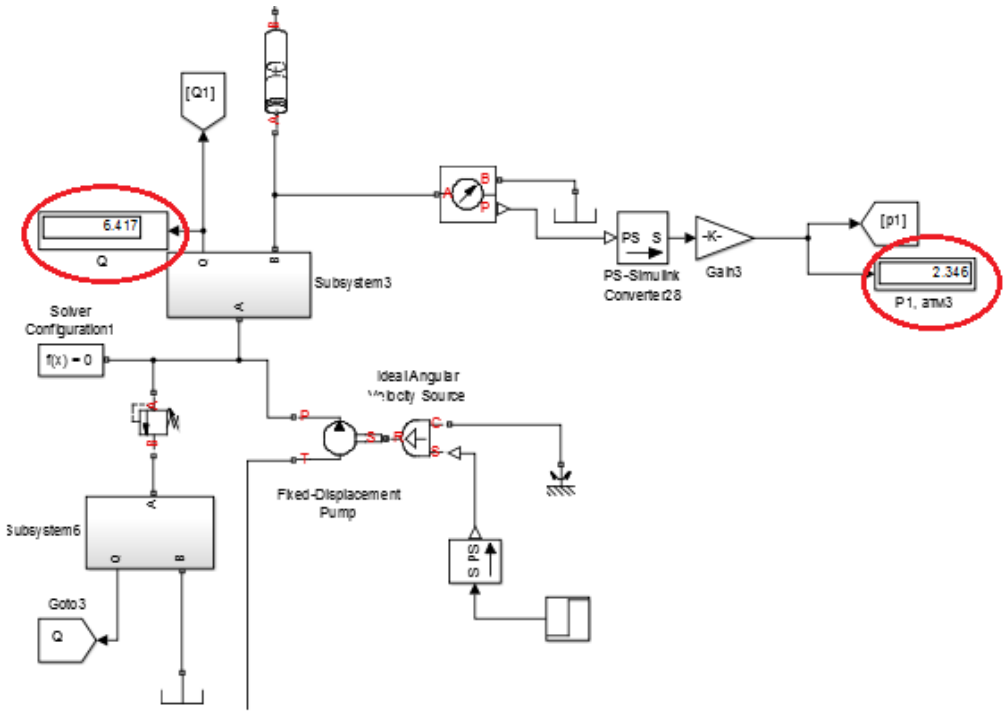


Рис. 2. Схема с шестеренчатым насосом

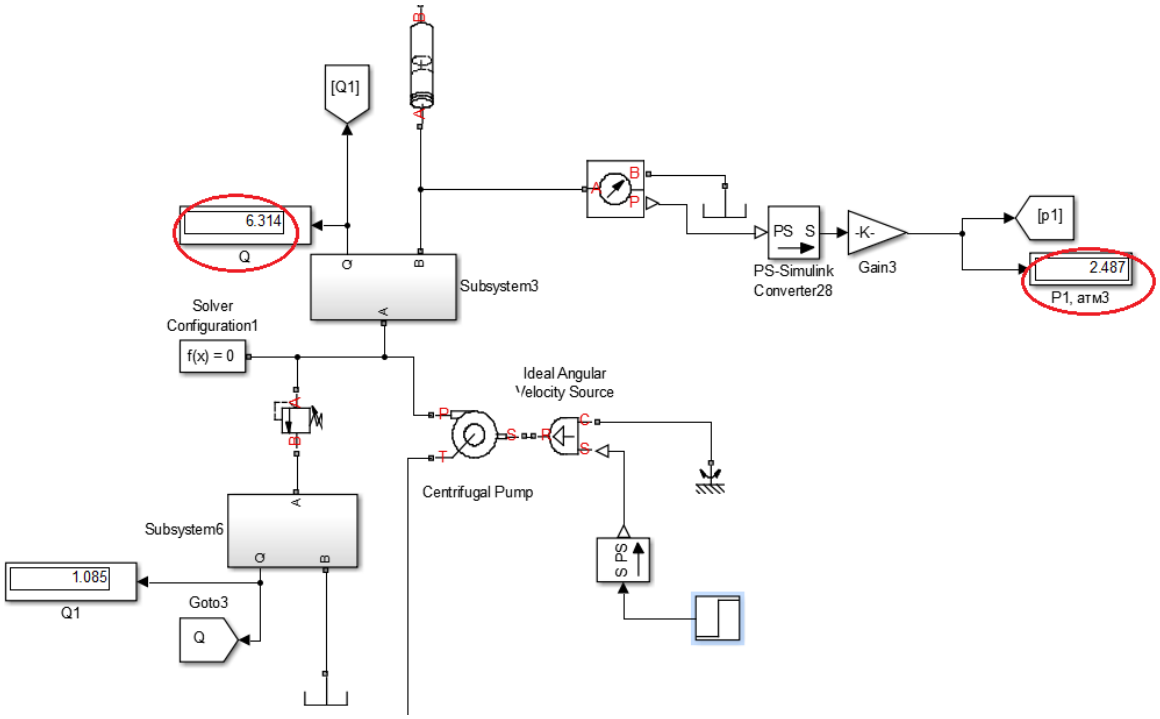


Рис. 3. Схема с заменой НШ на центробежные насосы

Анализ численного моделирования и исследование влияния параметров на переходные процессы

Результаты сравнения характеристик (рис. 4, 5) показали, что в обоих случаях параметры получаются одинаковые, но в случае, когда используется погружной насос, колебания в системе немного сглаживаются, исчезают пульсации, система становится более равномерной. Т.е. в модернизированной

системе, в отличие от исходной схемы, будет наблюдается уменьшение вибрации и шума, вызванных пульсацией давления в системе. В свою очередь уменьшение колебаний в системе положительно скажется на сроке службы всех агрегатов в целом.

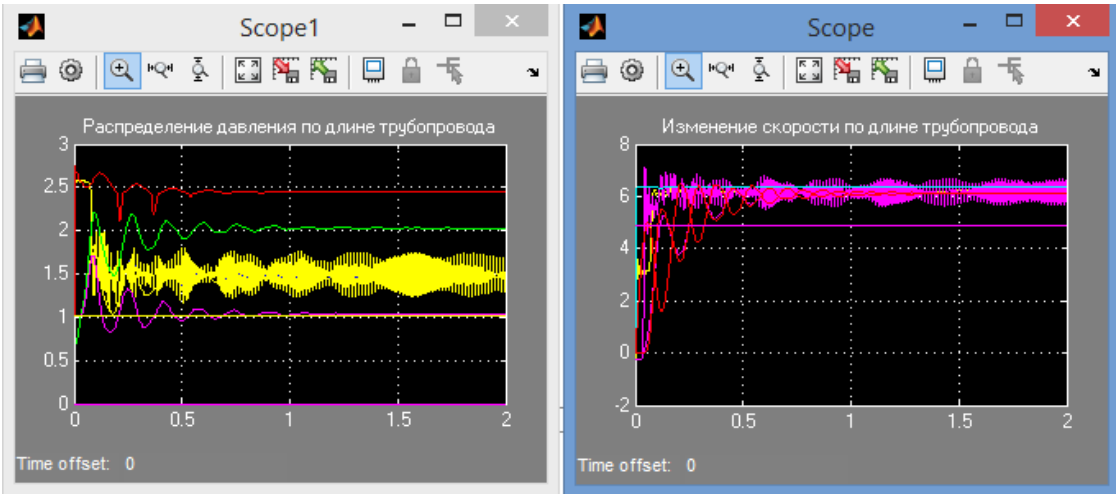


Рис. 4. Результаты численного моделирования схемы с НШ

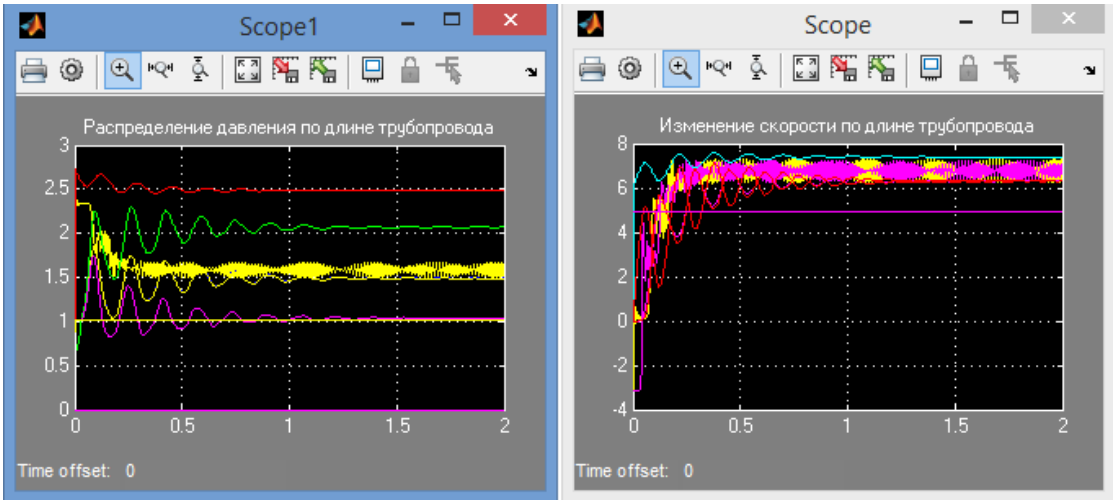


Рис. 5. Результаты численного моделирования схемы с центробежным насосом

В результате выполненной работы была разработана гидродинамическая модель трубопровода для двух вариантов схемы. Расчет параметров осуществлялся с использованием пакета Matlab. Полученная модель может быть использована для параметрического синтеза новых модернизированных схем, а также для анализа работоспособности системы при моделировании различных нештатных ситуаций, включая отключение насоса, разрыв трубопровода, засорение фильтра и другие отклонения от нормального режима. Кроме того, еще на стадии проектирования модель позволяет определить численные значения настроечных параметров элементов системы, в том числе давление настройки предохранительных клапанов, состав и количество местных сопротивлений, а также геометрию и материал трубопроводов.

Показано, что модернизация системы путем замены насосов НМШ 8-25-6,3/2,5 и НМШ 5-25-4,0 на полупогружной насос GRUNDFOS MTR 8-5/5 A-W-A-HUUV не приводит к существенному изменению параметров привода. При этом применение указанного насоса обеспечивает более широкий рабочий диапазон. Одновременно упрощается схема питания насосов, а также облегчаются монтаж, демонтаж и последующее техническое обслуживание оборудования.

В настоящее время для прогнозирования гидравлических, энергетических и иных характеристик трубопроводов преимущественно используются модели стационарного течения жидкости. Однако особенности эксплуатации гидросистем, включая изменение температуры, свойств рабочей жидкости, попадание воздуха в систему и засорение элементов, обуславливают необходимость разработки моделей, позволяющих рассчитывать переходные режимы течения жидкости.

Следует отметить, что в нефтегазовой отрасли в последние годы активно внедряются цифровые технологии и средства автоматизации. Это способствует повышению эффективности производства, снижению затрат, улучшению промышленной безопасности и более точному управлению технологическими процессами. Использование цифровых моделей объектов позволяет оптимизировать режимы работы оборудования, а также повысить качество принятия инженерных решений на всех этапах жизненного цикла системы.

Библиографический список

1. Моделирование физических процессов масляной системы энергетических установок в пакете matlab П. В. Петров, А. А. Соловьева / «Вестник УГАТУ», 2021. – Том 25. – № 1 (91). – С. 65-76.

2. Моделирование насосных агрегатов с использованием языка Simscape Matlab / Simulink. Н. Г. Диденко, А. В. Молодых. Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол, Россия. Инженерный Вестник Дона, № 5 (2023). – С. 386-391.

3. Прогнозирование технического состояния электроцентробежного насоса на основе нейросетевого моделирования / И. В. Каракулов, А. В. Клюев, В. Ю. Столбов / Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия. Вестник южно-уральского государственного университета, серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 37–46.

4. Технологическая схема ПНПС [Электронный ресурс]. URL: https://helpiks.org/7-89441.html.

© Марков Н.А., 2026

УДК 629.3.027.75

Д.А. МИНИГУЛОВА
dilaraminigulowa@yandex.ru
Науч. руководов. – д-р техн. наук, проф. В.А. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ГИДРОПРИВОДА ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ С РЕГУЛЯТОРОМ ДАВЛЕНИЯ

Аннотация: в статье рассматривается гидравлический привод шагающей машины, оснащённый регулятором давления. Обоснована актуальность разработки таких систем для перемещения техники в условиях пересечённой местности с непрогнозируемыми нагрузками на опоры. Сформулирована цель работы и определены задачи исследования. Представлена математическая модель гидропривода с результатами численного моделирования.
Ключевые слова: шагающий механизм; гидравлический привод; регулятор давления.

Введение

Современные задачи в области горнодобывающей промышленности, строительства и освоения труднодоступных территорий предъявляют повышенные требования к мобильности и проходимости транспортных и технологических машин. Шагающие машины, обладающие уникальной способностью преодолевать сложные рельефы местности, являются одним из перспективных решений данной проблемы. Ключевым элементом, определяющим их динамические и эксплуатационные характеристики, является привод ходового аппарата.

Шагающая машина использует для опоры в процессе движения малую площадь в дискретных точках поверхности местности, которые могут выбираться и варьироваться в соответствии с дорожными условиями. Это обстоятельство делает шагающий транспорт незаменимым, когда непрерывная колея невозможна - движение по «кочкам», по россыпи камней и т.п. [1].

Динамика шагающего движения, связанная с ударными нагрузками и неустойчивой работой на переходных режимах, порождает значительные колебания давления в гидросистеме. В опытно-конструкторских и научно-исследовательских работах важное место занимает математическое моделирование рабочих процессов, так как математические модели позволяют спрогнозировать поведение проектируемого объекта и синтезировать его параметры, что удешевляет стоимость разработки изделия.

Основная часть

Объектом исследования является гидропривод шагающей машины с регулятором давления.

В классических гидравлических схемах насосная установка работает практически непрерывно с номинальной подачей, а избыточный поток рабочей жидкости сбрасывается на слив, преобразуясь в теплоту. Это приводит к необходимости использовать громоздкие теплообменники, увеличивает гидравлическое сопротивление и снижает общий КПД привода до значений, неприемлемых для автономной техники. Кроме того, традиционные схемы не способны адаптироваться к быстропеременным нагрузкам, характерным для шагающего движения: при контакте опоры с неровной поверхностью возникают гидравлические удары, резонансные явления и пиковые давления, сокращающие ресурс уплотнений, гидрораспределителей и самих насосов [2].

Именно поэтому актуальной научно-технической задачей является разработка гидропривода шагающей машины с регулятором давления. Такое схемное решение принципиально меняет логику работы системы. Вместо постоянного дросселирования потока, регулятор давления обеспечивает поддержание заданного уровня давления в напорной гидролинии. Осуществляется это путём автоматического изменения подачи насоса в соответствии с текущим потреблением гидродвигателей. В результате привод функционирует в режиме «по требованию»: насос вырабатывает лишь тот расход, который необходим для преодоления актуальной нагрузки на каждом такте шагания [4].

Во-первых, такое схемное решение обеспечивает существенное повышение энергоэффективности. В паузах между движениями или при частичных нагрузках насос переходит в режим поддержания давления с минимальной подачей, компенсирующей только внутренние утечки. Уменьшается тепловыделение, отпадает необходимость в мощных системах охлаждения – гидравлический бак и теплообменник могут быть минимизированы, что критически важно для мобильных машин.

Во-вторых, регулятор давления повышает надёжность и ресурс гидравлической системы. Отсутствие постоянного сброса больших расходов на слив и исключение гидравлических ударов за счёт плавного изменения подачи значительно снижают износ насосов, клапанов и цилиндров. Рабочая жидкость не подвергается интенсивному нагреву. В результате шагающая машина становится не только более экономичной, но и более ресурсной [3].

В качестве цели исследования определена разработка методики расчета гидравлического привода шагающей машины с регулятором давления.

Постановка цели определяет следующие задачи работы:

1. Проведение аналитического обзора научно-технической и патентной информации на тему «Гидропривод шагающей машины с регулятором давления».

2. Разработка схемного решения шагающей машины с регулятором давления.

3. Разработка математической модели шагающей машины с регулятором давления.

4. Разработка методики расчета гидропривода шагающей машины с регулятором давления.

Динамическая математическая модель и результаты численного моделирования

Для получения характеристик и анализа процессов, происходящих в гидроприводе, построена матрица первых производных.

$$\begin{cases} U_{\Sigma} = L\dfrac{d}{dt}I_1(t) + R_1 I_1(t) + K_{\text{пэ}}\dfrac{d}{dt}x_{\text{з1}}(t) \\ U_{\Sigma} = U_{\text{вх}} - K_{oc}y_{\text{п1}}(t) \\ m_{\text{з1}}\dfrac{d^2}{dt^2}x_{\text{з1}}(t) = K_{FI}I_1(t) - C_{\text{з1}}x_{\text{з1}}(t) - b_1\dfrac{d}{dt}x_{\text{з1}}(t) \\ \mu b_{\text{окна1}}x_{\text{з1}}(t)\sqrt{\dfrac{2\left(P_n(t) - P_{\text{п1}}(t)\right)}{\rho_{\text{ж}}}} = A_{\text{п1}}\dfrac{d}{dt}y_{\text{п1}}(t) + \dfrac{V_{01}}{2E}\dfrac{d}{dt}P_{\text{п1}}(t) \\ m_{\text{п1}}\dfrac{d^2}{dt^2}y_{\text{п1}}(t) = A_{\text{п1}}P_{\text{п1}}(t) - R - b_2\dfrac{d}{dt}y_{\text{п1}}(t) \\ Q_n\overline{\gamma_n} = \mu b_{\text{окна1}}x_{\text{з1}}(t)\sqrt{\dfrac{2\left(P_n(t) - P_{\text{п1}}(t)\right)}{\rho_{\text{ж}}}} + \dfrac{V_{01}}{2E}\dfrac{d}{dt}P_n(t) \\ m_{\text{з4}}\dfrac{d^2}{dt^2}x_{\text{з4}}(t) = C_{\text{рег}}x_{\text{з4}}(t) - A_{\text{з4}}P_{\text{п1}}(t) \\ \mu b_{\text{окна2}}x_{\text{з4}}(t)\sqrt{\dfrac{2\left(P_n(t) - P_{\text{рег}}(t)\right)}{\rho_{\text{ж}}}} = A_{sp}\dfrac{d}{dt}y_{sp}(t) + \dfrac{V_{02}}{2E}\dfrac{d}{dt}P_{\text{рег}}(t) \\ m_{sp}\dfrac{d^2}{dt^2}y_{sp}(t) = C_{sp}y_{sp}(t) + A_{sp1}P_n(t) - A_{sp}P_{\text{рег}}(t) - b\dfrac{d}{dt}y_{sp}(t) \end{cases}$$

В основу модели положены подходы, изложенные в [2-4].

На рис. 1 представлена зависимость перемещения поршня гидроцилиндра от времени при запуске. Время выхода на установившийся режим составляет 0,95 секунды. Также присутствует перерегулирование, величина которого 0,002 м, что составляет 15 % от регулируемой величины.

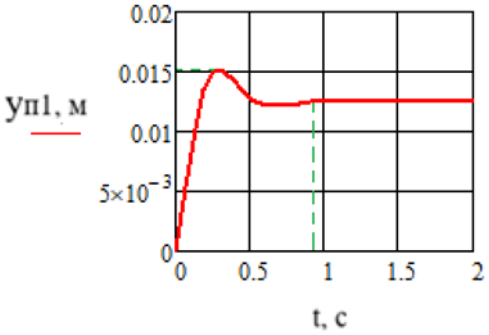


Рис. 1. Перемещение поршня гидроцилиндра

На рис. 2 представлена зависимость давления питания от времени при запуске. Время выхода на установившийся режим составляет 0,9 секунды. Перерегулирование отсутствует. График соответствует инертному звену второго порядка и имеет монотонный переходный процесс. Перегиб графика плавный за счет упругости системы.

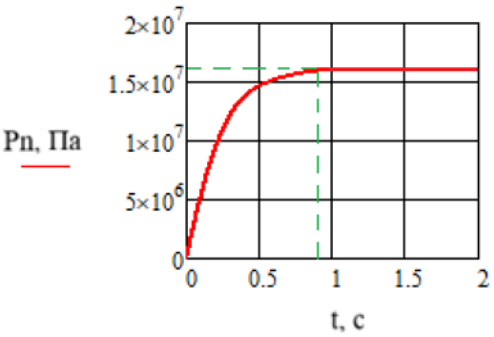


Рис. 2. Давление питания

Заключение

Таким образом, из приведенных результатов моделирования следует, что схемное решение, а также параметры системы выбраны верно, и соответствуют желаемым результатам. Предлагаемое схемное решение обеспечивает работу привода шагающей машины с высоким КПД и быстродействием во всех ожидаемых условиях эксплуатации. Учитывая необходимость освоения мест со сложным ландшафтом и разработку полезных ресурсов в труднодоступных местах, развитие шагающей техники является актуальной и перспективной задачей.

Библиографический список

1. Костюк, А. В. Моделирование динамики гидравлической системы управления шагающей машины [Электронный ресурс] – URL: https://www.dissercat.com/content/modelirovanie-dinamiki-gidravlicheskoi-sistemy-upravleniya-shagayushchei-mashiny.

2. Целищев, В. А., Петров, П. В., Кудерко, Д. А. Численный анализ и параметрический синтез электрогидромеханических агрегатов ГТД и систем управления летательного аппарата // Уфимский университет науки и технологий. – Уфа: РИЦ УУНИТ, 2023. – Электрон. версия печ. публикации. – Доступ возможен через Электронную библиотеку УУНИТ. URL: https://elib.bashedu.ru/dl/read/PetrovP i dr.Chisl.analiz.i parametr.sintez._mon_2023.pdf>.

3. Боровин, Г. К., Костюк, А. В., Платонов, А. К. Математическое моделирование гидравлической системы управления шагающей машины [Электронный ресурс] – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-gidravlicheskoy-sistemy-upravleniya-shagayuschey-mashiny.

4. Михайлов, В. В., Соловьева, Т. Н., Попов, В. П. Моделирование кинематики шагающего робота [Электронный ресурс] – URL: https://cyberlcninka.rU/articlc/n/modelirovanieshagayuschego robota.

© Минигулова Д.А., 2026

УДК 621.22

Д.Ф. МУКМИНОВ, Н.А. МАРКОВ
dinarmk59305@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРИВОД СКВАЖИННОГО ТРАКТОРА

Аннотация: в статье рассматривается методика математического моделирования гидравлического привода скважинного трактора, включающего регулятор расхода и гидромотор. Описываются уравнения баланса сил и расходов, а также статические и динамические характеристики системы. Приводятся результаты моделирования, показывающие, что регулятор расхода обеспечивает стабилизацию скорости вращения гидромотора при изменении нагрузки за счёт автоматического изменения проходного сечения. Анализ графиков подтверждает сходимость процессов в гидравлической и механической подсистемах и адекватность разработанной модели. Полученные зависимости могут использоваться для оптимизации параметров регулятора и прогнозирования поведения трактора в различных режимах эксплуатации.
Ключевые слова: гидравлическая система, скважинный трактор, трактор, микродвигатель, миниатюрная система.

Введение

Скважинные тракторы стали неотъемлемым инструментом при выполнении геофизических работ и технического обслуживания горизонтальных и сильно отклонённых скважин. Основная ценность таких устройств – способность доставлять измерительные модули в зоны, куда гравитационный спуск уже невозможен, а передача усилия по кабелю ограничена трением.

В гидравлическую схему скважинного трактора включен регулятор расхода для поддержания постоянной скорости скважинного трактора, так как при изменении сопротивления давление на входе гидромотора падает и скорость теряется. Поэтому ключевым элементом становится регулятор расхода по схеме «дроссель с перепадным клапаном», который автоматически поддерживает неизменный перепад давления на регулируемом отверстии. В результате объёмный расход через гидромотор перестаёт зависеть от нагрузки, и мотор вращается с практически постоянной угловой скоростью. Двухлинейный регулятор выполняет двоякую функцию: адаптирует подачу насоса к потреблению мотора и обеспечивает стабильность скорости даже при резких скачках сопротивления [1].

Математическое описание регулятора расхода

Работа регулятора основана на сравнении двух давлений: давления на входе регулятора P_r и давления после дросселирующего элемента P_m. Перепад давления ΔP действует на торцевую площадь золотника A_z, создавая силу, стремящуюся переместить золотник. Этой силе противодействует сила пружины $F_{\text{пр}}$. Входе моделирования был принят перепад давления ΔP=38 кПа, который был рассчитан по основной формуле дросселя.

Комплексная математическая модель гидравлического мотор-колеса скважинного трактора представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих гидромеханические процессы в регуляторе расхода и гидромоторе. Модель строится на основе фундаментальных законов сохранения массы, количества движения и энергии, а также уравнений состояния рабочей жидкости [2]. На рис. 1 показана расчетная схема привода скважинного трактора.

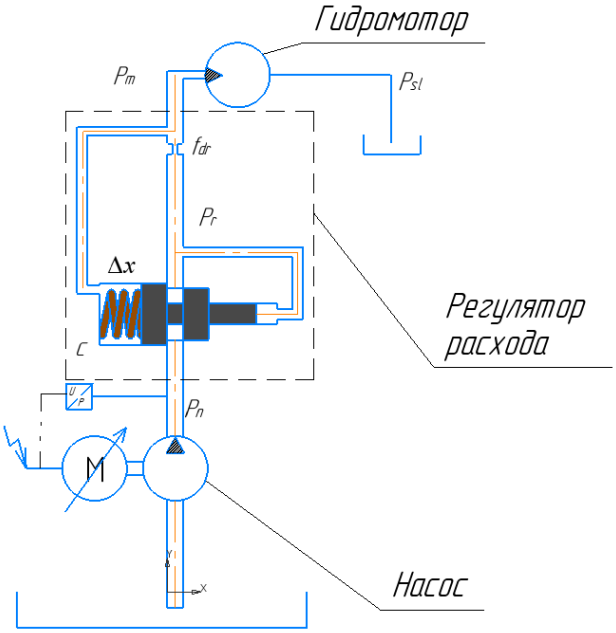


Рис. 1. Расчетная схема

В табл. 1 представлены исходные данные модели.

Уравнение движения золотника (баланс сил) записывается в виде:

$$m_z \frac{d^2x}{dt^2} = P_r \cdot A_z - P_m \cdot A_z - c \cdot x. \quad (1)$$

Уравнение баланса моментов на гидромоторе описывает равенство крутящего момента:

$$J\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m \cdot Q_m}{n_m} - M_m \ . \quad (2)$$

Таблица 1

Исходные данные математической модели

№	Наименование узла	Параметр	Значение
1	Источник питания (Насос)	Расход Q_n, л/ч	110
		Давление насоса P_n, МПа	35
2	Регулятор расхода	Жесткость пружины c, Н/м	550
		Диаметр запорного элемента клапана $d_к$, м	0,01
		Диапазон хода запорного элемента x, м	0,005
		Диаметр дросселя d_d, м	0,0005
3	Гидромотор	Диапазон крутящего моментов M_m, Н·м	0-25
		Рабочий объем гидромотора q_m, $м^3$	$3{,}26 \cdot 10^{-6}$

Уравнение неразрывности для напорной линии регулятора расхода связывает скорость изменения давления на входе регулятора с разностью между подачей насоса и расходом, уходящим через дроссель и перепускной клапан, с учётом модуля упругости жидкости и объёма напорной полости:

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{E}{V}\left[\mu \cdot b \cdot x \cdot \sqrt{\frac{2\cdot(P_r - P_m)}{\rho}} - \mu \cdot f_{др} \cdot \sqrt{\frac{2\cdot(P_r - P_m)}{\rho}}\right]. \quad (3)$$

Уравнение неразрывного потока через дроссель описывает:

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{E}{V}\left[\mu \cdot f_{др} \cdot \sqrt{\frac{2\cdot(P_r - P_m)}{\rho}} - Q_m\right]. \quad (4)$$

Статические характеристики привода скважинного трактора

По результатам расчета были построены статические характеристики, показанные на рис. 2.

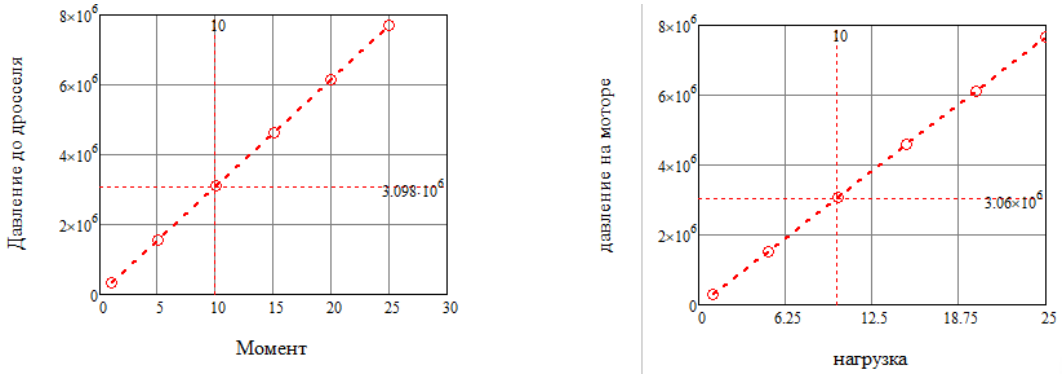


Рис. 2. Статические характеристики

В статике получены две линейные характеристики: давление до дросселя P_r и давление после дросселя P_m линейно растут с увеличением момента на валу гидромотора M_m. Рост P_r обусловлен тем, что регулятор поддерживает постоянный перепад на дросселе, поэтому рост нагрузки требует пропорционального повышения входного давления. Рост P_m отражает прямой перепад на гидромоторе, необходимый для преодоления возросшего момента с учётом механических потерь. Наклон обеих характеристик определяется рабочим объёмом гидромотора, а смещение зависимости P_m – моментом сухого трения.

Динамические характеристики привода скважинного трактора

Динамический анализ (рис. 3) позволяет оценить поведение системы при е при изменении управляющего сигнала регулятора [3].

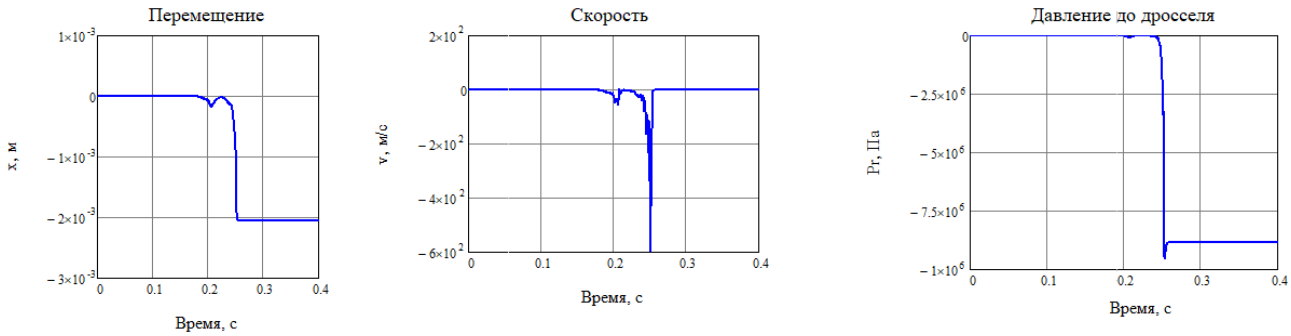


Рис. 3. Графики перемещения, скорости и давления до дросселя регулятора

При увеличении момента сопротивления на валу гидромотора запорный элемент регулятора расхода смещается на 2 мм, увеличивая проходное сечение для подачи дополнительного расхода рабочей жидкости. В ответ на возросшую нагрузку наблюдается кратковременная просадка скорости вращения вала, которая служит сигналом для системы регулирования. Одновременно с этим давление до дросселя повышается, обеспечивая необходимый перепад давления на регуляторе, а давление после дросселя также возрастает, создавая дополнительный крутящий момент, компенсирующий увеличение нагрузки (рис. 4).

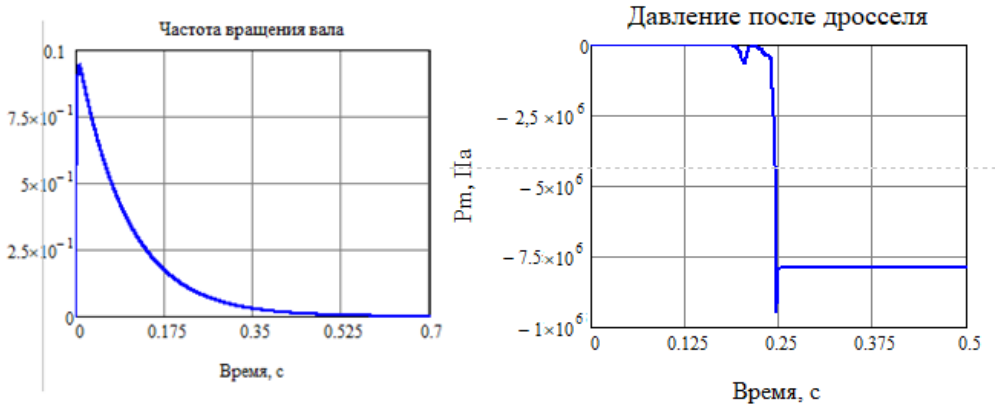


Рис. 4. Динамическая характеристика частоты вращения вала и давления после дросселя

В процессе нагружения гидромотора наблюдается характерная просадка скорости вращения его вала. Это снижение частоты вращения возникает в момент приложения дополнительного момента сопротивления и отражает инерционность механической части привода, а также конечное быстродействие системы регулирования. Величина и длительность просадки являются важными показателями динамической жесткости гидропривода.

Анализ осциллограмм давлений показывает, что давление после дросселя (на входе в гидромотор) повторяет форму кривой давления до дросселя с сохранением общей динамики изменения. Оба давления синхронно возрастают при набросе нагрузки, а их временные характеристики – время нарастания, наличие колебаний и выход на установившийся режим – практически идентичны. Это свидетельствует о том, что перепад давления на регулирующем

органе остается стабильным, а гидравлическая цепь работает в согласованном режиме без существенных фазовых сдвигов.

Совпадение очертаний кривых давлений до и после дросселя, а также согласованное поведение скорости и давлений позволяют сделать вывод о сходимости системы [4]. Под сходимостью здесь понимается устойчивое взаимодействие регулятора расхода и гидромотора: возмущение по нагрузке отрабатывается без нарастающих колебаний, параметры возвращаются к новому установившемуся состоянию, а динамические процессы в гидравлической и механической подсистемах протекают синхронно. Такое поведение подтверждает корректность настройки регулятора и адекватность математической модели реальному объекту.

Заключение

В результате проведенного исследования гидравлической системы «регулятор расхода – гидромотор» скважинного трактора получены статические характеристики, отражающие линейные зависимости давлений до и после дросселя от момента нагрузки, что позволило определить рабочие параметры гидромотора и регулятора. На основе идентифицированных параметров построена линеаризованная динамическая модель, описывающая переходные процессы в системе с учетом упругости рабочей жидкости, инерционности механической части и динамики золотника регулятора.

Полученные результаты подтверждают адекватность математической модели, корректность выбранных параметров и эффективность работы регулятора расхода в условиях переменной нагрузки, характерной для скважинного трактора. Разработанные модели и выявленные закономерности могут быть использованы для дальнейшей оптимизации настроек регулятора и прогнозирования поведения системы при различных режимах эксплуатации.

Библиографический список

1. Патент № 2528720 C1 Российская Федерация, МПК E21B 23/14, E21B 4/04. скважинный трактор: № 2013125012/03: заявл. 29.05.2013: опубл. 20.09.2014 / Ш. Р. Галлямов, К. А. Хисматуллин. – EDN ECNUNY.

2. Петров, П. В., Целищев, В. А. Основы алгоритмического моделирования нелинейных гидромеханических устройств: учеб. пособие / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2012. – 137 с.

3. Лабораторный практикум по дисциплине «Гидромеханические системы» [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; [авт.-сост. П. В. Петров]. – Уфа: УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-54.pdf.

4. Мукминов, Д. Ф. Движитель скважинного трактора / Д. Ф. Мукминов, Н. А. Марков // Мавлютовские чтения: Материалы XIX Всероссийской молодёжной научной конференции. В 8-ми томах, Уфа, 24–28 ноября 2025 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2026. – С. 407-411. – EDN BLNQFT.

© Мукминов Д.Ф., 2026

УДК 658.7.502.131.1

Р.А. МУСИН
ramusjet@gmail.com
Науч. руководв. – ст. преподаватель А.А. СОЛОВЬЕВА

Уфимский университет науки и технологий

ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ «ЗЕЛЁНОЙ» ЛОГИСТИКИ В ООО «РН-ТРАНСПОРТ»

Аннотация: статья посвящена разработке проекта создания системы «зелёной» логистики в ООО «РН-ТРАНСПОРТ» – специализированном транспортном предприятии ПАО «НК «Роснефть». В работе обоснована актуальность внедрения экологически ориентированных подходов в управлении цепями поставок, проанализированы текущие экологические показатели компании, представлены международные стандарты и лучшие практики.
Ключевые слова: «зелёная» логистика, ESG-стандарты, экологический менеджмент, ООО «РН-ТРАНСПОРТ», нефтегазовая отрасль, оптимизация маршрутов, эко-драйвинг.

Современные тенденции в области устойчивого развития, климатическая повестка, а также введение стандартов ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление) предъявляют повышенные требования к транспортно-логистической деятельности предприятий. Концепция «зелёной» логистики, направленная на снижение нагрузки на окружающую среду при сохранении экономической эффективности транспортных операций, становится стратегическим императивом для компаний реального сектора [1].

ООО «РН-ТРАНСПОРТ» является дочерним обществом ПАО «НК «Роснефть» и ведёт деятельность в сфере спецтехники, грузопассажирских и вахтовых перевозок, легкового транспорта, а также дорожно-строительного сервиса. Предприятие сертифицировано по стандарту ISO 14001 в области экологического менеджмента и имеет развитую филиальную сеть, охватывающую ключевые регионы деятельности головной компании.

Вместе с тем, несмотря на достигнутые успехи, система экологического менеджмента предприятия требует дальнейшего развития в сторону активного внедрения инструментов «зелёной» логистики. Целью данной работы является разработка комплекса организационно-технических мероприятий, направленных на создание полноценной системы «зелёной» логистики в ООО «РН-ТРАНСПОРТ».

«Зелёная» логистика представляет собой систему принципов и инструментов, позволяющих достичь баланса между экономическими, экологическими и социальными целями цепочек доставки грузов. В отличие от традиционного логистического подхода, ориентированного исключительно на минимизацию издержек и обеспечение своевременности доставки, «зелёная» логистика ставит во главу угла снижение углеродного следа, минимизацию отходов и рациональное использование ресурсов [2].

В международной практике основными направлениями «зелёной» логистики признаются: внедрение более экологичных видов транспорта, повышение топливной эффективности, развитие мультимодальных перевозок, цифровизация логистики и оптимизация маршрутов. В нефтегазовом секторе, где объёмы грузопотоков особенно велики, указанные направления приобретают критическое значение: даже незначительное повышение эффективности в масштабах крупной транспортной сети даёт мультипликативный экологический и экономический эффект.

Для ООО «РН-ТРАНСПОРТ» внедрение принципов «зелёной» логистики означает не только выполнение корпоративных обязательств и требований природоохранного законодательства, но и получение конкурентных преимуществ за счёт снижения операционных издержек и улучшения репутации перед экологически ориентированными стейкхолдерами.

По результатам проверки Южно-Уральского межрегионального управления Росприроднадзора, в 2025 году ООО «РН-ТРАНСПОРТ» продемонстрировало существенное снижение размера платы за негативное воздействие на окружающую среду. Так, по объекту 80-0102-000572-П на территории Республики Башкортостан снижение составило 63 % по сравнению с 2023 годом, по объекту 80-0102-000573-П – 61 %, по объекту 80-0102-000575-П – 47,7 %, по объекту 80-0102-002181-П – 71 % [3].

Указанная динамика достигнута за счёт снижения объёмов образования отходов, что свидетельствует о наличии у компании эффективной системы обращения с отходами. Однако в отчётных документах также зафиксированы отдельные нарушения, связанные с непредоставлением декларации за 2024 год по одному из объектов, что указывает на необходимость совершенствования документационного сопровождения экологической деятельности.

ООО «РН-ТРАНСПОРТ» располагает разветвлённой филиальной сетью (7 филиалов), головной офис находится в г. Уфе. Предприятие обслуживает технологические процессы на всей территории деятельности ПАО «НК «Роснефть», включая удалённые и экологически чувствительные регионы (Нефтеюганск, Оха, Стрежевой, Усинск и др.).

Важно отметить, что в структуре материнской компании также действует АО «РН-Транс», которое организует железнодорожные перевозки нефтеналивных грузов с 42 пунктов налива, эксплуатирует более 67 тыс. железнодорожных вагонов и 245 км железнодорожных путей. Хотя организационно эти предприятия разделены, для целей разработки единой системы «зелёной» логистики целесообразно учитывать синергетический потенциал взаимодействия между ними.

В нефтегазовом секторе, как в России, так и за рубежом, накоплен значительный опыт внедрения «зелёных» логистических решений [4]. К числу наиболее эффективных практик относятся:

– Цифровая оптимизация маршрутов и грузопотоков. Искусственный интеллект и алгоритмы машинного обучения позволяют сокращать пробег транспорта и, соответственно, выбросы CO_2. В качестве примера можно привести запуск Сбербанком в 2024 году ИИ-сервиса по оптимизации логистики светлых нефтепродуктов, способного сократить углеродный след за счёт снижения потребления топлива.

– Герметичные системы налива и рекуперация паров. На терминалах «Газпромнефть-Терминал» внедрена герметичная система нижнего налива топлива в автоцистерны и системы рекуперации паров, улавливающие частицы бензина и дизтоплива при заполнении бензовозов. В рамках экологической программы до 2035 года компания планирует достичь стопроцентной утилизации промышленных отходов и сократить удельные выбросы на 40 % от уровня 2022 года.

– Экологичный парк подвижного состава. Обновление парка автомобилей и спецтехники на модели с более высоким экологическим классом (Евро-5 и выше), а также переход на газомоторное топливо или электропривод (прежде всего для маршрутов малой и средней протяжённости в городах присутствия филиалов).

– Компенсация выбросов через углеродные проекты**.** Рассмотрение возможности участия в проектах углеродных кредитов, подобно практике запуска первого нулевого углеродного грузового поезда в Европе, где остаточные выбросы компенсируются через стандарт Gold Standard.

Современные исследования выделяют ключевые ESG-метрики в логистике нефтегазовой отрасли, включая удельные выбросы парниковых газов на тонно-километр, долю переработанных отходов, уровень полезного использования ресурсов и др. Формирование системы мониторинга таких метрик является необходимым условием для последующего сертификации и отчётности по стандартам устойчивого развития [5].

На основе проведённого анализа предлагается реализовать комплексный проект, охватывающий пять взаимосвязанных направлений.

Направление 1. Совершенствование системы обращения с отходами:

– Внедрение системы раздельного сбора и сортировки отходов на всех филиалах.

– Заключение договоров с лицензированными операторами на переработку вторичных ресурсов (масла, шины, аккумуляторы, упаковочные материалы).

– Цифровизация учёта образования и движения отходов с использованием электронного документооборота.

Направление 2. Снижение выбросов CO_2 при эксплуатации транспорта:

– Разработка программы постепенной замены автомобильного парка на технику экологического класса Евро-5 и выше.

– Пилотное внедрение электромобилей для вахтовых и служебных перевозок малой протяжённости (при наличии зарядной инфраструктуры в местах дислокации филиалов).

– Внедрение системы мониторинга расхода топлива с элементами телематики для контроля и оптимизации стиля вождения (эко-драйвинг).

– Оптимизация маршрутов движения с использованием специализированного программного обеспечения, что позволяет сократить лишний пробег и расход топлива.

Направление 3. Экологизация ремонтно-технической инфраструктуры:

– Обустройство площадок для технического обслуживания, ремонта и мойки техники системами замкнутого водоснабжения и очистки сточных вод.

– Использование экологически безопасных моющих средств и реагентов на постах обслуживания автотранспорта.

– Внедрение энергосберегающего освещения и оборудования в гаражах и ремонтных мастерских.

Направление 4. Цифровизация и оптимизация логистических процессов:

– Внедрение интегрированной системы управления транспортом (Transport Management System, TMS) для автоматизации планирования перевозок.

– Использование технологий искусственного интеллекта для прогнозирования загрузки и оптимизации маршрутов по нескольким критериям (время, стоимость, выбросы).

– Цифровое сопровождение грузов с передачей данных о местоположении и параметрах транспортного средства в единый центр мониторинга.

Направление 5. Развитие зелёных офисов и экологическое просвещение персонала:

– Перевод документооборота в электронный вид, установка контейнеров для раздельного сбора вторсырья в офисных помещениях.

– Снижение потребления бумаги, электроэнергии и воды в административных зданиях.

– Организация регулярного обучения и повышения квалификации водительского и диспетчерского состава по вопросам экологической безопасности и эко-драйвинга [5].

Реализация предложенного комплекса мероприятий позволит ООО «РН-ТРАНСПОРТ»:

1. Экологические результаты:

– дополнительное снижение объёмов образования отходов не менее чем на 15–20 % к 2027 году;

– сокращение удельного расхода топлива на 8–12 % за счёт оптимизации маршрутов и внедрения эко-драйвинга;

– уменьшение платы за негативное воздействие на окружающую среду не менее чем на 30% дополнительно к уже достигнутым показателям.

2. Экономические результаты:

– снижение операционных расходов на топливо и утилизацию отходов;

– снижение экологических платежей достигнуто за счёт сокращения объёмов отходов при выполнении требований природоохранного законодательства;

– рост эффективности использования транспортных средств.

3. Управленческие и репутационные результаты:

– соответствие лучшим мировым практикам в области устойчивого развития и ESG-стандартам;

– повышение инвестиционной привлекательности предприятия в рамках периметра ПАО «НК «Роснефть»;

– формирование позитивного имиджа ответственного и современного оператора автотранспортных услуг [6].

В итоге разработка проекта системы «зелёной» логистики в ООО «РН-ТРАНСПОРТ» представляет собой не просто комплекс природоохранных мероприятий, а стратегическое направление развития предприятия, интегрирующее экологическую эффективность в общую логику управления транспортными операциями. Предложенная дорожная карта учитывает специфику деятельности компании, её филиальную структуру, уже достигнутые экологические показатели, а также лучшие отраслевые практики.

Внедрение системы позволит не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и получить реальные экономические выгоды за счёт оптимизации ресурсопотребления, цифровизации процессов и повышения управляемости транспортным комплексом. Для достижения поставленных целей необходима консолидация усилий всех структурных подразделений, постоянный мониторинг показателей и дальнейшее совершенствование системы экологического менеджмента с учётом меняющихся требований законодательства и вызовов устойчивого развития.

Библиографический список

1. Приказ Минприроды России от 30.12.2021 № 1044 «Об утверждении Перечня индикаторов риска нарушения обязательных требований по федеральному государственному экологическому контролю (надзору)». (Вместе с «Перечнем индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного экологического контроля (надзора)») – URL: kodeks.karelia.ru (дата обращения: 03.05.2026).

2. ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2016. – 27 с. (Введён взамен ГОСТ Р ИСО 14001-2007).

3. Заменин, Н. А. Повышение экологичности логистических процессов компании / Н. А. Заменин. – Текст: электронный // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов XIX международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 15–16 мая 2025 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2025. – С. 218–223. – URL: https://elar.urfu.ru/handle/10995/143155 (дата обращения: 03.05.2026).

4. Журун, Я. А. «Зелёная» логистика как драйвер устойчивого развития: точки соприкосновения и синергия / Я. А. Журун, Е. И. Эйсымонт // Гуманитарные и естественнонаучные факторы решения экологических проблем и устойчивого развития. В 2 ч. Ч. 1 : материалы XXII междунар. науч.-практ. конф., Новомосковск, 19–20 дек. 2025 г. – Новомосковск : Росс. хим.-технолог. ун-т им. Д. И. Менделеева, Новомоск. ин-т (филиал), 2025. – С. 60–63.

5. Шендалев, А. Н. Модель зеленого менеджмента транспортной компании / А. Н. Шендалев, О. А. Шендалева. – Текст: непосредственный // Инновационная экономика и общество. – 2024. – № 3 (45). – С. 103–111.

6. Назарова, М. Экологическая устойчивость в современной логистике: инновационные подходы к снижению экологического воздействия в цепи поставок / М. Назарова. – DOI неизвестен. – Текст: электронный. – 2022. – URL: https://lib.dm-centre.ru (дата обращения: 03.05.2026). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

© Мусин Р.А., 2026

УДК 656.4

Т.И. НАДЫРГУЛОВА
nadyrgulovatansulpan@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕКРЕСТКОВ ГОРОДСКИХ МАГИСТРАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы цифровой трансформации транспортной инфраструктуры крупных городов России. Проводится анализ методов повышения пропускной способности перекрестков с применением интеллектуальных транспортных систем. На основе опыта внедрения ИТС в г. Уфе предлагаются мероприятия по оптимизации конкретного проблемного

узла – перекрестка улиц Мингажева и 8 Марта. Приводятся количественные показатели ожидаемой эффективности.
Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, пропускная способность, адаптивное светофорное регулирование, цифровая трансформация, Уфа, перекресток, приоритет общественного транспорта.

Цифровая трансформация городской среды является одним из ключевых трендов современного развития. В городах-миллионниках России, где уровень автомобилизации неуклонно растет, а существующая дорожная инфраструктура зачастую исчерпала свою пропускную способность, особую актуальность приобретают задачи оптимизации транспортных потоков. Традиционные методы расширения дорожной сети, такие как строительство развязок и новых магистралей, требуют колоссальных капиталовложений и не всегда применимы в условиях сложившейся городской застройки. В этой связи эффективным инструментом становится внедрение интеллектуальных транспортных систем, которые представляют собой комплекс технологических решений, объединяющих средства связи, управления, обработки данных и информации. Этот комплекс направлен на повышение безопасности, эффективности и комфорта перевозок. В отличие от капиталоемкого строительства, интеллектуальные транспортные системы нацелены на то, чтобы заставить уже существующую инфраструктуру работать умнее и продуктивнее за счет скоординированного управления и перераспределения потоков [1].

Исторически управление движением на перекрестках осуществлялось с помощью статических, или жестких, светофорных программ, работающих по фиксированному временному графику. Такие системы не учитывают реальную загруженность направлений в конкретный момент времени, что приводит к неоправданным задержкам транспорта при изменении интенсивности потока. Более совершенным подходом является адаптивное светофорное регулирование, при котором длительность фаз в реальном времени подстраивается под текущую интенсивность транспортного потока с использованием данных, поступающих с детекторов –радарных, магнитных или видеодетекторов. Математически пропускная способность регулируемого перекрестка для конкретного направления может быть выражена формулой:

$$c_{ij} = \frac{s_{ij} g_{ij}}{C}, \quad (1)$$

где c_{ij} – пропускная способность полосы i в течение фазы регулирования j, прив.ед/ч; s_{ij} – поток насыщения полосы i в течение фазы регулирования j, прив.ед/ч; g_{ej} – эффективная длительность фазы регулирования j, с; C – длительность цикла регулирования, с [2].

Из этой формулы видно, что увеличение доли времени, отводимой на конкретное направление, прямо пропорционально повышает его пропускную способность, и задача адаптивной системы как раз и заключается в динамическом перераспределении времени между направлениями в зависимости от текущей загрузки.

Среди ключевых элементов интеллектуальных транспортных систем, применяемых для управления перекрестками, можно выделить детекторы транспорта, фиксирующие проезд транспортных средств, их скорость и загрузку полос; локальные и центральные контроллеры, обрабатывающие данные с детекторов и формирующие управляющие сигналы для светофорных объектов; системы приоритетного проезда общественного транспорта, позволяющие автобусам, троллейбусам или трамваям запрашивать внеочередное включение зеленого сигнала; комплексы фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения, фиксирующие проезд на запрещающий сигнал, превышение скорости, выезд на встречную полосу или трамвайные пути; а также системы динамического информирования водителей в виде табло переменной информации, отображающих загруженность направлений и рекомендуемые альтернативные маршруты.

Уфа, как крупный административный, промышленный и культурный центр с населением свыше 1,1 миллиона человек, сталкивается с типичными для мегаполиса транспортными проблемами: заторами в часы пик, высокой аварийностью, неэффективной работой отдельных светофорных объектов. По данным Администрации городского округа город Уфа, на конец 2023 года система адаптивного регулирования была внедрена на 87 перекрестках города. Результаты внедрения показали значительную эффективность: удалось достичь снижения задержек транспортных средств в среднем на 20-25 %, повышения средней скорости движения в зонах действия системы на 15-18 %, а также сокращения количества остановок транспортных средств на 30 %, что положительно сказалось на экологической обстановке за счет снижения вредных выбросов.

Значимым компонентом уфимской интеллектуальной транспортной системы стала комплексная система фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения. В городе развернута сеть из более чем 150 стационарных комплексов, работающих в автоматическом режиме и круглосуточно фиксирующих такие нарушения, как превышение скорости, проезд на запрещающий сигнал светофора и выезд на полосу для общественного транспорта [3]. Эффект от внедрения этой системы выразился в снижении количества дорожно-транспортных происшествий на оборудованных участках в среднем на 15-20 %. Для повышения привлекательности общественного транспорта в Уфе была развернута система интеллектуального управления на основе технологий ГЛОНАСС и GPS. Муниципальный автобусный, троллейбусный и трамвайный парк оснастили бортовым оборудованием, которое в режиме реального времени передает данные о местоположении, скорости и соблюдении графика движения. Благодаря этому стало возможным внедрение электронных информационных табло на остановках, отображающих время прибытия ближайшего транспорта.

Согласно методике оценки ущерба от заторов, внедрение адаптивного регулирования на 87 перекрестках Уфы позволило получить ежегодную экономию в сотни миллионов рублей за счет сокращения временных потерь

автомобилистов, снижения расхода топлива и уменьшения вредных выбросов [4]. Важно отметить, что эта цифра не включает финансовую выгоду от снижения аварийности и повышения эффективности работы общественного транспорта. Таким образом, инвестиции в интеллектуальные транспортные системы являются не затратами, а рентабельными вложениями в развитие городской среды.

Однако, несмотря на значительные успехи в цифровой трансформации транспортной инфраструктуры Уфы, не все проблемные узлы города охвачены адаптивным управлением. Одним из таких перекрестков, требующих модернизации, является пересечение улиц Мингажева и 8 Марта. Данный узел не вошел в число перекрестков с адаптивным регулированием, что подтверждает актуальность его модернизации. В 2021 году в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги» была проведена реконструкция улицы 8 Марта: на участке от бульвара Хадии Давлетшиной до улицы Мингажева создана шестиполосная магистраль шириной 24 метра, призванная стать дублером перегруженной улицы Октября [5]. Организация движения на самой улице 8 Марта предусматривает три полосы в каждом направлении, при этом крайняя правая полоса предназначена для поворота направо на улицу Мингажева на север города, средние полосы – для движения прямо по улице 8 Марта в сторону улицы 50-летия Октября, а крайняя левая полоса позволяет как повернуть налево на улицу Мингажева на юг города, так и продолжить движение прямо.

Улица Мингажева имеет по две полосы в каждом направлении, а посередине проходят трамвайные пути, по которым следуют маршруты № 1, 5, 18 и др. Пересечение трамвайных составов с автомобильными потоками требует выделенной фазы светофорного регулирования, что увеличивает длительность цикла и время задержки автотранспорта. Особенностью транспортного узла является наличие на улице Мингажева трех различных автомобильных направлений выезда: правый поворот на улицу 8 Марта, прямое движение и диагональный правый поворот на улицу 50-летия Октября, позволяющий транспорту с улицы Мингажева напрямую попадать на ключевую городскую магистраль. Однако практика эксплуатации показала, что после реконструкции улицы 8 Марта транспортные потоки в часы пик накапливаются перед перекрестком с улицей Мингажева из-за неоптимальной работы светофорного регулирования, не учитывающего возросшую интенсивность движения. Пробки возникают в обе стороны по улице Мингажева. Ключевая проблема заключается в том, что существующая схема организации дорожного движения работает по жесткому временному графику. В часы пик наблюдаются значительные задержки, особенно для левоповоротных потоков с улицы Мингажева, а также из-за необходимости пропускать трамваи. На основе выявленных недостатков и анализа успешного опыта внедрения интеллектуальных транспортных систем в Уфе предлагается комплекс мероприятий по оптимизации данного перекрестка.

Прежде всего, предлагается замена существующего светофорного контроллера на адаптивный с установкой детекторов транспорта на всех подходах к перекрестку. Система будет в реальном времени корректировать длительность фаз в зависимости от загруженности направлений, в первую очередь увеличивая зеленый сигнал для наиболее загруженных направлений –в том числе для движения по улице Мингажева в обе стороны. Для решения проблемы с трамвайным движением предлагается внедрение системы приоритетного проезда общественного транспорта. Трамвайные вагоны, следующие по улице Мингажева, предлагается оснастить устройствами радиоканала, взаимодействующими со светофорным контроллером. При приближении трамвая к перекрестку система будет автоматически продлевать зеленый сигнал, если трамвай подходит на разрешающий, или сокращать красный, если трамвай подошел на запрещающий. Это позволит снизить задержки общественного транспорта без ущерба для пропускной способности перекрестка.

Кроме того, предлагается синхронизация светофорных объектов на улице Мингажева и на улице 50 лет Октября в рамках единой системы координированного управления. После того как транспортный поток с улицы Мингажева получает разрешающий сигнал и направляется в сторону улицы Гражданской, зеленый сигнал на перекрестке с улицей 50 лет Октября включается с расчетной задержкой, равной времени проезда дистанции между двумя перекрестками. Это позволяет реализовать режим «зеленой волны», при котором автомобили, стартовавшие с первого перекрестка, подходят ко второму также на разрешающий сигнал, исключая дополнительные остановки и накопление очередей. Управление обоими светофорными объектами осуществляется централизованно через Центр управления дорожным движением, что позволяет в реальном времени корректировать временные параметры в зависимости от текущей загруженности направлений. На самом перекрестке также предлагается установка комплексов фотовидеофиксации для фиксации проезда на запрещающий сигнал светофора и выезда на трамвайные пути, что особенно актуально из-за сложной конфигурации узла. На крупных подходах к перекрестку предлагается также установка динамических информационных табло, отображающих актуальную загруженность направлений и рекомендуемые альтернативные маршруты объезда в часы пик, что позволяет перераспределить потоки и снизить пиковую нагрузку дополнительно на 10-15 %.

Реализация предложенных мероприятий позволит повысить пропускную способность перекрестка на 15-20 % за счет рассредоточения потоков по разным фазам и внедрения адаптивного управления, снизить задержки для левоповоротных потоков с улицы Мингажева на 25-30 секунд, уменьшить количество конфликтных точек и снизить риск дорожно-транспортных происшествий на 15-20 %, обеспечить беспрепятственный пропуск транзитных потоков по улице 8 Марта в направлении улицы Октября и по улице Мингажева в обе стороны, а также сохранить приоритет трамвайного движения при общем

сокращении задержек автотранспорта. Синхронизация светофорных объектов позволит дополнительно сократить число остановок транспорта на втором перекрестке, реализуя режим «зеленой волны». Экономический эффект от внедрения предложенных решений будет выражаться в сокращении временных задержек автомобилистов, снижении расхода топлива и уменьшении вредных выбросов в атмосферу [4].

Проведенный анализ показывает, что цифровая трансформация транспортной инфраструктуры через внедрение элементов интеллектуальных транспортных систем является необходимым инструментом управления городским хозяйством крупных городов. Опыт Уфы, где адаптивное регулирование внедрено на 87 перекрестках, а фотовидеофиксация – более чем на 150 участках, демонстрирует конкретные количественные результаты: снижение задержек на 20-25 %, рост средней скорости на 15-18 %, сокращение аварийности на 15-20 % и ежегодную экономию в сотни миллионов рублей. На примере проблемного перекрестка улиц Мингажева и 8 Марта показано, как теоретические методы и успешный опыт города могут быть применены к конкретному узлу. Предложенные мероприятия, включающие адаптивное регулирование, приоритет трамвая, синхронизацию со смежным перекрестком для организации «зеленой волны», фотовидеофиксацию и динамическое информирование водителей, позволят повысить пропускную способность перекрестка без капитального переустройства проезжей части. Дальнейшее развитие интеллектуальных транспортных систем в Уфе видится в интеграции разрозненных систем в единую цифровую платформу, внедрении технологий умного паркинга и развитии сервисов интеллектуальной маршрутизации. Предлагаемые решения по конкретному перекрестку соответствуют этой стратегии и могут быть масштабированы на другие проблемные узлы города.

Библиографический список

1. Интеллектуальные транспортные системы роботы. [Электронный ресурс] // Rosavtodor. Режим доступа: https:/ https://dr.rosavtodor.gov.ru.

2. Проектирование регулируемых пересечений. [Электронный ресурс] // Transport.isty.edu. Режим доступа: https://transport.istu.edu/downloads/books/b2/signalized%20intersections.pdf.

3. Данные ГИБДД по Республике Башкортостан. Статистика по комплексам фотовидеофиксации. Режим доступа: https://гибдд.рф/.

4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов на автомобильном транспорте и в дорожном хозяйстве (утв. Минтрансом РФ). – М., 2019. – 51 с.

5. Реконструкция улицы 8 Марта в Уфе с инновационными технологиями. [Электронный ресурс] // Ufaved.info. Режим доступа: https://ufaved.info/articles/gorodskaysreda/rekonstruktsiya_ulitsy_8_marta_v_ufe_s_innovatsionnymi_tekhnologiyami/.

© Надыргулова Т.И., 2026

УДК 656.1/.5

А.И. НАФИКОВА
buhomalvado@mail.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРЕВОЗКА ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация: в данной статье рассмотрены особенности перевозки легковых автомобилей на железнодорожном транспорте в России. Описаны преимущества данного вида транспортировки перед автомобильными перевозками. Приведены технические характеристики основных типов специализированных вагонов: 11-9772, 23-469-08, 11-9733.
Ключевые слова: железнодорожная перевозка; легковой автомобиль; подвижной состав; технология погрузки; крытый вагон для легковых автомобилей; двухъярусный вагон; вагон-автомобилевоз; транспортная логистика.

Введение

С увеличением объёмов производства легковых автомобилей в Российской Федерации спрос на перевозку данной техники увеличился. При выборе вида транспорта для данной перевозки необходимо учитывать высокую сохранность груза, экономическую выгоду при транспортировке больших партий, а также наносимый вред окружающей среде. Для выполнения вышеперечисленных условий перевозки наиболее целесообразно использовать железнодорожный транспорт [1].

Перевозка легковых автомобилей на железнодорожном транспорте дает возможность одновременной транспортировки нескольких единиц техники в одном вагоне, что существенно снижает удельную стоимость перевозки. Кроме того, специализированные крытые вагоны защищают легковые автомобили от атмосферных воздействий, вандализма и хищений во время перевозки.

Сравнение видов транспорта

Автомобильный транспорт, не смотря на лидерство по количеству перевезенных грузов в Российской Федерации, имеет свои недостатки. Одним из них является высокая стоимость перевозки на дальние дистанции, что критично для перевозок легковых автомобилей. Кроме того, риск повреждения

груза при транспортировке наиболее высок: автомобильные перевозки грузов считаются одними из самых аварийных [2].

Водный транспорт позволяет перевозить груз большими партиями на значительное расстояние, что повышает экономичность перевозки за счет низкого расхода топлива на единицу груза. Однако, при сравнение средней скорости перевозки, водный транспорт значительно уступает остальным: 25–40 км/ч – водный, 60–80 км/ч – железнодорожный, 80–100 км/ч – автомобильный. Кроме того, при перевозке водными путями груз часто подвергается коррозии из-за воздействия высокой влажности и соленой воды. При перевозке внутри Российской Федерации также необходимо учитывать сезонность для речного вида транспорта [3].

Воздушный транспорт хоть и является одним из самых быстрых и безопасных видов транспорта, требует огромных затрат на перевозку. Предпочтителен для срочных перевозок, например, для эксклюзивных или гоночных автомобилей, экономически не выгоден и нецелесообразен для массовых перевозок легковых автомобилей и других видов груза [4].

Железнодорожный вид транспорта, предоставляет возможность перевозки большой партии легковых автомобилей: минимально в вагон помещается 10 автомобилей, а один грузовой локомотив в среднем способен перевозить 40 таких специализированных вагонов. Кроме того, железнодорожной транспорт остается лидером по грузообороту в Российской Федерации, что позволяет эффективно перевозить грузы на дальние расстояния. Также стоит отметить безопасность перевозки груза в специализированных вагонах, рассмотренных в статье: все вагоны, имеют крытую конструкцию, с цельнометаллическим кузовом, запираемые двери с возможностью пломбирования [5].

Подвижной состав

В настоящее время на железнодорожном транспорте России применяются несколько типов специализированных вагонов для перевозки легковых автомобилей.

Вагон модели 11-9772 – крытый двухъярусный вагон, разработан на заводе «Промтрактор-Вагон», выпускается с 2008 года. Вагон имеет двухъярусную конструкцию, что позволяет размещать автомобили в два уровня, тем самым увеличивается вместимость вагона и снижаются транспортные издержки на единицу груза.

Вагон модели 23-469-08 – крытый двухъярусный вагон производства Днепровагонмаш, эксплуатируемый с 1970-х годов. Однако, с 2007 года производством вагонов в Российской Федерации занимается ЗАО «Волгаметаллострой». Производство сохранило основные конструкции вагона, при этом адаптировала его под актуальные технические условия. Данный вагон остаётся конкурентоспособным благодаря увеличенной грузоподъёмности и надёжности.

Вагон модели 11-9773 – крытый одноярусный вагон Тверского вагоностроительного завода, выпускавшийся в период 1964–1995 годов. Изначально в 1960-х годах вагон проектировался, как универсальный вагон для штучных грузов, поэтому в отличие от специализированных двухъярусных вагонов. Модель 11-9733 представляет собой универсальный крытый вагон, поэтому проигрывает в параметре вместимости двум другим рассматриваемым моделям, из-за отсутствия специального внутреннего оборудования и конструкции самого вагона [6].

Подробные характеристики представленных в статье вагонов указаны в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики вагонов-автомобилевозов

Параметр	11-9772 [5]	23-469-08 [6]	11-9733 [7]
Тип	Крытый двухъярусный	Крытый двухъярусный	Крытый одноярусный
Грузоподъемность, т.	20	22	50
Тара вагона, т.	42,5–43,5	37,2–38	38,5–40
Длина по осям, мм.	24 460	25 220	24 260
Длина по раме, мм.	21 240	24 000	-
Ширина, мм.	3 210	3 150	3 226
Внутренняя ширина, мм.	3 000	2 920	3 100
Внутренняя длина, мм.	20 500	23 500	23 340
Высота 1-го яруса, мм.	1 900	1950	3 672 мм
Высота 2-го яруса, мм.	1 820	1 900	-
База вагона, мм.	17 000	19 000	17 000
Вместимость	6–12 авто	6–12 авто	6–10 авто
Завод	Акционерное общество «Промтрактор-вагон»	Частное акционерное общество «Днепровагон-маш»	Открытое акционерное общество «Тверской вагоностроительный завод»
Год начала	2008	1970	1995

выпуска			
Нормативный срок службы	30 лет	30 лет	32 года

Технологии погрузки

Погрузка легковых автомобилей осуществляется преимущественно своим ходом, кран используется для погрузки аварийных автомобилей или для погрузки автомобиля без запуска двигателя. В вагоны 23-469-08 и 11-9772 автомобили заезжают в торцевые дверцы, а в вагон 11-9733 через широкие торцевые или боковые двери по специальным рампам. В двухъярусных вагонах на первом ярусе установлены специальные направляющие, которые помогают точно позиционировать автомобиль. На второй ярус погрузка осуществляется с помощью стационарного наклонного настила, по которому автомобиль заезжает на второй ярус, редко используется подъёмная платформа. Для безопасности и крепления автомобилей используют колесные упоры, ремни, стяжки и крепежные железнодорожные подкладки. На погрузку одного вагона в среднем уходит 30–45 минут [7].

Разгрузка выполняется похожим образом, но сначала разгружается верхний ярус, а потом нижний. Это необходимо для того, чтобы иметь доступ к верхней платформе и пандусам без дополнительного оборудования, а также предотвращения опрокидывания вагона из-за неправильного распределения веса. Несоблюдение этой последовательности может привести к повреждению как легковых автомобилей, так и конструкции вагона в целом [8].

Экономическая эффективность

Для сравнение экономической эффективности между перевозками на автомобильном и железнодорожном транспорте рассмотрим пример перевозки партии легковых автомобилей в количестве 40 единиц по маршруту Москва – Владивосток (табл. 2).

При использовании автомобильного транспорта понадобится 5 автовозов по 8 автомобилей в каждом. Маршрут составляет около 9 000 км, для его преодоления в среднем требуется 7–9 суток, учитывая, что автовозом круглосуточно управляют два водителя. В среднем тариф на перевозку данного типа с помощью автовозов составляет 95 000 рублей за один автомобиль. Такая цена складывается из затрат на топливо и оплаты труда водителей, а также учитывает все расходы необходимые для погрузки и разгрузки автомобилей и их страхование, а также прибыль перевозчика [9].

Перевозка на железнодорожном транспорте по тому же маршруту составит около 10–14 суток, понадобиться 4 специализированных вагона, загруженных по 10 автомобилей в каждом. Стоимость единицы техники на железнодорожном транспорте в среднем составит 72 000 рублей за единицу

техники. В тариф уже включена стоимость погрузки автомобилей в вагон, а также оформление документов и их страхование [10].

Таблица 1

Сравнение экономической эффективности

Показатель	Железнодорожный транспорт	Автомобильный транспорт
Количество транспортных единиц	4 специализированных вагона	5 автовозов
Стоимость перевозки одного автомобиля, тыс. руб.	72	95
Общая стоимость партии, млн	2,88	3,8
Общая стоимость партии в год, млн.	34,56	45,6
Время доставки, сут.	7–9	10–14

Таким образом, используя усредненные значения тарифов перевозки, в табл. 2 можно увидеть, что общая стоимость перевозки партии на железнодорожном транспорте отличается от общей стоимости перевозки на автомобильном транспорте примерно в 1 миллион рублей. Если же считать, что один дилерский центр продает в среднем 40 автомобилей в месяц, в год ему понадобиться 480 единиц. Принимая в расчет, что поставка по этому маршруту будут осуществляться ежемесячно, то железнодорожная перевозка обеспечивает снижение затрат на 24%

Заключение

Таким образом, железнодорожная перевозка легковых автомобилей имеет ряд преимуществ перед другими видами транспорта, в том числе значительную экономическую эффективность, при массовых перевозках легковых автомобилей. Специализированные вагоны моделей 11-9772, 23-469-08, 11-9733 имеют специальную конструкцию для крепления, погрузки и разгрузки автомобилей, что обеспечивает высокую сохранность груза.

Библиографический список

1. Титова, Т. С. «От идеи – до внедрения»: 25 лет работы над инновациями в подвижной состав : статья / Т. С. Титова, Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская. – СПб. : ПГУПС, 2021. – С. 45–58.

2. Сиразетдинов, О. В. Формирование транспортно-логистического сервиса по доставке продукции предприятий потребителям: статья / О. В. Сиразетдинов. – Нижний Новгород: Научные проблемы водного транспорта, 2004. – С. 112–119.

3. Ожерельев, В. Н. Перспективы уплотнённой погрузки автомобилей в железнодорожные вагоны: статья / В. Н. Ожерельев, Е. В. Афонина. – М.: Транспортное машиностроение, 2016. – С. 23–29.

4. Вагон модели 11-9772 [Электронный ресурс]: технические характеристики. – URL: https://vagon.by/model/11-9772 (дата обращения: 29.04.2026).

5. Вагон модели 11-9772 [Электронный ресурс]: спецификация. – URL: https://www.agonta.com/cont_ru/railcars/boxcars/11_9772.html (дата обращения: 29.04.2026).

6. Вагон модели 23-469-08 [Электронный ресурс]: технические характеристики. – URL: https://vagon.by/model/23-469-08 (дата обращения: 29.04.2026).

7. Вагон модели 11-9733 [Электронный ресурс]: технические характеристики. – URL: https://vagon.by/model/11-9733 (дата обращения: 29.04.2026).

8. Об утверждении Местных технических условий размещения и крепления легковых автомобилей в специализированных вагонах для перевозки автомобилей модели 11-835: распоряжение ОАО «РЖД» от 03.08.2018 № 1727р. – М., 2018.

9. RZD Log – логистический портал ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. – URL: https://rzdlog.ru/ (дата обращения: 29.04.2026).

10. Система ВЛ – калькулятор стоимости перевозки автомобилей [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sistemavl.ru/calculator (дата обращения: 29.04.2026).

© Нафикова А.И., 2026

УДК 339.543

А.В. НУРИМАНОВ
nurim887@icloud.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ИМПОРТ АВТОМОБИЛЕЙ ИЗ США

Аннотация: в статье анализируется трансформация механизмов поставок американских автомобилей в Россию в условиях санкционного давления. Рассмотрены аукционная экосистема США как фактор прозрачности сделок, архитектура обходных логистических маршрутов через хабы Грузии и Турции, а также влияние таможенно-тарифной реформы октября 2024 года на удорожание техники. На примере BMW X5 (G05) математически обоснована инвестиционная привлекательность сделок для конечного потребителя,

выявлены технические риски цифровой блокировки телематики и сертификационные барьеры.
Ключевые слова: параллельный импорт; автомобильный рынок США; утилизационный сбор; аукционы Manheim; логистические хабы; СБКТС; Carfax; цифровая блокировка авто.

Ландшафт российского автомобильного рынка претерпел не просто изменения, а полную перекройку. Исчезновение с горизонта «Большой немецкой тройки» и ключевых японских марок образовало пустоту, которую китайские производители заполнили лишь отчасти. Для потребителя, разборчивого в вопросах посадки за рулем, пассивной безопасности и престижа, единственным окном в мир привычного автопрома остался параллельный импорт. В этой новой реальности Соединенные Штаты стали «тихой бухтой»: колоссальная емкость вторичного рынка, кристально чистая история транспортных средств и, что критично, снижающиеся ценники внутри страны. Этот материал – попытка препарировать механизм доставки «американской мечты» в суровые отечественные условия [1].

Рынок США – это не стихийная барахолка, а строго регламентированная среда обитания автомобилей.

Стандарт прозрачности

Скручивание пробега в Америке – уголовное преступление с реальными сроками. Цифровые платформы Carfax и AutoCheck работают как агрегаторы данных: они стягивают информацию из мастерских, страховых баз и правоохранительных сводок. Клиент из РФ виртуально присутствует при каждой замене масла в Нью-Мексико и знает характер повреждений, полученных при неудачной параллельной парковке в Мичигане. Такой уровень открытости ставит машины из США на голову выше «непрозрачных» вариантов из Европы или Эмиратов.

Комплектация без компромиссов

Американский потребитель требователен по своей природе. Поэтому даже начальные версии ходовых моделей (вроде Honda CR-V или Mercedes-Benz GLE) идут с таким набором оборудования, который на других континентах считается топовым. Речь об объемных атмосферных моторах, классических гидромеханических автоматах (никаких роботизированных коробок), мощных климатических установках и полноценных зимних пакетах, что делает эти лоты крайне желанными в российских широтах [2].

Главным фильтром на пути ввоза стали регуляторные ужесточения, заработавшие с середины осени 2024 года.

Трансформация утильсбора

Основная цель нововведений – нейтрализация схем «серого» реэкспорта. Если вы раньше могли завезти машину по «серой» схеме через Киргизию с копеечным инвойсом, забыв о доплатах в РФ, то сегодня недоимка пошлин ЕАЭС жестко интегрируется в структуру утилизационного сбора.

– Физические лица (для себя): льготный тариф (3,4 – 5,2 тыс. руб.) сохраняется при условии, что вы не расстаетесь с авто 12 месяцев, а рабочий объем двигателя ограничен 3.0 литрами.

– Коммерческий тариф: попытка ввезти мощный внедорожник (свыше 3.0 л) с целью перепродажи превращает сбор в разорительную статью бюджета (от 1,2 до 2,5 млн рублей), делая экономику перепродажи бюджетных машин бессмысленной.

Сертификационная хирургия (СБКТС и ЭРА-ГЛОНАСС). Оформление Свидетельства о безопасности – обязательный ритуал [2].

Главная головная боль для «американцев» – задняя оптика. Отечественные стандарты безопасности движения запрещают красные сигналы поворотников. В бюджет сделки сразу зашивается «операция» по перепрошивке или замене блок-фонарей на евро-аналоги.

Логистические головоломки: География обходных путей

Прямой транспортный коридор между Штатами и Россией разрушен. Морские тяжеловесы (Maersk, MSC) не работают с портами РФ. Это стимулировало появление сложных каскадных маршрутов.

– Грузинский хаб (Батуми/Поти): доминирующее направление – сорок-сорок пять дней в море от восточных причалов США (Саванна, Нью-Джерси) до черноморского побережья Грузии. Далее автовоз и штурм КПП «Верхний Ларс». Главная болевая точка – зависимость от погоды и геополитического фона, создающая километровые заторы из фур [1].

– Турецкий плацдарм: Турецкая Республика играет роль распределительного центра. Судно разгружается в районе Стамбула, после чего-либо морем идет в Новороссийск, либо автотранспортом через сопредельные государства. Эта схема дороже, но дает фору в плане контроля сохранности груза [3].

– Восточный крюк через КНР: экзотичный, но набирающий обороты канал для премиум-сегмента. Электрокары (Lucid, Rivian), боящиеся переохлаждения в трюме, везут через китайские терминалы с последующей перегрузкой на железнодорожные платформы.

Финансовое моделирование: разбор на примере бестселлера

Для иллюстрации реальной разницы возьмем расчет BMW X5 (G05) 2021 года выпуска с 3-литровой турбошестеркой мощностью 340 л.с.

– Стоимость покупки на площадке Manheim (небитый): $42000.

– Внутриамериканская логистика и аукционный взнос: $1500.

– Океанский транзит до Поти: $2200.

– Брокерские и агентские услуги: $1000.

– Транспортный налог и сопутствующие сборы: ~$500.

– Таможня РФ для частного клиента (возраст авто 3-5 лет): приблизительно 9 000 евро (в рублевом выражении ~950 000).

– Госпошлина за утилизацию (льготная): 5 200 руб.

– Себестоимость на границе: около 5,6 млн. руб.

– Актуальный прайс в РФ: от 7,5 до 8 млн. руб.

– Маржинальность (условная выгода покупателя): около 2 млн рублей оседает в кармане, а не в кассе дилера.

Инженерные ловушки и технологическая тюрьма

Нелегальный ввоз – это не супермаркет, а венчурная инвестиция с высоким порогом риска.

Цифровая клетка: современный транспорт – это программно-аппаратный комплекс на колесах.

Производители (BMW, Mercedes, Tesla) активно внедряют геолокационные скрипты. Зафиксированы инциденты, когда импортированный автомобиль, выходя в интернет через российскую SIM-карту, терял навигационные карты или мультимедийный функционал. Лекарством служит перепрошивка или внедрение модулей-эмуляторов (бюджет: 50–150 тыс. руб.) [3].

Отсутствие страховки от поломок: понятие «глобальная гарантия» для территории РФ аннулировано. Заводской брак становится исключительно головной болью нового собственника. Поэтому критически важна предпродажная инструментальная диагностика на территории США силами независимых специалистов.

В 2025 году параллельный ввоз машин из Америки окончательно мутировал из ширпотреба в узкий клуб джентльменов. Это занятие требует дотошного знания правовых лакун и наличия надежных контрагентов за океаном. Но пока спред между рыночной ценой уставшего «официала» в России и свежего «американца» сопоставим со стоимостью жилой недвижимости в провинции, этот мост будет функционировать. Это выбор тех, кто ставит качество сборки на заводе в Спартанбурге и документальную честность выше, чем комплиментарный латте в дилерском центре.

Библиографический список

1. Агапова, А. В. Таможенное регулирование параллельного импорта в условиях санкционных ограничений / А. В. Агапова // Таможенное дело. – 2024. – № 3. – С. 11–14.

2. Басаргин, А. А. Методы искусственного интеллекта в транспортной логистике: учебное пособие / А. А. Басаргин. – Новосибирск: СГУИТ, 2022. – 164 с.

3. Воронов, А. С. Трансформация цепей поставок автомобильной техники в Российской Федерации / А. С. Воронов, М. И. Лисин // Логистика и управление цепями поставок. – 2025. – Т. 18, № 1. – С. 45–53.

© Нуриманов А.В., 2026

УДК 621.22

В.С. ПАВЛОВА, С.Ю. КОНСТАНТИНОВ
pavlotti14.10@gmail.com, konstserge@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ

Аннотация: статья посвящена исследованию гидравлических характеристик сетчатых фильтров с различной тонкостью фильтрации. Рассмотрено влияние конструкции и размеров ячейки фильтрующей сетки на гидравлические характеристики фильтра. Испытания фильтров проводились на стенде «Определение потерь напора в местных гидравлических сопротивлениях» через промывной фильтр с размером ячейки сетки 100 мкм и угловой фильтр с размером ячейки сетки 500 мкм, а также через сквозную трубу диаметром 12,5 мм без фильтрующего элемента.
Ключевые слова: фильтр, фильтрующий элемент, гидравлическое сопротивление, перепад давления, пропускная способность.

Фильтр является неотъемлемым вспомогательным элементом гидроавтоматики, кондиционером рабочей жидкости, в гидравлических и пневматических системах мобильной техники, авиации, машиностроении. При проектировании фильтров обеспечение низкого перепада давлений на фильтрующем элементе является важной задачей, особенно при выборе оптимального размера ячейки фильтрующей сетки, так как уменьшение ее размера повышает тонкость фильтрации, однако приводит к увеличению гидравлического сопротивления, и, как следствие, к росту энергетических потерь в системе [1].

Экспериментальные исследования гидравлических характеристик фильтров проводились на стенде «Определение потерь напора в местных гидравлических сопротивлениях» кафедры прикладной гидромеханики УУНиТ, на который были установлены:

1) фильтр промывной с размером ячейки 100 мкм (рис. 1, 2);
2) фильтр угловой с размером ячейки 500 мкм (рис. 3, 4);
3) сквозная труба без фильтра диаметром 12,5 мм (контрольный образец).
Во время испытаний снимались следующие параметры:
а) частота привода насоса (Гц);
б) расход рабочей жидкости (л/мин);
в) давление на входе (кПа);
г) давление на выходе (кПа).

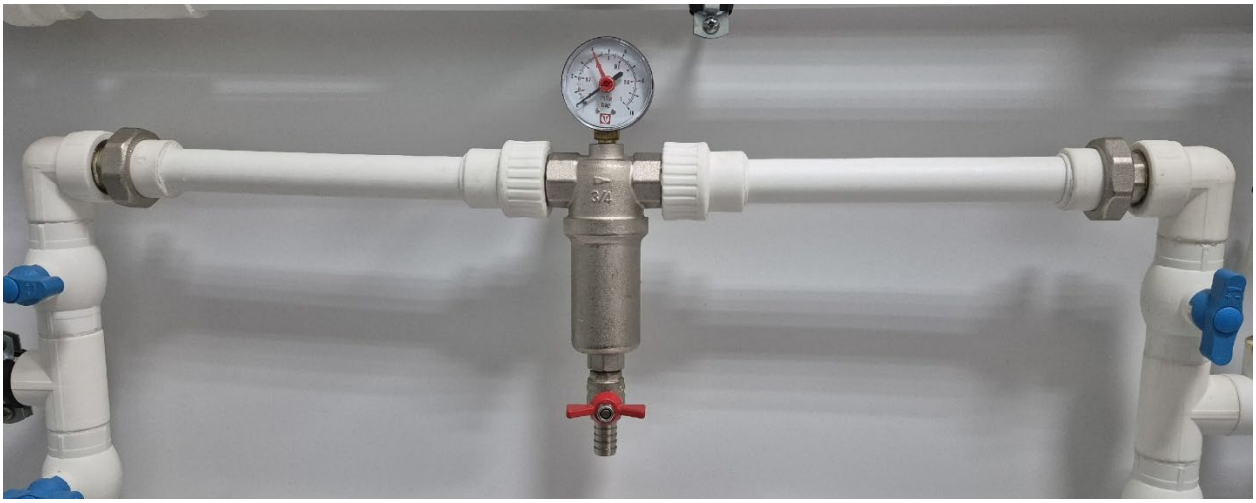


Рис. 1. Промывной фильтр G 3/4" на стенде

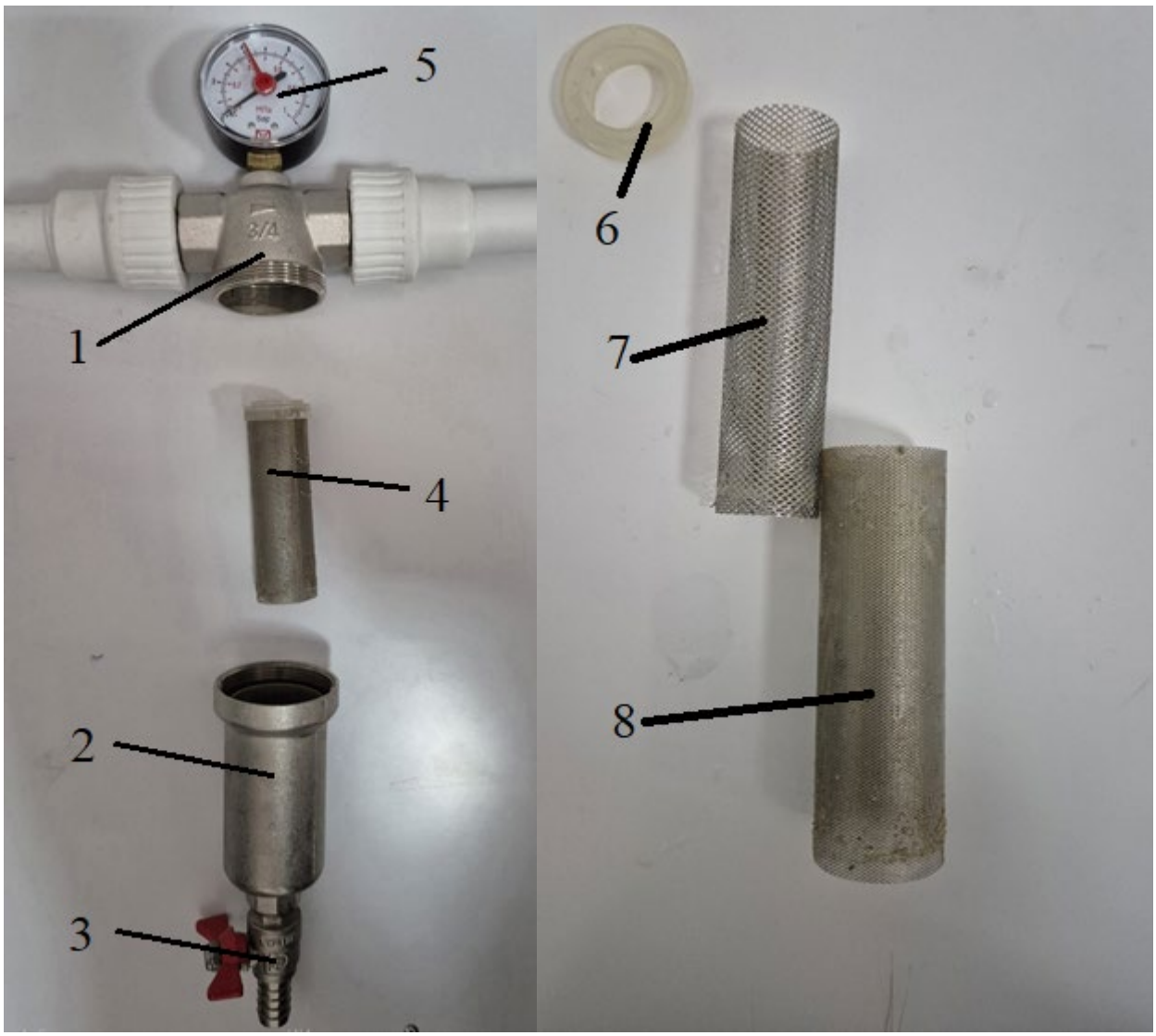


Рис. 2. Конструкция промывного фильтра:
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – промывной кран; 4 – фильтропакет; 5 – манометр; 6 – уплотнение фильтропакета; 7 – каркасная фильтрующая сетка; 8 – основная фильтрующая сетка

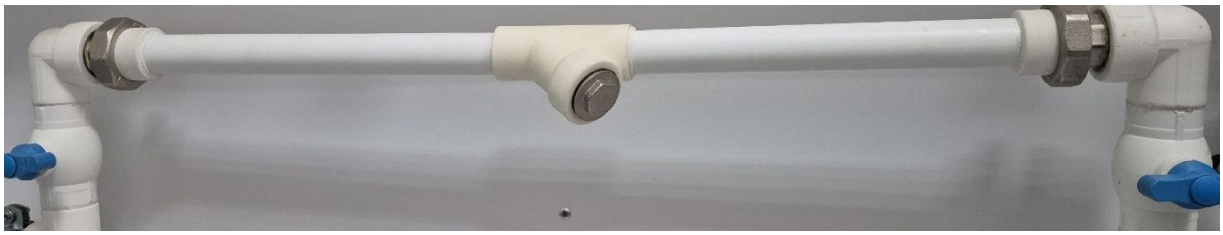


Рис. 3. Угловой фильтр ДУ 21 мм на стенде

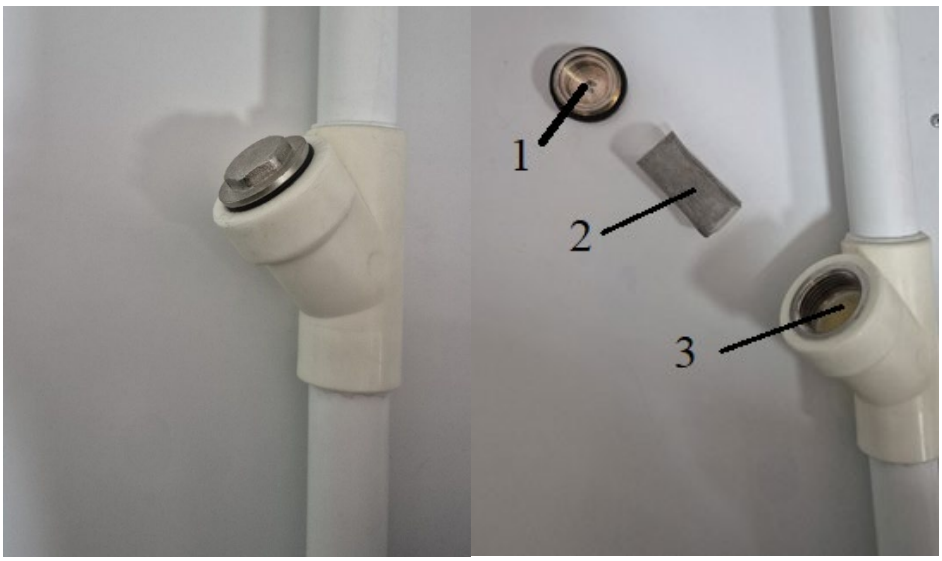


Рис. 4. Конструкция углового фильтра. 1 – крышка; 2 – фильтровальная сетка; 3 – корпус

Диапазон изменения частоты: 5÷50 Гц с шагом 5 Гц, что способствовало изменению расхода рабочей жидкости (воды) от минимальных до максимальных рабочих значений [2].

Результаты испытаний промывного фильтра (100 мкм) представлены в табл. 1 и на рис. 5, 6.

Таблица 1

Результаты испытания промывного фильтра

Фильтр промывной G3/4" 100 мкм					
Частота, Гц	Расход, Q, л/мин	Давление входа, p_1, кПа	Давление выхода, p_2, кПа	Перепад давлений, Δp, кПа	Коэф. местного гидравлического сопротивления, ξ
5	0,4	5,4	-0,2	5,6	
10	4,1	7,8	-0,2	8	
15	13,4	10,6	-0,2	10,8	19,83964
20	19,4	19,4	-0,2	19,6	17,17798
25	24,1	29,5	-0,2	29,7	16,86716
30	30	43	1,8	41,2	15,09991
35	35	58,4	6,1	52,3	14,08267
40	38,5	74,5	9,7	64,8	14,42026
45	43,5	93,7	14,9	78,8	13,73622
50	48	111	18,3	92,7	13,2714

Анализ экспериментальных данных (табл. 1) показывает, что при увеличении расхода от 0,4 до 48,0 л/мин перепад давления возрастает от 5,6 до 92,7 кПа. Характер зависимости носит нелинейный характер с увеличением роста перепада давления в области высоких расходов [3].

Результаты испытаний углового фильтра (500 мкм) представлены в табл. 2 и на рис. 5, 6.

Таблица 2

Результаты испытания углового фильтра

Фильтр угловой ДУ 21 мм 500 мкм					
Частота, Гц	Расход, Q, л/мин	Давление входа, p_1, кПа	Давление выхода, p_2, кПа	Перепад давлений, Δp, кПа	Коэф. местного гидравлического сопротивления, ξ
5	0,7	1	-0,2	1,2	
10	7,5	4,2	-0,2	4,4	25,80178046
15	13,5	11,2	-0,2	11,4	20,6327369
20	18,5	20,1	-0,2	20,3	19,56465108
25	23,9	32,2	-0,2	32,4	18,7097823
30	28	45,4	2,1	43,3	18,21760828
35	33,5	61,8	5	56,8	16,69468571
40	38,1	81,6	8,8	72,8	16,54249278
45	42,5	97,3	12	85,3	15,57724666
50	45,8	116,2	17,1	99,1	15,58340021

Анализ экспериментальных данных показывает, что при увеличении расхода от 0,7 до 45,8 л/мин перепад давления возрастает от 1,2 до 99,1 кПа. Характер зависимости носит нелинейный характер с усилением роста перепада давления в области высоких расходов.

Результаты испытаний сквозной трубы (d = 12,5 мм) представлены в табл. 3 и на рис. 5, 6.

Таблица 3

Результаты испытания сквозной трубы

	Сквозная труба d = 12,5 мм				
Частота, Гц	Расход, Q, л/мин	Давление входа, p_1, кПа	Давление выхода, p_2, кПа	Перепад давлений, Δp, кПа	Коэф. местного гидравлического сопротивления, ξ
5	0,3	1	-0,2	1,2	
10	7,5	4	-0,2	4,2	8,112423
15	14,1	10,2	-0,2	10,4	5,68354
20	19,1	18,7	-0,2	18,9	5,62884
25	24,4	28,5	-0,2	28,7	5,237524
30	29,7	43,9	3,4	40,5	4,988453
35	34,8	58,7	6,6	52,1	4,674154
40	40,1	73,2	10,6	62,6	4,229698
45	44	89,5	14,6	74,9	4,203396
50	47,7	105,3	18,4	86,9	4,149606

При обработке экспериментальных данных вычислялись:

1) Перепад давлений на фильтре Δp:

$$\Delta p = p_1 - p_2. \quad (1)$$

2) Коэффициент местного гидравлического сопротивления ξ:

$$\xi = \frac{\Delta p \cdot \pi^2 d^4}{8\rho Q^2}, \qquad (2)$$

где d – гидравлический диаметр фильтра и трубы, 16,5 мм и 12,5 мм; ρ – плотность воды, 998 кг/м^3.

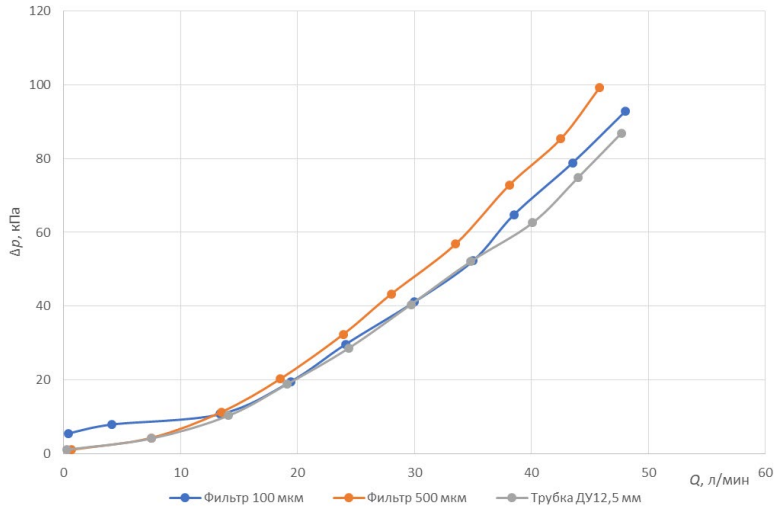


Рис. 5. Экспериментальные характеристики фильтров и сквозной трубы

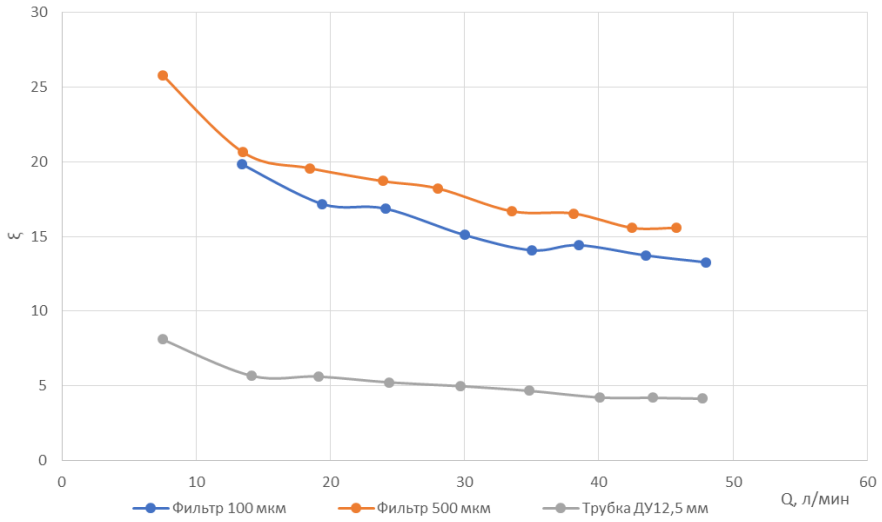


Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от расхода

Для анализа экспериментальных данных оценивается поверхностная площадь фильтров:

$$S_{500} = \pi d_{500} l_{500} = \pi \cdot 20 \cdot 40 = 2513{,}3 \text{ мм}^2; \qquad (3)$$

$$S_{100} = \pi d_{100} l_{100} = \pi \cdot 30 \cdot 100 = 9424{,}8 \text{ мм}^2, \qquad (4)$$

где S_{500} – площадь поверхности фильтроэлемента 500 мкм; S_{100} – площадь поверхности фильтроэлемента 100 мкм; d_{500}, d_{100} – диаметр фильтроэлемента 500 и 100 мкм соответственно, мм; l_{500}, l_{100} – длина фильтроэлемента 500 и 100 мкм соответственно.

Рис. 5 показывает, что при одинаковом расходе до 10 л/мин сопротивление фильтра 100 мкм больше, чем сопротивление фильтра 500 мкм,

что можно объяснить ламинарным характером течения в сетчатом фильтроэлементе, большим влиянием размера ячейки и малым площадей S_{500} и S_{100}. С ростом расхода (от 15 до 40 л/мин) и изменением режима течения на турбулентный площадь фильтроэлемента начинает оказывать большее влияние, чем размер ячейки, что объясняет рост гидравлического сопротивления фильтра 100 мкм, относительно фильтра 500 мкм [4]. На больших расходах (от 40 до 50 л/мин) начинает оказывать влияние на процесс фильтрации гидравлическое сопротивление фильтра, определяемое конструкцией (поворот потока на 90°, рис. 1, 2), что приводит к возрастанию сопротивления фильтра 100 мкм относительно трубы 12,5 мм [5]. Данное поведение фильтров полностью согласуется с рабочим процессом поверхностных фильтров Т. М. Башты [1]. Средний коэффициент гидравлического сопротивления (табл. 1, 2, 3) для фильтра 500 мкм равен 18, а для фильтра 100 мкм – 14, для стенда с трубкой 12,5 мм – 5 и уменьшается с ростом расхода.

На основе экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1) зависимость перепада давления от расхода носит нелинейный характер для всех фильтров;

2) размер ячейки, площадь фильтрующего элемента и режим течения оказывает существенное влияние на гидравлические характеристики фильтра. При ламинарном течении через фильтр основное значение на гидравлическое сопротивление имеет размер ячейки, при турбулентном – площадь фильтроэлемента, а на предельных для фильтроэлемента расходах – гидравлическое сопротивление конструкции;

3) средний коэффициент гидравлического сопротивления фильтра напрямую зависит от площади фильтрующего элемента.

Результаты исследования могут применяться для выбора типоразмера, площади фильтрующей сетки, а также конструкции фильтра при проектировании.

Библиографический список

1. Башта, Т. М. Гидравлические приводы летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 500 с.
2. Бродский, Г. С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. М.: Горная промышленность, 2003. – 359 с.
3. Целищев, В. А., Кудинов, Ю. А. Гидравлические характеристики фильтрующих элементов гидросистем // Вестник УГАТУ, 2008. – Т. 11, № 2 (29). – С. 68–74.
4. Тук, Д. Е., Гарипов, А. А., Целищев, В. А. Исследование течения жидкости в фильтроэлементах с объемным принципом фильтрации // Вестник УГАТУ, 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 159–163.

5. Гарипов, А. А., Константинов, С. Ю., Тук, Д. Е., Целищев, В. А. Численное моделирование течения в фильтре // Вестник УГАТУ, 2013. – Т. 17, № 3 (56). – С. 153–158.

© Павлова В.С., Константинов С.Ю. 2026

УДК 621.22

А.А. РИЯНОВ
riyanovarslan@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Р.Р. КАЛИМУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОГРЕЙДЕРА

Аннотация: в статье рассматривается модернизация гидравлической системы автогрейдера, разработка математической модели контура подъема и опускания отвала автогрейдера. За счёт электронных систем управления повышается энергоэффективность и надежность машины, а также снижения расхода топлива, что очень важно в дорожной технике.
Ключевые слова: дорожная техника; автогрейдер, гидравлический подъем, надежность, поршневой насос, гидравлическая система, отвал.

Автогрейдер – это самоходная дорожная машина, предназначенная для послойного срезания, перемещения и распределения грунта, щебня, снега и других мелких материалов при строительстве и обслуживании дорог. За последнее время возросли требования к производительности дорожных работ, а также экономии эксплуатационных затрат и горюче-смазочных материалов. Современные автогрейдеры всё чаще оснащаются электронной системой управления и более современными гидравлическими элементами [1].

В отечественной и зарубежной литературе отмечается большое разнообразие конструктивных решений гидравлических систем и компонентов автогрейдеров, большая часть которых посвящена техническим решениям по модернизации системы подъема и отпускания отвала. При текущих нововведениях конструкции автогрейдеров включают оптимизацию гидросхемы, повышение эффективности насосов и применения электронного управления потоком.

Неисправности и износ гидравлических компонентов остаются одной из частых причин простоя данной техники и высоких затрат на обслуживание, но системная модернизация гидросистемы может существенно продлить ресурс автогрейдера и снизить эксплуатационные затраты [2].

Гидросистема автогрейдера служит для управления рабочим оборудованием и поворотом машины. Такая система отвечает за управлением

отвала, а именно подъем, опускание, поворот и выдвижение, вынос тяговой рамы и как механизм поворота колес.

Рассматривая пример автогрейдера последнего поколения Caterpillar 24M (рис. 1), можно прийти к выводу, что она оснащена системой отслеживания нагрузки навесного оборудования. Данный метод позволяет системе постоянно регулировать давление и расход рабочей жидкости в соответствии с рабочими условиями. Это в свою очередь имеет преимущество в виде экономии топлива и снижении тепловыделения от гидродвигателей [3].

Рис. 1. Автогрейдер Caterpillar 24M

Для построения гидравлической схемы (рис. 2) составлено техническое задание:

1. Усилие и скорость для подъема и опускания отвала: R_{max}=80 кН, V_{max}=0,15 м/с.

2. Момент и частота вращения поворота отвала: M_{max}=12 кН·м, n_{max}=25 об/мин.

3. Усилие и скорость для перемещения отвала: R_{max}=70 *кН·м, Vmax=0,15 м/с.*

4. Усилие и скорость для выноса тяговой рамы: R_{max}=*55* кН, V_{max}=0,12 м/с.

5. Усилие и скорость для переднего отвала: R_{max}=60 кН, V_{max}=0,09 м/с.

При температуре 60°С наблюдается турбулентный режим, в котором максимальные потери не превышают 1,7 МПа (рис. 3). Для заданного давления системы $P_н$ = 20 МПа составляет 8,5 % от общего объёма потерь в контуре.

Система с регулируемым насосом, номинальный расход которого – 128 л/мин, способна выдерживать нагрузку 80 кН при скорости 0,15 м/с (рис. 4), и для обеспечения таких параметров нужно настроить производительность насоса на уровне 62 % [4].

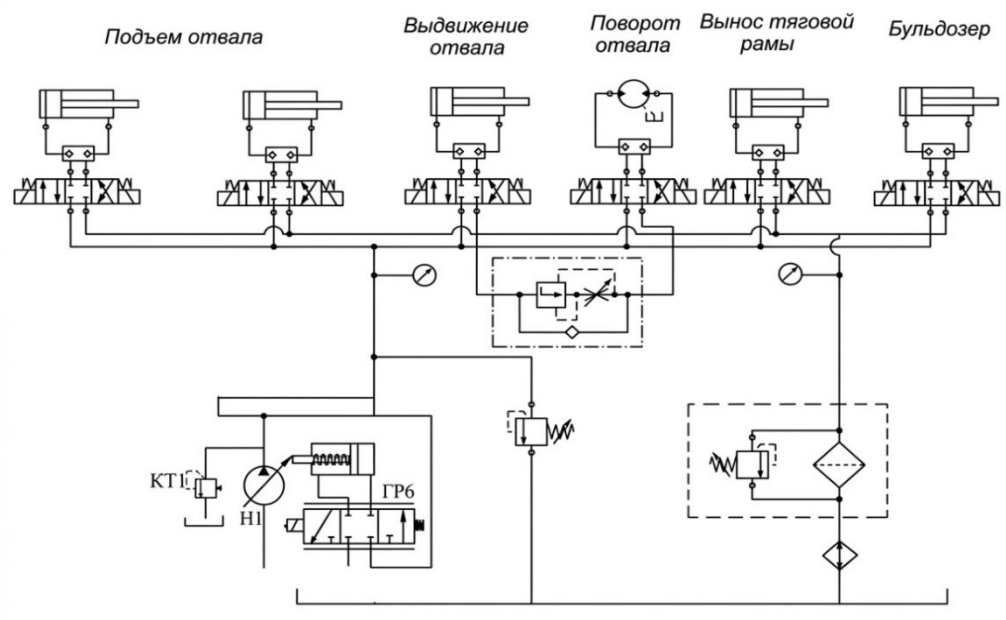


Рис. 2. Схема принципиальная гидравлическая автогрейдера тяжелого типа с регулируемым насосом

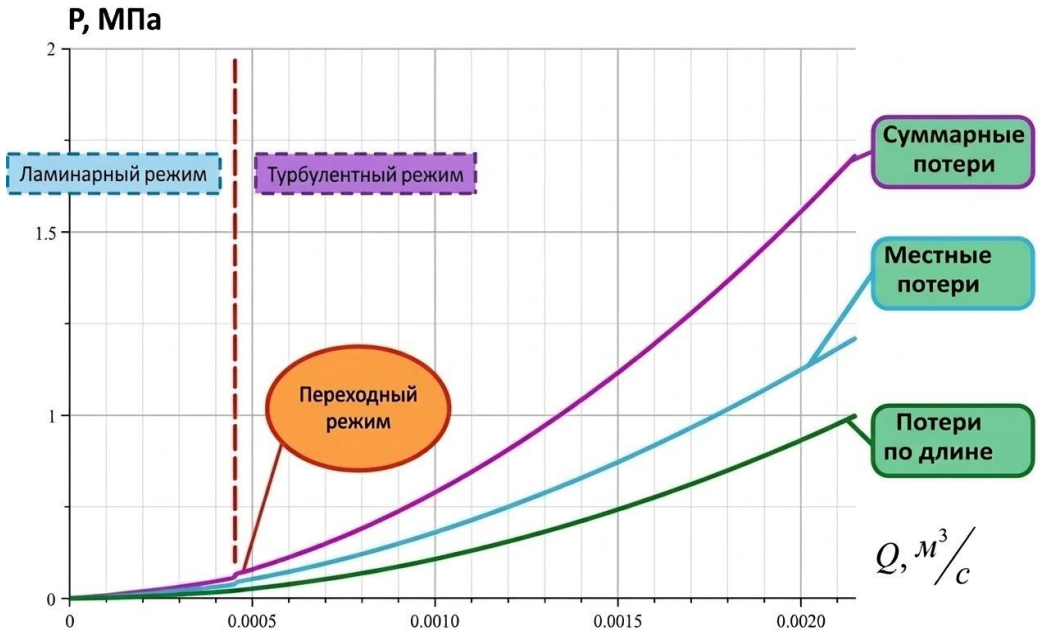


Рис. 3. График гидравлических потерь при температуре на линии нагнетания при t= +60°C

Работу гидросистемы обеспечивает аксиально-поршневой насос с наклонным диском (рис. 5). Ниже представлена его краткая характеристика:

– Номинальное давление насоса = 35 МПа.

– Максимальная подача насоса = 0,00213 м^3/с.
– Номинальная частота вращения = 1500 об/мин.
– Объёмный КПД насоса = 0,98.
– Механический КПД насоса = 0,93.

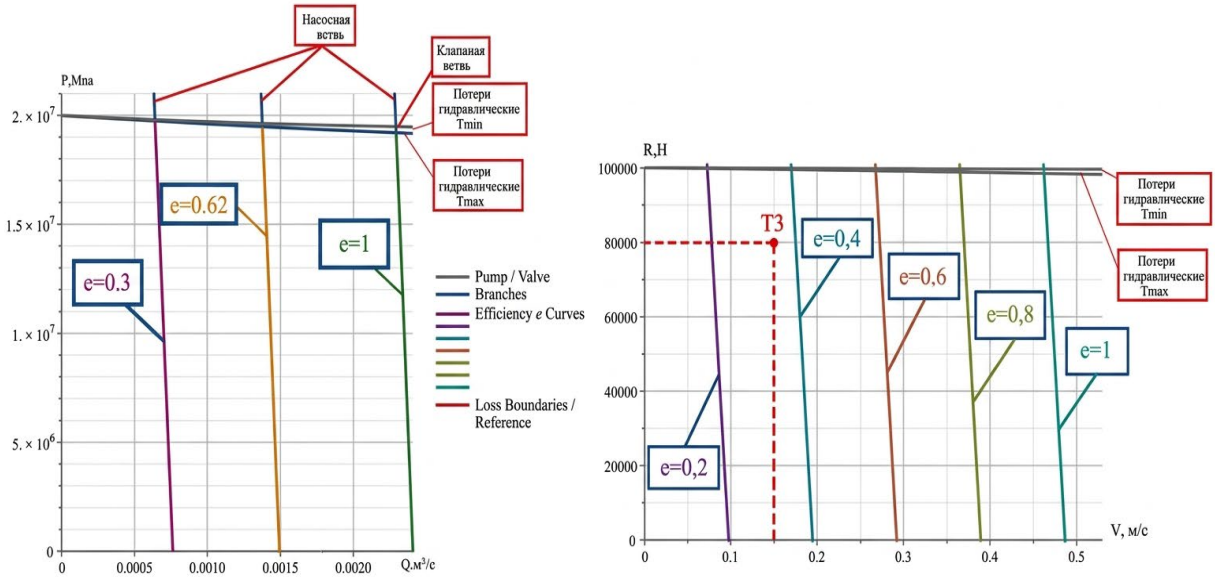


Рис. 4. Внешняя и внутренняя характеристика гидроцилиндра

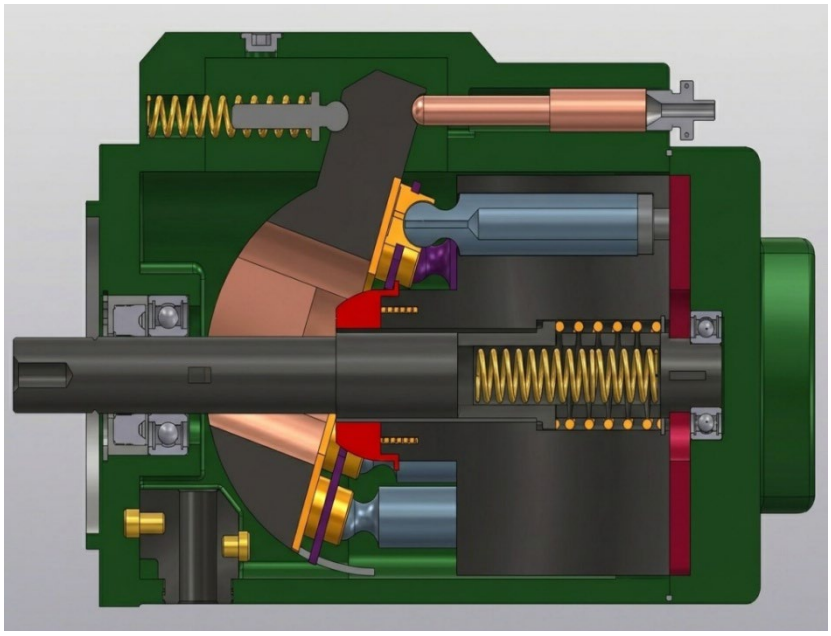


Рис. 5. Аксиально-поршневой насос с наклонным диском в разрезе

Один из распространенных способов управления отвалом автогрейдера – ручной: оператор самостоятельно регулирует положением ручки, которая воздействует на гидросистему напрямую (рис. 6).

Рис. 6. Схема управления контура отвала автогрейдера

Далее была составлена математическая модель контура подъема опускания отвала и получены графики переходных процессов статической и динамической моделей (рис. 7).

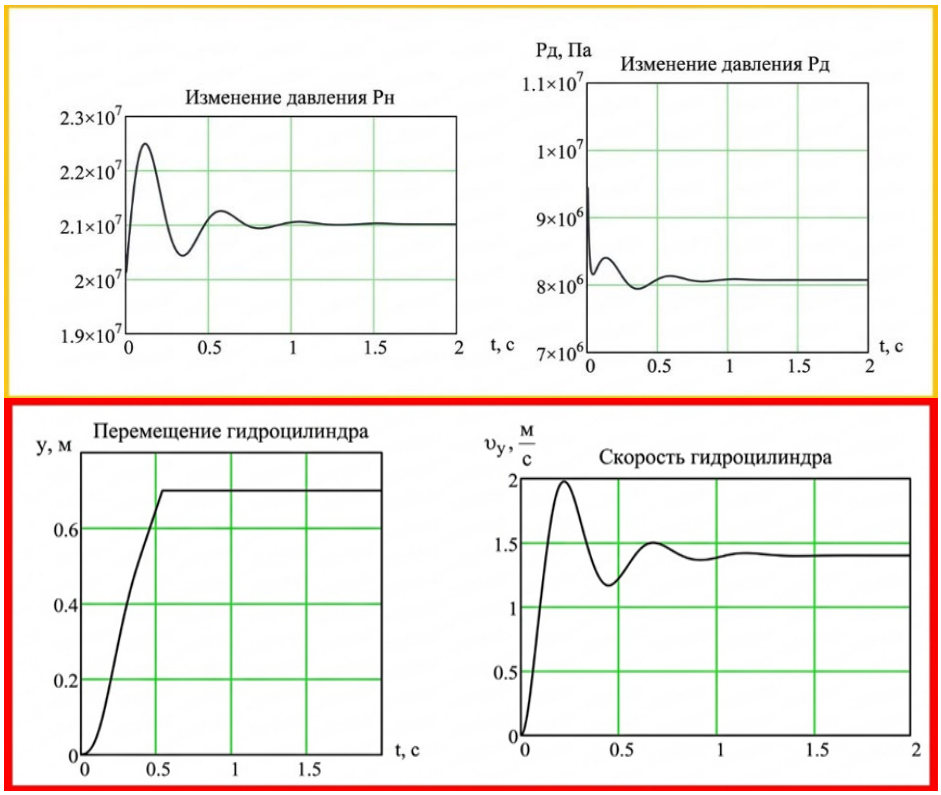


Рис. 7. Графики переходных процессов

Подводя итоги, с внедрением аксиально-поршневого насоса с регулятором расхода в гидравлической системе стабилизировались движение

рабочих органов, что снижает нагрузку на насос. В процессе создания математической модели контура подъема и опускания отвала графически продемонстрированы оптимальные параметры гидравлической системы с учётом регулятора расхода.

Библиографический список

1. Башта, Т. М., Руднев, С. С. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов // Издательство: М. «Машиностроение», 1982. – 423 с.

2. Вильнер, Я. М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам // Издательство: Минск. Высшая школа, 1976. – 96 с.

3. Дунаев, П. Ф., Леликов, О. П. Конструирование узлов и деталей машин. Учебное пособие // Издательство: М. Издательский центр «Академия», 2009. – 447 с.

4 Русак, А. М., Целищев, В. А. Проектирование электрогидравлических усилителей – учебное пособие / Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1996. – 45 с.

© Риянов А.А., 2026

УДК 1.6.33

И.И. САБАХОВ
isabahov@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН

Аннотация: в статье проводится анализ проблем транспортировки нефтепродуктов в республике Башкортостан. На основе статистики 2024–2026 гг. выявлено устойчивое снижение объёмов железнодорожных перевозок, а также рассмотрены системные проблемы автомобильной транспортировки, включающие износ специализированного автопарка и дефицит необходимых складских мощностей. Преодоление кризиса требует модернизации инфраструктуры и резервных мощностей.
Ключевые слова: железнодорожный транспорт; автотранспорт; нефтепереработка, проблемы.

Республика Башкортостан является одним из старейших нефтедобывающих регионов России. Всего в регионе находятся 4 нефтеперерабатывающих завода, что обеспечивает ему статус одного из крупнейших центров нефтепереработки Российской Федерации. В данной статье будут рассмотрены особенности и проблемы транспортировки обработанных нефтепродуктов по территории республики Башкортостан. Рассмотрим несколько видов перевозок. В основном нефтепродукты на территории республики перевозят железнодорожным транспортом (ЖД), автотранспортом, трубопроводом, а также в меньшей степени водным транспортом. Обслуживанием железнодорожных перевозок в регионе осуществляется Куйбышевской железной дорогой, которая проходит по множеству областей РФ (рис. 1). На долю Башкирии приходится большая часть погрузки магистрали, а нефть и нефтепродукты являются её ключевой номенклатурой.

На данный момент наблюдается тенденция к снижению объёма перевозок нефтепродуктов, так по данным за 2024–2025 года падение составило 9,3 %, а прогноз на 2026 предполагает снижение погрузки ещё на 2 % [1] (рис. 2).

Причинами этого являются несколько факторов. Первым являются обширные повреждения инфраструктуры Башкирского УНПЗ в связи с атакой беспилотных летательных аппаратов, что повлекло за собой снижение производства нефтепродуктов. Также в 2025 были основаны новые железнодорожные направления, впервые были приняты к перевозке нефтепродукты по направлениям Донецк – 69 тыс. тонн, Луганск – 29 тыс. тонн и «Мелитополь-Херсонский» – 1,5 тыс. тонн. Что повлекло за собой перестройку логистических цепочек и адаптацию под неё всей транспортной системы. На данный момент имеются проблемные участки Куйбышевской железной дороги с уровнем заполнения пропускной способности выше допустимого. В республике Башкортостан такими являются участок Стерлитамак- Карламан и часть участка Богданович- Камышлов [2]. Ограничивающими могут быть как отдельные элементы (перегон, станция, устройство тягового электроснабжения), так и все вместе взятые. Это свидетельствует о необходимости развития железнодорожной инфраструктуры как на конкретно проблемных участках, так и в целом по региону, такие изменения в первую очередь будут способствовать расшивке «узких» мест по всем основным направлениям.

Рис. 1. Схема Куйбышевской железной дороги

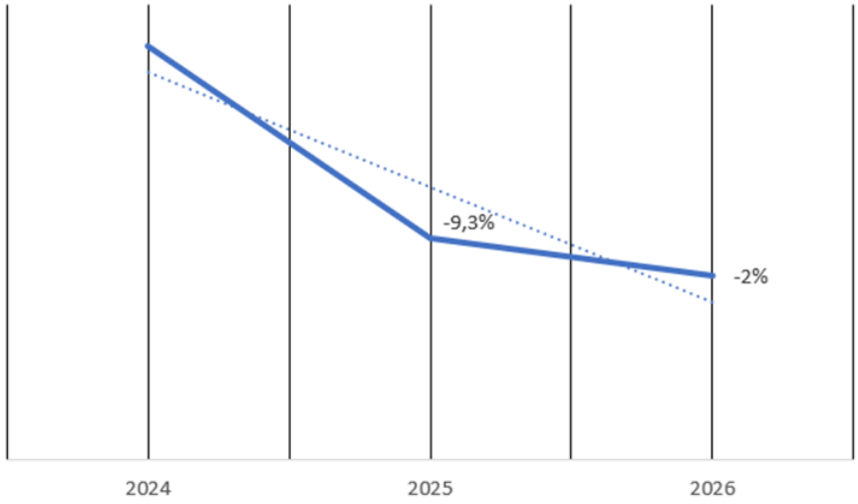


Рис. 2. Динамика объёма перевозок период 2024-2026 годов

Доставка нефтепродуктов (бензина и дизельного топлива) от нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) до автозаправочных станций (АЗС) в Башкортостане преимущественно осуществляется автомобильным транспортом. Этот сегмент уязвим, в частности, из-за зависимости от состояния дорожной инфраструктуры и наличия специализированного автотранспорта (цистерны и бензовозы). Одной из главных проблем является «проблема последней мили», для дальних перевозок эффективна железнодорожная транспортировка, но перевозка бензовозами из перевалочных пунктов (ЖД станций) до оптовых складов и конечных потребителей (АЗС и различные промышленные предприятия) даёт сбой. Эксперты отмечают, что эти проблемы имеют системный характер, к которым относится износ парка автоцистерн и недостаточные мощности для хранения и перевалки светлых нефтепродуктов [3]. Это создает дополнительные логистические издержки и риски, особенно на локальных маршрутах внутри республики. Также стоит подробнее рассмотреть проблему повреждения ключевой инфраструктуры переработки нефтепродуктов (повреждения УНПЗ в результате атаки беспилотных летательных аппаратов). Повреждения комплекса повлекло за собой

уменьшение выпускаемой продукции, что в свою очередь привело к уменьшению количества топлива на розничных точках (АЗС). Перевозчики столкнулись с проблемой нехватки товара для транспортировки, а владельцы АЗС – с невозможностью формирования запасов. Стабильность автотранспортировки в регионе будет зависеть от возможности и способности восстановить исходные мощности НПЗ и обеспечение необходимого уровня защиты нефтеперерабатывающих объектов, а также наладить систему распределения топлива через альтернативные логистические хабы, минуя повреждённые узлы. Проблемы транспортировки нефтепродуктов носят системно-кризисный характер, спровоцированный внешним воздействием (угроза БПЛА). Преодоление этого кризиса требует не только ремонта мощностей, но и модернизации автопарка и создания резервных мощностей для хранения топлива.

Библиографический список

1. Интерфакс. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.npktrans.ru/media/novosti/rzhd-prognoziruyut-sokrashenie-pogruzki-v-bashkirii-v-2026g-minimum-na-2/.
2. Транспорт России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://new.transportrussia.ru/zheleznodorozhnyy-transport/prioritet-pogruzki.html.
3. РБК. Взгляд. Топливный вопрос [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rbctv-ufa.ru/video/vzglyad/rbk-vzglyad-toplivnyy-vopros.html.

© Сабахов И.И., 2026

УДК 331.1

Д.А. СИНЧАК
dimasinchak@mail.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация: в работе рассматриваются особенности применения беспилотных авиационных систем для инвентаризации складских помещений. Анализируются подходы к автономному управлению дронами, программные платформы и протокол MAVLink. Описаны методы позиционирования в условиях отсутствия GPS, а также процесс сбора и обработки данных. Особое внимание уделено интеграции с WMS и возможностям аналитического

использования данных. Показаны преимущества автоматизации инвентаризации с применением БАС.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, дроны, инвентаризация, складская логистика, MAVLink, ArduPilot, автономный полёт, LiDAR, SLAM, WMS, компьютерное зрение.

Беспилотные авиационные системы (БАС) сегодня – это не просто модная тема в технологических новостях, а реальный инструмент, который уже меняет целые отрасли. Логистика и транспорт здесь в числе первых: дроны доставляют грузы в труднодоступные места, работают в городской среде и, что особенно важно, в рамках данного исследования всё активнее применяются для инвентаризации складов [1].

Большинство существующих решений построено на принципе дистанционного управления: пилот есть, просто он находится не внутри аппарата, а где-то рядом с пультом. Вместе с тем почти все функции оператора технически можно передать самому дрону и тогда мы получаем полностью автономный полёт. Это расширяет сферу применения и одновременно снижает эксплуатационные затраты [2]. Такие аппараты уже существуют, но вопрос в другом: как сделать их дешевле и надёжнее? Именно эта задача пока остаётся открытой.

На рынке представлен широкий выбор полётных контроллеров и сопутствующих компонентов. Есть и готовые коробочные решения, например, дроны DJI серий Mavic 3 Enterprise, Matrice 30T и Matrice 300 RTK со встроенными контроллерами и фирменным программным обеспечением FlightHub 2. Выбор программного инструмента во многом определяется двумя вещами: возможностями языка программирования и уровнем владения им со стороны разработчика. Современные API, как правило, поддерживают несколько языков, так что здесь есть пространство для манёвра. Из популярных платформ стоит выделить ArduPilot – за открытый исходный код и высокую гибкость настройки под конкретные задачи.

Отдельного внимания заслуживает протокол MAVLink (Micro Aerial Vehicle Link), обеспечивающий связь между дроном и наземной станцией управления. Команды кодируются в двоичный формат, что делает их независимыми от платформы и снижает нагрузку на канал передачи [3]. Дополнительно используется двойная проверка контрольной суммы – это повышает надёжность. На практике всё это означает, что можно заранее создать топологию склада и прописать маршрут полёта прямо в программном интерфейсе. Удобно и вполне эффективно [3].

Правда, внутри складских помещений Global Positioning System (GPS) не работает и это создаёт отдельную задачу позиционирования. Решают её по-разному. Ultra-Wideband маяки (UWB) по периметру дают точность 10–30 см. Оптические системы типа OptiTrack или Vicon с инфракрасными камерами обеспечивают точность до 1 мм, но это скорее лабораторный вариант. Light Detection and Ranging (LiDAR) в связке с алгоритмами Simultaneous Localization

and Mapping (SLAM) позволяет дрону самостоятельно строить карту помещения и ориентироваться в ней. Visual Odometry – связка камеры и инерциальных датчиков. Используется, например, в DJI Mavic как резервная навигация. Есть ещё RFID и Wi-Fi fingerprinting: менее точные, зато существенно дешевле.

Среди распространённых полётных контроллеров выделяется Radiolink Pixhawk PIX 2.4.8 (рис. 1). Автономность в таких системах обеспечивается бортовым микрокомпьютером, который анализирует видеопоток с камеры через нейронную сеть и преобразует результат в управляющие команды MAVLink [3]. Дрон «видит» и сам принимает решения.

Рис. 1. Полетный контроллер Radiolink Pixhawk PIX 2.4.8

В процессе инвентаризации аппарат последовательно снимает каждый стеллажный отсек, а к каждому снимку автоматически прикрепляются метаданные: временная метка, координаты, номер прохода и уровень стеллажа. Это позволяет чётко привязать изображение к конкретному складскому адресу. После облёта данные – снимки или 3D-облака точек от LiDAR передаются на сервер или в облако для обработки.

В ряде случаев часть вычислений выполняется прямо на борту, если дрон оснащён модулем типа NVIDIA Jetson Nano (рис. 2) или Raspberry Pi 5. Это даёт возможность обрабатывать данные в реальном времени.

Рис. 2. Суперкомпьютер NVIDIA Jetson Nano

Далее информация преобразуется в форматы JSON или XML и передаётся в систему управления складом (WMS), где автоматически сопоставляется с учётными записями, проверяется наличие товаров и формируются отчёты о расхождениях. В современных решениях предусмотрена и автоматическая корректировка данных – это заметно ускоряет процесс и снижает влияние человеческого фактора [4].

На этом возможности не заканчиваются. Собранные данные открывают путь к аналитике: можно выявлять зоны наибольшей нагрузки, фиксировать типичные ошибки размещения товаров, строить прогнозы для оптимизации логистических потоков. В итоге растёт не только точность учёта, но и общая эффективность складских операций.

Структуру спроса на услуги дроновой инвентаризации в России условно можно разделить на несколько ключевых сегментов: ритейл и e-commerce, промышленно-производственные склады, а также холодильные и низкотемпературные склады. Наибольшую активность демонстрируют сети розничной торговли и онлайн-площадки, для которых скорость оборота товара и частота пересчёта остатков напрямую влияют на качество сервиса и финансовый результат [5].

В сегменте ритейла и e-commerce дроны применяются прежде всего на крупных распределительных центрах и региональных складах, где объём паллетных мест может достигать десятков тысяч. Здесь беспилотные системы позволяют проводить полную или выборочную инвентаризацию в сжатые сроки, не останавливая полностью операционную деятельность, что особенно важно в пиковые сезоны продаж [6].

Промышленные склады и логистические комплексы предприятий также формируют стабильный спрос на инвентаризацию с помощью дронов, особенно в случаях, когда речь идёт о крупногабаритных грузах, металлопрокате, строительных материалах или компонентной базе для производства. В таких условиях БПЛА помогают сократить время обхода больших территорий и снизить риски для персонала при работе на высоте или в труднодоступных зонах [7].

Таким образом, это не эксперимент ради эксперимента, а вполне рабочий инструмент с измеримым эффектом. Автономные дроны с современными системами навигации и обработки данных реально сокращают время инвентаризации и минимизируют ошибки. При этом технология уже нашла своего конкретного потребителя: наибольший спрос сосредоточен в ритейле и e-commerce, где скорость пересчёта остатков напрямую влияет на финансовый результат, а также в промышленных логистических комплексах, где дроны снижают риски для персонала и сокращают время обхода больших территорий.

Показательно, что внедрение беспилотных систем происходит не вопреки операционным ограничениям, а именно благодаря им: высокостеллажные склады, пиковые сезоны, труднодоступные зоны – всё это не барьеры, а точки входа для технологии. Чем сложнее условия, тем очевиднее преимущество дрона перед ручным обходом.

Вопросы надёжности и стоимости пока ещё стоят на повестке, но общая траектория понятна: рынок взрослеет, бизнес-модели устоялись, а круг отраслей, готовых к внедрению, продолжает расширяться. Потенциал направления очевиден и судя по динамике последних лет, он будет реализовываться быстрее, чем многие ожидают.

Библиографический список

1. Калмурзаева, Д. К., Багинова, В. В. Беспилотные летающие аппараты как инструмент микрологистики нового поколения // European research, 2017. – № 1 (24). – С. 12–14.
2. Тищенко, И. П., Степанов, Д. Н., Фраленко, В. П. Разработка системы моделирования автономного полета беспилотного летательного аппарата // Программные системы: теория и приложения, 2012. – № 3-1 (12). – С. 3–21.
3. Гусев, П. Ю., Сокольников, В. В., Поцебнева, И. В. Разработка программы управления элементами полета беспилотного аппарата с использованием модели искусственного интеллекта // Известия ТулГУ. Технические науки, 2025. – Вып. 1. (230). – С. 229–234.
4. Курбанов, Т., Старченко, Д., Заикин, А. Дроны в логистике: опыт ведущих зарубежных и отечественных компаний, перспективы и проблемы применения // Логистика, 2020. – № 159. – С.26–29.
5. Инвентаризация дронами [Электронный ресурс]. URL: https://sustainability.metro-cc.ru/resursoeffektivnye-tcz/inventarizacziya-dronami-v-rcz/ (дата обращения: 23.04.2026).
6. Инвентаризация склада с помощью беспилотников [Электронный ресурс]. URL: https://robotrends.ru/robopedia/inventarizaciya-sklada-s-pomoshyu-bespilotnikov (дата обращения: 23.04.2026).
7. Российский ответ DJI: Как ГК «Геоскан» стала лидером беспилотных технологий в стране [Электронный ресурс]. URL: https://rcmonste.ru/blog/article/rossiyskiy-otvet-dji-kak-gk-geoskan-stala-liderom-bespilotnyh-tehnologiy-v-strane (дата обращения: 24.04.2026).

© Синчак Д.А., 2026

УДК 658.7

Я.Т. ТАИПОВА
yamilya.taipova@bk.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УЧЁТА СКЛАДСКОГО ПЕРСОНАЛА НА ОСНОВЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация: в статье рассматриваются автоматизированные системы учета рабочего времени. Описываются виды систем учета рабочего времени и ключевые аспекты внедрения биометрических систем.
Ключевые слова: Складской персонал, автоматизированные системы учета рабочего времени, биометрическая идентификация, учет рабочего времени, минимизация человеческого фактора, единая биометрическая система.

Популярность и актуальность автоматизированных систем учета рабочего времени (АСУРВ) возрастает, поэтому руководство внедряет различные виды таких систем, чтобы достичь следующих целей: занятость каждого сотрудника, соответствие внутреннему режиму работы (опоздания, задержки, отсутствие на рабочем месте), планирование графика и проведение анализа деятельности [1].

Но некоторые из этих систем имеют существенные недостатки в виде идентификации по внешним или второстепенным признакам. В табл. 1 приведены системы и характеристики.

Таблица 1

Виды автоматизированных систем учета рабочего времени [2], [3], [4]

Вид системы	Описание	Преимущества	Недостатки
Табельный учет	Ежедневная фиксация рабочего времени сотрудников.	Контролирование норм рабочего времени. Точный расчет заработной платы и обоснование выплат.	Ошибки вследствие человеческого фактора. Повышенная энергоемкость. Отсутствие гибкости.
Карточная система	Карта для отметки, которую необходимо приложить к терминалу, чтобы зафиксировать прибытие и убытие с места работы.	Относительно дешевая стоимость оборудования. Определение точного времени отметки.	Высокий риск подделки, потери или отметки за коллегу. Ограниченность зон контроля. Вероятность несанкционированного проникновения

Продолжение табл. 1

Вид системы	Описание	Преимущества	Недостатки
Видеонаблюдение	Установка камер видеонаблюдения основной задачей, которых является отслеживание перемещений сотрудников, запись, фиксация изображения и звука	Не требует значительных затрат на установку и эксплуатацию. Является простой и удобной системой в использовании.	Теряет свою целесообразность при большом штате сотрудников. Не содержит в себе функций отметки о прибытии персонала. Высокая вероятность намеренного поиска и нахождения в «слепой зоне» со стороны работника. Необходимость привлечения дополнительных сотрудников для наблюдения.
Программные системы	Сохранение истории пользователя и фиксация включения и выключения компьютера.	Четкое определение интервала времени, возможность отслеживать эффективность использования рабочего времени сотрудником	Ограниченная сфера применения. Высокая вероятность фальсификации данных.
RFID (радиочастотная идентификация)	Основана на взаимодействии метки и считывателя. При попадании в область действия радиоволн считывателя, метка активируется и сообщает заложенную информацию. Считывающее устройство передает полученную информацию в ПО.	Возможность многократной записи данных, быстрое считывание, сканирование при разных расположениях, считывание на различном диапазоне расстояний, возможность считывания сразу нескольких носителей	Высокая стоимость внедрения, риск утери данных, влияние окружающей среды на метки, вероятность утери или передачи носителя, риск помех сигналов и неточных считываний.

Продолжение табл. 1

Вид системы	Описание	Преимущества	Недостатки
Биометрические системы	Сканирование биологических параметров отпечатка пальцев, рисунка вен, лица и сетчатки глаза, а также запись и распознавание голоса.	Исключение передачи или дублирования, сокращение времени и затрат на учет данных для управления персоналом, быстрый доступ и сканировании, сокращение затрат на учет производительности, общего времени в день, переработок, дни отсутствия	Высокие затраты, риск утери уникальных человеческих данных, необходимость строго соблюдения законодательства,

Однако, в данных видах учета рабочего времени возникают риски подмены личности, фальсификации данных, утери или кражи носителя и неточности из-за человеческого фактора. Видеонаблюдение и программные системы не могут обеспечить наблюдение за действиями конкретного человека в реальном времени, но часть рисков все же снижают.

При биометрической идентификации оборудование сканирует данные человека и сравнивает их с предварительно оцифрованными, тем самым определяет личность и в случае совпадения производит допуск на территорию. В базу данных также вносится информация о времени входа и выхода, включая временные отсутствия (обеденный перерыв и т.д.). Кроме того, биометрические системы имеют возможность интегрироваться с различными WMS-системами. Использование современных терминалов сбора данных (ТСД), способных считывать отпечатки пальцев или распознавать лица, позволяет обеспечить не только безопасность доступа, но и учесть производительность сотрудника, ведь данные с ТСД (количество и время операций) будут передаваться в WMS-систему.

Хорошим примером является крупнейшая бизнес-структура «Amazon», последовательно внедряющая передовые технологии. Современная технология распознавания лиц и отпечатков пальцев для авторизации доступа сотрудников позволяет предоставлять доступ только к определенным участкам складов и конфиденциальным данным.

Применение данной технологии широко распространено на мировом логистическом рынке. Крупнейшая международная компания экспресс-доставки грузов и документов «DHL» также внедряет биометрические технологии для управления учетом и контролем доступа в рабочие помещения.

Отметим, что не только зарубежные, но и популярные российские фирмы также широко применяют современные цифровые технологии. С помощью них «Деловые Линии», «Сколково Логистика», «Экспресс Логистика» и другие

компании сохраняют эффективность обработки рабочих задач персоналом, повышают качество обслуживания и обеспечивают безопасные условия для складирования и перевозки груза [4].

Внедрение биометрии имеет определенные риски, связанные с вероятностью утечки шаблона данных, фальсификации и кражи. Сотрудники не готовы идти на такие риски и поэтому часто не дают согласие на использование или отказываются от работы в данной организации.

Хотя биометрическая система хранит не подлинные данные, а лишь зашифрованный, уникальный и необратимый набор цифр, полученный путем преобразования исходного образца и определяющий личность, руководство все равно должно опираться на свод законов и уделять особое внимание обеспечению безопасности.

Серверы с базами данных должны находиться в строго засекреченных сегментах сети и недоступных охраняемых помещениях. Помимо этого, руководство, опираясь на Федеральный закон №152-ФЗ «О персональных данных», обязано получить письменные соглашения сотрудников, а также уведомлять о передаче в Единую биометрическую систему (ЕБС). В случае если персонал не выразил согласие на внедрение, предоставлять альтернативные варианты. Дополнительно необходимо уведомить Роскомнадзор об обработке персональных данных, определить цель и срок использования, обеспечить качественную защиту и шифрование биометрии. Также в обязанности входит разработка внутренней документации и назначение ответственного лица [5].

Таким образом, на основании вышеизложенных данных мы можем сделать вывод, что внедрение технологии распознавания лиц и отпечатков пальцев для авторизации доступа сотрудников позволяет успешно оптимизировать процессы управления складом, исключает возможность, значительной утраты грузов и самовольных манипуляций с товаром. А также сокращает время на планирование и распределение часов за счет анализа данных по каждому сотруднику, что доступно для быстрого получения информации и составления графиков работы.

Отметим, что немаловажным фактором является экономия средств, получаемая от внедрения: единоразовая установка биометрических систем позволит упростить контроль и управление, как рабочим временем, так и деятельностью сотрудников, что обеспечивает высокий процент безопасности и защиты от несанкционированного доступа и разглашения.

Затрагивая тему прогнозирования актуальности биометрических технологий на массовом производстве, хочется отметить, что поскольку программа содержит индивидуальные данные каждого служащего, это позволяет производить анализ действий сотрудников, оптимизировать внутренние процессы и инвентаризацию ресурсов. Что в наше время позволяет решать злободневные проблемы, в виде простоя сотрудников и несанкционированного доступа.

Библиографический список

1. Популярные системы контроля и учета рабочего времени сотрудников [Электронный ресурс]. – URL: https://assistentus.ru/sotrudniki/sistemy-kontrolya-i-ucheta-rabochego-vremeni/ (дата обращения 28.04.2026)
контроля и учета рабочего времени сотрудников [Электронный ресурс]. – URL:

2. Бегичева, С. В. Автоматизированные системы учета рабочего времени сотрудников. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannye-sistemy-ucheta-rabochego-vremeni-sotrudnikov/viewer (дата обращения: 28.04.2026).

3. Ирина Томакова, Жанна Коптева Интеграция биометрических технологий в систему управления персоналом в условиях цифровой экономики – URL: https://www.researchgate.net/publication/351830644_Integration_of_biometric_technologies_into_a_personnel_management_system_in_a_digital_economy (дата обращения: 29.04.2026).

4. Кузнецова, Е. В. Анализ применения биометрических технологий в промышленной логистике. – URL: https://na-journal.ru/pdf/nauchnyi_aspekt_6-2024_t46_web.pdf#page=89 (дата обращения: 29.04.2026).

5. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (дата обращения: 01.05.2026).

© Таипова Я.Т., 2026

УДК 62-5

Д.А. ТОМИНА
ditomina@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. П.В. ПЕТРОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ПОДАЧИ ТОПЛИВА В ГАЗОТУРБИННУЮ УСТАНОВКУ

Аннотация: в данной статье рассматривается моделирование регулятора расхода подачи топлива непрямого действия в газотурбинную установку, а также влияние конструкционных и иный параметров на качество процессов.
Ключевые слова: газотурбинная установка, регулятор расхода, система регулирования подачи топлива, статическая математическая модель, динамическая математическая модель.

В настоящее время во многих энергосистемах применяются газотурбинные установки. На ТЭЦ, например, паровые и паросиловые турбины активно заменяются на ГТУ для повышения параметров эффективности. Газотурбинные установки предназначаются для преобразования химической энергии сжигания газовоздушной смеси в механическую энергию вала. Данные установки играют важную роль в современных энергосистемах, обеспечивая надежность и гибкость электроснабжения, при генерации электроэнергии, особенно во время пиковых нагрузок, а также в качестве резервных источников энергии. Именно поэтому сейчас актуально разрабатывать системы регулирования подачи топлива для в повышения эффективности работы оборудования, обеспечения безопасности, снижения выбросов вредных веществ, энергосбережения и гибкости системы [1].

В данной статье рассматривается разработка регулятора расхода непрямого действия, а также влияние конструкционных и иных параметров на качество процессов.

Разработка математической модели для описания динамики основных элементов ведется на основе предложенного схемного решения для системы регулирования расхода, которое представлено на рис. 1.

Для определения граничных условий была просчитана статическая математическая модель регулятора. Статическая математическая модель реализует поведение объекта в определенный момент времени без учета изменений во времени [2].

Разработанная математическая модель состоит из двух уравнений баланса сил на клапанах и трех уравнений неразрывности.

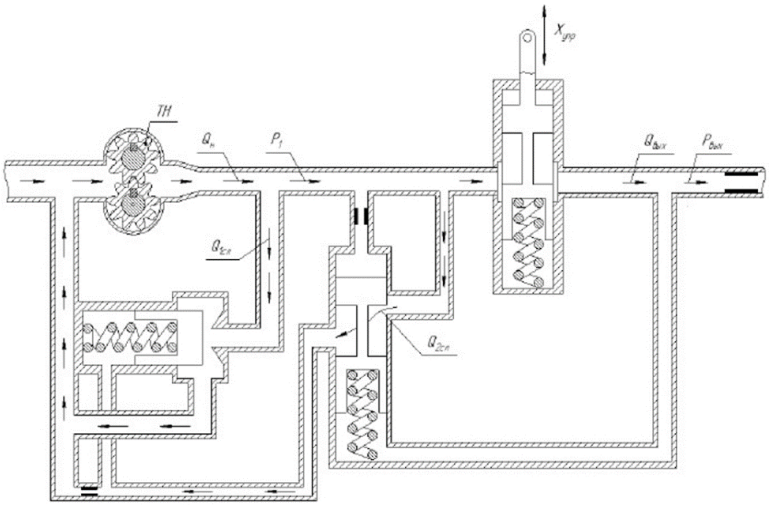


Рис. 1. Расчетная схема регулятора расхода непрямого действия

Для математического описания системы регулирования топливоподачи принимаются допущения, обычно применяемые в практике расчетов систем подачи топлива:

1. Модуль объемной упругости рабочей жидкости, коэффициент ее вязкости, коэффициент расхода, управляемого золотника, а также давление подачи и слива являются постоянными величинами.
2. Температура жидкости в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется.
3. Гидравлические потери в подводящих магистралях к изделию малы и ими можно пренебречь.
4. Трубопроводы короткие, гладкие, жесткие, что позволяет не учитывать волновые явления.
5. Изменением плотности жидкости при увеличении давления можно пренебречь.
6. Противообледенительными устройствами в системе можно пренебречь.

Просчитав статическую математическую модель, сделаем подбор параметров, путем изменения P_n, чтобы определить граничные условия и подобрать номинальным режим (рис. 2).

На графике P_{ni} принят за номинальный режим, P_{min}, P_{max} – граничные условия.

Разработка математической модели для исследования динамики системы производилась с учётом следующих допущений:

1) сухое трение не учитывается;

2) температура жидкости в течение рассматриваемого промежутка времени не изменяется;

3) утечки жидкости в системе не учитываются [3].

Уравнения динамической модели представлены в виде Коши.

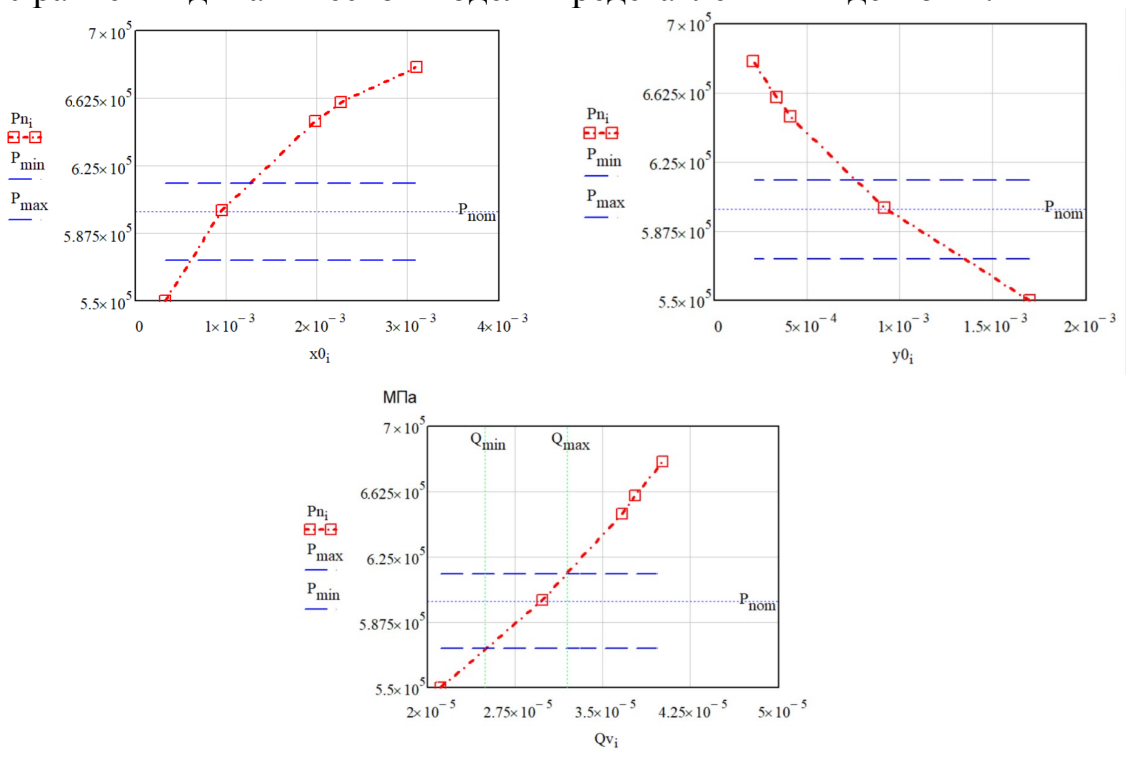


Рис. 2. График зависимости изменения давления перед регулируемым дросселем на перемещение золотника регулятора расхода, график зависимости изменения давления перед регулируемым дросселем на положение крана, график зависимости изменения давления перед регулируемым дросселем на расход переливного клапана

Система дифференциальных уравнений, описывающая математическую модель данного регулятора, реализуется в виде матрицы первых производных методом Рунге-Кутты четвертого порядка с фиксированным количеством расчетных точек 10 тыс. за 0,15 секунд (рис. 3). Алгоритм автоматически регулирует размер временного шага в зависимости от требуемой точности. Это позволяет сохранять высокую точность даже при большом количестве шагов интегрирования.

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ \frac{1}{m_1}\cdot\left(y_4\cdot 0.8\cdot F_{kl1} - C_{pr1}\cdot y_0 - y_6\cdot\frac{F_{kl1}}{2} - k_v\cdot y_1\right) \\ y_3 \\ \frac{1}{m_2}\cdot\left(y_4\cdot F_{kl2} - C_{pr2}\cdot y_2 - y_5\cdot F_{kl2} - k_{v2}\cdot y_3\right) \\ \frac{E}{v_0}\cdot\left[Q_n - \mu\cdot b\cdot y_2\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot|y_4 - P_{sl}|}\cdot\mathrm{sign}(y_4 - P_{sl}) - \mu\cdot b\cdot(x_{dr} - x_f)\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot|y_4 - y_6|}\cdot\mathrm{sign}(y_4 - y_6) - \mu\cdot b\cdot y_0\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot|y_4 - y_5|}\cdot\mathrm{sign}(y_4 - y_5) - F_{kl1}\cdot y_3\right] \\ \frac{E}{v_0}\cdot\left[\mu\cdot b\cdot y_0\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot|y_4 - y_5|}\cdot\mathrm{sign}(y_4 - y_5) - f_{kl2}\cdot y_3 - \mu\cdot(b\cdot x_{dr2})\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot|y_5 - P_{sl}|}\cdot\mathrm{sign}(y_5 - P_{sl})\right] \\ \frac{E}{v_0}\cdot\left[\mu\cdot b\cdot(x_{dr} - x_f)\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot|y_4 - y_6|}\cdot\mathrm{sign}(y_4 - y_6) - \mu\cdot(b\cdot x_{fr})\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}\cdot|y_6 - P_{tma}|}\cdot\mathrm{sign}(y_6 - P_{tma})\right] \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Вектор начальных условий, матрица первых производных

Оценим влияние конструкционных и иных параметров на качество переходных процессов (рис. 4), полученных с помощью расчетной модели, созданной в предыдущих разделах [4].

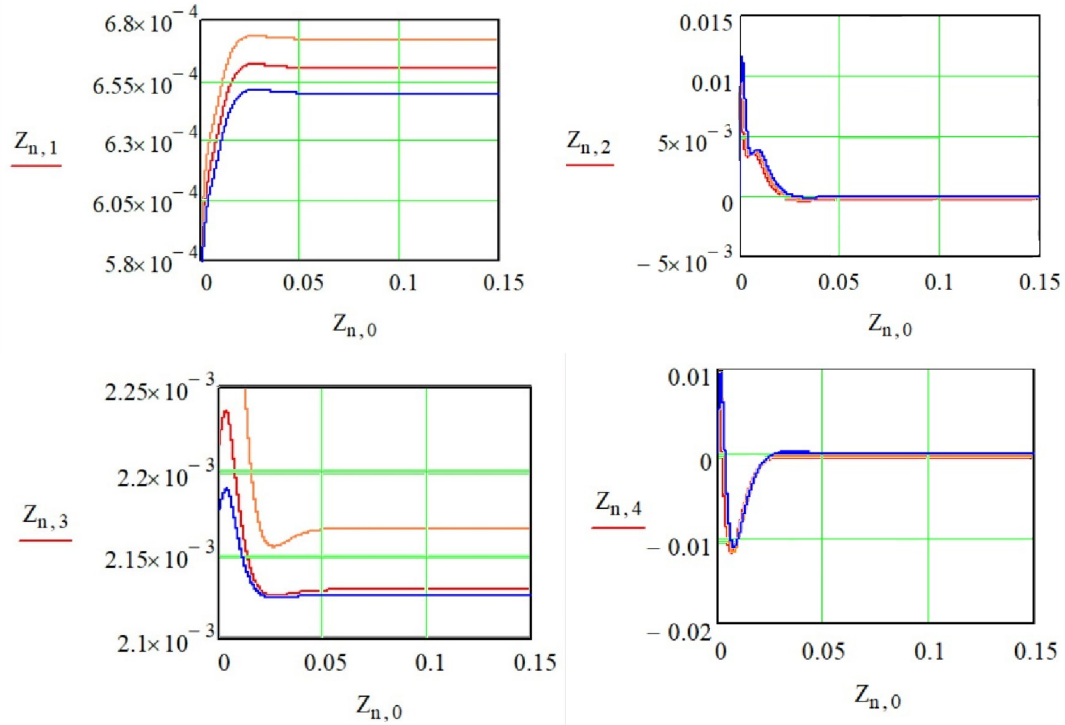


Рис. 4. Динамические характеристики золотника регулятора и переливного клапана

В качестве конструкционного параметра возьмем ширину окна в золотниковой паре (рис. 5).

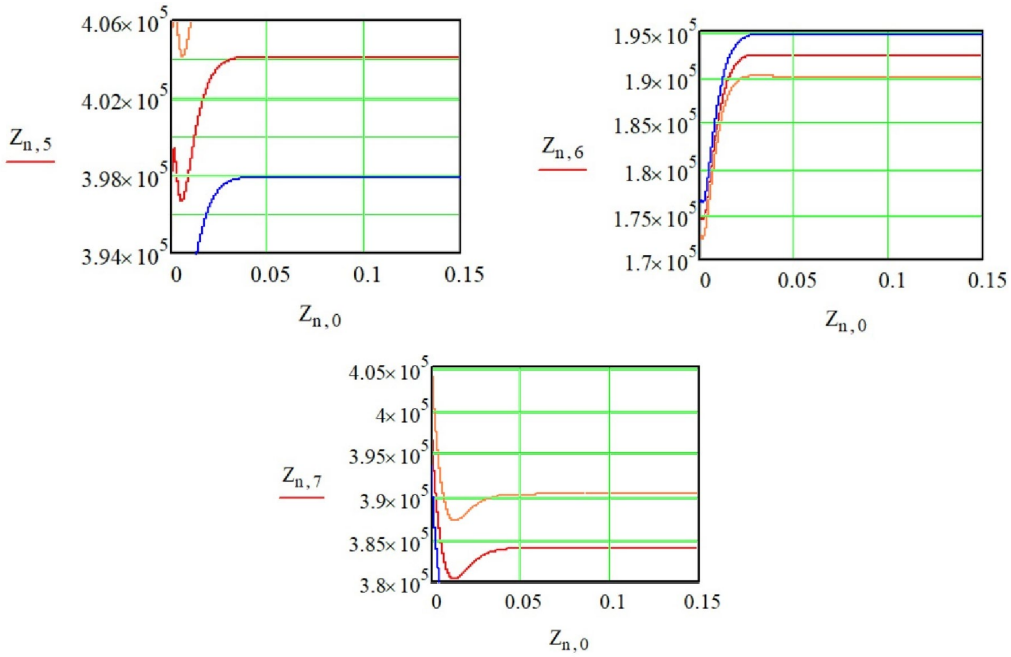
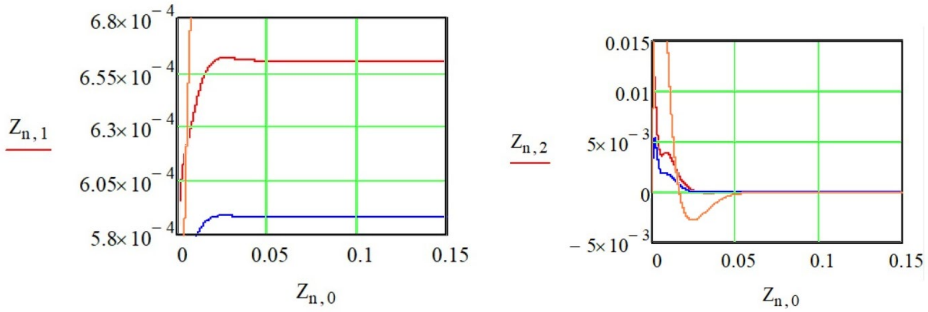


Рис. 5. Динамические характеристики изменения давления перед и после дросселя, и в сливной магистрали золотника

Таким образом, исходя из графиков (рис. 6, 7) видно, что при изменении оптимального размера ширины окна в золотниковой паре, как в большую, так и в меньшую сторону, выход на режим у системы занимает больше времени. Также чем меньше ширина окна в золотниковой паре, тем большее расстояние у переливного клапана требуется для выхода на режим. Появляются скачки давления, что также плохо отражается на системе.

В качестве другого параметра для оценки влияния возьмем расход, подаваемый в насос.



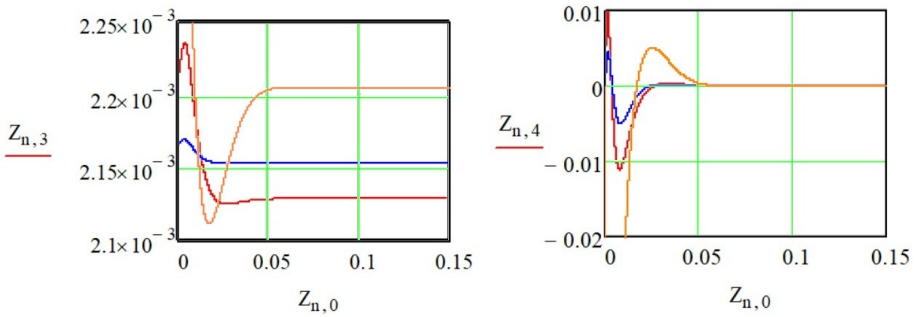


Рис. 6. Динамические характеристики золотника регулятора и переливного клапана

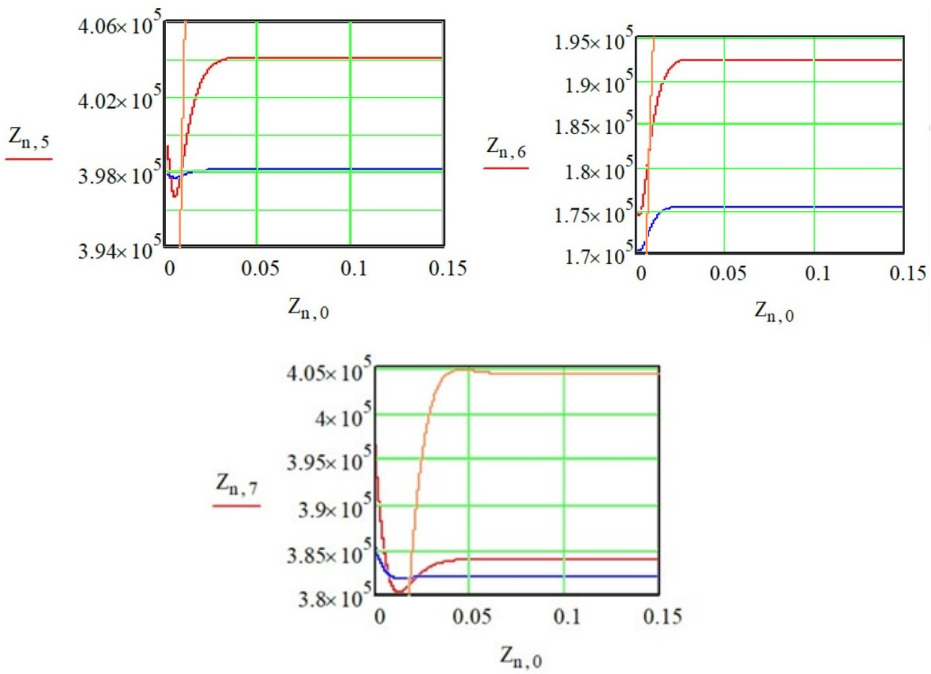


Рис. 7. Динамические характеристики изменения давления перед и после дросселя, и в сливной магистрали золотника

При некорректно выбранном значении расхода, подаваемого в насос, появляется скачкообразное изменение выхода на режим у системы. Также, как и с конструкционными параметрами, затрачивается больше времени для выхода на режим, а в случаях подачи слишком большого расхода выход на режим не достигается даже при высоких показателях за 30 секунд.

Таким образом, можно сделать вывод, что все параметры в значительной степени влияют на эффективность работы установки, поэтому крайне важно подобрать номинальные значения для устойчивой и быстрой работы системы.

Библиографический список

1. Цанев, С. В., Буров, В. Д., Ремезов, А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 488 с.

2. Стрижалов, С. Э., Олейников, Б. А. Повышение эффективности работы ГТУ за счет модернизации системы топливоподачи // Энергосбережение и водоподготовка, 2021. – № 4 (108). – С. 45–50.

3. Поповский, А. Ю., Брошков, С. Д. Математическое моделирование в среде MathCAD: Учебное пособие. – Одесса: ОНМА, 2003. – 101 с.

4. Научная электронная библиотека e.LIBRARY.RU [Электронный ресурс] e.library // URL: https://www.elibrary.ru/defaultx.asp (дата обращения: 12.03.2026).

© Томина Д.А., 2026

УДК 658.7

Т.И. ФАЙЗУЛЛИН
takopuk@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

АНТИХРУПКОСТЬ ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК: УРОКИ ПАНДЕМИИ И САНКЦИЙ

Аннотация: статья посвящена проблеме обеспечения устойчивости логистических цепей в условиях внезапных внешних шоков. На основе анализа последствий пандемии COVID-19 и санкционных ограничений 2022 года для России и мира сформулированы принципы антихрупкости цепей поставок. Предложены практические меры для компаний: диверсификация, создание буферных запасов, цифровизация и гибкость контрактов.
Ключевые слова: Антихрупкость, цепи поставок, логистика, пандемия, санкции, устойчивость, дефицит контейнеров, закрытие границ.

Современные глобальные цепи поставок десятилетиями выстраивались под эгидой эффективности: точно в срок (JIT), минимальные складские запасы, концентрация производства в регионах с дешёвой рабочей силой. Пандемия COVID-19 2020–2021 гг. и последовавшие за ней в 2022 г. беспрецедентные санкционные ограничения в отношении России продемонстрировали хрупкость этой модели. Закрытие границ, дефицит полупроводников и контейнеров, резкий рост фрахта, разрыв устоявшихся транспортных коридоров – всё это заставило бизнес пересмотреть подходы к управлению рисками. В 2012 году Н. Талеб ввёл понятие «антихрупкость» – способность системы не просто выдерживать стресс, но и становиться лучше благодаря ему [1]. Цель данной работы – на основе уроков двух крупнейших шоков предложить конкретные меры по построению антихрупких цепей поставок для российских и международных компаний.

Уроки пандемии: сбой глобальной синхронизации. Пандемия наглядно показала, что оптимизация под одну переменную – себестоимость – ведёт к катастрофическим последствиям при малейшем изменении внешних условий. Закрытие заводов в Китае в первом квартале 2020 г. вызвало домино-эффект по всему миру: автомобильные концерны (Toyota, Volkswagen) остановили конвейеры из-за отсутствия электроники и проводки. Портовая инфраструктура, не рассчитанная на волнообразные нагрузки, встала в пробки – например, в портах Лос-Анджелеса и Лонг-Бич в 2021 г. суда ожидали разгрузки по 2–3 недели. Ставки фрахта 40-футового контейнера из Азии в Европу достигли 14000 (против обычных 1500–2000) [2]. Российские компании, завязанные на импорт комплектующих (автопром, ТНП, фармацевтика), столкнулись с многократным удлинением сроков поставки.

Ключевой вывод: системы JIT, не подкреплённые резервными мощностями и альтернативными маршрутами, рушатся при синхронном шоке. Антихрупкость требует замены единого глобального конвейера на «сеть мелких, избыточных и взаимозаменяемых узлов».

Санкционный шок 2022 года: разрыв устоявшихся коридоров. После 24 февраля 2022 г. Россия подверглась массированным санкциям: отключение от SWIFT, запрет на поставки высокотехнологичной продукции, блокировка активов, отказ европейских и американских перевозчиков (Maersk, MSC, Hapag-Lloyd) работать с РФ, закрытие воздушного пространства ЕС. Это привело к разрыву традиционных маршрутов «Запад – Восток» через Балтику и автомобильных перевозок через Беларусь и Польшу. Дефицит морских контейнеров и полувагонов, кратный рост стоимости страховки грузов, переход на параллельный импорт – компаниям пришлось экстренно перенастраивать логистику [3].

Однако именно санкционный кризис дал мощный импульс развитию альтернативных маршрутов: Международный транспортный коридор «Север – Юг» (через Каспийское море и Иран), активизация железнодорожных перевозок через Казахстан и Китай, рост оборота портов Дальнего Востока. По данным Минтранса РФ, в 2023 г. объём перевозок по коридору «Север – Юг» вырос на 45% по сравнению с 2021 г. Российские компании, ранее закупавшие 80% комплектующих в Европе, переориентировались на Китай, Турцию и страны ЕАЭС. При этом многие столкнулись с удорожанием логистических плеч на 30–70%, но постепенно сформировали новые устойчивые цепочки.

Принципы построения антихрупких цепей поставок. На основе анализа кейсов (от металлургов до ретейла) можно выделить четыре ключевых принципа:

1. Диверсификация поставщиков и маршрутов. Нельзя допускать, чтобы единственный поставщик или транспортный коридор занимали долю более 30–40% в критических позициях. Пример: после пандемии компания «Северсталь» разработала пул альтернативных поставщиков коксующегося угля (вместо Украины – Казахстан, ЮАР) и запасных вариантов вывоза продукции (Балтика

+ Азово-Черноморский бассейн). При блокировке одного маршрута переключение занимает не более 7 дней.

2. Создание стратегических буферных запасов. JIT-модель должна дополняться страховыми складами для товаров с низкой эластичностью спроса (лекарства, критическая электроника, упаковка). После санкций 2022 года FMCG-компании увеличили норматив неснижаемого остатка с 2 до 6 недель потребления. Это повысило издержки на складирование (на 8–12%), но позволило избежать остановки продаж.

3. Цифровизация и предиктивная аналитика. Использование систем класса TMS (Transport Management System) с API-стыковкой к портальным системам РЖД, операторов фитинговых платформ и таможни позволяет в реальном времени перемаршрутизировать грузы при первых признаках сбоя. Некоторые российские логистические операторы (например, «Деловые Линии») внедрили нейросетевые модели прогнозирования заторов на погранпереходах – точность 89%, что даёт фору в 3–5 дней для перенаправления транспорта.

4. Гибкость контрактов и параллельный импорт. Юридическая возможность быстрой замены поставщика без расторжения многолетних рамочных соглашений. После легализации параллельного импорта в России (приказ Минпромторга № 1532) компании получили легальный канал ввоза оригинальных товаров без согласия правообладателя. Однако для антихрупкости этого мало – необходимо прописывать в контрактах с новыми логистическими партнёрами право на субституцию маршрута и фиксацию тарифа в национальной валюте.

Практические рекомендации для российского бизнеса. Во-первых, целесообразно перейти от годового бюджетирования логистики к квартальному с возможностью оперативной корректировки. Во-вторых, инвестировать в геоинформационные системы, которые моделируют нештатные сценарии: внезапное закрытие МАПП, рост акцизов на топливо, дефицит тягачей. В-третьих, строить отношения с региональными операторами магистрального транспорта (особенно на маршрутах в Казахстан, Узбекистан, Азербайджан) – это обеспечивает приоритетную подачу подвижного состава в периоды пикового спроса. Наконец, для малого и среднего бизнеса оптимальной стратегией станет вхождение в логистические пулы (кооперация с другими компаниями для совместного формирования сборных контейнерных поездов), что снижает транзакционные издержки и повышает устойчивость [4].

Выводы. Пандемия и санкции вскрыли системную уязвимость глобальных и национальных цепей поставок, построенных на экономии без запаса прочности. Но именно эти кризисы дали бизнесу и государству стимул создавать антихрупкие механизмы: диверсификация, буферные запасы, цифровая маршрутизация, гибкость контрактов. Российские компании, прошедшие через шок 2022 года, уже накопили уникальные компетенции – от параллельного импорта до «бесшовной» стыковки железнодорожных и морских тарифов. Дальнейшее развитие коридора «Север – Юг» и цифровой платформы «ГосЛог» способно превратить вынужденные меры в устойчивое конкурентное

преимущество. Антихрупкость не означает отсутствие сбоев – она означает способность учиться на них и перестраиваться быстрее, чем рушатся старые модели.

Библиографический список

1. Талеб, Н. Н. Антихрупкость. Как извлечь выгоду из хаоса / Н. Н. Талеб; пер. с англ. – М.: КоЛибри, 2014. – 768 с. (оригинал издан в 2012 г.).

2. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2022. – United Nations Conference on Trade and Development, 2022. – 159 p. URL: https://unctad.org/rmt2022).

3. Миротин, Л. Б., Покровский, А. К. Трансформация глобальных цепей поставок под влиянием санкционных ограничений // Логистика и управление цепями поставок. – 2023. – № 2 (109). – С. 24–33.

4. Афанасенко, И. Д., Барыкин, С. Е. Антихрупкая логистика: новые принципы организации перевозок в условиях неопределённости // Вестник Уфимского университета науки и технологий. – 2024. – № 1. – С. 56–64.

© Файзуллин Т.И., 2026

УДК 621.33

А.Р. ХАЙБУЛЛИН
baimak881@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛИЗАПЦИЯ

Аннотация: в статье проведён глубокий анализ современного рынка электромобилей, рассмотрены геополитические аспекты развития отрасли, ключевые игроки и их стратегии, технологические тренды (включая типы батарей и автономность), а также проблемы и ограничения (этика добычи сырья, энергетический кризис, переработка батарей). Проанализированы сценарии развития рынка до 2030 года, определены потенциальные победители в борьбе за триллионные рынки будущего.
Ключевые слова: электромобили, рынок EV, геополитика, Tesla, BYD, батареи, автономность, V2G, переработка батарей, водородные технологии.

Ещё 15 лет назад электромобиль казался экзотикой – игрушкой для экоэнтузиастов и богачей. Сегодня же автопром переживает самый масштабный переворот со времён Генри Форда. Переход на электротягу – это не просто замена двигателя: меняется вся философия транспорта. На смену

нефтяным королям приходят «литиевые бароны», а вместо механики в почёте сложные алгоритмы [1].

Но так ли безоблачен этот «зелёный» рассвет? Разберём, как геополитическое противостояние Запада и Востока превратило рынок EV в арену технологических сражений.

Геополитическая архитектура: электрический железный занавес

1. Китайская экспансия: путь «вертикального дракона»: секрет успеха КНР – в жёстком симбиозе госпланирования и агрессивного капитализма. Пока европейские концерны дожимали последние капли из технологий ДВС, Пекин в 2015 году объявил электромобили «новой инфраструктурой» и начал вливать миллиарды в отрасль.

Ключевое преимущество Китая – вертикальная интеграция. Страна не просто собирает машины: она контролирует всю цепочку производства [2]. Вот цифры, которые заставляют нервничать конкурентов:

– 80 % мировых поставок редкоземельных металлов;

– 75 % производства литий-ионных батарей;

– 60 % мощностей по переработке лития.

Что это значит на практике? Если завтра цена лития взлетит вдвое, западные стартапы рискуют обанкротиться, а китайские гиганты лишь слегка скорректируют цены.

2. Протекционизм США и «европейская инерция»: США ответили на китайский вызов актом IRA (Inflation Reduction Act) – по сути, экономической войной под маской экологии. Правило простое: хочешь субсидии – строй завод в Америке. Результат уже виден: Tesla расширяет Gigafactory в Texace, а Ford запускает производство аккумуляторов в Мичигане.

Европа же застряла в бюрократической ловушке. С одной стороны – жёсткие нормы выбросов, с другой – страх перед социальной катастрофой из-за закрытия заводов в Германии и Франции. В 2023 году Volkswagen признал: переход на EV обойдётся компании в 5 млрд евро и потерю 30 000 рабочих мест [3].

Титаны индустрии: анатомия лидерства

1. Tesla: культ эффективности и софта: Tesla сделала невозможное – заставила мир влюбиться в электромобили. Помните, как все смеялись над «электричками»? Илон Маск доказал: EV может быть не просто экологичным, а по-настоящему крутым – быстрым, стильным, умным.

Но реальное преимущество Tesla – не в дизайне, а в подходе к производству:

– Giga Casting. Замена сварки сотен деталей одной литой конструкцией сократила затраты на 30%.

– Экосистема данных. Каждая Tesla – это мобильный сенсор, обучающий нейросеть автопилота. Этот актив невозможно скопировать быстро, даже имея миллиардные инвестиции.

2. BYD: технологический прагматизм: Если Tesla – это iPhone, то BYD – целая экосистема. Их прорыв – батарея Blade Battery, которая прошла тест на прокол гвоздём без дыма и огня. Это стало эталоном безопасности.

BYD берёт рынок не маркетингом, а агрессивным демпингом. В 2024 году компания предложила седан Seal за 25 000 долларов – на 15% дешевле аналогов. Секрет – в полном самообеспечении компонентами.

3. Феномен «опоздавших» – legacy-бренды: Volkswagen, Mercedes и BMW столкнулись с «дилеммой инноватора». Им нужно:

– кормить огромный штат сотрудников, занятых в производстве ДВС;

– одновременно инвестировать миллиарды в софт, который пока получается слабо.

Корейские бренды (Hyundai/Kia) адаптируются быстрее. Их 800-вольтовые системы зарядки сокращают время пополнения энергии до 18 минут – и это уже в массовом сегменте [4].

Технологический фронтир: за пределами лития

1. Битва химий – LFP против NMC: рынок разделился:

– Массовый сегмент (Китай, бюджетные Tesla) переходит на LFP (литий-железо-фосфат). Дешевле, долговечнее, безопаснее.

– Премиум-класс остаётся на никелевых батареях ради большого запаса хода.

Перспективный кандидат на замену – натрий-ионные батареи. Натрий есть везде (это обычная соль!), а технологии уже выходят из лабораторий. Как только их запустят в серию, EV станут дешевле бензиновых авто даже без субсидий.

2. Автономность как новая религия: через 5 лет лидерство на рынке EV будет измеряться не разгоном до сотни, а «временем свободного внимания». Тот, кто первым предложит надёжный автопилот 4-го уровня, заберёт рынок такси и логистики – триллионы долларов в перспективе.

Тёмная сторона «зелёной» медали

Нельзя говорить о лидерах, не упомянув цену их успеха:

– Этический дефицит. Добыча кобальта в ДР Конго остаётся пятном на репутации индустрии. Tesla и Ford уже исключают кобальт из цепочек поставок.

– Энергетический тупик. Если все пересядут на EV, энергосети рухнут. Решение – технология V2G (Vehicle-to-Grid), когда машина отдаёт энергию в сеть в пиковые часы. Пилотные проекты уже тестируют в Японии и Калифорнии.

Прогноз до 2030 года: кто выживет?

Мы вступаем в эру консолидации. Ожидается, что до 70 % китайских стартапов исчезнут или будут поглощены. Возможные сценарии:

– «Apple vs Android». На рынке останутся 2–3 глобальные платформы (Tesla, BYD и, возможно, европейская коалиция), остальные станут поставщиками кузовов.

– Водородный реванш. В грузоперевозках EV могут проиграть водородным топливным элементам из-за веса батарей. В 2023 году Toyota и Hyundai уже запустили пилотные проекты водородных грузовиков [4].

Мир электромобилей – это не про двигатели, а про данные и энергию. Лидеры сегодня – не те, кто лучше гнёт металл, а те, кто быстрее управляет информацией и эффективнее хранит заряд.

Битва Tesla и BYD – лишь верхушка айсберга. Под ней скрывается глобальная перестройка экономики, где автомобиль станет частью умной сети. И тот, кто первым освоит эту логику, получит контроль над триллионными рынками.

Библиографический список

1. Данные McKinsey & Company о рынке роботакси (прогноз до 2035 г.). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mckinsey.com/industries/industrials/our-insights/unlocking-the-industrial-potential-of-robotics-and-automation.

2. Отчёты International Energy Agency (IEA) о производстве лития и редкоземельных металлов (2023 г.). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iea.org/reports/lithium.

3. Официальные заявления Tesla, BYD, Volkswagen, Ford о стратегиях развития до 2030 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars.

4. Статьи и аналитические обзоры BloombergNEF о геополитике рынка EV. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/.

© Хайбуллин А.Р., 2026

УДК 656.132

Д.А. ХАЙДАРОВ
dhaydarov98@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ИНТЕГРАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС УФИМСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Аннотация: изучена технологическая и социоэкономическая роль железнодорожного транспорта в городской агломерации. Кратко описана его роль в Уфимской агломерации и недостатки, устранение которых может повысить роль железнодорожного транспорта в транспортном комплексе Уфимской агломерации.
Ключевые слова: железнодорожное пассажирское сообщение; городские агломерации; транспортно-пересадочные узлы; транспортная инфраструктура.

Уплотнение радиальных транспортных потоков, сходящихся в точке пиковой генерации пассажиропотока, представляет собой значительный вызов для организации транспортного комплекса городской агломерации [1]. По мере роста агломераций, данная проблема не может решаться экстенсивным расширением транспортных связей с низкой пропускной способностью человеческих потоков и требует того или иного интенсивного решения. На сегодняшний день существует ряд таковых решений, в которых применяются различные технологические и организационные идеи. В рамках данной работы рассмотрим то, как железнодорожное сообщение может применяться для решения данной проблемы в пределах Уфимской городской агломерации.

Одним из главных технологических преимуществ железнодорожного транспорта по сравнению с автомобильным является высокий «потолок» провозной способности, получаемой через единицу ширины сечения путей сообщения в плане. В то же время, железная дорога, в силу технических особенностей, требует определённого уровня отдаления от жилой застройки. Таким образом, железнодорожный транспорт наиболее эффективен для обслуживания корреспонденций, имеющих высокий пассажиропоток и высокое расстояние в пути, что минимизирует долю времени, затрачиваемого на перемещение к железной дороге и от неё, в общем времени, затрачиваемом на перемещение. Вместе с этим, благодаря высокой маршрутной скорости и провозной способности, железнодорожный транспорт способен обеспечивать более низкую стоимость одного место-километра удельной транспортной работы, чем автомобильный транспорт [2].

Железнодорожный транспорт также имеет ряд социоэкономических преимуществ, делающих его более привлекательным каркасным транспортом

для агломерационных процессов, в сравнении с агломерациями, возникающими на каркасе автомобильных дорог. Поскольку формирование агломерации происходит на территориях со значительными масштабами расстояний, затраты на транспортную работу, приходящиеся на одного жителя, не позволяют обеспечивать качественное транспортное обслуживание населения пригородных поясов агломерации организационными мероприятиями пассажирского транспорта общего пользования того же уровня качества, который может быть обеспечен на территориях с непрерывной городской застройкой. Это может выражаться целым рядом негативных факторов, в различном их сочетании: увеличением стоимости проезда, снижением частоты отправлений, значительной удалённостью жилья от остановочных пунктов. Комбинация этих факторов, вкупе с преимущественно более низкой скоростью перемещения с использованием автобуса, делает использование личного автомобиля повседневной необходимостью для жителей пригородов. Таким образом, агломерации, возникающие на каркасе автомобильных дорог, развиваются с принципом активного автомобилепользования как главным способом удовлетворения нужд жителей в мобильности. Прямым негативным социоэкономическим последствием такого положения является ограничение в самостоятельной мобильности для жителей, которые по тем или иным причинам, не могут реализовать свой спрос на перемещение за рулём автомобиля. Вторым негативным социоэкономическим последствием является то, что поток автомобилей жителей пригородов, распределённый на обширном пространстве с низкой плотностью застройки, сталкивается с геометрическими ограничениями при маятниковых перемещениях к местам занятости в плотном городском ядре с ограниченным пространством как для движения личных транспортных средств, так и для их хранения в течение дня. Таким образом, возникает конфликт за городское пространство между жителями городского ядра и пригородов, что, в силу административно-территориальных границ конкретного города, может принимать форму экономической коллизии между органами управления городом и органами управления окрестными территориями, на которых проживают жители пригородов, чьё благосостояние зависит от занятости в городском ядре. Помимо этого, значительное количество свободного времени жителей пригородов оказывается затрачено на дорожные заторы, что также оказывает негативный социоэкономический эффект как через прямое снижение качества жизни [3], так и через косвенное снижение вовлечённости людей в единую культурную, экономическую, социальную сферы агломерации, что, в свою очередь, снижает потенциал агломерационных процессов.

В сравнении с автомобильным, главным преимуществом железнодорожного каркаса в агломерациях является то, что он позволяет сгладить влияние уплотнения потоков на время, проводимое в пути. Помимо этого, скорость сообщения, обеспечиваемая городским и пригородным железнодорожным транспортом, может превосходить скорость сообщения личного автотранспорта, в особенности – в часы пик, что позволяет привлечь и

владельцев автомобилей. При этом, благодаря большой провозной способности, железнодорожный транспорт позволяет организовать мультимодальную консолидацию пассажиропотоков, использовав подвозящие автобусные маршруты с низкой общей стоимостью для меньшей части всей поездки, оптимизировав соотношение затрат и времени в пути.

Для Уфимской городской агломерации задача сведения радиальных транспортных потоков в значительной степени усугубляется тем, что сходящиеся в месте наибольшей концентрации мест занятости и, соответственно, пассажиропотоков, историческом центре города, транспортные потоки как из пригородов, так и из остальных частей городского ядра, на сегодняшний день, сходятся в двух стеснённых локациях. Так, транспортные потоки с направления северной части Уфимского полуострова и потоки с направления Затонского шоссе преимущественно сходятся на участке улицы 50-летия Октября между улицами Пархоменко и Цюрупы. Аналогично, маятниковые перемещения из юго-восточной части полуострова и с направления Бельского мостового перехода преимущественно сходятся в многоуровневых пересечениях Проспекта Салавата Юлаева с улицами Айской и Заки Валиди.

Несмотря на наличие в улично-дорожной сети и маршрутной сети общественного транспорта связей, позволяющих небольшому количеству жителей избежать перемещения через данные узловые точки, в условиях связанных с рельефом осложнений, расширение использования существующей инфраструктуры железной дороги в передвижениях жителей агломерации (как городских, так и пригородных территорий) видится перспективным способом снижения человеческого потока через существующие узлы.

Так, на сегодняшний день, железнодорожное сообщение, благодаря существующей частоте движения [4] может обеспечивать прибытие на железнодорожный вокзал до 1,5–2 тысяч пассажиров (в зависимости от количества вагонов в составах) в час с каждого из направлений (северного и южного), что составляет около 20% пассажиропотока, который может обеспечить автобусный коридор Проспекта Октября в точке своего вхождения на узел концентрации потоков, или около 50 % от пассажиропотока, прибывающего со стороны Бельских мостов. Однако, в силу удалённости от основных точек генерации пассажиропотока, расположенных в историческом центре города, ключевым вопросом становится не провозная способность железнодорожного компонента транспортного комплекса, а провозная способность подвозящего транспорта, а также пешая доступность точек занятости, расположенных в прилегающей местности. При этом, проблема обеспечения подвоза пассажиров стоит ещё более остро для большинства других станций в пределах Уфимской агломерации, не имеющих маршрутов общественного транспорта, привозящих пассажиров к станциям.

Таким образом, обеспечение пассажиропотока на «подвозящем» и «развозящем» сегментах является ключевым фактором обеспечения успешного использования железной дороги в качестве агломерационного транспорта. С

помощью оценки наличия мультимодальной инфраструктуры можно оценить технологическую интеграцию железной дороги в транспортный комплекс, а сделав поправку на существующий охват подвозных маршрутов (или отсутствие таковых) – оценить организационную интеграцию.

В качестве границ агломерации избраны станции, находящиеся на примерном расстоянии часа пути от железнодорожного вокзала. Среди 42 станций, по состоянию на май 2026 года, инфраструктуру для пересадки на общественный транспорт имеют 12 станций. Перехватывающие парковки имеют 14 станций. При этом, среди станций, имеющих остановки для пересадки, маршрутами регулярных перевозок для мультимодальной пересадки обеспечены лишь 8 станций из 12, имеющих остановки для пересадки на общественный транспорт других видов.

Стоит отметить, что даже при существующем положении, расположение железной дороги относительно существующих транспортных коридоров таково, что на территории города и, в особенности, пригородов существуют территории, для которых железная дорога обеспечивает более быстрое перемещение в исторический центр города. На рис. 1 представлены остановочные пункты в районе Черниковка, для которых выполняется такое условие.

Рис. 1. Остановочные пункты в районе Черниковка, для которых железная дорога обеспечивает более быстрое перемещение в исторический центр города.

Таким образом, благодаря повышению организационной интеграции, железная дорога может оказывать более значительное влияние в рамках транспортного комплекса Уфимской агломерации как его внутренний элемент, а не только как средство внешнего сообщения.

Библиографический список

1. Территориальное расселение и структурная трансформация экономики регионов (Концептуальные основы анализа и моделирования) / Монография под ред. проф. Гайнанова Д.А. Уфа, 2022. – 184с.
2. Zhang, Ming, (2009). Bus Versus Rail: Meta-Analysis of Cost Characteristics, Carrying Capacities, and Land Use Impacts. / Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2110. – pp. 87–95.
3. Rababe, Saadaoui, Deborah, Salon, Huê-Tâm, Jamme, Nicole, Corcoran, Jordyn, Hitzeman. Does Car Dependence Make People Unsatisfied With Life? Evidence From a U.S. National Survey, Travel Behaviour and Society, 2025. – Volume 39, 100954, ISSN 2214-367X. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.1016/j.tbs.2024.100954.
4. Хайдаров, Д. А. Обзор интеграции городского железнодорожного сообщения в городские транспортные системы городов-миллионеров России без метрополитенов // Мавлютовские чтения: материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции (г. Уфа, 25–29 ноября 2024 г.). – Уфа: Уфимский университет, 2025. – С. 423–428.

© Хайдаров Д.А. 2026

УДК 656.071

Ш.Д. ШАРИПОВ
shomortnichek@mail.ru
Науч. руковод. – ст. преподаватель А.А. СОЛОВЬЕВА

Уфимский университет науки и технологий

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ ПО ДОПОГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ VR В ООО «РН-ТРАНСПОРТ»

Аннотация: в статье рассматривается актуальная проблема качества подготовки водителей, осуществляющих перевозку опасных грузов в соответствии с ДОПОГ. На примере ООО «РН-Транспорт» анализируются недостатки традиционной системы обучения, включая отсутствие практико-ориентированной подготовки и высокую цену ошибки. Предлагается внедрение VR-тренажеров для маркировки транспортных средств и отработки действий в нештатных ситуациях. Обосновывается экономическая эффективность и социальная значимость предлагаемых решений.
Ключевые слова: ДОПОГ, виртуальная реальность, VR-тренажеры, подготовка водителей, опасные грузы, безопасность перевозок, ООО «РН-Транспорт».

Перевозка опасных грузов автомобильным транспортом относится к категории деятельности с повышенным уровнем риска. Согласно статистике, человеческий фактор остается основной причиной аварий и инцидентов при транспортировке нефтепродуктов, химических веществ и других материалов высокого класса опасности. Для компании ООО «РН-Транспорт», являющейся ключевым логистическим оператором в структуре нефтяной отрасли, вопросы обеспечения безопасности перевозок имеют стратегическое значение.

Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ) устанавливает жесткие требования к квалификации водительского состава. Обучение и сертификация водителей проводятся в аккредитованных учебных центрах по программам повышения квалификации (первичное обучение – 44 часа, повторное – 23 часа) с последующей сдачей экзамена в территориальных комиссиях Управления государственного автодорожного надзора (УГАДН) [4, 7]. Экзамен считается сданным при правильности ответов не менее чем на 75 % вопросов базового курса [1].

Однако существующая система подготовки имеет системные недостатки. Как отмечают эксперты, традиционное обучение часто ограничивается изучением теории «на бумаге», без возможности отработки практических навыков в безопасной среде [5]. Учитывая сложную специфику ДОПОГ, такой подход резко снижает качество подготовки и создает риски для реальных перевозок. Настоящая статья посвящена обоснованию внедрения технологии виртуальной реальности (VR) для совершенствования системы обучения водителей в ООО «РН-Транспорт».

ООО «РН-Транспорт» предъявляет высокие требования к своим сотрудникам. При приеме на работу водители категории ВС в обязательном порядке должны иметь действующее свидетельство ДОПОГ, опыт работы от 1 года, а также успешно пройти дополнительные внутренние аттестации [6]. Компания регулярно направляет своих сотрудников на первичное и повторное обучение в учебные центры, имеющие аккредитацию Ространснадзора [2]. Срок действия свидетельства составляет 5 лет, после чего водитель обязан подтвердить квалификацию [9].

Компания обеспечивает социальный пакет, включающий компенсацию затрат на обучение и медицинские осмотры, корпоративную пенсионную программу и добровольное медицинское страхование [6]. Однако, несмотря на высокий уровень корпоративной поддержки, качество подготовки водителей в значительной степени зависит от применяемых методик обучения.

Анализ существующей практики выявляет следующие критические недостатки:

1. Дефицит практической подготовки. Основной упор в обучении делается на теоретические занятия и заучивание нормативных документов. Водители не имеют возможности в безопасных условиях отработать такие ключевые навыки, как физическая маркировка транспортного средства знаками опасности (с учетом их особенностей, расположения и способов крепления), а также выявление ошибок в сопроводительных документах [5].

2. Высокая цена ошибки. Стоимость нарушения правил перевозки опасных грузов чрезвычайно высока. Штрафы для юридических лиц могут достигать 500 тысяч рублей, а в случае нештатной ситуации – привести к техногенной или экологической катастрофе [5]. Традиционное обучение не позволяет «проиграть» сценарии аварий без реальных последствий.

3. Низкая эффективность теоретических занятий. Преподавателям сложно определить по результатам стандартного тестирования действительно ли обучающийся усвоил материал. Часть слушателей просто заучивает правильные ответы, не понимая сущности явлений и не формируя устойчивые навыки [5].

4 Трудности визуализации сложных процессов. Маркировка опасных грузов требует точного знания многочисленных знаков, табличек и информационных панелей. Обучение только по тексту и статичным изображениям ведет к искажению восприятия, поскольку не всегда понятно, как слушатель интерпретирует учебный материал [5].

Технологии виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) активно внедряются в сфере профессионального образования. Для транспортной отрасли, особенно для таких потенциально опасных направлений, как перевозка опасных грузов, VR-симуляторы предлагают принципиально новые возможности [8].

Суть технологии заключается в создании полностью контролируемой виртуальной среды, которая имитирует реальный процесс подготовки транспортного средства к перевозке опасного груза. Тренажер работает «от первого лица» на игровых движках (например, Unity) и позволяет:

– симулировать процесс нанесения маркировочных знаков на транспортное средство;

– подбирать и размещать необходимое снаряжение и средства индивидуальной защиты в зависимости от типа груза;

– выявлять ошибки в сопроводительных документах [2, 5].

Особую ценность представляет возможность генерации адаптивных заданий с использованием элементов искусственного интеллекта. Система анализирует «проблемные места» конкретного обучающегося и генерирует новые уникальные задания, направленные на устранение выявленных пробелов в знаниях. Это позволяет подстраивать модель подготовки под уровень каждого водителя [5].

Для ООО «РН-Транспорт» предлагается внедрение комплексного VR-тренажера, включающего следующие функциональные блоки:

Блок 1. Виртуальная маркировка транспортных средств: водитель в режиме 360 градусов осматривает виртуальную модель автоцистерны (или бортового тягача с полуприцепом) и размещает знаки опасности согласно заданному классу груза. Система проверяет соответствие знаков перевозимому веществу, правильность расположения (спереди, сзади, по бокам) и способ крепления.

Блок 2. Подготовка документации и снаряжения: обучающемуся предоставляется набор транспортных документов (маршрутный лист, свидетельство ДОПОГ, письменные инструкции) и средств защиты (огнетушители, проблесковые маячки, знаки аварийной остановки, СИЗ). VR-среда требует выбрать корректный набор для конкретного рейса и разместить его в виртуальной кабине.

Блок 3. Действия в нештатных ситуациях: модуль симулирует различные инциденты: утечку груза, возгорание, дорожно-транспортное происшествие. Водитель должен действовать согласно письменным инструкциям, вызывать экстренные службы и предпринимать первичные меры по ликвидации последствий.

Технически решение может быть реализовано с использованием автономных VR-шлемов (например, Pico или Meta Quest), что позволяет проводить обучение как в специализированном классе, так и непосредственно на территории автопарка.

Внедрение VR-тренажера не заменяет полностью традиционные лекции, а дополняет их. Предлагается следующая схема интеграции:

1. Подготовительный этап (2 часа): знакомство с теорией, изучение нормативных документов в аудитории.

2. Практикум в VR (4–6 часов): отработка практических навыков на тренажере с фиксацией ошибок и генерацией дополнительных заданий для «слабых мест».

3. Итоговое тестирование в УГАДН: стандартная процедура экзамена (письменно или комбинированно, с процентом правильных ответов не менее 75 %) [1, 7].

Такой подход позволяет значительно повысить усвояемость материала за счет визуализации и многократного повторения действий без риска реальных последствий.

Внедрение VR-тренажеров в систему подготовки водителей ООО «РН-Транспорт» обеспечит следующие эффекты:

– Повышение качества обучения. Исследования показывают, что использование технологий виртуальной реальности повышает запоминание материала на 70-80% по сравнению с традиционными лекциями. Обучающиеся получают возможность наглядно увидеть взаимосвязь между классом опасности груза, требуемой маркировкой и необходимым снаряжением. Это напрямую повышает вероятность успешной сдачи экзамена в Ространснадзоре с первого раза [5].

– Снижение финансовых рисков. Стоимость одного штрафа за нарушение правил маркировки может составлять до 500 000 рублей для юридического лица [5]. Инвестиции в VR-обучение окупаются уже при предотвращении 2-3 подобных инцидентов. Кроме того, снижаются затраты на повторное обучение и пересдачу экзаменов сотрудниками, не прошедшими аттестацию с первого раза.

– Стандартизация подготовки. VR-тренажер обеспечивает единые стандарты обучения для всех филиалов компании – от Нефтеюганска до Ангарска и Уфы [2, 6]. Независимо от места проведения занятий, качество подготовки становится одинаково высоким, а результаты – предсказуемыми.

– Повышение безопасности перевозок. Отработка действий в аварийных ситуациях на виртуальных симуляторах формирует у водителей устойчивые алгоритмы поведения при реальных инцидентах. По данным зарубежных исследований, применение VR-тренажеров для отработки действий в кризисных ситуациях снижает количество ошибок персонала на 60 %.

Совершенствование системы обучения водителей при сертификации по ДОПОГ с использованием технологии VR в ООО «РН-Транспорт» представляет собой актуальное и экономически обоснованное направление модернизации корпоративной системы подготовки кадров. Традиционные методы обучения, основанные преимущественно на лекциях и тестировании, не позволяют в полной мере сформировать у водителей необходимые практические навыки маркировки транспортных средств, работы с документацией и действия в нештатных ситуациях.

Внедрение VR-тренажеров, разработанных на базе игровых движков с элементами искусственного интеллекта, позволяет создать безопасную контролируемую среду для отработки ключевых компетенций. Система адаптивного обучения генерирует задания, направленные на устранение выявленных пробелов в знаниях каждого конкретного водителя, что повышает эффективность подготовки и снижает нагрузку на преподавателей.

Для ООО «РН-Транспорт» использование VR-технологий означает не только снижение рисков штрафных санкций и аварийности, но и укрепление репутации социально ответственной компании, заботящейся о безопасности своих сотрудников и окружающей среды. Учитывая высокую конкуренцию на рынке логистических услуг и ужесточение требований законодательства (вступление в силу новых правил выдачи свидетельств с 1 сентября 2026 года), внедрение инновационных методов обучения становится стратегическим приоритетом [1].

Рекомендуется начать пилотный проект в одном из крупных филиалов (например, в г. Нефтеюганске или Тюменской области, где уже существует заинтересованность в инновациях [2]), оценить экономическую эффективность и при положительных результатах масштабировать решение на всю компанию.

Библиографический список

1. Проект приказа Минтранса России «Об утверждении Порядка выдачи свидетельств о подготовке водителей автотранспортных средств, перевозящих опасные грузы…» (разработан 24.02.2026). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: «Трудохрана.ру» (дата обращения: 02.03.2026).

2. Описание проекта «3D Тренажер для обучения водителей и консультантов по перевозке опасных грузов / Тренажер ДОПОГ». –

Университет 2035 / Тюменский государственный университет. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pt.2035.university (дата обращения: 20.03.2026).

3. Тендер №273698137: Образовательные услуги по программе повышения квалификации водителей ДОПОГ для филиала ООО «РН-Транспорт» в г. Нефтеюганск на 2025-2026 гг. – BiCoTender, 2024.

4. Программа повышения квалификации водителей, осуществляющих перевозки опасных грузов (ДОПОГ). – Сыктывкарский лесной институт, Центр дополнительного образования, 2025.

5. Описание проекта «3D тренажер маркировки ТС перевозящих опасные грузы». – Университет 2035 / Тюменский государственный университет. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pt.2035.university (дата обращения: 20.03.2026).

6. Вакансия «Водитель автомобиля категории ВС ДОПОГ» (ООО «РН-Транспорт», г. Ангарск). – Dreamjob.ru, 2026.

7. Опасные грузы: обучение водителей 2026. – «Трудохрана.ру», 2025. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.trudohrana.ru (дата обращения: 20.03.2026).

8. Описание проекта «Программный модуль по обучению специалистов, перевозящих опасные грузы». – Университет 2035 / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pt.2035.university/project/programmnyj-modul-po-obuceniu-specialistov-perevozasih-opasnye-gruzy (дата обращения: 20.03.2026).

9. Перевозка опасных грузов (ДОПОГ): программы обучения. – Учебный центр «Нива», 2025. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ucniva.ru/bezopasnost_dopog (дата обращения: 20.03.2026).

© Шарипов Ш.Д., 2026

УДК 656.135

В.Д. ШИРШОВ
shirshovvadim@yandex-team.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПАНИЙ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ

Аннотация: в статье будут рассматриваться ключевые направления применения нейросетей (искусственного интеллекта) для решения основных задач складской и транспортной логистики. Описываются принципы и примеры

использования искусственного интеллекта (ИИ) в логистической отрасли на примере разных транспортных компаний.

Ключевые слова: оптимизация логистических процессов, искусственный интеллект, внедрение нейросетей, совершенствование процессов.

В наши дни искусственный интеллект превратился в мощный и действенный инструмент для решения самых разных задач: автоматизация бизнес-процессов, анализ больших данных, создание медиаконтента, поддержка клиентов через чат-ботов, написание программ на базе Python и многое другое. Логистика – очередная сфера, в которой сила искусственного интеллекта используется уже далеко не первый год, и статистика свидетельствует об этом как о вполне успешном опыте. В настоящее время рынок грузоперевозок и складского хозяйства проходит стадию глубокой технологической перестройки. Ежегодно спрос на цифровые решения в логистике увеличивается примерно на 20 %, а по оценкам специалистов, около 45% российских компаний намерены в ближайшие два-три года внедрить инструменты на основе нейросетей, ориентируясь на опыт тех корпораций, которые уже активно применяют этот универсальный инструмент. Внедрение нейросети на всех возможных этапах цепочки поставок даёт возможность не только автоматизировать рутинные операции, а значит снизить объём человеко-часов на определённых этапах, но и поднять управление логистическими процессами на принципиально иной уровень: такое как уменьшение убытков, предсказания событий и оптимизация решений [1].

В основе функционирования логистического искусственного интеллекта лежит целый комплекс технологий. Первая из них, это алгоритмы машинного обучения, которые обрабатывают значительные массивы ретроспективных данных, выявляют в них недостатки, альтернативные решения и, что особенно важно, обобщают информацию для последующего анализа специалистом. В отличие от классических методов анализа, нейросеть может учитывать множество параметров: погодные условия, загруженность дорог, тип транспортного средства и даже индивидуальный стиль вождения конкретного водителя, влияющий на продолжительность перевозки груза. Вторая технология – компьютерное зрение, которая даёт возможность работать с визуальной информацией: сканировать номера, распознавать объекты, обнаруживать дефекты продукции или отслеживать состояние оборудования без прямого участия человека. Третья технология: обработка естественного языка, если вкратце «NLP. Благодаря ей машины понимают и генерируют устную и письменную речь, что серьёзно усиливает клиентский сервис, в частности чат-ботов поддержки, а главное помогает при обработке документов. Сочетание этих трёх направлений и формирует ту самую «умную и эффективную» логистику, которую сегодня берут на вооружение лидеры рынка доставки, а также в целом большие логистические отрасли [2].

Самый заметный результат нейросети демонстрируют в складской логистике и управлении товарными запасами. Искусственный интеллект

с опорой на предиктивную аналитику способен точно определить, когда и в каких объёмах следует закупать товар, чтобы, с одной стороны, не заморозить средства в излишках, а с другой не потерять прибыль из-за дефицита. Алгоритмы могут принимать во внимание маркетинговые акции, сезонность продукции, кассовые данные и даже метеопрогнозы. В качестве примера можно привести совместную работу X5 Group и компании «Балтика»: внедрение системы планирования поставок на основе ИИ повысило точность прогнозов на 20 % и позволило заметно снизить затраты на хранение и перевозку. Кроме того, непосредственно на складах всё шире применяются роботизированные системы с искусственным интеллектом, подобные решениям Amazon. Роботы Kiva, снабжённые компьютерным зрением, способны самостоятельно перемещаться по складу, находить и доставлять стеллажи к пунктам комплектации, оптимально распределяя загрузку в реальном времени. Это не только ускоряет обработку заказов, но и даёт возможность более рационально использовать площадь складских помещений [3].

Долгие годы ключевой зоной ответственности транспортных компаний остаётся доставка, и здесь нейросети решают задачу выстраивания оптимального маршрута. Системы наподобие ORION, внедрённой компанией UPS, обрабатывают тысячи параметров при выборе пути. Его особенность в том, что он минимизирует левые повороты на маршруте, что неочевидно для человека, но критически важно для безопасности и экономии топлива: при таком маневре автомобиль дольше простаивает в ожидании нужного периода.

Благодаря такой оптимизации средняя стоимость доставки заметно снижается без потери качества сервиса. Сейчас нейросети научились эффективно работать и в сфере, где раньше полагались только на опыт механиков, а именно в ремонте и обслуживании парка. Системы предиктивной диагностики, подобные Volvo Active Monitoring, способны анализировать данные с датчиков грузовиков в реальном времени. Например, они фиксируют аномальную вибрацию, изменение температуры узлов или состояние тормозных колодок, тем самым прогнозируя риск поломки еще до того, как она случится на трассе. Внедрение таких технологий позволяет транспортным компаниям перейти от плановых ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию транспорта. Результатом становится сокращение аварийных остановок на дороге как минимум на 25 % и сокращение убытков при ремонте [4].

Параллельно с контролем техники нейросеть способна отслеживать и грузы. Платформа Resilience360 от DHL собирает данные с GPS-трекеров, включая и систему таможенного оформления, позволяя логисту видеть полную картину движения поездов, судов и фур по всему миру и заранее предупреждать клиента о задержках в поставках. Однако, как показывает практика, роль искусственного интеллекта в логистике уже не ограничивается лишь физическими операциями. Огромный пласт работы любого логиста – это оформление документации и презентация решений руководству или партнерам. Исследования учебного центра «Руно» показывают, что современный

искусственный интеллект успешно справляется с рутиной, которая раньше отнимала до 30 % рабочего дня логиста. Нейросеть способна генерировать по шаблонам и правильно составленным промтам сложные деловые документы: маршрутные листы, таможенные декларации, акты и служебные записки. Более того, инструменты вроде ChatGPT или отечественных аналогов могут анализировать массивы табличных данных, превращая их в связный текст еженедельного отчета для руководства, что, в свою очередь, радикально меняет подход к работе: специалист перестает быть оператором Excel, становясь аналитиком и стратегом, который принимает на основе визуализированных данных верные управленческие решения.

В конечном итоге стоит понимать, что, несмотря на почти безграничные возможности, внедренные в логистику нейросети – это не решение всех проблем. Хоть сейчас нейросети в логистике эволюционировали из экспериментальной технологии в прикладной инструмент, который способен предсказывать будущий спрос, находить оптимальные маршруты, предупреждать о поломках машин и брать на себя рутину по оформлению бумаг, он все еще не может полностью заменить человека, его мышление, опыт и стратегический склад ума. Массовая интеграция ИИ-моделей в бизнес и логистику уже началась, и с годами тема будет только расти. В этой погоне за «дешевой» автоматизацией главное не забыть об обдуманном и выверенном подходе к интеграции ИИ в логистические процессы транспортных компаний.

Библиографический список

1. Значимость транспортной логистики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://academdpo.ru (дата обращения: 18.04.2026).

2. Транспортная логистика: определение, задачи, виды. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://itctraining.ru (дата обращения: 18.04.2026).

3. Данные сайта TADVISER. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tadviser.ru/ (дата обращения: 20.04.2026).

4. Транспортная логистика: что это такое простыми словами – виды, основы, особенности грузоперевозок транспортно-логистической компании. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.secuteck.ru (дата обращения: 21.04.2026).

© Ширшов В.Д., 2026г.

УДК 656.078

И.Н. ЯКУПОВ
y4kup0v.11d4r@gmail.com
Науч. руководитель – ст. преподаватель А.А. СОЛОВЬЕВА

Уфимский университет науки и технологий

PERFOMANCE-BASED LOGISTICS В ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКЕ

Аннотация: в статье рассматривается концепция Performance-Based Logistics (PBL) как современная модель управления логистическим обеспечением, ориентированная на достижение измеримых результатов эксплуатации, а не на оплату отдельных операций. Особое внимание уделяется экономическим преимуществам подхода, включая снижение совокупной стоимости владения активами на протяжении жизненного цикла, повышение эксплуатационной готовности и надежности транспортных систем, а также стимулирование инноваций у поставщиков услуг.
Ключевые слова: Performance-Based Logistics, транспортная логистика, цепи поставок, жизненный цикл активов, показатели эффективности, контрактные модели.

Современное развитие мировой экономики сопровождается существенным усложнением логистических систем и повышением требований к устойчивости цепей поставок. Рост международной торговли, ускорение производственных циклов и цифровая трансформация экономики приводят к тому, что эффективность транспортной логистики становится ключевым фактором конкурентоспособности компаний и национальных экономик. Традиционные подходы к управлению логистикой, основанные на оптимизации отдельных операций транспортировки, хранения и обслуживания, постепенно уступают место интегрированным моделям управления результатами функционирования всей цепи поставок. Отечественные исследователи отмечают, что логистика в современных условиях выступает не просто инструментом организации потоков, а системой стратегического управления ресурсами, обеспечивающей устойчивость экономических процессов [1].

Одной из ключевых тенденций развития логистики становится переход от оплаты процессов к оплате достигнутых результатов. Традиционная модель контрактования предполагает оплату выполненных операций, к примеру работы, по перевозке, хранению, ремонту, поставке запасных частей. Однако подобная система не всегда стимулирует участников логистической цепи к снижению отказов, сокращению простоев и повышению надежности. В ответ на данные ограничения в мировой практике формируется концепция «outcome-based models», в рамках которых объектом управления становится результат функционирования системы, а не объем выполненных работ. Активно

развивающееся направление Performance-Based Logistics (PBL) является примером такого подхода.

Использование PBL в транспортной логистике является актуальным по причине цифровизации логистики и управления жизненным циклом продукции. Развитие технологий интернета вещей, систем мониторинга состояния оборудования и аналитики больших данных позволяет осуществлять постоянный контроль эксплуатационных параметров транспортных средств и инфраструктуры. Это создает объективные предпосылки для перехода к результат-ориентированным контрактам, основанным на измеримых показателях готовности и надежности. В отечественной научной школе вопросы интеграции цепей поставок и цифровой трансформации логистики рассматриваются как ключевые направления развития отрасли [2]. Несмотря на активное развитие теоретических подходов к реализации и зарубежный опыт внедрения PBL, в Российской Федерации применение данной модели остается ограниченным. Институциональные особенности контрактной системы, ориентация на минимизацию закупочной цены и недостаточная практика долгосрочного жизненного цикла обслуживания сдерживают распространение результат-ориентированных моделей. В этой связи цель настоящего исследования заключается в анализе возможностей применения Performance-Based Logistics в транспортной логистике на основе сопоставления зарубежного опыта и российских реалий. Объектом исследования являются логистические системы и цепи поставок, а предметом – модели управления логистическим обеспечением на основе показателей эффективности. Методологическую основу исследования составляют системный и сравнительный анализ, кейс-стади, методы экономико-логистического моделирования и анализ системы ключевых показателей эффективности (KPI).

Развитие логистических контрактов отражает общую эволюцию логистики как научной и прикладной дисциплины. На ранних этапах преобладала транзакционная логистика, при которой заказчик приобретал отдельные услуги перевозки или складирования. Эффективность оценивалась преимущественно по стоимости операции. В дальнейшем сформировалась сервисная логистика, предполагающая комплексное обслуживание и интеграцию нескольких функций в рамках одного контракта. Современный этап характеризуется переходом к outcome-based logistics, где основное внимание уделяется конечному результату функционирования логистической системы. Сущность Performance-Based Logistics заключается в ориентации контрактных отношений на показатели эксплуатационной готовности, надежности и доступности обслуживаемой системы. В рамках PBL заказчик приобретает гарантированный уровень функционирования транспортной или технической системы, а поставщик услуг получает вознаграждение в зависимости от достижения установленных показателей. Таким образом, происходит перераспределение рисков: значительная часть ответственности за результат переносится на исполнителя, что стимулирует его к повышению эффективности процессов обслуживания. Концепция PBL тесно связана с

управлением жизненным циклом продукции. В теории логистики и управления цепями поставок подчеркивается, что основная доля затрат формируется на этапе эксплуатации, а не производства [2]. Следовательно, оптимизация технического обслуживания, своевременное выявление неисправностей и снижение частоты отказов способны существенно сократить совокупную стоимость владения системой. В этом контексте PBL выступает инструментом интеграции процессов обслуживания, снабжения и аналитического сопровождения эксплуатации. Ключевыми элементами модели являются соглашения об уровне сервиса (SLA), система KPI, управление надежностью и готовностью техники, а также интеграция данных эксплуатации. Использование прогнозной аналитики позволяет перейти от реактивного ремонта к предиктивному обслуживанию, что снижает вероятность внеплановых простоев. Метрики эффективности включают operational availability, совокупную стоимость владения (TCO), среднее время между отказами (MTBF) и уровень сервисной готовности. Эти показатели обеспечивают объективную оценку результата и формируют основу для расчета экономической эффективности контракта. Преимущества модели проявляются в снижении совокупных затрат жизненного цикла, стимулировании инноваций и повышении прозрачности взаимодействия сторон. Вместе с тем PBL требует сложной системы контрактного регулирования, четкого определения показателей и развитой цифровой инфраструктуры, без которой невозможно обеспечить достоверность оценки результатов [3].

Комплексное внедрение подхода Performance-Based Logistics в цепи поставок особенно ярко наблюдается в сфере оборонной логистики Соединенных Штатов Америки и стран НАТО, где контракты жизненного цикла давно стали нормой и предусматривают оплату именно за поддержание техники в состоянии постоянной готовности к выполнению поставленных задач. Такой переход к результат-ориентированному финансированию позволил не только существенно повысить уровень эксплуатационной готовности вооружений и военной техники, но и одновременно добиться заметного сокращения бюджетных расходов на обслуживание, поскольку поставщики теперь напрямую заинтересованы в повышении надежности оборудования, ведь их доход полностью зависит от того, насколько успешно система выполняет свои функции в реальных условиях. В авиационной отрасли модель PBL реализуется через сервисные контракты с производителями двигателей и авиационных систем, где заказчик оплачивает уже не отдельные работы, а фактическое использование оборудования по часам налета или километрам пробега, в то время как производитель берет на себя полную ответственность за техническое обслуживание, своевременную поставку запасных частей и всю логистическую поддержку в целом. Активное применение технологий предиктивного обслуживания и современных аналитических инструментов в этих контрактах позволяет минимизировать простои самолетов и вертолетов, оптимизировать управление складскими запасами и в конечном итоге достигать впечатляющих результатов по

снижению затрат при одновременном росте надежности. Элементы Performance-Based Logistics успешно применяются и в коммерческой транспортной логистике, где операторы третьего и четвертого уровней, то есть 3PL и 4PL-провайдеры, заключают контракты, в которых уровень оплаты напрямую зависит от соблюдения сроков доставки грузов, стабильности всего перевозочного процесса и общих показателей качества предоставляемого сервиса. Факторами, которые обеспечивают успешное внедрение такой модели за рубежом, выступают хорошо развитая контрактная система, позволяющая фиксировать все нюансы, высокая цифровая зрелость компаний, обеспечивающая прозрачность обмена данными между партнерами, а также общая зрелость управления цепями поставок на отраслевом уровне. Зарубежная практика убедительно показывает, что Performance-Based Logistics способствует формированию долгосрочных и взаимовыгодных партнерских отношений между заказчиками и поставщиками, что в свою очередь значительно повышает общую устойчивость логистических систем к различным внешним воздействиям и кризисам [4].

Развитие транспортной логистики в Российской Федерации во многом определяется стратегическими документами государственного уровня, среди которых особое место занимает Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года, где четко подчеркивается необходимость повышения эффективности использования имеющейся инфраструктуры, существенного сокращения логистических издержек для бизнеса и экономики в целом, а также активного внедрения цифровых технологий управления перевозками на всех уровнях. Министерство транспорта Российской Федерации в рамках своих полномочий реализует масштабные проекты цифровой трансформации транспортного комплекса, которые направлены на развитие интеллектуальных транспортных систем, способных анализировать ситуацию в реальном времени, и на повышение общей прозрачности всех процессов, связанных с перемещением грузов и пассажиров. Структура рынка логистических операторов в стране постепенно смещается в сторону предоставления комплексных услуг, однако пока еще преобладает модель краткосрочного контрактования, которая не всегда позволяет учитывать долгосрочные эффекты. Отдельные элементы Performance-Based Logistics уже встречаются в практике, в частности в виде сервисных контрактов в авиационной и железнодорожной отраслях, а также при использовании соглашений об уровне сервиса в логистическом аутсорсинге, однако системное и масштабное применение результат-ориентированной модели пока еще отсутствует. Институциональными ограничениями здесь выступают особенности действующего контрактного законодательства, которое не всегда приспособлено к долгосрочным обязательствам, и традиционная ориентация закупочных процедур исключительно на минимальную цену контракта на момент подписания. Среди экономических и организационных барьеров можно выделить недостаточную прозрачность в определении и мониторинге ключевых показателей

эффективности, определенные риски, связанные с долгосрочными обязательствами для обеих сторон, а также дефицит качественных аналитических данных о реальном состоянии техники и инфраструктуры. Вместе с тем активное развитие цифровых платформ для управления перевозками и накопление больших объемов эксплуатационной информации создают вполне реальные предпосылки для постепенного и взвешенного внедрения Performance-Based Logistics в российскую практику [5].

Сравнение зарубежных и российских моделей управления логистикой наглядно показывает значительные различия как в распределении рисков между заказчиком и исполнителем, так и в уровне общей цифровой зрелости компаний и отраслей. В зарубежных системах значительная часть ответственности за конечный результат традиционно возлагается именно на поставщика услуг, что естественным образом стимулирует его к активному внедрению инноваций, постоянному повышению надежности техники и оптимизации всех процессов, поскольку доход напрямую зависит от успеха. В российской практике риски очень часто остаются преимущественно на стороне заказчика, что существенно ограничивает мотивацию исполнителей к долгосрочной оптимизации и инновационному развитию. Уровень цифровой зрелости также играет здесь ключевую роль, поскольку зарубежные компании уже давно активно применяют предиктивную аналитику, цифровое моделирование процессов и интеграцию данных из разных источников, в то время как российские предприятия находятся пока еще на этапе активного внедрения и освоения соответствующих технологий, что требует дополнительных усилий и инвестиций. Оценка потенциального экономического эффекта от внедрения Performance-Based Logistics в российских условиях показывает вполне реальную возможность заметного снижения эксплуатационных затрат и одновременного повышения надежности транспортных систем в целом. Адаптация этой модели требует постепенного и продуманного перехода к результат-ориентированным контрактам, разработки понятной и прозрачной системы ключевых показателей эффективности, которая будет отражать доступность транспорта для работы, строгое соблюдение сроков доставки грузов и общую стоимость владения активами на протяжении всего жизненного цикла. Существенную роль в этом процессе должны сыграть современные цифровые технологии мониторинга эксплуатации, поскольку именно они позволяют собирать и анализировать данные в реальном времени. Использование устройств интернета вещей для постоянного отслеживания состояния оборудования, анализа больших данных для выявления закономерностей и создания цифровых двойников транспортных средств и инфраструктуры дает возможность формировать действительно объективную систему оценки эффективности, которая будет понятна всем участникам. Важным условием успешной адаптации становится развитие долгосрочных партнерских отношений между заказчиками и поставщиками логистических услуг, а также постепенное изменение управленческой культуры

взаимодействия, где акцент смещается с контроля отдельных операций на совместное достижение общих результатов [6].

Методика оценки эффективности внедрения Performance-Based Logistics в транспортной сфере основывается на тщательном сравнении традиционной модели логистики, ориентированной на процессы, с результат-ориентированным управлением, которое учитывает конечные исходы. Сценарный анализ, проводимый в рамках такого подхода, убедительно показывает, что переход к PBL позволяет существенно снизить внеплановые расходы на обслуживание техники, оптимизировать складские запасы запасных частей и материалов, а также заметно повысить коэффициент готовности транспортных средств к выполнению задач в любой момент времени. Потенциальное снижение общих затрат напрямую связано с уменьшением количества простоев оборудования и повышением предсказуемости всего процесса эксплуатации, что в конечном итоге приводит к более стабильным и прогнозируемым экономическим показателям для всех участников цепи поставок. Performance-Based Logistics в целом представляет собой современную и высокоэффективную модель управления логистическим обеспечением, которая ориентирована на достижение измеримых и объективно оцениваемых результатов эксплуатации техники и инфраструктуры. Богатый зарубежный опыт убедительно подтверждает эффективность этой модели в повышении надежности систем и значительном снижении стоимости их жизненного цикла, что делает ее особенно привлекательной для применения в самых разных отраслях. Российская транспортная система уже обладает необходимыми технологическими предпосылками для внедрения Performance-Based Logistics, однако для полноценной реализации требуется серьезная адаптация существующих институциональных механизмов, развитие цифровой инфраструктуры и формирование новой культуры долгосрочного партнерства между всеми участниками рынка [7].

Performance-Based Logistics представляет собой одну из наиболее прогрессивных моделей управления логистическим обеспечением, ориентированную на достижение измеримых результатов эксплуатации, а не на оплату отдельных операций. Анализ показывает, что внедрение данной концепции способно обеспечить существенное повышение эксплуатационной готовности и надежности транспортных систем, снижение совокупной стоимости владения активами на протяжении жизненного цикла, стимулирование инноваций у поставщиков услуг и формирование долгосрочных партнерских отношений между участниками цепи поставок. Вместе с тем успешная реализация PBL в российских условиях требует комплексного подхода, включающего адаптацию контрактного законодательства, переход от минимизации цены к оценке долгосрочной эффективности, разработку прозрачной системы ключевых показателей, ускоренное развитие цифровой инфраструктуры и изменение управленческой культуры в сторону совместной ответственности за результат. Таким образом, Performance-Based Logistics можно рассматривать как современный этап

эволюции логистики – переход от процесс-ориентированного к результат-ориентированному управлению, создающий основу для более устойчивых и конкурентоспособных транспортных систем будущего. Для научного сообщества транспортного и логистического направлений данная область остается одной из наиболее перспективных, поскольку объединяет инженерные, экономические, институциональные и цифровые аспекты развития современной логистики.

Библиографический список

1. Гаджинский, А. М. Логистика: учебник / А. М. Гаджинский. – 21-е изд. – Москва: Дашков и К, 2017. – 419 с.

2. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р (ред. от 06.11.2024). – Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents (дата обращения: 28.02.2026).

3. Сергеев, В. И. Управление цепями поставок: учебник для вузов / В. И. Сергеев. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 480 с.

4. Министерство транспорта Российской Федерации. Цифровая трансформация транспортного комплекса РФ. Официальные материалы Минтранса России. – [электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства транспорта Российской Федерации. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/ (дата обращения: 27.02.2026).

5. Григорьев, М. Н., Уваров, С. А. Логистика: учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 746 с.

6. Еремин, М. Ю. Эффективность применения стратегии performance based logistics при осуществлении сервисного сопровождения военной авиационной техники // Экономика: вчера, сегодня, завтра, 2019. – Том 9. – № 1А. – С. 90–100.

7. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 ноября 2023 г. № 3097-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года». – Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/activities/297/documents (дата обращения: 28.02.2026).

© Якупов И.Н., 2026

УДК 339.543

Р.Р. АЛТЫНБАЕВ
diksandj@mail.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ИМПОРТ ИЗ КИТАЯ В РОССИЮ: ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация: в статье рассматриваются особенности параллельного импорта товаров из Китая в Россию, анализируются его правовые основы, преимущества и риски. Особое внимание уделяется влиянию данного механизма на российскую экономику и внешнеторговые связи.
Ключевые слова: параллельный импорт; Китай; Россия; внешняя торговля; санкции; логистика; импортозамещение.

Параллельный импорт из Китая в Россию за последние несколько лет превратился из альтернативного механизма поставок в один из ключевых инструментов поддержания бизнеса. После введения санкционных ограничений и ухода значительной части западных компаний российские предприниматели столкнулись с необходимостью срочно перестраивать логистические и торговые цепочки. Особенно серьёзно ситуация затронула сферы, связанные с продажей электроники, бытовой техники, автомобильных комплектующих и промышленного оборудования – продукции, которая в необходимом объёме внутри страны практически не производится. В этих условиях одним из наиболее доступных решений стал именно параллельный импорт через Китай [1].

Под параллельным импортом понимается ввоз оригинальной продукции без участия официального дистрибьютора или представителя бренда. Речь идёт не о контрафакте, а о легально произведённых товарах, изготовленных на сертифицированных предприятиях. Отличие заключается лишь в том, что поставка осуществляется без согласия правообладателя. Если раньше подобная практика могла повлечь административную ответственность, то после изменения законодательства ввоз ряда товаров был разрешён официально. Особенно это касается брендов, которые прекратили деятельность на российском рынке либо временно приостановили поставки [2].

Механизм работы параллельного импорта достаточно прост. Российская компания находит поставщика в Китае, заключает договор, оплачивает продукцию и организует её доставку через границу. В результате техника, оборудование или комплектующие поступают на российский рынок без участия прежних официальных каналов. Такая схема позволила многим компаниям

сохранить ассортимент и продолжить работу даже в условиях ограниченного доступа к международным поставкам [1].

Китай стал главным направлением для подобных поставок по нескольким причинам. Прежде всего, страна обладает крупнейшими производственными мощностями в мире. На китайских предприятиях выпускается широкий спектр продукции – от недорогих аксессуаров до сложного промышленного оборудования. Кроме того, китайские компании быстро адаптируются к изменениям рыночной конъюнктуры. После роста спроса со стороны России поставщики оперативно расширили экспортные направления и логистические маршруты. Важную роль сыграло и то, что в Китае производятся как товары известных международных брендов, так и собственные аналоги, зачастую сопоставимые по качеству, но более доступные по стоимости [2].

Наиболее востребованными категориями товаров остаются смартфоны, ноутбуки, комплектующие для компьютеров и бытовая техника. Значительные объёмы приходятся и на автомобильные запчасти, поскольку после сокращения официальных поставок возник дефицит комплектующих для европейских и японских автомобилей. Помимо этого, через Китай активно поставляется промышленное оборудование: станки, насосы, реле, электронные компоненты и другая продукция, необходимая для стабильной работы предприятий. Существенную долю занимают также одежда, обувь и текстиль [3].

Одним из основных преимуществ параллельного импорта стало сохранение товарного ассортимента на российском рынке. Несмотря на прогнозы о масштабном дефиците, большинство привычных товаров продолжило поступать в продажу. В некоторых случаях выросли сроки доставки и конечная стоимость продукции, однако полного исчезновения многих категорий товаров удалось избежать. Для потребителей это имело не только экономическое, но и психологическое значение: наличие привычной техники и товаров снижало ощущение нестабильности на рынке.

Для бизнеса параллельный импорт также открыл дополнительные возможности. Компании получили большую свободу в выборе поставщиков, маршрутов доставки и условий закупки. Предприниматели могут самостоятельно сравнивать предложения различных китайских производителей, искать более выгодные условия и выстраивать собственные логистические схемы. Крупные фабрики нередко предоставляют скидки постоянным клиентам и готовы адаптировать упаковку или комплектацию продукции под требования российского рынка. Для малого и среднего бизнеса подобная гибкость оказалась особенно важной [3].

Тем не менее система параллельного импорта сопровождается рядом серьёзных трудностей. Одной из главных проблем остаётся логистика. Транспортные маршруты через Казахстан и Дальний Восток нередко перегружены, а сроки доставки могут существенно увеличиваться. Контейнеры задерживаются в портах и на железнодорожных узлах, что приводит к замораживанию оборотных средств компаний. В попытке снизить риски некоторые организации используют альтернативные маршруты через Турцию,

ОАЭ и другие страны, однако это значительно увеличивает стоимость перевозок.

Не менее сложной остаётся финансовая сторона вопроса. Колебания валютного курса напрямую влияют на себестоимость товаров и прибыль компаний. Дополнительные трудности создают ограничения в международных расчётах. Часть банков осторожно относится к операциям с китайскими партнёрами из-за риска вторичных санкций, поэтому предпринимателям приходится искать обходные способы оплаты через посредников или третьи страны. Всё это повышает расходы и усложняет проведение сделок [1].

Особое внимание приходится уделять проверке поставщиков. Китайский рынок чрезвычайно масштабен, и среди большого количества посредников далеко не всегда легко найти надёжного производителя. Нередко качество пробной партии отличается от качества основной поставки, а в случае возникновения споров решить вопрос бывает непросто. Именно поэтому многие компании стараются лично посещать фабрики, заказывать образцы продукции и пользоваться услугами специализированных агентств по проверке контрагентов [2].

Проблемы возникают и в сфере гарантийного обслуживания. Поскольку товары ввозятся вне официальных каналов, авторизованные сервисные центры нередко отказываются принимать такую продукцию на ремонт. Крупные торговые сети постепенно создают собственные сервисные подразделения либо сотрудничают с независимыми мастерскими, однако у небольших продавцов возможности для полноценного обслуживания ограничены.

Со временем российский бизнес начал адаптироваться к новым условиям. Всё больше компаний пользуются услугами логистических операторов, которые помогают решать вопросы таможенного оформления, сертификации и документооборота. Для поиска партнёров активно применяются цифровые платформы, включая Alibaba и 1688. Постепенно параллельный импорт стал частью новой экономической реальности.

Судя по текущей ситуации, данный механизм останется востребованным ещё продолжительное время. Пока международные бренды не восстановили полноценное присутствие на российском рынке, именно Китай продолжает играть роль основного торгового партнёра России. Российские компании вынуждены перестраивать привычные схемы работы, развивать сотрудничество с азиатскими производителями и искать новые способы организации поставок. Несмотря на сложности, параллельный импорт позволил сохранить стабильность товарного рынка и обеспечить доступность многих категорий продукции для бизнеса и потребителей.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. В. Международная торговля: учебник / В. В. Кузнецов. – Москва: Юрайт, 2023. – 350 с.

2. Смирнов, А. А. Внешнеэкономическая деятельность предприятия / А. А. Смирнов. – Санкт-Петербург: Питер, 2022. – 280 с.

3. Федеральная таможенная служба Российской Федерации. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://customs.gov.ru (дата обращения: 28.03.2026).

© Алтынбаев Р.Р. 2026

СЕКЦИЯ 1.7. МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЁРДОГО ТЕЛА

УДК 678.074.00

Т.Р. АБДРАШИТОВ
abdrashitov8147@gmail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ЭЛАСТОМЕРЫ. ЧТО ЭТО: РЕЗИНА ИЛИ ПЛАСТМАССЫ?

Аннотация: в данной статье рассмотрены эластомеры – уникальный класс полимерных материалов, сочетающих свойства резины и пластмасс. Подробно исследуются их структура, ключевые характеристики (эластичность, прочность, термостойкость). Так же внимание уделено сравнению эластомеров с резинами и пластмассами, а также их широкому применению – от автомобильной промышленности и строительства до медицины и высоких технологий.
Ключевые слова: эластомеры, резина, пластмассы, полимеры, свойства.

Эластомеры – это класс полимерных материалов, обладающих способностью к значительным обратимым деформациям. Их уникальные физико-химические характеристики делают их незаменимыми в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, автомобилестроение, электронику и медицину [1].

Основное отличие эластомеров от других полимеров – наличие сетчатой структуры, образованной поперечными сшивками макромолекул, как показано на рис. 1. Эти поперечные связи формируются в процессе вулканизации (для каучуков) или при введении сшивающих агентов в состав термопластичных эластомеров. Благодаря такой структуре, эластомеры способны к значительному растяжению (до 1000 % и более) и при этом возвращаются к исходной форме после снятия нагрузки. Не следует путать эластомеры и термопласты.

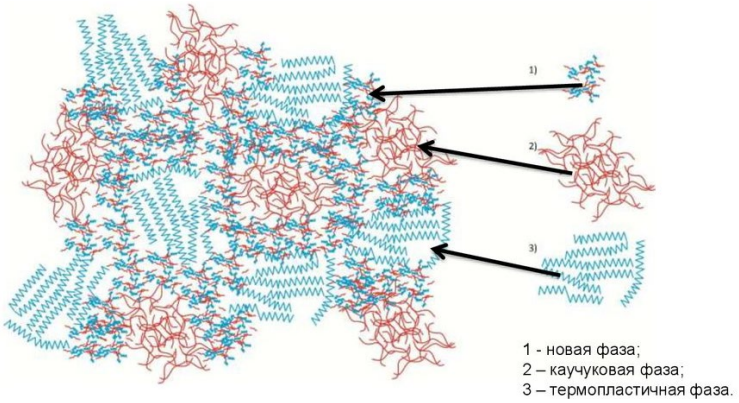


Рис. 1. Структура термопластичного эластомера

Таким образом, сетка способна к раздвижению ячеек без разрыва молекулярных связей. К эластомерам относят различные насыщенные и ненасыщенные каучуки, резины, полимерные нити, термоэластопласты, полиуретановые эластомеры и некоторые другие соединения. Эластомеры могут быть как природного (натуральный каучук), так и синтетического происхождения (полиуретан, силикон) [2].

Рис. 2. Образец из эластомера

Рис. 3. Образцы из эластомера

Рис. 4. Образцы для транспортной промышленности

Структура эластомера – это его внутреннее строение, то есть расположение в пространстве частиц разного размера, имеющих между собой устойчивые связи и порядок сцепления. Структура эластомеров, как и у дуропластов, состоит из пространственно-сетчатых макромолекул. Однако молекулярная сетка у первых более редкая и имеет более широкие ячейки. При деформации ячейки раздвигаются, не разрушая места связи. После снятия напряжения ячейки возвращаются в свое первоначальное положение,

соответственно, синтетический материал снова принимает свою первоначальную форму. Эластомеры имеют следующие характеристики макромолекулярного строения:

1. Состоят из длинных полимерных цепей с высокой степенью свободы сегментов.

2. Молекулярная масса обычно составляет 10^5-10^6 г/моль.

3. Характерны гибкие углерод-углеродные или кремний-кислородные (в силиконах) связи [3].

Характеристики различных свойств для описания эластомеров приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики свойств эластомеров

Характеристика	Значение и описание
Модуль упругости	0.1–10 МПа (ниже, чем у пластмасс)
Температура стеклования (Tg).	Обычно ниже −40°C (для натурального каучука −70°C)
Устойчивость к деформации	Высокая
Предел прочности при растяжении	5-50 МПа
Ударная вязкость	50-150 кДж/м²
Коэффициент Пуассона	0,5

Резина – это вулканизированный эластомер (чаще всего на основе натурального или синтетического каучука), обладающий высокой эластичностью, способностью к большим обратимым деформациям и устойчивостью к износу. Получается путем вулканизации (сшивки полимерных цепей серой или другими агентами), что придает материалу прочность и термостойкость. Пластмассы – это синтетические или природные полимерные материалы, которые при нагревании могут размягчаться (термопласты) или необратимо затвердевать (термореактопласты). Они обладают высокой жесткостью, но, в отличие от резины, не способны к значительным обратимым деформациям [4]. Вулканизация – метод температурной стабилизации, в результате которого под воздействием высоких температур каучук взаимодействует с реагентом. За счет химической реакции молекулы каучука смешиваются в пространственную сетку, что позволяет создавать эластичный полимер – резину. При этом структура полимера представляет собой хаотично расположенные цепочки углерода. В нормальном состоянии цепи скручены, могут раскручиваться при растягивании и возвращаться в прежний, скрученный вид. За счет этого свойства резина используется в самых разных сферах. Помимо каучука состав резины включает активаторы и противостерители, активные и неактивные наполнители. Некоторые производители добавляют красители для создания материала с особым цветом. Иногда в резину включают

ароматизаторы, модификаторы, огнезащиту и другие компоненты. Для быстрого получения материала используются ускорители вулканизации [5].

Для сравнения материалов характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение резины и пластмассы

Характеристика	Резина	Пластмасса
Химическая структура	сшитый (вулканизированный) эластомер с гибкими полимерными цепями и поперечными связями, обеспечивающими эластичность.	могут быть как линейными (термопласты), так и сшитыми (термореактопласты), но их цепи жестче, а деформация чаще необратима.
Механические свойства	мягкая, гибкая, выдерживает растяжение до 500-1000% и возвращается в исходную форму.	жесткие, при деформации либо ломаются (хрупкие, как *PS*), либо необратимо деформируются (пластичные, как PE).
Термические свойства	рабочая температура обычно от -50°C до +120°C (специальные сорта до +300°C).	термопласты размягчаются при 80-200°C, термореактопласты не плавятся, но разлагаются.

Исходя из этого можно сделать вывод, что эластомеры – это самостоятельная категория материалов, включающая как резину, так и некоторые виды пластмасс (например, силиконы или полиуретаны). Спектр применения эластомеров непрерывно расширяется – от традиционных промышленных решений до прорывных технологий будущего. Их уникальное сочетание эластичности, прочности и химической стойкости делает эти материалы незаменимыми практически во всех сферах человеческой деятельности. Развитие новых видов эластомеров с заданными свойствами открывает перспективы для создания инновационных продуктов и технологических решений. Благодаря совокупности механических, химических и термических свойств, эластомеры находят применение в самых различных отраслях: автомобилестроение (уплотнители, шланги, амортизаторы, ремни), медицина (катетеры, перчатки, уплотнительные элементы для медицинской техники), пищевая промышленность (прокладки, трубопроводы и мембраны, устойчивые к агрессивным средам), электроника и кабельная промышленность (изоляция проводов, герметизирующие компоненты), строительство (гидроизоляционные материалы, герметики, виброизоляторы) [6]-[9].

Эластомеры представляют собой уникальный класс полимерных материалов, занимающих промежуточное положение между резинами и пластмассами. Их отличительной особенностью является способность к значительным обратимым деформациям при сохранении структурной

целостности, что обусловлено специфической молекулярной структурой с гибкими полимерными цепями и поперечными связями. От традиционного использования в автомобилестроении и строительстве до инновационных применений в медицине, робототехнике и гибкой электронике - эти материалы продолжают расширять сферы своего применения. Было выявлено, что эластомеры способны включат в себя и резину и пластмассы, именно поэтому их нельзя включить в конкретную категорию. Таким образом, эластомеры не только сохраняют свою актуальность как промышленные материалы, но и приобретают все большее значение как ключевой элемент высокотехнологичных разработок будущего.

Библиографический список

1. Кузнецов А. В., Ениколопов С. Н. Электрочувствительные материалы для актуаторов мягкой робототехники // Российские нанотехнологии. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 47–56.
2. Павлов В. П., Кудоярова В. М. Прочностные и вязкоупругие свойства теплозащитных полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]: Уфа: УГАТУ, 2015. URL: http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Pavlov_prochnostnye_i_vyazkouprugie_svoystva_teplozashchitnyh_kompozitsionnyh_materialov_2015.pdf>.
3. Аксенов В. И. Эластомеры России: сырьё, рынок, технологии, перспективы // Вестник химической промышленности. – 2023. – № 3. С. 22–29.
4. Савельев А. Н. Производство синтетического каучука в России: анализ итогов за 2022 г. и перспективы развития // Химическая промышленность сегодня. – 2023. – № 2. – С. 35–41.
5. Иванов П. П., Смирнова Л. А. Эластомерные материалы повышенной прочности: свойства и применение // Труды ВИАМ. – 2023. – № 4. – С. 12–19.
6. Петрова Е. В. Рецептурные приёмы создания эластомерных материалов с повышенной огнестойкостью // Труды ВИАМ. – 2023. – № 6. – С. 28–35.
7. Сидоров М. К. Эластомеры для герметизирующих жгутовых материалов: свойства, методы получения и особенности изготовления // Полимерные материалы и технологии. – 2023. – № 5. – С. 44–50.
8. Соловьёв А. А. Эластомеры в промышленности: свойства, виды и области применения // Электронный журнал "Эполимер". – 2023. – № 2. – URL: https://epolymer.ru/articles/2023-2-3 (дата обращения: 22.04.2025).
9. Миронов Д. С. Полимеры-эластомеры: обзор различных классов и химических формул // Полимер Инфо. – 2023. – № 1. – URL: https://polymerinfo.ru/articles/elastic-types (дата обращения: 22.04.2025).

© Абдрашитов Т. Р., 2026

УДК 539.3

М.А. АЛАШОВ., Н.Н. НАСЫРОВ
alashov_m@mail.ru tirretlppk@gmail.com
Науч. руководв. – ассистент К.В. КОНЕВА

Уфимский университет науки и технологий

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ШТАМПОВОЙ СТАЛИ ДЛЯ ШТАМПОВОЧНЫХ МОЛОТОВ И ПУАНСОНОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Аннотация: в статье представлены результаты сравнительного анализа механического поведения штамповых сталей марок 5ХНМ и 5ХНВ в условиях, характерных для эксплуатации деталей, испытывающих сложное термомеханическое нагружение. Определены основные упругие, прочностные и пластические характеристики рассматриваемых материалов показано влияние химического состава и структурных особенностей на сопротивление деформации и разрушению. Предложены рекомендации по применению каждой из марок в зависимости от требуемого ресурса и условий эксплуатации. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и модернизации штамповой оснастки в машиностроении.
Ключевые слова: 5ХНМ, 5ХНВ, штамповые стали, инструментальные стали, напряжение, упругие свойства, химический состав, легирование.

В современном машиностроении, особенно в таких отраслях, как аэрокосмическая, автомобилестроительная и оборонная промышленность, широкое применение получила горячая объёмная штамповка (ГОШ). Этот процесс используется для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД): моноколёс, дисков и лопаток. Для моноколёс штамповка снижает трудоёмкость на 50–60 % и формирует текстуру зерна. Диски ГТД из трудно деформируемых жаропрочных сплавов получают только штамповкой, обеспечивающей временное сопротивление ≥ 1570 МПа. Точная штамповка лопаток позволяет достичь припуска 0…0,1 мм на пере, а групповая штамповка блоков из 4–8 заготовок снижает трудозатраты на 25–30 %. Таким образом, ГОШ – ключевой метод получения высоконагруженных деталей ГТД. Однако штамповочная оснастка работает в экстремальных условиях: высокие ударные нагрузки, циклические термические воздействия и локальная концентрация напряжений приводят к ускоренному износу и разрушению штампов. Этот технологический процесс позволяет быстро получать высоконагруженные и высокоточные детали с хорошим качеством металла. Однако штамповочная оснастка, в частности молоты, работает в экстремальных условиях: высокие ударные нагрузки, циклические термические воздействия и локальная

концентрация напряжений приводят к ускоренному износу и преждевременному разрушению штампов.

Срок службы штамповой оснастки определяется множеством факторов, среди которых ключевым является материал штампа. Инструментальная сталь должна сочетать высокую прочность, достаточную вязкость, пластичность и стойкость к образованию трещин. Наиболее распространёнными марками для таких условий являются 5ХНМ и 5ХНВ. Однако на практике выбор между этими сталями часто осуществляется без чётких количественных критериев, что приводит к неоправданно частой замене оснастки и снижению эффективности производства.

Проблема заключается в отсутствии систематических сравнительных данных о механическом поведении сталей 5ХНМ и 5ХНВ в условиях, моделирующих реальную эксплуатацию штампов (сложное термомеханическое нагружение). Имеющиеся в литературе сведения фрагментарны и не позволяют прогнозировать стойкость штампов в зависимости от выбранного материала.

В связи с этим цель настоящей работы – провести сравнительный анализ механических характеристик сталей 5ХНМ и 5ХНВ, оценить влияние их химического состава и структуры на сопротивление деформации и разрушению, а также выработать рекомендации по рациональному выбору марки для конкретных условий эксплуатации штамповой оснастки.

Полученные результаты позволят обоснованно подходить к выбору материала, увеличить межремонтный ресурс штампов и повысить эффективность штамповочного производства.

1. Сравнительный анализ характеристик штамповых сталей 5ХНМ и 5ХНВ

1.1 Прочностные характеристики

В результате анализа литературных источников [1,4] были получены данные для инструментальных сталей 5ХНМ и 5ХНВ после отжига в масле при 850 °С и отпуска при 460–520 °С. Характеристики приведены в *табл.1,* для сравнения материалов.

Анализ *табл.1* показывает, что сталь 5ХНМ ориентирована на восприятие высоких рабочих нагрузок, по пределу текучести и временному сопротивлению превосходит 5ХНВ, что указывает на её высокую способность сопротивляться пластической деформации и сохранять форму при больших контактных нагрузках. В свою очередь, сталь 5ХНВ характеризуется более высокими показателями пластичности (относительное удлинение и сужение выше на 22% и 28% соответственно) и ударной вязкости (на 14% больше), что свидетельствует о её повышенной сопротивляемости динамическим и ударным воздействиям, а также меньшей склонности к хрупкому разрушению. По упругим и теплофизическим свойствам стали практически не различаются.

Таблица 1

Прочностные характеристики сталей 5ХНМ и 5ХНВ

Характеристика	5ХНМ	5ХНВ
Модуль упругости, МПа	$2{,}1 \cdot 10^5$	$2{,}1 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,25–0,30	0,25–0,30
Линейный коэффициент теплового расширения, 1/°С	12,6–14,2	12,6–14,2
Предел текучести, МПа	1420	1050
Предел выносливости, МПа	241	241
Временное сопротивление, МПа	1570	1280
Относительное удлинение, %	9	11
Относительное сужение, %	35	45
Ударная вязкость, кДж/м^2	343	392
Твердость, НВ	241	255

1.2 Химический состав

Стали по химическому составу практически идентичным, основой легирования сплава является хром, никель и углерод. Углерод в количестве 0,5% обеспечивает высокую твёрдость матрицы после закалки. Хром в количестве 0,5–0,8% повышает прокаливаемость и износостойкость, никель в количестве 1,4–1,8% повышает вязкость и сопротивление хрупкому разрушению, марганец и кремний по 0,5–0,8% и 0,1–0,4% соответственно, дополнительно упрочняют твёрдый раствор.

Принципиальное различие между марками – в легировании специальными карбидообразующими элементами, 5ХНМ содержит молибден, который снижает склонность к отпускной хрупкости и повышает теплостойкость при циклических нагрузках, а 5ХНВ содержит вольфрам, который формирует более стабильные карбиды и обеспечивает повышенную красностойкость при работе в условиях разогрева штампа.

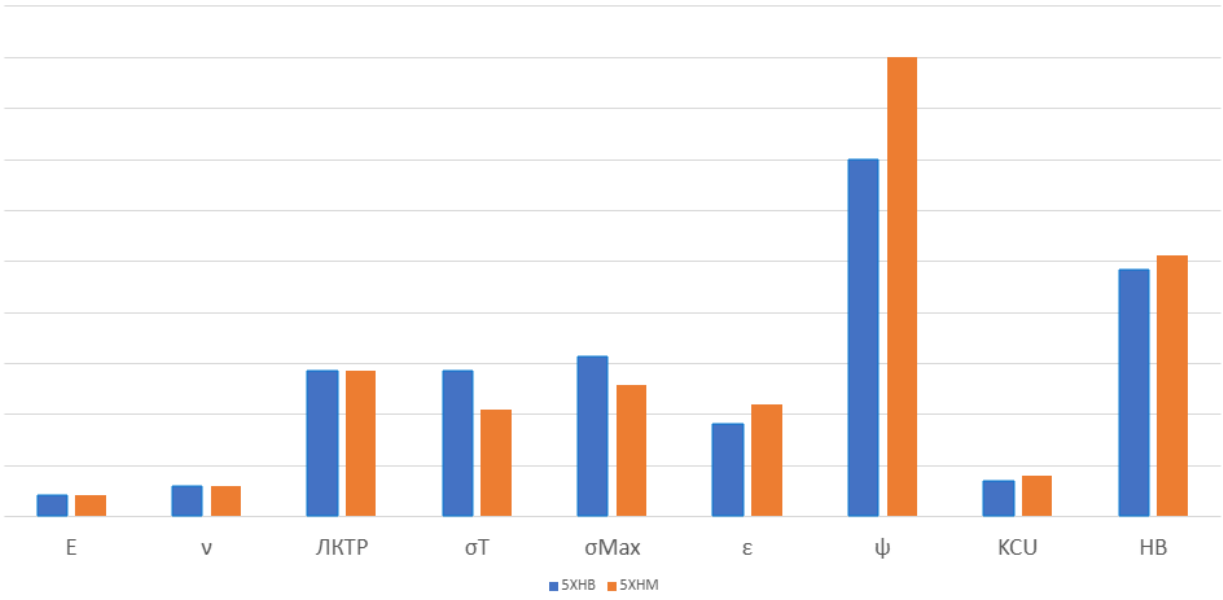
Вольфрам, входящий в состав, стали 5ХНВ, способствует повышению пластичности и ударной вязкости. Поэтому штамп из стали 5ХНВ лучше приспособлен к работе в условиях ударного нагружения. Высокие значения относительного удлинения, сужения и ударной вязкости обеспечивают способность материала поглощать большую энергию удара и эффективно сопротивляться зарождению трещин в зонах концентраторов напряжений.

2. Результаты и их обсуждение

Рассмотрев прочностные и химические характеристики, видно, что сталь 5ХНМ, легированная молибденом, обладает лучшей прокаливаемостью и более высокими прочностными показателями. Это делает её предпочтительной для изготовления крупногабаритных молотовых штампов с массой падающих частей свыше 3 тонн и блоков матриц, где критически важна жёсткость и сопротивление пластической деформации.

Гистограмма 1

Гистограмма прочностных характеристик сталей 5ХНМ и 5ХНВ



Как видно из *гист.1* сталь 5ХНВ, легированная вольфрамом, уступает 5ХНМ в прочности, но имеет на 49 кДж/м² выше ударную вязкость и пластичность, имея на 2% больше относительного удлинения и на 10% больше относительного сужения. Вследствие этого она лучше сопротивляется зарождению и развитию трещин в условиях циклического термомеханического нагружения. Данную марку рекомендуется применять для средних и мелких штампов, а также пуансонов и вставок, работающих в зонах локальной концентрации напряжений.

Выбор между сталями 5ХНМ и 5ХНВ основывается на анализе габаритов и сферы применения. Для крупных штампов, где нужна прочность и прокаливаемость, подходит сталь 5ХНМ, а для инструментов меньших размеров, подверженных риску хрупкого разрушения от удара или циклического нагрева, эффективнее будет сталь 5ХНВ.

Выводы:

1. Показана актуальность рационального выбора материала для штампов, работающих в различных условиях.

2. Дан сравнительный анализ штамповых сталей 5ХНМ и 5ХНВ, различающихся выбором легирующего компонента. Показаны основные механические и химические характеристики.

3. Предложены рекомендации по выбору инструментальных сталей 5ХНМ и 5ХНВ для штамповой оснастки работающих с разными условиями и габаритами.

Библиографический список

1. ГОСТ 5950–2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия. – Введ. 2002-01-01. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 2001. – 24 с.
2. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали: справочник / Ю.А. Геллер. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 526 с.
3. Гадалов, В.Н. Мониторинг процессов эксплуатации, износа и разрушения штампового оборудования / В.Н. Гадалов, С.Н. Кутепов, О.М. Губанов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 307–310.
4. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – 8-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.
5. Позняк, Л.А. Штамповые стали для горячего деформирования / Л.А. Позняк, Ю.М. Скрынченко, С.И. Тишаев. – М.: Металлургия, 1980. – 176 с.
6. ВИЛС повысил эксплуатационные характеристики моноколес для газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] // AEX.RU– Режим доступа: https://www.aex.ru/inform/47143.
7. Разработка и внедрение технологических процессов изготовления точных заготовок компрессорных лопаток ГТД на ОАО «Моторостроитель» [Электронный ресурс] // CyberLeninka. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-vnedrenie- tehnologicheskih-protsessov-izgotovleniya-tochnyh-zagotovok-kompressornyh-lopatok-gtd-na-oao-motorostroitel.

© Алашов М.А., Насыров Н.Н., 2026

УДК 678.074.00

Р.Ш. АРАБХАНОВ
1a1.2r2.3s3@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТВЕРДОФАЗНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ И УГЛЕНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация: данная статья рассматривает технологии твёрдофазовой переработки полимеров и угленаполненных композитов, включая прессование, экструзию, термокомпактирование и холодную штамповку. Описаны особенности, преимущества, недостатки и сферы применения полимеров и угленаполненных композиционных материалов в промышленности. Исследованы ключевые факторы, влияющие на качество изделий из композиционных материалов, а именно механические нагрузки, различные температурные режимы, свойства материалов.
Ключевые слова: твёрдофазная переработка, полимеры, угленаполненные композиты, прессование, экструзия, термокомпактирование, холодная штамповка.

В условиях глобального перехода к устойчивому развитию и циркулярной экономике твёрдофазные методы переработки полимерных композитов приобретают особую значимость. Эти технологии позволяют существенно снизить энергопотребление по сравнению с традиционными методами переработки, минимизировать деградацию полимерной матрицы и сохранить структурную целостность углеродных наполнителей.

Прессование – один из наиболее распространённых методов, применяемый для изготовления листовых и объёмных изделий. Процесс осуществляется под высоким давлением (10–100 МПа) при температурах, близких к температуре стеклования полимера. Прессование обеспечивает высокую точность размеров изделий, минимальную пористость изготавливаемого композита, а также возможность использования вторичного сырья, но при этом у данного метода имеется ограниченная производительность и высокие энергозатраты, которые надо учитывать при выборе технологии для получения полимеров [1]-[6].

Другим распространенным способом получения полимеров и угленаполненных композиционных материалов является твёрдофазная экструзия, которая позволяет получать непрерывные профили (трубы, стержни) без плавления материала. Данная технология основана на сочетании сдвиговых деформаций и давления, которые совместно дают высокую

производительность, возможность переработки термочувствительных полимеров, но вместе с тем и сложность контроля структуры материала, ограничения по геометрии изделий [1]-[6].

Ещё одним методом получения полимеров является термокомпактирование. Этот метод заключается в уплотнении материала под давлением при повышенной температуре, что приводит к улучшению межфазного взаимодействия между полимером и наполнителем. В этом методе обеспечивается простота технологического процесса, отсутствие дорогостоящего оборудования, минимальные потери энергии, но при этом и высокая длительность цикла, и ограниченная производительность [1]-[6].

Также при изготовлении полимеров и композиционных материалов применяется холодная штамповка. Она используется для изготовления деталей сложной формы без нагрева, подходит для переработки термопластов с высокой молекулярной массой. Она осуществляется путём деформации холодной заготовки между двумя штампами. Данный метод обладает высокой скоростью производственного цикла, демонстрирует отличную воспроизводимость результатов, при этом обеспечивается малая вероятность дефектов поверхности. В качестве недостатков данного метода можно отметить сложность масштабирования для крупногабаритных конструкций, а также требуется высокая квалификация персонала [1]-[6].

Современные технологии твёрдофазной переработки кардинально отличаются от традиционных подходов. Они включают в себя комплексные решения, например, сочетающие механическое воздействие, температурную активацию и физико-химическую модификацию материалов. Особый интерес представляют гибридные методы, такие как комбинация экструзии с радиационным сшиванием или импульсное магнитно-импульсное прессование, которые позволяют достигать уникальных свойств композитов при значительном снижении энергозатрат. Важнейшим направлением развития стало внедрение цифровых технологий в процессы переработки – от систем машинного обучения для прогнозирования оптимальных режимов до создания цифровых двойников технологических линий, что обеспечивает беспрецедентный уровень контроля качества [5].

Современные твёрдофазные технологии демонстрируют особую эффективность при работе с угленаполненными композитами, где критически важно сохранить структурную целостность углеродных наполнителей. Инновационные подходы, такие как холодное спекание (*cold sintering*) или плазменная активация поверхности, позволяют создавать материалы с рекордными показателями прочности и электропроводности. Особого внимания заслуживают разработки в области экологически ориентированных решений, включая методы переработки многослойных композитов и системы замкнутого цикла для углеродных наполнителей, что соответствует принципам циркулярной экономики [1].

Перспективным направлением является создание «умных» композиционных материалов с программируемыми свойствами. Последние

достижения в этой области включают разработку самовосстанавливающихся систем с наноконтейнерами отвердителя, адаптивных материалов с изменяемой структурой под нагрузкой, а также биомиметических систем с градиентными свойствами. Эти инновации открывают новые возможности для авиакосмической отрасли, где востребованы крупногабаритные детали сложной геометрии, для производства электротранспорта, нуждающегося в легких и прочных аккумуляторных корпусах, и для медицинской сферы, где требуются биосовместимые имплантаты с контролируемыми характеристиками [1]-[6].

Отраслевые перспективы внедрения современных твёрдофазных методов переработки выглядят чрезвычайно многообещающе. В авиастроении они позволяют сократить массу конструкций при сохранении прочностных характеристик, в энергетике – создавать термостойкие элементы для оборудования, в автомобилестроении – производить детали с улучшенными демпфирующими свойствами. Особенно важно, что эти технологии обеспечивают воспроизводимость характеристик материала от партии к партии, что критически важно для серийного производства [1]-[6].

Таким образом, в данной статье рассмотрены различные подходы к твёрдофазовой переработке полимеров и угленаполненных композиционных материалов. Каждый метод обладает уникальными характеристиками, преимуществами и недостатками, влияющими на качество и экономичность производимых изделий. Оптимальное решение выбирается исходя из конкретных потребностей рынка и требований в отраслях, использующих композиционные материалы.

Анализ показал, что твёрдофазовая переработка композитов играет ключевую роль в обеспечении качественной и эффективной работы современного производства. Основным выводом является подтверждение экономической выгоды и практической значимости данной технологии, несмотря на некоторые трудности, возникающие при внедрении и освоении новых разработок.

Развитие современных технологий открывает новые перспективы для совершенствования традиционных процессов, позволяя существенно повысить эффективность производств и расширить ассортимент выпускаемой продукции.

Современный этап развития твёрдофазных технологий характеризуется их интеграцией с достижениями нанотехнологий, искусственного интеллекта и устойчивого развития. Перспективы отрасли связаны с созданием адаптивных производственных систем нового поколения, обеспечивающих ресурсоэффективность и возможность получения материалов с программируемыми свойствами.

Библиографический список

1. Лысенко Е. Н., Галанов А. В. Композиционные материалы: Учебник для вузов. – Москва: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2008. – 48 с.

2. Рогов И. А., Воронин Ю. Ф. Полимерные композиты. Твердая фаза, структура и свойства. – Санкт-Петербург: Политехника, 2017. – 405 с.
3. Волков Г. М., Гаврилова О. Ю. Технология переработки пластмасс и компаундов. Новосибирск: Наука, 2019. – 236 с.
4. Васильев В. В., Красников В. Я. Новые направления исследований в области высоконаполненных композитов // Российские технологические журналы. – 2017. №4. – с. 45-55.
5. Кудрявцев И.Л., Лавров А.К. Современные тенденции в развитии материаловедения композитов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2018. – Том 61, № 10. – С. 11-15.
6. Осипов В.А., Верещагин Л.А. Исследование свойств полимерных композитов, армированных дисперсными наполнителями // Физика и химия стекла. – 2018. – Том 44, № 2. – С. 77-85.

© Арабханов Р.Ш., 2026

УДК 621.791-13

А.А. БАДРЕТДИНОВА
adelkabadra@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ПРЕИМУЩЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

Аннотация: в данной работе рассмотрен метод сварки взрывом для изготовления слоистых композиционных материалов, преимущества данного метода, отрасли, в которых используются композиционные материалы, а также перспективы развития данного метода.
Ключевые слова: сварка взрывом, слоистые композиционные материалы.

Метод сварки взрывом представляет собой уникальную технологию, позволяющую создавать металлические слоистые композиционные материалы с выдающимися механическими свойствами. Однако, несмотря на его преимущества, существует ряд проблем, связанных с качеством и надежностью получаемых материалов. В условиях современного производства, где требования к прочности и легкости конструкций постоянно растут, необходимо детально исследовать возможности и ограничения данного метода.

Целью данной работы является анализ преимуществ сварки взрывом в контексте создания слоистых композиционных материалов, а также оценка их механических характеристик и областей применения.

Актуальность темы обусловлена растущими потребностями в высокопрочных и легких материалах как в России, так и за рубежом. Слоистые композиционные материалы находят применение в аэрокосмической, автомобильной и строительной отраслях, где их уникальные свойства могут значительно повысить эффективность и безопасность конструкций.

Рассмотрим принцип действия метода сварки взрывом. Метод сварки взрывом базируется на использовании взрывной энергии для соединения металлов, невозможных для сварки традиционными методами. Процесс начинается с размещения детонирующего вещества на поверхности одного из материалов. При взрыве создается ударная волна, которая стремительно сжимает металлы, достигая давлений и температур, необходимых для формирования металлургического соединения между слоями. Этот процесс происходит так быстро, что исключается возможность образования оксидов или других загрязнений на свариваемой поверхности, что обычно наблюдается при традиционной сварке. Отсутствие необходимости в вакууме или атмосфере защитных газов делает процесс экономичнее и более доступным. Благодаря контролируемой взрывной энергии, сварка взрывом обеспечивает высококачественное соединение без термической деформации или ухудшения свойств материала, что делает ее идеальной для создания многослойных композитов с заданными свойства и функциями [1]-[3]. Наглядно процесс сварки взрывом показан на рисунке 1.

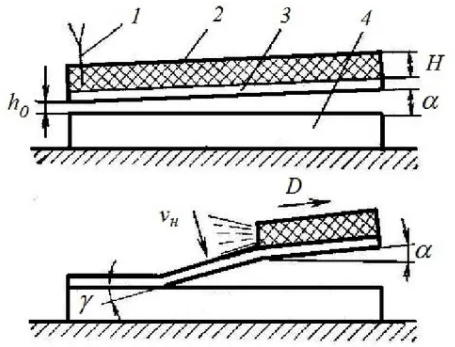


Рис. 1. Схема сварки взрывом:
1 – детонатор; *2* – взрывчатое вещество;
3 – привариваемая платсина;*4* – заготовка.

Преимущества изготовления металлических слоистых композиционных материалов методом сварки взрывом.

Современные технологии производства материалов постоянно развиваются, стремясь удовлетворить возрастающие требования промышленности к качеству и долговечности продукции. Одним из перспективных методов изготовления композиционных материалов является сварка взрывом.

Применение сварки взрывом для создания металлических слоистых композиционных материалов открывает новые возможности для авиационной, автомобильной и других отраслей промышленности. Такой подход не только

улучшает физико-механические характеристики продукции, но и значительно сокращает затраты на производство, делая технологию выгодной с экономической точки зрения. Современные технологии производства материалов постоянно развиваются, стремясь удовлетворить возрастающие требования промышленности к качеству и долговечности продукции [4], [5]. Одним из перспективных методов изготовления композиционных материалов является сварка взрывом. Этот метод позволяет соединять различные металлы, обеспечивая высокую прочность и уникальные свойства получаемых изделий.

Благодаря своим уникальным характеристикам слоистые композиционные материалы, изготовленные методом сварки взрывом, находят широкое применение в различных отраслях [1]-[6]:

– в авиационной и аэрокосмической индустрии они используются для создания облегченных, но прочных конструкций, которые способны выдерживать экстремальные нагрузки и температуры;

– в автомобилестроении эти материалы применяют для улучшения характеристик безопасности и снижения веса транспортных средств, что влияет на уменьшение расхода топлива и эмиссии вредных веществ;

– в судостроении слоистые композиты используют для повышения коррозийной стойкости и прочности корпусов судов;

– в нефтегазовой промышленности композиционные материалы, полученные этим методом, используются для изготовления оборудования, способного выдерживать высокие давления и агрессивные среды.

Все это делает слоистые композиционные материалы важным элементом в развитии и модернизации множества отраслей, обеспечивая их продукциями высокой надежности и эффективности.

Рассмотрим перспективы развития метода сварки взрывом. Метод сварки взрывом, обусловленный динамичным развитием технологий и нарастающими требованиями к материалам, обладает значительным потенциалом для дальнейшего совершенствования. Ожидается, что интеграция современных автоматизированных систем управления и РЧА-анализа (рентгеновской компьютерной аналитики) позволит улучшить контроль качества сварных соединений и повысить точность параметров взрыва [7]. Также предстоит работа над минимизацией воздействия взрывных процессов на окружающую среду, разработка методик снижения эмиссии шума и вибраций. Кроме того, расширение спектра используемых материалов, включая не только металлы, но и новые гибридные композиты, откроет новые возможности в авиационной, автомобильной промышленности и других сферах применения. Усовершенствованная методика сварки взрывом представляет собой ключ к созданию инновационных и высокопроизводительных материалов будущего [8].

Таким образом, сварка взрывом представляет собой перспективный метод создания металлических слоистых композиционных материалов, который объединяет в себе экономичность и эффективность. Этот метод позволяет избежать многих проблем, связанных с традиционными способами сварки,

таких как межслойная коррозия и ограниченная совместимость материалов. Благодаря использованию энергии взрыва для соединения слоев, достигается высокое качество сварного шва, исключающее пористость и другие дефекты, характерные для других методов сварки. Таким образом, сварка взрывом открывает новые возможности для создания композиционных материалов с уникальными свойствами, находящих применение в авиационной, автомобильной, оборонной и других отраслях промышленности, где требования к материалам особенно высоки.

Библиографический список

1. Горбунов, А. П., Михайлов, М. А. Сварка взрывом: технологии и применения. / Материалы и технологии, 2015. 45-50 с.
2. Коваленко, В. И., Сидоров, А. Н. Изготовление композиционных материалов методом сварки взрывом /Журнал материаловедения, 2016. 123-130 с.
3. Петров, И. А., Романов, С. В. Механические свойства слоистых композиционных материалов, полученных методом взрывной сварки. – Изд.: Научные записки, 2014. 78–82 с.
4. Савельев, Д. Н., Кузнецов, Е. А. Анализ процессов сварки взрывом для создания многослойных композитов / Проблемы прочности, 2017. 34–40 с.
5. Лебедев, А. В., Фролов, В. Н. Современные методы сварки взрывом в производстве композитных материалов / Технологии и материалы, 2018. 112–118с.
6. Иванов, П. С., Климов, Ю. Г. Исследование свойств слоистых материалов, полученных сваркой взрывом. / Журнал прикладной механики и материаловедения, 2019. 56–62 с.
7. Смирнов, А. П., Тихонов, М. В. Влияние условий сварки взрывом на характеристики композиционных материалов. / Материалы для машиностроения, 2020. 89–95 с.
8. Захаров, О. И., Федоров, И. В. Перспективы применения сварки взрывом в производстве слоистых композитов – Изд.: Современные материалы и технологии, 2021. – 22– 28 с.

© Бадретдинова А.А., 2026

УДК 615.462:616.314

А.С. ДОМРАЧЕВА
arinadom@icloud.com
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ СВЕТООТВЕРЖДАЕМЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация: в данной работе рассмотрены области применения светоотверждаемых композитов, их преимущества и недостатки, дальнейшие перспективы их развития.
Ключевые слова: светоотверждаемые композиты, стоматология, материалы, полимеризация.

Данная статья посвящена актуальным материалам, таким как светоотверждаемые композиты. Изучение преимуществ и недостатков этих материалов помогает стоматологам выбирать оптимальные методы реставрации, минимизировать осложнения и улучшать качество лечения. Это делает тему особенно актуальной как для практикующих врачей, так и для исследователей в области стоматологических технологий.

Светоотверждаемые композиты – это высокотехнологичные полимерные материалы, готовые к направленной радикальной полимеризации под действием света определённого спектра [1].

Светоотверждаемые композиты нашли широкое применение в современной стоматологии благодаря своей универсальности, эстетичности и удобству работы. Одним из главных направлений их использования является терапевтическая стоматология, где эти материалы применяют для прямых реставраций зубов при лечении кариеса, клиновидных дефектов и других повреждений твердых тканей. Композиты позволяют восстанавливать анатомическую форму и функциональность зубов с высокой точностью, обеспечивая при этом естественный внешний вид [2].

На рис. 1 представлено применение светоотверждаемого композита в лечении зуба

Рис. 1. Пломбирование зуба

В эстетической стоматологии светоотверждаемые композиты играют важную роль при выполнении художественных реставраций, коррекции формы и цвета зубов, а также при создании виниров прямого метода. Их пластичность и способность к послойному нанесению позволяют стоматологам добиваться превосходных эстетических результатов [3], [5].

На рис. 2 показан пример эстетической реставрации зуба.

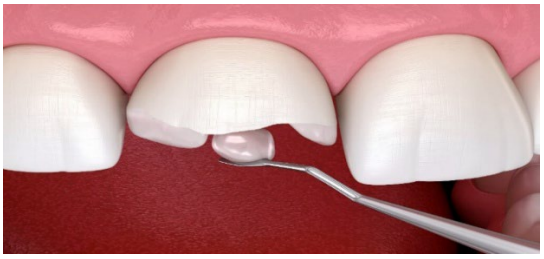


Рис. 2. Эстетическая реставрация зубов

Еще одной значимой областью применения является использование этих материалов в ортопедической стоматологии для фиксации несъемных протезов, вкладок и накладок. Благодаря адгезивным свойствам композиты обеспечивают надежное крепление конструкций, сохраняя при этом минимальную инвазивность вмешательства.

На рис. 3 можно увидеть цементацию виниров.

Рис. 3. Адгезивная цементация виниров

Рассмотрим реимущества и недостатки светоотверждаемых композитов [4]-[6].

К преимуществам светоотвеждаемых композитов относятся: высокая эстетика; возможность подбора оттенка, максимально соответствующего естественной эмали; отсутствие металлических включений, что делает реставрации неотличимыми от натуральных зубов; минимальная инвазивность, которая позволяет сохранять больше здоровых тканей зуба благодаря адгезивной фиксации и не требует значительного препарирования, как в случае с амальгамными пломбами; управляемость процессом полимеризации, при которой реализуется возможность послойного нанесения и отверждения, что улучшает качество реставрации и обеспечивается снижение риска полимеризационного стресса за счет контроля времени отверждения; высокая прочность и долговечность, что подтверждается клиническими исследованиями (*Burke F.J.T.*, 2020), согласно которым обеспечивается 7-10 летний срок службы

таких светоотверждаемых композитов при правильной технике нанесения, что сопоставимо с керамическими вкладками; универсальность применения светоотверждаемых композитов при реставрации жевательных зубов, виниров, шинирования, фиксации протезов; технологическая перспективность, согласно последним разработкам в ближайшей перспективе будут использоваться «умные» композиты с pH-чувствительностью, материалы с эффектом памяти формы и нанокомпозиты с антибактериальными свойствами [1]–[8].

К недостаткам светоотвеждаемых композитов относятся: полимеризационная усадка; возможное образование микрощелей между пломбой и тканями зуба, что может привести: к нарушению краевого прилегания, риску вторичного кариеса, повышению чувствительности зуба; техническая зависимость, которая заключается в строгом соблюдении протоколов нанесения композита в условиях абсолютной сухости рабочего поля и точного соблюдения времени полимеризации; чувствительны к ошибкам при послойном нанесении; может появится ограниченная прочность в зонах высокой нагрузки, т.е. такие композиты не всегда пригодны для зубов с экстремальными нагрузками, возможны сколы и износ реставраций со временем, а также высокая стоимость, связанная с ценой качественных композитов выше, чем у традиционных материалов [1]–[8].

Современная стоматология активно развивает технологии светоотверждаемых композитов, стремясь улучшить их механические свойства и продлить срок службы реставраций. Одним из ключевых направлений является модификация наполнителей. Например, внедрение наночастиц оксида циркония или алмазоподобных структур в матрицу композита позволяет значительно повысить его устойчивость к истиранию. Уже сегодня на рынке присутствуют материалы с наногибридными наполнителями, которые демонстрируют лучшую износостойкость, сопоставимую с естественной эмалью, что особенно важно для реставраций жевательных зубов.

Другое перспективное направление развития светоотверждаемых композитов – это разработка композитов с улучшенной полимеризационной способностью. Технологии типа «*Bulk-fill*» позволяют отверждать материал более глубокими слоями (до 4-5 мм) без потери прочности, что снижает риск внутренних напряжений и последующего растрескивания. Кроме того, ведутся исследования в области «умных» композитов, способных выделять фториды или минеральные компоненты для профилактики вторичного кариеса, увеличивая долговечность реставраций [7].

Особое внимание уделяется снижению полимеризационной усадки – одной из главных причин микроподтеканий и рецидивов кариеса. Новые матричные системы с модифицированными мономерами (например, силоксанами) демонстрируют усадку менее 1%, что улучшает краевое прилегание. В экспериментальной фазе находятся композиты с «адаптивными» свойствами, способные компенсировать термическое расширение за счет особой структуры полимерной сети [8]

Таким образом, будущее светоотверждаемых материалов связано с созданием интеллектуальных композитных систем, сочетающих высокую прочность, минимальную усадку и биологическую активность. Это позволит не только продлить срок службы реставраций до 10–15 лет, но и превратить их в функциональную часть зуба, взаимодействующую с живыми тканями.

Библиографический список

1. Боровский, Е. В. Терапевтическая стоматология: учебник / Е. В. Боровский, В. К. Леонтьев. – Москва: Медицина, 2021. – 319 с.
2. Луцкая И. К. Материаловедение в стоматологии : учебное пособие / И. К. Луцкая. – 3-е изд., перераб. и доп. –Москва: МЕДпресс-информ, 2022. – 288 с.
3. Николаев, А. И. Практическая терапевтическая стоматология : учебное пособие / А. И. Николаев, Л. М. Цепов. – 11-е изд. – Санкт-Петербург: СПбМАПО, 2020. – 456 с.
4. Ряховский, А. Н. Адгезивные системы и композитные материалы в стоматологии / А. Н. Ряховский. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. – 208 с.
5. Федоров, Ю. А. Современные стоматологические материалы : учебное пособие / Ю. А. Федоров. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2021. — 318 с.
6. Трезубов, В. Н. Клиническое материаловедение в стоматологии : учебник / В. Н. Трезубов, Е. Н. Жулев, Л. М. Мишнев. – Москва: СпецЛит, 2020. – 239 с.
7. Ортопедическая стоматология : учебник / под ред. В. Н. Копейкина. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : Медицина, 2018. – 624 с.
8. Федоров, Ю. А. Композитные пломбировочные материалы / Ю. А. Федоров. – Санкт-Петербург: Человек, 2020. – 176 с.

© Домрачева А.С., 2026

УДК 691.175.5/8

К.Р. ФАХРИСЛАМОВА
Kamila040620044@mail.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, НА ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Аннотация: появляется все больше композитов, активно заменяющих стандартные материалы в производстве, и актуально исследовать, как их эффективно применять. Выдвинута задача исследовать возможности замены

традиционных материалов на композиты с целью получения экономической выгоды и иных преимуществ.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; углепластики; стеклопластики; органопластики; гибридные композиты.

Современная промышленность всё чаще прибегает к использованию в производстве полимерных композиционных материалов (ПКМ). Этот класс материалов сочетает в себе лучшие свойства разных компонентов, за счет чего и получает привлекательность на фоне более традиционных аналогов.

На рис. 1 представлена структура ПКМ.

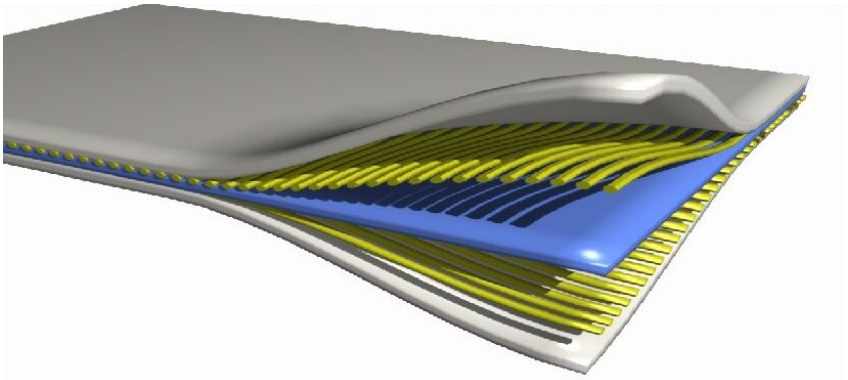


Рис. 1. Полимерный композиционный материал

ПКМ по своей структуре представляют систему, которая состоит из полимерной матрицы и армирующих наполнителей – волокон, частиц или наноструктур, которые ее усиливают. Ранее недостижимые для обычных металлов или пластиков характеристики становятся возможны благодаря такой комбинации [1].

Армирующие компоненты ПКМ на самом деле могут быть абсолютно разными, и потому в классификации полимерных композитов необходимо отталкиваться именно от них. В результате могут быть выделены несколько ключевых групп: углепластики, стеклопластики, органопластики и гибридные композиты. Ввиду разнообразия таких материалов, мы сведем все характеристики в таблицу 1 [2].

Таблица 1

Области применения композитов и сопутствующие данные

Композиты	Состав	Области применения	Средняя стоимость, руб./кг
Углепластики	Углеродное волокно + эпоксидная/ полиэфирная смола	Авиация (крылья, фюзеляжи), космос, автоспорт, ветроэнергетика	3000–8000
Стеклопластики	Стекловолокно +	Судостроение,	300–1500

	полиэфирная/ эпоксидная смола	строительство, трубы, автомобильные кузова	
Органопластики	Арамидные волокна (кевлар) + полимерная матрица	Бронезащита, авиация (двери, панели), спортивный инвентарь	2000–5000
Гибридные композиты	Комбинация волокон (углерод + стекло, кевлар + углерод) + полимерная матрица	Авиация (лонжероны), автомобилестроение, военная техника	4000–10000

Как и любые материалы, ПКМ имеют свои преимущества и недостатки, приведенные в таблице 2. Благодаря знанию их сильных и слабых сторон, можно минимизировать затрудняющие производство аспекты [3].

Таблица 2

Преимущества и недостатки композитов

Композиты	Основные преимущества	Недостатки
1	2	3
Углепластики	Высокая удельная прочность (в 5 раз выше стали), малый вес, коррозионная стойкость, усталостная прочность	Высокая стоимость, хрупкость при ударных нагрузках, сложность утилизации
Стеклопластики	Низкая стоимость, хорошая прочность, коррозионная стойкость, диэлектрические свойства	Больший вес по сравнению с углепластиками, меньшая жесткость
Органопластики	Высокая ударная вязкость, устойчивость, малый вес	Дороже стеклопластиков, гигроскопичность, снижение прочности при нагреве
Гибридные композиты	Оптимальный баланс прочности, жесткости и стоимости	Сложность проектирования (неоднородность свойств), высокая себестоимость

Развитие технологий производства ПКМ не только открывает новые возможности для промышленности, позволяя создавать легкие, прочные и долговечные конструкции, но еще и приносит экономические выгоды. Поскольку снижение массы конструкций на 20–30% ведет за собой уменьшение расхода топлива на 10–15%, это открывает перспективы на многомилионную экономию при ресурсе самолёта в 25–30 лет. В дальнейшем мы рассмотрим конкретные примеры применения ПКМ и экономические преимущества такой замены.

Опишем примеры успешного применения композиционных материалов. Например, удачной заменой традиционных материалов на углепластик (CFRP),

являющимся одним из известнейших видов ПКМ, стала конструкция крыла Boeing 787, приведенная на рисунке 2. Алюминиевые сплавы были заменены на углепластик. На деле он оказался более эффективным: композитные крылья показали большую устойчивость к усталостным нагрузкам и коррозии, что увеличило срок службы самолета [4].

С точки зрения экономической выгоды, можно отметить снижение массы крыла на 20–25%, что привело бы к уменьшению расхода топлива на 10–12% [5]-[7].

Рис. 2. Крыло самолета Boeing 787 Dreamliner

Другим примером являются Лонжероны вертолёта Ми-38. Традиционные стальные лонжероны в вертолете были заменены на стеклопластиковые методом намотки, вследствие чего масса конструкции снизилась на 15–20%. Результат оказался очень важен, поскольку каждый килограмм влиял на маневренность и грузоподъёмность вертолета. Ко всему прочему, композитные лонжероны не подвержены коррозии и проявили себя лучше в поглощении вибрации, что повысило комфорт и безопасность полёта [5].

Рис. 3. Вертолёт Ми-38

Если говорить о композитных материалах, нельзя не упомянуть самолет *Airbus* A350. Это первый широкофюзеляжный самолёт, более 50% конструкций в котором выполнено из композитов. Например, панели фюзеляжа, ранее изготавливаемые из алюминиевых сплавов, подверглись замене на

углепластиковые. Благодаря этому решению был получен ряд преимуществ: повышение жёсткости конструкции, снижение ее веса на 8–10%, устойчивость к повреждениям. Еще одним плюсом стал сам процесс изготовления композитных панелей: их можно изготавливать крупными секциями, что упрощает сборку и сокращает количество крепёжных элементов [8].

Последним примером являются двери грузового отсека самолета Ан-148. Двери грузового отсека, ранее изготавливавшиеся из алюминия, были заменены на стеклопластиковые. Это решение позволило снизить массу конструкции на 30%, что особенно важно для грузовых модификаций. Кроме того, композитные двери не требуют частой покраски и менее чувствительны к механическим повреждениям. Экономические выгоды заключаются в сокращении затрат на обслуживание и увеличении срока службы детали.

Приведённые примеры демонстрируют, что замена традиционных материалов на композиты в авиации даёт значительные преимущества: снижение массы, повышение прочности и долговечности, уменьшение эксплуатационных расходов. Это не только делает самолёты более экономичными, но и открывает новые возможности в проектировании авиационной техники. В ближайшие годы доля композитов в авиастроении будет только расти, что подтверждается активными разработками в этой области.

Библиографический список

1. Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. – Москва: ЦОП Профессия, 2014. – 592 с.
2. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. – Москва: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.
3. Басов Н. И. Композиционные материалы в авиастроении: учебное пособие / Н. И. Басов, В. А. Белый. – Москва: Машиностроение, 2019. – 328 с.
4. Петров В. В. Конструкционные композиты в самолетостроении / В.В. Петров. – Москва: Авиационные материалы и технологии, 2021. – 45 с.
5. Крылов И. Н. Применение полимерных композитов в конструкции вертолетов / И. Н. Крылов. – Москва: Вертолетная промышленность, 2020. – 15 с.
6. Федосов С. В. Экономическая эффективность применения композитов в авиастроении / С. В. Федосов. – Москва: Наука, 2020. – 176 с.
7. Берлин А. А. Основы создания композиционных материалов / А. А. Берлин. – Москва: Научный мир, 2020. – 368 с.
8. Гусев А. А. Перспективные композиты в авиационной технике / А. А. Гусев. – Казань: КНИТУ, 2020. – 214 с.

© Фахрисламова К.Р., 2026

УДК 621.43.001.24

Ш.А. ГАЗЕТДИНОВ, В.Б. КАРИМОВ, И.К. КАРПОВ
tat_ar_in14@mail.ru
Науч. руководит. – ассистент К.В. КОНЕВА

Уфимский университет науки и технологий

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ НА РЕСУРС ШАТУННО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВС

Аннотация: в статье рассматривается влияние конструктивных концентраторов напряжений на ресурс шатунно-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания. Анализируются основные зоны концентрации напряжений и их роль в процессе усталостного разрушения деталей при циклическом нагружении. Также рассматриваются современные методы снижения напряжений и повышения долговечности элементов ШПГ.
Ключевые слова: Шатунно-поршневая группа; ДВС; конструктивные концентраторы напряжения; конечно-элементный анализ; моделирование; шатун; поршень; поршневой палец; ресурс.

Шатунно-поршневая группа (ШПГ) является одним из наиболее нагруженных узлов двигателя внутреннего сгорания. В процессе работы детали ШПГ (поршень, поршневой палец, шатун) испытывают сложное термомеханическое нагружение: циклические газовые силы, инерционные нагрузки, тепловые воздействия. В этих условиях локальные зоны изменения геометрии – галтели, переходы сечений, канавки, отверстия, резьбовые соединения – становятся концентраторами напряжений, которые существенно снижают усталостную прочность и ресурс элементов.

Под концентрацией напряжений [1-3] понимается резкое местное изменение поля напряжений и деформаций, которая может быть вызвана конструктивными факторами (галтели, выточки, отверстия, и т. д.), технологическими (шероховатость, наличие дефектов технологического происхождения и т. д.), а также условиями внешних воздействий. Недостаточно строгая оценка напряженного состояния и условий прочности в зоне концентрации при проектировании может послужить причиной преждевременного разрушения высоконапряженных конструкций и иметь тяжелые последствия.

Современные методы компьютерного моделирования, в частности метод конечных элементов (МКЭ) [4, 5], позволяют детально исследовать напряжённо-деформированное состояние ШПГ с учётом реальной геометрии, контактных взаимодействий и нелинейных свойств материалов. Однако для эффективного использования этих инструментов необходимы

систематизированные знания о типовых концентраторах и методах снижения их негативного влияния.

В связи с этим целью настоящей статьи является обзор и анализ основных конструктивных концентраторов напряжений в элементах шатунно-поршневой группы ДВС, а также рассмотрение современных подходов к их моделированию и способов повышения усталостной долговечности. Статья носит обзорный характер и обобщает известные литературные данные, что позволяет сформировать единую картину влияния геометрических параметров на ресурс ШПГ.

Шатунно-поршневая группа (ШПГ) – это ключевой узел двигателя внутреннего сгорания, объединяющий поршень, шатун и поршневой палец (рис. 1). Она преобразует энергию сгорания топлива в механическую работу, передавая усилие на коленчатый вал. ШПГ подвергается экстремальным температурным и механическим нагрузкам, которые носят циклический характер.

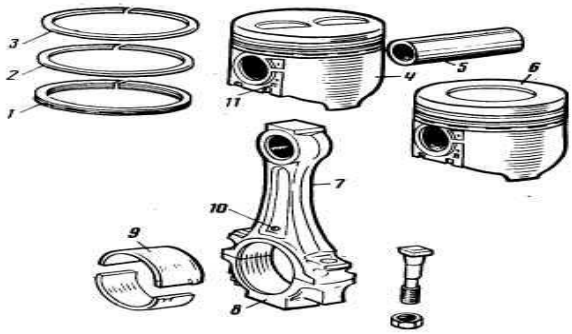


Рис. 1. Общий вид ШПГ

1 – маслосъемное поршневое кольцо; 2, 3 – компрессионные поршневые кольца; 4, 6 –поршни; 5 – поршневой палец; 7 – шатун; 8 – крышка шатуна; 9 – шатунный вкладыш; 10 – отверстие на шатуне для выхода масла; 11 – метка П на поршне

В элементах шатунно-поршневой группы существуют критические зоны, где наиболее сильно проявляется концентрация напряжений. Такими элементами являются поршень и шатун.

В поршне основными зонами концентрации являются переходы от днища к бобышкам и от бобышек к юбке. Здесь происходит изменение сечения, и при малых радиусах закругления возникают значительные напряжения. Дополнительными концентраторами являются также канавки под поршневые кольца и вырезки под клапаны.

В шатуне зонами концентрации являются переходы между головками и стержнем, где форма детали резко изменяется. Галтели в этих зонах играют важную роль в распределении напряжений: уменьшение их радиуса приводит к значительному росту напряжений. Дополнительными концентраторами

являются зоны болтовых соединений крышки шатуна, где действуют растягивающие нагрузки [6].

Конструктивные концентраторы напряжений существенно влияют на долговечность шатунно-поршневой группы. При циклическом нагружении они становятся источниками локального превышения предела выносливости материала, даже если номинальные напряжения остаются в допустимых пределах. Разрушение большинства деталей ШПГ начинается именно в зонах концентрации напряжений. Разрушение происходит по стадиям: сначала накопление микроповреждений на поверхности, затем зарождение микротрещины, которая впоследствии развивается до критического размера и приводит к разрушению детали и, возможно, самого узла.

Особенностью усталостного разрушения является его скрытый характер на начальной стадии. Деталь может работать даже при наличии множества мелких трещин, но при дальнейшем увеличении нагрузки или числа циклов она может внезапно разрушиться без каких-либо заметных предварительных изменений.

Более подробно рассмотрим концентраторы напряжений в точках соединения шатуна с поршнем. Концентраторами напряжений в поршне являются переходы от днища к бобышкам и от бобышек к юбке; в шатуне – переходы между головками и стержнем, где форма детали резко изменяется (рис. 2).

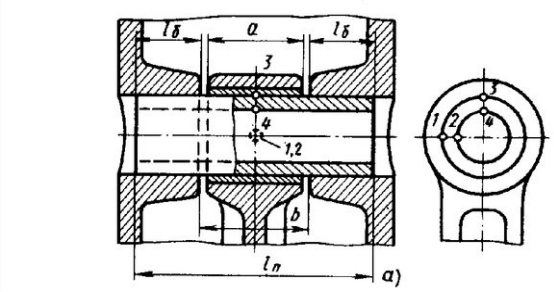


Рис. 2. Сечение поршневого пальца, ВГШ и части поршня

Так как этот узел является подшипником скольжения, он требует постоянной смазки, что, в свою очередь, вынуждает выполнять дополнительные каналы для подачи масла, являющиеся концентраторами напряжений. Наличие нескольких концентраторов напряжений в одном сечении может суммироваться по сложным зависимостям.

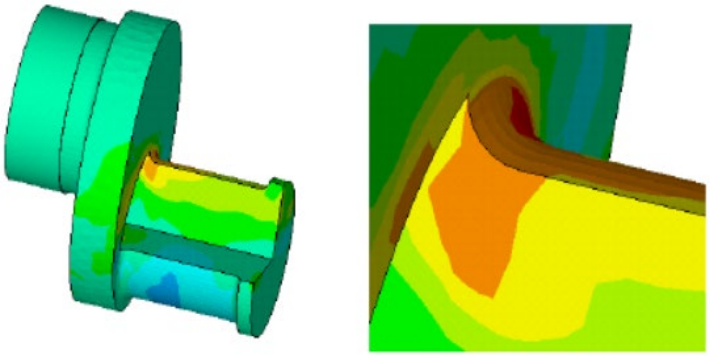


Рис. 3. НДС коленчатого вала при действии рабочих нагрузок [7]

В настоящее время для изучения поведения концентраторов напряжений обычно используют компьютерное моделирование. Этот метод основан на МКЭ, реализованном в программных комплексах (рис. 3).

Такое исследование состоит из двух этапов. Сначала моделируют упрочнение детали методом поверхностного пластического деформирования (обкаткой роликами). При моделировании процесса обкатки можно оценить распределение остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое.

На втором этапе исследуют напряжённо-деформированное состояние детали в условиях, приближенных к реальной эксплуатации в двигателе. Например, для коленчатого вала анализируют воздействие шатунов с учётом давления газов в камере сгорания, то есть изменение силы, передаваемой на шатунную шейку во времени. Модель вращается с учётом трения в подшипниках. В итоге получают полную картину напряжённо-деформированного состояния детали, включая остаточные напряжения, сформированные при упрочнении.

Основными методами, позволяющими значительно повысить сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений, являются применяемые при изготовлении деталей способы упрочняющей технологии, в особенности, широко используемое в современном машиностроении поверхностное пластическое деформирование (ППД).

После ППД в поверхностном слое деталей возникают сжимающие остаточные напряжения, улучшающие свойства поверхностного слоя (повышается его твёрдость, прочность. В результате ППД происходит существенное повышение сопротивления усталости [8, 9].

Для экспериментального определения напряжённого состояния используются методы тензометрии. На поверхность деталей наклеивают тензорезисторы, позволяющие измерять деформации в процессе работы двигателя. Для калибровки датчиков применяют статические нагрузки с использованием гидравлических домкратов и динамометров.

Металлографический анализ разрушенных деталей позволяет установить взаимосвязь между расчётными зонами концентрации напряжений и реальными очагами зарождения трещин.

На основе полученных результатов инженеры принимают решения для снижения напряжений в местах их концентрации. К основным решениям можно отнести:

– методы поверхностного пластического деформирования;

– увеличение радиусов галтелей;

– применение более плавных переходов;

– оптимизацию формы детали и каналов в ней;

– поверхностные термические и термохимические обработки.

Таким образом, конструктивные концентраторы напряжений оказывают значительное влияние на ресурс шатунно-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания. В местах неоднородности формы детали возникают напряжения, которые при циклическом нагружении приводят к ускоренному разрушению. Разрушение имеет скрытый характер и происходит постепенно. Для повышения ресурса ШПГ необходимо снижать напряжения указанными выше конструктивными методами.

Библиографический список

1. Иосилевич Г. Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин/ Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.

2. Мавлютов, Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций/ Р.Р. Мавлютов. – Москва: Наука, 1996. – 240 с.

3. Конева К. В. Исследование напряжённо-деформированного состояния в элементах конструкции ГТД с выточками при нормальной и повышенной температурах/ К. В. Конева, В. С. Жернаков, Т. Н. Мардимасова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2020 – Т. 24, № 1(87). – С. 3-9

4. О.С. Зенкевич. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1975. - 540 с.

5. Букатый А. С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования / А. С. Букатый // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, №6(2),2014 С. 374 – 377

6. Дужников, М. Д. Нагрузки шатунно-поршневой группы во время работы двигателя внутреннего сгорания / М. Д. Дужников // инновационные научные исследования: сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 07 июня 2023 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2023. – С. 97-100.

7. Букатый, А. С. Динамический метод исследования концентраторов напряжений коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 с учётом упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / А. С. Букатый, В. Э. Костичев, Е. А. Денискина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. - 2013. - № 3(24). - С. 27-31.

8 Павлов, В. Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям / В. Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.С. Вакалюк. - Самара: СНЦ РАН, 2012. - 125 с.

9. Бычков, Н. В. Выбор методов финишной обработки для повышения усталостной прочности деталей двигателя автомобиля / Н. В. Бычков, А. И. Безнедельный, В. П. Гилета // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 35-40.

© Газетдинов Ш.А., Каримов В.Б., Карпов И.К., 2026

УДК 621.791.053

Э.Э. ИДРИСОВ
edgaridrisov1@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРИСТЫХ ФЛЮСОВ НА СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ СТАЛЬ-АЛЮМИНИЙ

Аннотация: в данной работе рассмотрено взаимодействие алюминия и стали в слоистых композитах, используемых в авиационной и автомобильной промышленности. Исследованы методы соединения материалов, такие как прокатка, взрывная сварка и диффузионная пайка, а также их влияние на механические и коррозионные свойства композитов. Проведён анализ микроструктуры и адгезионной прочности на границе раздела сталь-алюминий. Результаты показали, что оптимальные параметры обработки позволяют достичь высокой прочности соединения и устойчивости к коррозии.
Ключевые слова: слоистые композиты, сталь-алюминий, адгезия, коррозионная стойкость, методы соединения.

Целью данной работы является исследование взаимодействия алюминия и стали в слоистых композитах, а также оценка влияния методов соединения на их эксплуатационные характеристики.

Для изучения взаимодействия алюминия и стали были использованы следующие методы [1]–[6]:

1. Прокатка – это соединение материалов при высокой температуре и давлении;

2. Взрывная сварка – это создание прочного соединения за счёт энергии взрыва;

3. Диффузионная пайка – это формирование соединения через взаимную диффузию атомов.

В [3] микроструктура композитов исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), механические свойства изучались посредством испытаний на растяжение и микротвёрдость, а коррозионная стойкость оценивалась в солевом тумане. В результате полученных исследований в микроструктуре композитов на границе раздела сталь-алюминий обнаружено образование интерметаллидных фаз Fe-Al, Fe-Al_2, которые влияют на прочность соединения, что видно из рис. 1. Оптимальные параметры обработки (температура, давление) позволяют минимизировать толщину интерметаллидного слоя, что повышает адгезионную прочность.

Согласно [3], наибольшая прочность соединения достигнута при использовании взрывной сварки (до 250 МПа). Диффузионная пайка обеспечивает более равномерное распределение напряжений, но требует точного контроля температуры.

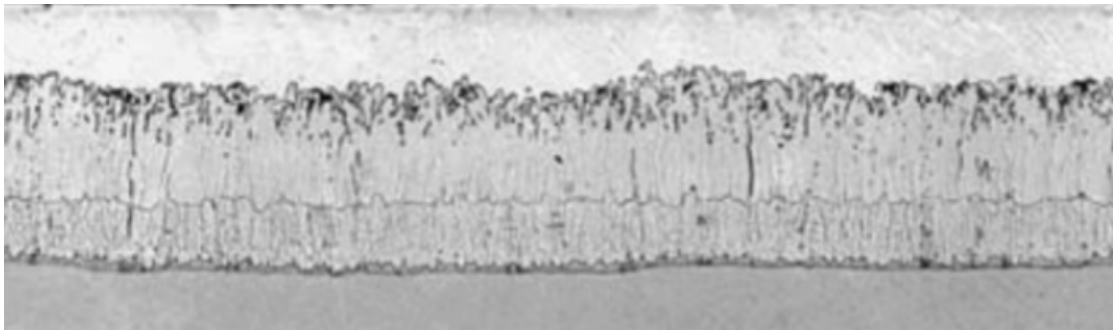
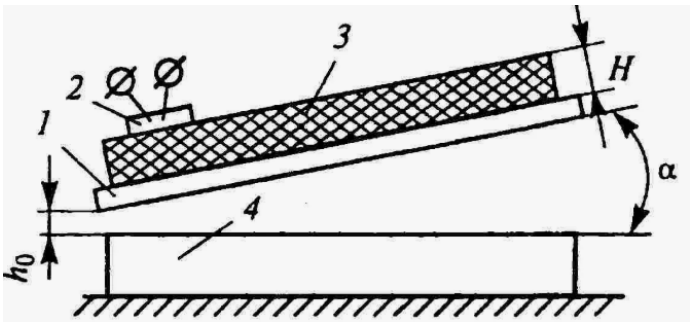


Рис. 1. Микроструктура границы раздела сталь-алюминий (СЭМ)

На рис. 2 показана взрывная сварка, которая создает очень прочные соединения за счет энергии взрыва.



1, 4 — заготовки, 2 — детонатор,
3 — взрывчатое вещество
Рис. 2. Сварка взрывом

Композиты, полученные методом прокатки [7]-[8], показали наилучшую устойчивость к коррозии благодаря отсутствию пор и трещин на границе раздела, рис. 3.

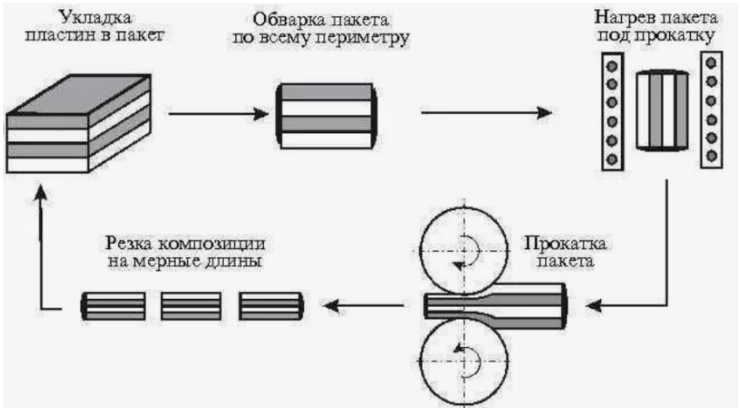


Рис. 3. Схема получения слоистых композиционных материалов методом пакетной прокатки

Для сравнения полученных характеристик слоистых композитов, полученных вышеперечисленными методами [1]–[6], покажем их в виде табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики методов соединения

Метод соединения	Прочность (МПа)	Коррозионная стойкость	Толщина интерметаллидного слоя (мкм)
Прокатка	200	Высокая	2.5
Взрывная сварка	250	Средняя	5,0
Диффузионная пайка	180	Высокая	1,8

В результате проведенного анализа видно, что выбор метода соединения стали и алюминия существенно влияет на свойства слоистых композитов. При этом наилучшие результаты по прочности и коррозионной стойкости достигнуты при комбинировании методов прокатки и диффузионной пайки. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации технологических процессов в промышленности.

Библиографический список

1. Иванов А.С. Влияние адгезии между алюминием и сталями на свойства слоистых композитов // Материалы научной конференции «Современные технологии в металлургии». – 2021. – С. 25–30.

2. Петров Б.Е. Алюминий и его сплавы в композитных материалах // Физика и химия материалов. – 2020. – Т. 42, № 3. – С. 112–118.

3. Сидоров В.А. Иследование механических свойств композитов на основе стали и алюминия // Журнал металлургии. – 2019. – № 8. – С. 45–50.

4. Смирнов Д.Ф. Слой алюминия в стальных композитах: структура и свойства // Современные материалы и технологии. – 2022. – № 2. – С. 78–86.

5. Кузнецов И.П. Взаимодействие алюминия и стали в многослойных материалах: теоретический и практический аспекты // Композитные материалы. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 93–99.
6. Лукашенко А.М. Анализ метода сварки алюминия к стали в композитах // Проблемы материаловедения. – 2021. – № 6. – С. 34–39.
7. Власенко Н.В. Практические рекомендации по созданию композитов сталь-алюминий / Технология и механика материалов. 2018. Т. 28, № 1. С. 58-63.
8. Ермолов С.Ю. Динамические характеристики слоистых композитов на основе алюминия и стали / Научно-технические тропы. – 2023. № 1. С. 102–110.

© Идрисов Э.Э., 2026

УДК 691.175.5/8

А. Х. ИСХАКОВА
aliaishakova8@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В. М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

СТЕКЛОВОЛОКНИТЫ

Аннотация: В работе проведён комплексный анализ структуры, технологий получения и эксплуатационных характеристик стекловолокнитов – одного из наиболее перспективных классов полимерных композиционных материалов. Рассмотрены основные методы переработки стекловолоконных материалов в изделия, приведены физико-механические характеристики, влияющие на эксплуатационные свойства. Отмечены тенденции развития технологий, включая внедрение нанонаполнителей, автоматизацию процессов и повышение экологичности. Представлены области применения стекловолокнитов в различных отраслях промышленности. Приведены таблицы свойств и графические иллюстрации производственных процессов.
Ключевые слова: стекловолокнит, композиционные материалы, стекловолокно, армирование, эпоксидная смола, *RTM*, пултрузия, наномодификация, биоразлагаемые матрицы.

Стекловолокниты относятся к группе полимерных композиционных материалов, где в качестве армирующего компонента используется стеклянное волокно. Благодаря высокой удельной прочности, хорошим электроизоляционным свойствам, термостойкости и химической стойкости стекловолокниты широко применяются в конструкционных и электроизоляционных целях.

Основой получения стекловолокнитов является производство стеклянных волокон, которое осуществляется путём вытяжки тонких нитей из расплава кремнеземистого сырья при температурах 1400 – 1600 °С. В состав стекла могут вводиться различные добавки для регулирования физических свойств: оксиды алюминия, магния, бора и кальция. Волокна могут иметь различную форму поперечного сечения – круглую, треугольную, шестиугольную. После формирования волокна обрабатываются замасливателями, обеспечивающими защиту от истирания и улучшение адгезии с полимерной матрицей.

Схематическое изображение процесса производства стекловолокон представлено на рис. 1.

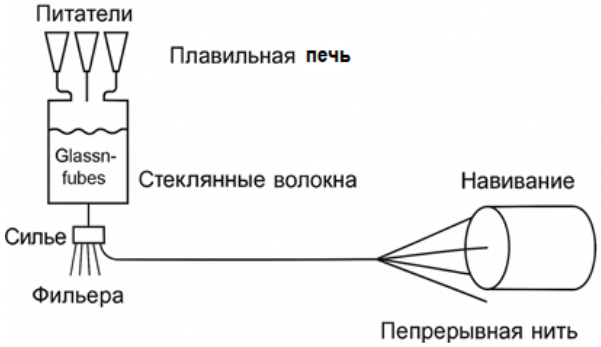


Рис. 1. Схема производства стеклянных волокон методом вытяжки

На следующем этапе производится формование стекловолокнитов. В зависимости от назначения изделия применяются различные технологии переработки. Прессование используется для получения листовых заготовок, например, стеклотекстолита. Метод пултрузии позволяет производить профили постоянного сечения – балки, трубы, арматуру. Вакуумная инфузия и *RT*М-технологии широко применяются для изготовления крупногабаритных изделий сложной формы, например, панелей и корпусов в аэрокосмической и энергетической отраслях.

Физико-механические свойства стекловолокнитов зависят от множества факторов, включая состав стеклянного волокна, структуру армирующего наполнителя, тип связующего и параметры отверждения. В табл. 1 приведены обобщённые данные о характеристиках типичных стекловолокнитов.

Таблица 3

Основные физико-механические характеристики стекловолокнитов

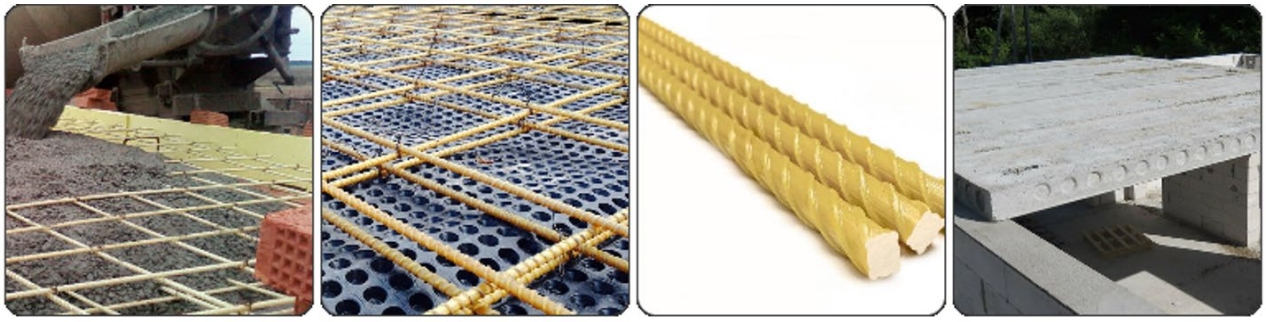
Показатель	Значение	Особенности
Прочность на растяжение	400–900 МПа	Зависит от ориентации волокон
Модуль упругости	20–40 ГПа	Определяет жёсткость конструкции
Плотность	2,4–2,6 г/см³	Обеспечивает лёгкость изделий
Электрическая прочность	15–25 кВ/мм	Важно для электроизоляции
Рабочая температура	от –60 до +180 °С	При использовании эпоксидных связующих

На свойства стекловолокнитов оказывает влияние выбор армирующего материала. Так, *E*-стекло обеспечивает высокую диэлектрическую прочность, тогда как *S*-стекло обладает повышенной прочностью и термостойкостью. Использование *AR*-стекла позволяет повысить стойкость изделий в щелочных средах, что важно для строительства и химической промышленности.

Связующее играет ключевую роль в обеспечении целостности структуры стекловолокнита. Эпоксидные смолы обеспечивают высокую адгезию и стойкость к воздействию химически агрессивных веществ. Полиэфирные смолы более доступны по цене, но уступают эпоксидным по механическим характеристикам.

В последние годы активно развиваются технологии модификации матриц наночастицами, что позволяет значительно повысить прочность и термостойкость изделий. Например, введение оксида титана или графеновых нанопластинок увеличивает модуль упругости композитов до 30%.

Стекловолокниты нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. В авиации их используют для производства обшивки фюзеляжей, внутренних перегородок и радиопрозрачных элементов. В строительстве применяют армирующие профили, фасадные панели, композитную арматуру. В автомобилестроении стекловолокниты используются для изготовления бамперов, панелей приборов и каркасов сидений. Электротехническая отрасль использует стекловолокниты в качестве электроизоляционных прокладок, печатных плат (СТЭФ) и кожухов. В химической промышленности стекловолокниты применяются для создания трубопроводов, резервуаров и оборудования для агрессивных сред.



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Примеры изделий из стекловолокнитов
а - арматура из стекловолокна в бетонной заливке; б - сетка из стеклопластиковой арматуры; в - стеклопластиковая арматура в прутках; г - армирование плит перекрытия стеклопластиковой арматурой

Перспективные направления развития стекловолокнитов связаны с повышением экологической устойчивости материалов, созданием биоразлагаемых матриц, применением интеллектуальных структур с возможностью самодиагностики повреждений, а также развитием 3D-печати армированных конструкций. Внедрение автоматизированных технологий

укладки волокон и отверждения смолы (*AFP*, *ATL*) позволяет значительно повысить производительность процессов и качество изделий.

Библиографический список

1. Вшивков С. А. Технология получения композиционных полимерных наноматериалов: учебное пособие. – Москва: Химия, 2011. – 256 с.
2. Девятловская А. Н. Новые конструкционные материалы: учебное пособие. – Москва: Машиностроение, 2017. – 304 с.
3. Кочуров И. Ф., Южаков К. Н. К вопросу применения композитной арматуры / Вестник строительной науки. Москва: МГСУ, 2023. 45 с.
4. Епифанов В. В. Конструкционные материалы в автомобилестроении: учебное пособие. – Москва: Автоиндустрия, 2023. – 280 с.
5. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы. – Томск: Издательство Томского университета, 2013. – 215 с.

© Исхакова А.Х., 2026

УДК 691.175.5/8

Э.И. ЮСУПОВА
elinayusupova2008@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ТИТАН-АЛЮМИНИЙ

Аннотация: данная работа посвящена исследованию особенности образования интерметаллидов в слоистых композиционных материалах (СКМ) на основе титана и алюминия, которые представляют собой многослойные структуры, объединяющие два или более различных материала для достижения улучшенных характеристик. В условиях современных технологий, требующих высоких эксплуатационных свойств, титан-алюминиевые композиционные материалы становятся перспективным направлением в материаловедении. Работа включает в себя анализ физических, механических и химических свойств титан-алюминиевых сплавов, а также их преимуществ и недостатков по сравнению с другими материалами. Особое внимание уделяется слоистой структуре, межфазным границам и влиянию легирующих элементов на свойства материалов. Работа подчеркивает важность дальнейших исследований

и развития технологий, которые могут привести к улучшению свойств этих материалов и расширению их применения в различных отраслях.

Ключевые слова: интерметаллиды, слоистые композиционные материалы, многослойные структуры, перспективные материалы.

Современные технологии предъявляют высокие требования к материалам, например, таким как СКМ на основе титана и алюминия Ti-Al, которые перспективны благодаря уникальному сочетанию физико-химических и механических свойств [1].

Актуальность исследования СКМ обусловлена потребностью в материалах с высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и термостойкостью, а также необходимостью преодоления ограничений, связанных с высокой стоимостью производства Ti-Al СКМ.

СКМ на основе титана и алюминия обладают уникальными свойствами, которые делают их востребованными для применения в различных высокотехнологичных отраслях. СКМ являются интерметаллидами, то есть соединениями металлов (в данном случае титана и алюминия), которые обладают как металлическими, так и керамическими свойствами. Физические свойства: Ti-Al СКМ сочетают малую плотность (3,5–4,2 г/см³), термостойкость (до 800–1000 °*C*), умеренную теплопроводность и низкий коэффициент термического расширения, что важно для авиации, космоса и двигателестроения. Что касается механических свойств СКМ, то для них характерна высокая удельная прочность, жесткость и усталостная прочность, которые обеспечивают надежность в нагруженных конструкциях. Недостатком СКМ на основе Ti-Al является хрупкость, которую улучшают термомеханической обработкой и легированием. Так же этим материалам свойственна высокая коррозионная стойкость (защитная оксидная пленка) и устойчивость к окислению (до 900–1000°*C*) позволяют использовать материалы в агрессивных средах и при высоких температурах. Ti-Al хорошо сочетаются с другими материалами в композитах. Если рассматривать отличие свойств СКМ на основе Ti-Al по отношению к свойствам углеродистой стали: то, они легче, более термостойкие, более устойчивые к коррозии, но при этом дороже и сложнее в обработке. При сравнении СКМ Ti-Al со сплавами на основе алюминия, то СКМ прочнее и более термостойкие, но менее пластичны и теплопроводны. Также сопоставим свойства СКМ Ti-Al с керамикой. Эти материалы схожи по жесткости и термостойкости, но СКМ Ti-Al более пластичны и обладают большей ударной вязкостью.

Особенностью СКМ Ti-Al является, что их строение (рис. 1) определяет физико-механические свойства:

1. Слоистая структура: распределяет нагрузки, повышает жесткость и прочность, препятствует распространению трещин.

2. Межфазные границы: взаимодействие Ti и Al формирует уникальные свойства, образуются интерметаллиды (TiAl3, Ti3Al), влияющие на прочность, термостойкость и пластичность. Контроль за их образованием важен.

3. Кристаллическая структура интерметаллидов: определяет свойства. Например, γ-фаза (TiAl) обеспечивает высокую термостойкость.

4. Дефекты структуры: (дислокации, поры, микротрещины) влияют на характеристики. Устраняются термической и механической обработкой (например, HIP).

5. Легирующие элементы: (V, Mo и др.) модифицируют структуру и улучшают свойства (пластичность, термостойкость). Легирование кремнием и ниобием способствует увеличению твёрдости, прочности, сопротивляемости окислению и коррозионной стойкости, а также влияет на кристаллическую структуру и межфазные границы.

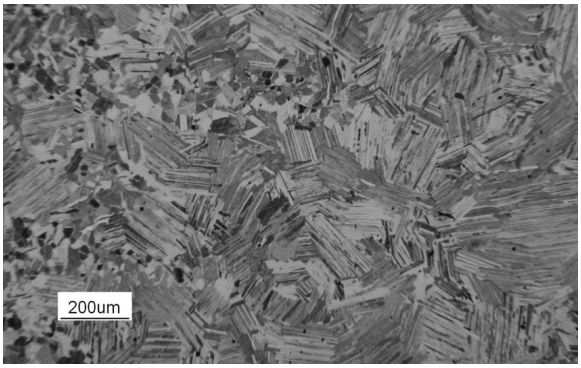


Рис. 1. *Микроструктура СКМ Ti-Al*

Титан-алюминиевые сплавы (интерметаллиды), благодаря своим уникальным свойствам, находят широкое применение в авиации, космонавтике, энергетике и других высокотехнологичных отраслях. Однако, как и у любого материала, у них есть как достоинства, так и недостатки.

Преимущества и недостатки СКМ Ti-Al представлены в таблице 1.

Таблица 1

Преимущества и недостатки СКМ Ti-Al

Преимущества	Недостатки
Легкость и высокая удельная прочность	Высокая стоимость
Высокая термостойкость	Плохая обрабатываемость
Устойчивость к коррозии и окислению	Ограниченная пластичность
Долговечность и устойчивость к усталостным повреждениям	Температурные ограничения
Экологическая устойчивость	Склонность к образованию дефектов
Совместимость с другими материалами	Ограниченная свариваемость

Представьте материалы, которые делают самолёты легче, ракеты прочнее, а медицинские импланты долговечнее. Это как раз про титан-алюминиевые сплавы – высокотехнологичные материалы, без которых сложно представить современную технику.

1. В авиации эти сплавы – настоящие трудяги. Из них делают лопатки турбин, детали компрессоров и даже каркасы самолётов. Благодаря им машины

становятся легче, а значит – экономичнее в расходе топлива. А когда речь заходит о космосе, тут без них вообще никуда. Корпуса спутников, ракетные сопла, камеры сгорания – всё это должно выдерживать жуткий вакуум, радиацию и дикие перепады температур. Обычные материалы тут не справятся, а титан-алюминиевые сплавы – справляются.

2. В автомобилях эти сплавы тоже нашли своё место. Двигатели становятся мощнее, а машины – легче, когда вместо стальных деталей используют титан-алюминиевые аналоги. Особенно это важно для спортивных авто и электромобилей – чем меньше вес, тем больше скорость и запас хода.

3. А ещё они незаменимы в энергетике. Лопатки турбин, работающие под огромными нагрузками, трубы в агрессивных средах, теплообменники – всё это служит дольше благодаря особым свойствам этих сплавов.

4. Но, пожалуй, самое удивительное – их применение в медицине. Суставные протезы, зубные импланты, хирургические инструменты – всё это должно быть прочным, лёгким и, главное, безопасным для организма. И тут титан-алюминиевые сплавы снова на высоте – они не отторгаются телом и служат десятилетиями.

Интерметаллиды представляют собой класс химических соединений, образующихся между металлами и характеризующихся упорядоченной кристаллической структурой. Их образование обладает рядом принципиальных особенностей:

1. Термодинамические условия образования

– Образуются при строго определенных стехиометрических соотношениях компонентов;

– Процесс сопровождается отрицательной энергией Гиббса ($\Delta G < 0$);

– Характеризуются узкой областью гомогенности на фазовых диаграммах;

2. Кинетические особенности

– Требуют активационного энергетического барьера для образования;

– Скорость формирования зависит от коэффициентов диффузии компонентов;

– Процесс ускоряется при повышении температуры;

3. Кристаллографические особенности

– Образуют упорядоченные сверхструктуры (B2, $L1_2$, DO_{19} и др.);

– Характеризуются сложными элементарными ячейками;

– Проявляют анизотропию свойств;

4. Электронные особенности

– Обладают особым типом межатомной связи (ковалентно-металлической);

– Имеют специфическое распределение электронной плотности;

– Характеризуются наличием зонной структуры;

5. Технологические аспекты

– Чувствительны к скорости охлаждения;

– Требуют точного контроля состава;

– Образуют метастабильные фазы при определенных условиях обработки.

Титан-алюминиевые СКМ незаменимы в авиации, космонавтике, автомобилестроении и энергетике. Несмотря на высокую стоимость и сложность обработки, их внедрение в промышленность имеет большие перспективы. Физические и механические свойства этих материалов делают их ценными для высоконагруженных конструкций, а химическая устойчивость позволяет использовать их в агрессивных средах. Слоистая структура и современные методы модификации, такие как аддитивные технологии, улучшают эксплуатационные характеристики, что делает их востребованными в высокотехнологичных отраслях. Хотя недостатки, такие как высокая стоимость и ограниченная пластичность, могут сдерживать применение, продолжающиеся исследования в металлургии и обработке могут улучшить свойства титан-алюминиевых сплавов и расширить их использование. Эти материалы обеспечивают создание эффективных и надёжных конструкций для экстремальных условий эксплуатации. Исследование особенностей образования интерметаллидов имеет как фундаментальное научное значение для понимания закономерностей фазообразования в металлических системах, так и важное прикладное значение для создания новых поколений конструкционных и функциональных материалов. Дальнейшее развитие этого направления материаловедения открывает перспективы для решения актуальных задач в различных отраслях современной техники и технологий.

Библиографический список

1. Металлургия титана / metals-pace / [Электронный ресурс] // metals-paceh: [сайт]. URL: https://metalspace.ru/education-career/education/referat/639-metallurgiya-titana.html
2. Титановые сплавы / titanmet / [Электронный ресурс] // titanmet: [сайт]. URL: https://www.titanmet.ru/literatura/tial.htm
3. Материалы нового поколения / viam / [Электронный ресурс] // viam: [сайт]. URL: https://viam.ru/interview/3570
4. Интерметаллиды на основе титана / cyberleninka / [Электронный ресурс] // cyberleninka: [сайт].URL: https://cyberleninka.ru/article/n/intermetallidy-na-osnove-titana-1
5. Коррозионная стойкость титана, алюминия / e-him / [Электронный ресурс] // e-him: [сайт]. URL: https://e-him.ru/?page=dynamic&section=9&article=1333
6. Аддитивные технологии: настоящее и будущее / conf.viam / [Электронный ресурс]//conf.viam:[сайт].URL:https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1417.pdf

7. Материалы нового поколения / viam / [Электронный ресурс] // viam: [сайт]. URL: https://viam.ru/interview/3570
8. Перспективные материалы и технологии / spbu / [Электронный ресурс] // spbu: [сайт]. URL: https://nanomat.spbu.ru/ru/konferentsii.html

© Юсупова Э. И., 2026

УДК 621.762.04:678.86.046.9

Е.О. КАРИМОВА
m.ekoterina@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Аннотация: в данной статье рассматриваются дисперсно-упрочнённые композиционные материалы, представляющие собой перспективный класс материалов, сочетающих высокие прочностные характеристики, жаростойкость и устойчивость к ползучести. Рассматриваются композиты с металлической матрицей, механизм их упрочнения, методами их получения, а также выполнен сравнительный анализ с композитами на основе неметаллической матрицы.
Ключевые слова: композиты; металлическая матрица; технология изготовления дисперно-упрочненных композитов.

В современном материаловедении особое внимание уделяется разработке новых композитных материалов, обладающих высокой прочностью, термостойкостью и износостойкостью [1]. Одним из перспективных классов таких материалов являются дисперсно-упрочненные композиты с металлической матрицей. Эти материалы находят применение в аэрокосмической отрасли, машиностроении, энергетике и других сферах, где требуются материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками [2], [4]-[6].

Дисперсное упрочнение основано на введении в металлическую матрицу мелкодисперсных твердых частиц, которые препятствуют движению дислокаций и, следовательно, значительно повышают прочностные характеристики материала [2].

Композиты на основе металлической дисперсно-упрочненной матрицы отличаются от волокнистых композитов тем, что матрица является основной несущей нагрузку составляющей, а дисперсные частицы тормозят движения

дислокаций, повышая предел текучести и прочность материала. В дисперсно-упрочненные композиционные материалы искусственно вводят мельчайшие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и другие, не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояния между ними, тем прочнее композиционный материал. В дисперсноупрочненных композиционных материалах матрица является основным несущим элементом.

Высокая прочность достигается при размере частиц 10—500 нм при среднем расстоянии между ними 100—500 нм и равномерном их распределении в матрице [1]. Дисперсно-упрочненные композиты могут быть получены на основе большинства применяемых в технике металлов и сплавов.

Области применения композиционных материалов не ограничены. Они применяются в авиации для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки, лонжеронов, нервюр, панелей и т.д.) и двигателей (лопаток компрессора и турбины и т.д.), в космической технике для узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жидкости, для элементов жесткости, панелей, в автомобилестроении для облегчения кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и т.д., в горной промышленности (буровой инструмент, детали комбайнов и т.д.), в гражданском строительстве (пролеты мостов, элементы сборных конструкций высотных сооружений и т.д.) и в других областях народного хозяйства [3].

Применение композиционных материалов обеспечивает новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, энергетических и транспортных установок, уменьшении массы машин и приборов.

Технология получения дисперсно-упрочненных материалов заключается в выборе упрочняющей фазы и метода ее введения, определении объемного содержания, а также в разработке рациональных режимов деформации и термической обработки. Выбирая упрочняющую фазу, следует исходить из ее термодинамических свойств, диффузионной подвижности в матрице и других параметров, учитывающих условия эксплуатации данной композиции. Объемное содержание упрочняющей фазы определяется технологическими возможностями равномерного распределения входящих в состав композиционного материала компонентов [1], [3].

В дисперсно-упрочненных материалах обычно сосуществуют два типа структур – агрегатная (рис.1) и дисперсная (рис.2). В агрегатной структуре частицы упрочняющей фазы окружены несколькими зернами матрицы, имеющими различную кристаллографическую ориентацию, в дисперсной же структуре частица упрочняющей фазы полностью окружена одинаково ориентированной матрицей. Преобладание той или иной структуры определяется способом получения композиционных материалов [5].

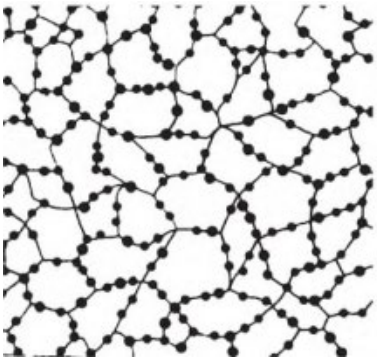


Рис. 7. Агрегатная структура в дисперсно-упрочненных материалах

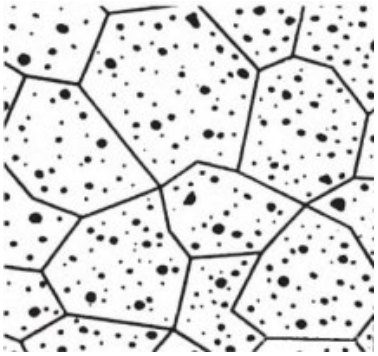


Рис. 8. Дисперсная структура в дисперсно-упрочненных материалах

Процесс получения дисперсно-упрочненных композитов должен быть таким, чтобы обеспечить создание стабильной дислокационной структуры, способствующей многократному повышению прочности и сохранению пластичности [2].

Известно, что вязкий, лишенный хрупкости материал перед разрушением претерпевает значительную деформацию. Причем пластические деформации в реальных кристаллических материалах начинаются при напряжениях, которые меньше, чем теоретически рассчитанные для идеальных материалов, примерно в 1000 раз.

Такая вязкая прочность по сравнению с теоретической объясняется тем, что в пластической деформации активно участвуют дислокации – локальные искажения кристаллической решетки. При деформировании благодаря дислокациям сдвиг атомов в соседнее положение происходит не одновременно по всей поверхности скольжения, а растягивается во времени. Такое постепенное скольжение за счет небольших смещений атомов в области дислокации не требует значительных напряжений, что и проявляется при испытаниях пластичных материалов. Упрочнение таких материалов заключается в создании в них структуры, затрудняющей движение дислокаций.

Композиты с металлической матрицей обладают значительно более высокой температурной устойчивостью, по сравнению с полимерными. Например, алюминиевые или никелевые матрицы выдерживают температуры до 600–1000 °C и более [1]. Это делает их применимыми в условиях высоких тепловых нагрузок (турбины, выхлопные системы, двигатели).

Композиты с неметаллической матрицей, в частности полимерной, ограничены по температуре эксплуатации: до 250–300 °C даже для термостойких пластиков. Однако керамические матрицы могут выдерживать температуры до 1500 °C, но при этом обладают высокой хрупкостью и сложностью обработки.

Металлические матрицы обеспечивают высокую прочность, пластичность и ударную вязкость, что позволяет эффективно работать в условиях переменных нагрузок. Они хорошо переносят деформации и не разрушаются хрупко.

Полимерные матрицы обладают низкой плотностью и высокой удельной прочностью, но менее устойчивы к ударам и деформациям. Керамические матрицы крайне хрупки, хотя прочны на сжатие и устойчивы к износу. Металлические матрицы обладают высокой электропроводностью и теплопроводностью, что полезно при применении в электронных системах или элементах, подверженных нагреву [1].

Использование дисперсно-упрочненных композитов с металлической матрицей в перечисленных отраслях промышленности способствует созданию надежных, долговечных и эффективных изделий и конструкций, отвечающих современным требованиям к качеству и производительности [8].

Библиографический список

1. Мальцева Л. А. Жидкофазные технологии получения композиционных материалов. Матрицы. Упрочнители./ Л. А. Мальцева – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013.– 120с.

2. Ловшенко Г. Ф. Получение, структура и свойства дисперсно-упрочненных механически легированных материалов на основе железа / Г. Ф. Ловшенко – Вестник Белорусско-Российского университета. – 2006.

3. Лукин А. А., Лукина З. С. Композиционные и порошковые материалы: учеб. пособие. - 1-е изд. / А. А. Лукин, З. С.Лукина. – Воронеж: 2012. – 115 с.

4. Мальцева Л.А. Жидкофазные технологии получения композиционных материалов. Матрицы. Упрочнители. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 120 с.

5. Ловшенко Г.Ф. Получение, структура и свойства дисперсно-упрочненных механически легированных материалов на основе железа // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2006.

6. Лукин А. А., Лукина З. С. Композиционные и порошковые материалы: учеб. Пособие / А. А. Лукин, З. С. Лукина. – Воронеж: ВГУ, 2012. – 115 с.

7. Туманов А. Т. Композиционные материалы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2018. – 300 с.

8. Гольдштейн М. А. Металлические матричные композиты. – СПб.: Политехника, 2015. – 200 с.

© Каримова Е.О., 2026

УДК 621.43.068

Р.И. КАГАРМАНОВА
ronchik86@gmail.com
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация: в данной работе исследуются перспективы применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в машиностроении. Проанализированы преимущества и недостатки использования ПКМ по сравнению с традиционными материалами. Выделены основные направления развития ПКМ и их потенциал для улучшения характеристик машиностроительной продукции.
Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, перспективы развития полимерных материалов.

ПКМ активно заменяют традиционные материалы в различных отраслях машиностроения благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность при низком весе, устойчивость к коррозии и химическим воздействиям. С учетом требований современных технологий, связанные с легкостью, прочностью и экономической эффективностью, исследуется необходимое развитие ПКМ.

Рассмотрим основные отрасли применения ПКМ в машиностроении:

– использование ПКМ в авиастроении позволяет снизить вес конструкции самолета, что приводит к экономии топлива и увеличению дальности полета;

– в автомобилестроении применение ПКМ в кузовных элементах, подвеске и других деталях позволяет снизить вес автомобиля, улучшить его динамические характеристики и уменьшить расход топлива;

– в судостроении ПКМ используются для изготовления корпусов судов, надстроек и других элементов, обеспечивая высокую коррозионную стойкость и снижение веса;

– применение ПКМ в железнодорожном машиностроении встречается в вагонах, локомотивах и инфраструктурных элементах позволяет снизить вес, повысить прочность и улучшить шумоизоляцию.

Для наглядного представления области применения ПКМ, можно рассмотреть пример из области автомобилестроения, представленный на рис. 1.

Рис. 1. Кузов автомобиля

Исследуя различные типы ПКМ, выделим основные преимущества использования их в машиностроении, которые выделяются высокой удельной прочностью и жесткостью, коррозионной стойкостью, технологичностью, вибропоглащением и электроизоляционными свойствами. Однако, помимо положительных сторон, есть и недостатки. К ним относятся высокая стоимость, анизотропия свойств, низкая термостойкость, слабая ударопрочность.

В машиностроении используются различные типы ПКМ, в зависимости от требований к материалу и условий эксплуатации. Наиболее распространенные типы:

- Углепластики, которые обладают высокой прочностью, жесткостью и малой плотностью. Используются в авиастроении, автомобилестроении и спортивном оборудовании.
- Стеклопластики, обладающие хорошей прочностью, коррозионной стойкостью и низкой стоимостью. Используются в судостроении, автомобилестроении и строительстве.
- Органопластики, владеющие высокой эластичностью и ударопрочностью. Используются в автомобилестроении, спортивном оборудовании и защитных конструкциях.
- Боропластики, которые обладают высокой прочностью, жесткостью и термостойкостью. Используются в авиастроении и космической технике.

В результате проведенного анализа различных типов ПКМ обобщим их свойства в виде табл. 1.

Таблица 4

Сравнение свойств различных типов ПКМ

Свойство	Углепластик	Стеклопластик	Органопластик	Боропластик
Плотность, г/см³	1.5-2.0	1.8-2.2	1.2-1.5	2.0-2.5
Прочность, МПа	1000-3000	500-1500	300-800	1500-4000
Модуль упругости, ГПа	100-300	20-50	5-15	200-400
Термостойкость, °С	150-300	100-200	80-150	200-400
Стоимость	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая

Кроме того, рассмотрим требования, предъявляемые к ПКМ в машиностроении, которые зависят от конкретной отрасли и условий эксплуатации, их можно рассмотреть в табл. 2.

Таблица 5

Требования к ПКМ в различных отраслях машиностроения

Отрасль	Основные требования
Авиастроение	Высокая удельная прочность, низкий вес, термостойкость, пожаробезопасность
Автомобилестроение	Снижение веса, ударопрочность, коррозионная стойкость, низкая стоимость
Судостроение	Коррозионная стойкость, прочность, плавучесть, низкое водопоглощение
Железнодорожное машиностроение	Снижение веса, шумоизоляция, виброгашение, пожаробезопасность

В результате комплексного сбора информации о перспективах развития ПКМ в машиностроении сформированы основные направления модернизации таких материалов. Так, разработка новых армирующих материалов связана с созданием новых волокон с более высокой прочностью, жесткостью и термостойкостью, таких как углеродные нанотрубки и графен. Исследование новых полимерных матриц предполагает создание новых полимерных смол с улучшенными свойствами, такими как высокая термостойкость, химическая стойкость и ударная вязкость. Разработка новых технологий производства представляет собой совершенствование технологий формования ПКМ, таких как литье под давлением, прессование и намотка, для повышения производительности и снижения затрат. Разработка новых методов переработки отходов ПКМ предполагает создание эффективных методов переработки отходов ПКМ для снижения экологической нагрузки.

В настоящее время ведутся активные разработки в области ПКМ для машиностроения, направленные на создание новых материалов с улучшенными характеристиками и расширение областей их применения. Примеры ведущихся разработок приведены в табл. 3.

Таблица 6

Примеры ведущихся разработок в области ПКМ для машиностроения

Направление разработки	Цель	Ожидаемый результат
Самовосстанавливающиеся композиты	Увеличение срока службы изделий, снижение затрат на обслуживание	Композиты, способные самостоятельно залечивать трещины и повреждения

Композиты с интегрированной функциональностью	Создание многофункциональных материалов, упрощение конструкции	Композиты, одновременно выполняющие несущую функцию и функцию датчика или актуатора
Биокомпозиты	Снижение экологической нагрузки, использование возобновляемых ресурсов	Композиты на основе растительных волокон

Несмотря на некоторые недостатки, перспективы развития ПКМ в машиностроении весьма обнадеживающе. Ведущиеся разработки направлены на создание новых материалов с улучшенными характеристиками и снижение их стоимости. В будущем можно ожидать все более широкого использования ПКМ в машиностроении, что позволит создавать более эффективные, экологичные и экономичные машины и оборудование.

Библиографический список

1. Кобяков, П. Ю. Полимерные композиционные материалы в машиностроении: учебное пособие / П. Ю. Кобяков. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 200 с.

2. Казеко, Л. А. Композитные материалы: учебно-методическое пособие / Л. А. Казеко, О. С. Городецкая. – Минск: БГМУ, 2020. – 32 с.

3. Чалаев, А. В., Барашков, В. П. Полимерные композиционные материалы: характеристики и применение / Москва: Энергия, 2015. 108 с.

4. Левин, С. Я., Мещерякова, Н. В. Применение композитов в авиационной и космической технике / Москва: Машиностроение, 2018. 27 с.

5. Ковалев, Е. И. Разработка новых полимеров для машинного строительства / Е. И. Ковалев, И. П. Смирнова. – Казань: Казанский технический университет, 2021. – 21 с.

6. Полимерные композиционные материалы: применение и технологии: [сайт]. – URL: https://www.polymer-materials.com (дата обращения: 22.04.25)

7. Нанотехнологии в полимерных композитах: перспективы: [сайт]. – URL: https://www.nanotech-polymer.com (дата обращения: 22. 04. 25)

8. Применение природных волокон в композитах: [сайт]. – URL: https://www.eco-fiber.com (дата обращения: 23. 04. 25)

© Кагарманова Р.И., 2026

УДК 691.175.5/.8

Е.О. КАРИМОВА, Э.Ф. БАРЕЕВА
m.ekoterina@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСТРУЗИОННО-ВЫДУВНЫМ ПУТЕМ

Аннотация: в статье рассматривается технология экструзионно-выдувного формования (ЭВФ) как перспективный метод производства полых изделий и полимерных композиционных материалов. Основное внимание уделено ключевым этапам процесса, включая экструзию заготовки, выдувное формование и охлаждение, а также применяемым материалам, таким как термопласты и их композиты. Особый акцент сделан на преимуществах метода: экономичности, высокой производительности и возможности создания изделий сложной геометрии. Проведён сравнительный анализ с альтернативными технологиями переработки полимеров.
Ключевые слова: экструзионно-выдувное формование, полимерные композиты, полые изделия, термопласты, технология переработки.

Современные технологии переработки полимерных материалов позволяют создавать изделия с уникальными эксплуатационными характеристиками. Одним из наиболее востребованных методов является экструзионно-выдувное формование (ЭВФ), которое сочетает высокую производительность, экономичность и возможность использования композитных материалов [1], [4].

Актуальность темы обусловлена растущим спросом на лёгкие, прочные и экологически безопасные полимерные изделия. ЭВФ позволяет не только сократить затраты на производство, но и создавать материалы с заданными свойствами за счёт введения композитных добавок.

Выдувное формование – это процесс производства изделий из полимерных композиционных материалов, основанный на раздуве разогретого пластика воздухом внутри формы. Методом выдувного формования производят полую тару и иные изделия полой формы с различной толщиной стенок. Технология раздува воздухом является недорогой, имеет короткий цикл производства, позволяет получить изделия сложной конфигурации, а бракованные изделия легко поддаются переработке [2].

Технология выдувного формования изделий из полимеров схожа с технологией выдува стекла. Существует два типа выдувного формования полимеров: экструзия и литье под давлением с раздувом. В отдельную

подкатегорию можно выделить формование с раздувом и растяжением, направленное на создание двуосноориентированных пластиков. Между собой типы формования отличаются способом производства заготовки (преформа, паризон) [1].

На первом этапе происходит формирование заготовки из расплавленного полимера методом экструзии (паризон) или литья под давлением (преформа). Это важнейший этап формования изделий по данной технологии, который в большей степени определяет свойства и качество готового изделия [3].

В момент, когда заготовка позиционируется относительно разомкнутой формы, происходит ее смыкание. Через верхнюю или нижнюю часть заготовки после смыкания формы внутрь подается сжатый воздух, за счет которого она раздувается и принимает заданную форму.

В общем случае при выдувном формовании подача сжатого воздуха может осуществляться сверху через дорн, снизу через ниппель или через специальную иглу. При использовании иглы для подачи сжатого воздуха можно получить замкнутые пустотелые изделия, поскольку после извлечения иглы след от ее введения быстро затягивается. Таким способом производят, например, пластиковые игрушки.

Раздув полимерной заготовки начинается сразу после смыкания полуформ и прекращается, когда полое изделие полностью заполнит внутренний объем формы. При смыкании полуформ заготовка отделяется (горячая или холодная резка). На начальном этапе подачи сжатого воздуха раздув происходит в свободном режиме и сопровождается относительно равномерным изменением толщины. Сама заготовка в этот момент имеет форму пузыря до тех пор, пока не начнется соприкосновение с внутренними стенками формы. Когда изделие приобретает стабильную толщину стенок и заданные размеры, матрица размыкается для выталкивания готового продукта. Стенки формы достаточно холодные. Потому, соприкасаясь с ними, изделие дублирует рельеф и начинает остывать, одновременно фиксируя полученную форму. На данном этапе решающими параметрами технологического процесса являются давление воздуха и температура формы. При увеличении давления качество поверхности изделия улучшается, снижается коробление стенок, сокращается время охлаждения продукта. Температура формы должна выдерживаться в заданных технологическим процессом пределах. Завершается охлаждение после остывания наиболее толстых участков изделия. Важно не допустить преждевременного извлечения изделия, поскольку может наблюдаться его необратимое деформирование. В среднем время охлаждения раздутого изделия занимает 50–70% от всего технологического цикла. Для увеличения производительности при выдувном формовании используют ускорители охлаждения – жидкий азот, водяной туман, охлажденный воздух. Понижать температуру расплава для сокращения времени охлаждения не рекомендуется, поскольку это может негативно отразиться на качестве готового изделия [2].

Выдувное формование сопровождается образованием значительного количества производственного брака (до 35%). При ошибках в технологическом процессе объем брака увеличивается. Брак пригоден для повторной переработки в дробилках и использования в следующем технологическом цикле. Объем вторичного сырья не должен превышать 30-40% от общего объема материала [2], [3].

Метод экструзионно-выдувного формования используется для получения пластиковой тары удлиненной формы. Он характеризуется высокой производительностью и низкой себестоимостью готовой продукции [3].

Экструдированная заготовка (паризон) представляет собой полую эластичную трубку или рукав заданной длины, которая пропускается через центр разомкнутой формы для формования будущего изделия. Толщина стенок заготовки больше толщины стенок будущего изделия. За счет вытягивания пластичной заготовки под действием собственного веса стенки в ее верхней части тоньше, чем в нижней. Это явление называется разнотолщинностью стенок. Снизить разнотолщинность до минимальных значений можно при выдерживании коэффициента раздува в пределах 3–3,5.

При экструзии расплав должен быть полностью гомогенным и иметь постоянную температуру по всему периметру будущей заготовки. Выдавливание расплава осуществляется равномерно и без пульсации. Сам процесс выдувного формования может протекать в непрерывном или прерывистом режиме.

На рис. 1 приведена схема устройства экструдера [5]

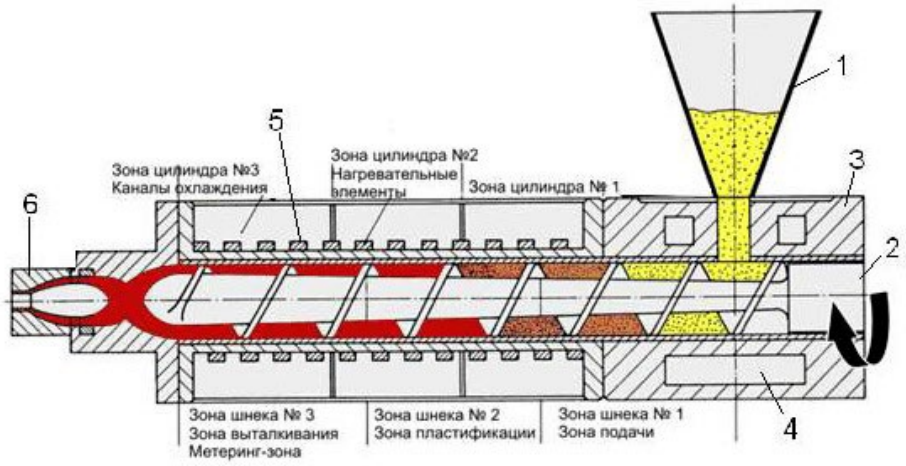


Рис. 1. Схема устройства экструдера

Конструктивно машина разделена на три отсека:

- зону загрузки;
- зону плавления;
- зону дозирования.

В заключение, можно отметить, что метод экструзионно-выдувного формования сочетает высокую производительность, экономическую

эффективность и возможность создания сложных полых конструкций, что делает его незаменимым в современных отраслях промышленности.

Библиографический список

1. Баженов С.Л. Технология переработки пластических масс. – Москва: Химия, 2020. – 480 с.
2. Выдувное формование // Proplast URL: https://proplast.ru/articles/vyiduvnoe-formovanie/ (дата обращения: 28.04.2025).
3. Власов С. В., Каплун А. Б. Полимерные композиционные материалы: учебное пособие / С. В. Власов, А. Б. Каплун. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 320 с.
4. Гульбин В. В. Экструзионно-выдувное формование изделий из пластических масс. – Москва: Профессия, 2019. – 256 с.
5. Промышленные системы // Promsistem URL: https: //promsistem.com/stati/chto_takoe_ekstruder/#1 (дата обращения: 28.04.2025).
6. Кербер М.Л. Полимерные композиты: структура, свойства, технологии. – Москва: Альянс, 2022. – 412 с.

© Каримова Е. О., Бареева Э.Ф., 2026

УДК 683.531.19

П.А. КУРЕНЁВА, Р.Э. РИЗАЕВ
Polii.kureneva@yandex.ru
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ И ИХ СВОЙСТВА

Аннотация: в данной статье рассмотрены композиционные материалы для космической отрасли, их виды, особенности структуры, а также их свойства.
Ключевые слова: композиционные материалы, стекловолокна, арамидные волокна, углепластики.

Композиционные материалы в космической технике используются очень широко – благодаря их высокой прочности при малом весе, а также устойчивости к экстремальным условиям (температурным перепадам, радиации и т.д.) [1]-[7]. Рассмотрим основные виды композиционных материалов для космоса:

1. Углепластики (карбон-композиты). Матрица: чаще всего состоит из эпоксидной смолы, наполнителем является углеродное волокно. Их преимущества заключаются в высокой прочности, жёсткости, малом весе и термостойкости. Углепластики используются в создании обшивки спутников, несущих конструкции ракет, обтекателей.

2. Стеклопластики. Матрица состоит из полимерных смол (эпоксидные, полиэфирные). В качестве наполнителя используются стеклянные волокна. Их преимущества заключаются в хорошей электрической проводимости и стойкости к коррозии. В основном они применяются при изготовлении радиопрозрачных обтекателей и корпусов антенн.

3. Органопластики. Матрица состоит обычно термореактивные смолы. В качестве наполнителя используют высокопрочные органические волокна (например, арамидные волокна, типа Кевлара). Их преимущества заключаются в высокой ударной прочности и высокой устойчивости к вибрациям. Эти материалы применяют при создании модулей защиты оборудования, а также амортизирующие элементы состоят из органопластика.

4. Металлокомпозиты. Матрица состоит из металлов (алюминий, титан). Наполнитель: керамические частицы, волокна или слоистые структуры. Преимущества: высокая термостойкость, хорошая механическая прочность. Металлокомпозиты в основном используют для теплозащитных покрытий, структурных частей для возвращаемых аппаратов.

5. Керамические композиционные материалы (CMC). Матрица состоит из керамики (например, карбид кремния SiC). Наполнитель: керамические волокна. Преимущества: работа при сверхвысоких температурах (>1500°C). Используются данные материалы для теплозащитных экранов космических кораблей, элементов двигателей.

6. Функционально-градиентные материалы (*FGM*). У этих материалов присутствует плавный переход свойств от одного материала к другому (например, от металла к керамике). Преимущества их основаны на снижении термических и механических напряжений, а применяются такие материалы для теплозащиты обшивки космических кораблей.

Вышеперечисленные материалы показаны на рис. 1.

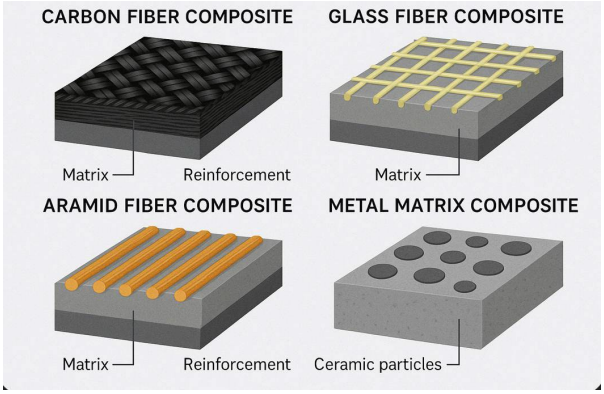


Рис. 1. Структура композитных материалов: углепластика, стеклопластика, органопластика, металлокомпозита

Композиционные материалы для космической отрасли должны обладать такими свойствами, как:

1. Прочность и жесткость: это способность материала выдерживать нагрузки без деформации и разрушения. Для космических конструкций критичны как статическая прочность (сопротивление постоянным нагрузкам), так и динамическая (сопротивление ударным и вибрационным воздействиям).

2. Усталостная прочность: это сопротивление разрушению при циклических нагрузках, характерных для работы в условиях вибраций и колебаний.

3. Высокий модуль упругости: это характеристика, определяющая жесткость материала и его способность сопротивляться деформации под нагрузкой.

Также композиты для космоса должны иметь такие механические свойства, как:

1. Термостойкость: это способность сохранять механические свойства при высоких температурах, возникающих, например, при входе в атмосферу.

2. Низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР): это изменение размеров материала при изменении температуры. Согласование ТКЛР различных компонентов конструкции критически важно для предотвращения деформаций и разрушений.

3. Низкая теплопроводность: это способность материала проводить тепло. Важна для управления температурным режимом космического аппарата.

При создании композитных материалов учитываются такие факторы, как:

1. Низкая плотность: представляет собой единицу объема материала. Чем меньше плотность, тем легче конструкция, что особенно важно в космической технике.

2. Химическая стойкость: это сопротивление материала воздействию агрессивных сред, включая космическую радиацию, атомарный кислород и другие факторы космической среды.

3. Низкое влагопоглощение: это способность материала мало поглощать влагу, т.к. избыточное влагопоглощение может привести к изменению свойств материала и деградации конструкции.

4. Низкое газовыделение необходимо из-за того, что выделение газов из материала в вакууме может негативно повлиять на работу чувствительных приборов и оптических систем.

Кроме того, композиционные материалы, используемые в космической отрасли должны обладать следующими технологическими свойствами:

1. Хорошая обрабатываемость, т.к. она влияет на сложность и стоимость изготовления деталей из данного материала.

2. Хорошая ремонтопригодность – это возможность ремонта и восстановления поврежденных участков конструкции без особых затруднений и применения дополнительных средств.

3. Совместимость с другими материалами позволяет использовать данный композиционный материал в сочетании с другими материалами, применяемыми в конструкции космического аппарата.

Рассмотрим экономические факторы, которые необходимо учитывать при использовании композиционных материалов.

1. Низкая стоимость материала. Цена за единицу массы или объема должна быть низкой и конкурентоспособной.

2. Стоимость изготовления должны быть также низкой, что связано с затратами на производство деталей из данного материала.

Обратим внимание также на матричные компоненты композиционных материалов, используемых в космической промышленности.

1. Полиимиды композиционных материалов. В качестве примера рассмотрим *Kapton*: он устойчив к температурам в диапазоне от -269°*C* до +400°*C*.

2. Цианатэфиры. Их преимущество заключается в низком влагопоглощеним и высокая стабильность в вакууме.

3. Керамические матрицы *CMC* устойчивы к температурам, превышающим 1500°*C*, они используются в теплозащите.

В качестве армирующих волокон для рассматриваемых композиционных материалов часто используют следующие волокна:

1. Углеродные волокна *CFRP*. Они состоят из графитных кристаллов, обладающих прочностью до 7000 МПа при очень низкой плотности ≈ 1.7–1.9 г/см³.

2. Кевлар (арамид) обладают прочностью до 3600 МПа. Их применяют для метеороидных щитов и для оболочек.

3. Базальтовые волокна очень устойчивы к термоудару и радиации, поэтому их используют в теплозащитных покрытиях.

3. Структура композиционных материалов:

В качестве примера рассмотрим, что такие высокотехнологичные композиционные материалы для космической отрасли выпускает американская компания *Hexcel Corporation* для таких гигантов, как *NASA, Boeing* и *Airbus Defence & Space*. Примером такого проекта может служить проект *NASA Orion Spacecraft*. Также *Hexcel* поставила композитные материалы для обшивки и силовых элементов капсулы *Orion*, предназначенной для полётов за пределы низкой околоземной орбиты, включая Луну и Марс. Особенностью является материал *HexPly*, это углеродный препрег с эпоксидной смолой, обладающий высокой ударопрочностью и устойчивостью к тепловым перегрузкам. Применяется в сэндвич-панелях, несущих конструкциях и обшивке.

Кроме того, в настоящее время компанией используется технология Out-of-Autoclave (OOA), когда композиты можно формовать без автоклава, что снижает затраты и массу. Это особенно важно для крупных элементов обшивки корабля. Также *Hexcel* использует 3D-переплетение волокон для повышения прочности на сдвиг. Их материалы выдерживают космический вакуум, радиацию и циклические термические нагрузки.

В заключение отметим, что в настоящее время прослеживаются 5 трендов в развитии космических композитов:

1. Создание ультралёгких и термостойких материалов, таких как нанотрубки, графен, термопластики.

2. Ведутся разработки умных композитов с функцией самодиагностики и самовосстановления.

3. Создаются технологии для повышения радиационной стойкости материалов на базе базальтовых волокон и гибридных матриц.

4. Внедряется 3D-печать композитов прямо на орбите.

5. Обеспечивается большая экологичность композиционных материалов, благодаря новым способам их переработки и использовании биоразлагаемых матриц.

Библиографический список

1. Виртуальная среда обучения КНИТУ (КХТИ) [Электронный ресурс]. URL:https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/216063/mod_resource/content/1/Армирующие %20наполнители%20для%20КМ.pdf (дата обращения: 14.04.2025).

2. Баданина, Ю. В. Композиционные материалы в ракетно-космической технике : учебное пособие / Ю. В. Баданина, В. Д. Баскаков, А. Л. Галиновский [и др.] ; под редакцией Г. В. Малышевой. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – ISBN 978- 5-7038-5136-4. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/172743 (дата обращения: 15.07.2022).

3. Михеев, А. Е. Ракетные и космические конструкции из композиционных материалов: учеб. пособие / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – 128 с.

4. Электронная библиотека диссертаций disserCat [Электронный ресурс]. URL: https://www.dissercat.com/content/formirovanie-struktury-i-svoistv-kompozitsionnykh-materialov-na-osnove-sverkhvysokomolekulya (дата обращения: 15.07.2022).

5. ВГТУ: статьи, руководства и инструкции на различные темы. [Электронный ресурс]. URL: https://wiki.cchgeu.ru/index.php?title=Арамидные_волокна (дата обращения: 15.07.2022).

6. Буланов, И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – Москва: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 1998.

7. Файловый архив для студентов. [Электронный ресурс]. URL: https://studfile.net/preview/5282548/ (дата обращения: 13.07.2022).

© Куренёва П.А., Ризаев Р.Э., 2026

УДК 669.018.95

П.К. МАХМУТОВА
polinakamilevna@inbox.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: в данной работе проведено исследование современных технологий производства дисперсно-упрочнённых композиционных материалов (ДУКМ), выявлению факторов, оказывающих влияние на их качество и свойства, разработке рекомендаций по улучшению технологического процесса и повышению эффективности производства.
Ключевые слова: дисперсно-упрочненные композиционные материалы, оптимизация, технологии производства, механические свойства, оптимизация

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДУКМ) представляют собой особый класс материалов, в которых упрочнение достигается за счет введения в металлическую матрицу дисперсных (мелкодисперсных) частиц второй фазы [1]–[7]. Эти частицы равномерно распределены в основной металлической матрице и имеют размеры от нескольких нанометров до нескольких микрометров (рис. 1).

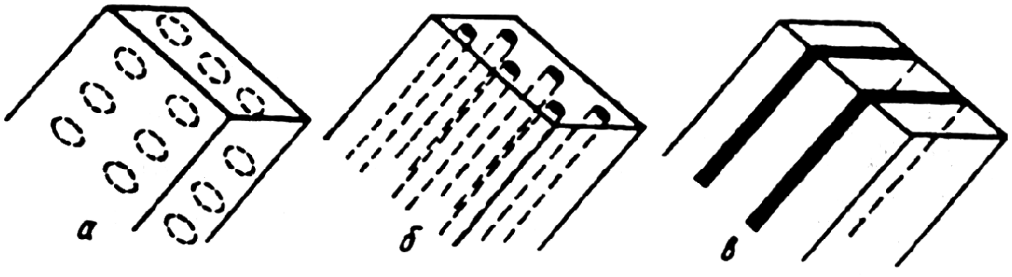


Рис. 1. Схема строения композиционных материалов
а – дисперсно-упрочненные; *б* – волокнистые;
в – слоистые.

В современных условиях развития промышленности особую значимость приобретает оптимизация производства дисперсно-упрочненных композиционных материалов (ДУКМ). Это обусловлено растущими требованиями к механическим и эксплуатационным характеристикам материалов в различных отраслях.

Актуальность данной статьи связана с оптимизацией производства ДУКМ, которые требуют повышения эффективности производственных

процессов, снижения энергозатрат и улучшения качества получаемых материалов с учетом того, что современные технологии производства ДУКМ должны соответствовать принципам устойчивого развития и обеспечивать минимизацию экологического воздействия на окружающую среду.

Основными методами научного исследования были следующие: анализ современных технологий производства ДУКМ, исследование факторов, влияющие на качество и свойства получаемых композитов, и способов оптимизации технологических процессов, разработка рекомендаций по совершенствованию производства ДУКМ.

Наиболее распространённым методом является порошковая металлургия, включающая следующие этапы:

- подготовка порошка матрицы и наполнителя;
- смешивание компонентов;
- компостирование смеси методами горячего прессования, экструзии или спекания.

Рассмотрим основные этапы технологии компостирования смеси методом горячего прессования:

- выбор места (компостную кучу рекомендуется размещать на открытом солнечном месте, так как тень может охладить массу и замедлить процесс разложения);
- подготовка материалов (используют смесь «зелёных» (азотистых) и «коричневых» (углеродистых) материалов. «Зелёные» — это свежая трава, овощные отходы, ботва, навоз, «коричневые» — сухие листья, солома, опилки, бумага);
- укладка материалов (материалы укладывают слоями: 20–30 см «зелёных» и 10–15 см «коричневых». Каждый слой слегка увлажняют. Можно добавить немного готового компоста или земли, чтобы внести микроорганизмы);
- накрывание кучи (компостную кучу накрывают плёнкой или брезентом, чтобы сохранить тепло и влагу);
- переворачивание компоста (раз в 1–2 недели компост переворачивают вилами, чтобы обеспечить доступ кислорода);
- контроль влажности (компост должен быть влажным, как отжатая губка. Если он слишком сухой, добавляют воды, если слишком мокрый – «коричневых» материалов);
- использование готового компоста (готовый компост используют для мульчирования или подкормки растений).

Однако у горячего компостирования есть и недостатки: такой метод требует большего ухода и внимания к деталям, а также может привлекать грызунов [1].

Для крупносерийного производства применяют литьё и прокатку с использованием жидких металлов. Этот способ обеспечивает высокую производительность, однако страдает от неоднородности структуры и сложности контроля свойств готового изделия, рис. 2.

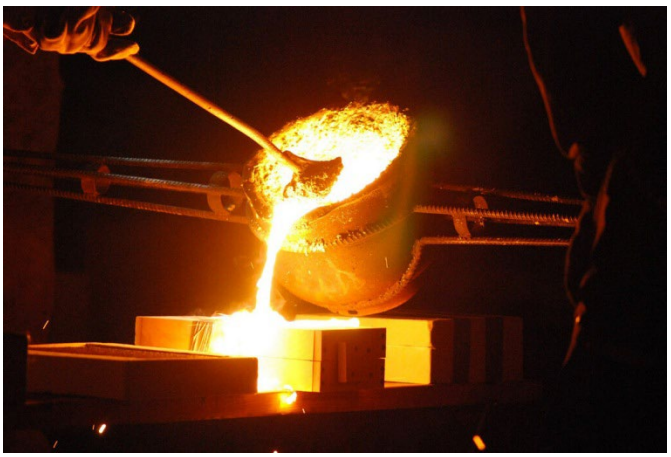


Рис. 2. Литьё с использованием жидких металлов

Электроискровое легирование позволяет создавать поверхностные слои с повышенной твёрдостью и износостойкостью путём формирования мелкодисперсных фаз в процессе электроэрозионной обработки поверхности заготовки [2].

Анализируя факторы, определяющие свойства полученных композитов, можно выделить следующие ключевые аспекты:

- состав и форма исходных компонентов;
- технологические режимы;
- пористость и структура межфазных границ.

Оптимизация включает внедрение усовершенствованных методов смешивания, контроль режимов формовки и улучшение оборудования для термообработки, таких как:

- улучшение смешивания компонентов (использование вибрационного перемешивания или ультразвуковой обработки способствует уменьшению агломерации частиц и улучшает однородность распределения);
- контроль условий компостирования (применение многокомпонентных прессформ с регулируемым давлением и температурой позволит обеспечить требуемые свойства даже сложных геометрических деталей);
- совершенствование оборудования (автоматизированные системы управления процессом позволяют сократить брак и снизить производственные затраты за счёт точного регулирования температурных и временных параметров) [4].

На основании проведённого анализа предлагаются следующие рекомендации:

- повышение точности дозировки компонентов для уменьшения отклонений в структуре материала;
- применение специальных добавок для улучшения смачивания и сцепления компонентов;
- использование автоматизированных линий, оснащённых системами мониторинга состояния заготовок и оперативного изменения параметров процесса;

– регулярное проведение лабораторных испытаний готовых образцов для оценки соответствия требованиям стандартов [5], [6].

Проведённое исследование позволило выявить основные тенденции развития технологий производства дисперсно-упрочнённых композиционных материалов, определить значимые факторы, влияющие на качество готовой продукции, предложить эффективные меры по оптимизации производственных процессов и сформулировать практические рекомендации по дальнейшему развитию отрасли.

Библиографический список

1. Кузнецов А. В., Васильев Н. Н. Основы порошковой металлургии, 2018. – С. 78–89.
2. Шилов О. Б., Прохоров М. П. Современные подходы к созданию высокопрочных композиционных материалов. – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – С. 45–60
3. Крутиков Л. С., Смирнова Е. Д. Перспективы производства дисперсно-упрочнённых композитов. – Воронеж: Издательство ВГУ, 2021. – С. 90–102.
4. Яковлев В. И., Петров А. Г. Методы и средства повышения качества металлопродукции. – Новосибирск: Академическое издательство, 2019. – С. 23–35.
5. Иванов, Д. А., Иванов А. В., Шляпин С. Д. Изучение физикомеханических свойств и структуры композиционного материала А1-А12О3, полученного с использованием механической обработки алюминиевого порошка ПАП-2 и реакционного спекания порошковых заготовок // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2014. – № 4. – С. 40-50.
6. Черный, А. А., Черный В. А. Композиционные материалы в технике и перспективы их получения. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2007.
7. Композиционные материалы: текст лекций / В.Н. Сафин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 36.

© Махмутова П.К., 2026

УДК 691.175.5/.8

Л.И. МАКЕЕНКО
Makeenko-lev@mail.ru
Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АРМИРОВАННЫЕ ВОЛОКНАМИ. ИХ СТРУКТУРА, ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ

Аннотация: статья посвящена композиционным материалам, армированным волокнами, которые сочетают высокую прочность, жесткость и низкую плотность. Рассмотрены основные типы армирующих волокон (углеродные, стеклянные, арамидные, базальтовые), виды матриц (термореактивные и термопластичные), технологии производства (намотка, прессование, вакуумная инфузия) и области применения (авиация, автомобилестроение, строительство, медицина). Особое внимание уделено преимуществам и недостаткам волокнистых композитов, а также перспективам их развития.
Ключевые слова: композиционные материалы, матрица композиционного материала.

Композиционные материалы – это искусственно созданные материалы, состоящие из двух или более компонентов с чёткой границей между ними. Обычно они включают армирующий элемент (например, волокна или частицы), который придаёт прочность, и матрицу (связующее вещество), которая удерживает армирование и распределяет нагрузку [1].

Актуальность исследования композиционных материалов, армированных волокнами, обусловлена их ключевой ролью в развитии современных высокотехнологичных отраслей промышленности. В условиях растущих требований к конструкционным материалам, которые должны сочетать легкость, прочность, устойчивость к агрессивным средам и долговечность, традиционные материалы часто оказываются недостаточно эффективными [2]. Волокнистые композиты предлагают уникальное решение этих задач, позволяя создавать материалы с заранее заданными свойствами, что особенно важно для таких передовых областей, как авиация, космонавтика, автомобилестроение и энергетика.

Современные тенденции устойчивого развития и экологической безопасности также подчеркивают значимость этих материалов. Разработка биокомпозитов и усовершенствованных методов переработки направлена на снижение экологического воздействия, что соответствует глобальным целям сокращения углеродного следа и перехода к «зеленым» технологиям. Кроме того, внедрение интеллектуальных композитов с функцией самодиагностики и

адаптивными свойствами открывает новые перспективы для создания инновационных конструкций в робототехнике, медицине и умных городских системах [3].

Композиционные материалы представляют собой искусственно созданные многокомпонентные системы, состоящие из двух и более фаз с чётким разделением функций. Одна из фаз, называемая армирующей, выполняет роль несущей структуры и определяет прочностные характеристики материала. В случае волокнистых композиционных материалов (ВКМ) в этой роли выступают короткие или непрерывные волокна, расположенные упорядоченно или хаотично. Другая фаза – матрица, окружающая волокна, фиксирует их положение, передаёт нагрузки и обеспечивает целостность конструкции [4].

Армирующая фаза (волокна) отвечает за прочность, жёсткость и устойчивость к внешним механическим воздействиям. Волокна могут быть ориентированы в определённом направлении (унидирекционные композиты), либо располагаться хаотично (изотропные композиты). Современные технологии также позволяют создавать многослойные и многопозиционные структуры, сочетающие разные виды волокон и направления армирования.

Матрица – это связующее вещество, в которое погружены волокна. Она защищает волокна от воздействия внешней среды (коррозии, влаги, температур), равномерно распределяет нагрузки и предотвращает расслоение материала. Матрицы бывают полимерные, металлические или керамические, но наибольшее распространение получили полимерные матрицы – благодаря их лёгкости, технологичности и относительно невысокой стоимости [5].

Уникальные свойства ВКМ обусловлены взаимодействием между волокнами и матрицей. Эффективная передача нагрузки происходит только при хорошем сцеплении между фазами. Поэтому большое внимание уделяется подготовке поверхности волокон (например, нанесению специальных покрытий, обработке плазмой) и выбору типа матрицы. При разрушении материала первым признаком его усталости зачастую становится деламинация, т.е. расслоение структуры на границе волокно–матрица.

Армирующие волокна играют ключевую роль в формировании прочностных характеристик композиционного материала. Современная промышленность использует несколько типов волокон, различающихся по химическому составу, структуре и механическим свойствам.

Стеклянные волокна – одни из самых распространённых, благодаря своей низкой стоимости и хорошим механическим свойствам. Они обладают высокой прочностью, термостойкостью и химической инертностью. [6].

Углеродные волокна отличаются очень высокой прочностью и жёсткостью при малом удельном весе. Эти волокна позволяют создавать конструкции, сравнимые по прочности с металлами, но при этом значительно легче.

Таблица 1

Сравнение армирующих волокон

Свойство	Стеклянные волокна	Углеродные волокна	Арамидные волокна	Базальтовые волокна
Плотность	2,5 г/см³	1,6 г/см³	1,44–1,48 г/см³	2,65 г/см³
Твёрдость	Высокая	Очень высокая	Средняя	Высокая
Модуль упругости	70-90 ГПа	150-250 ГПа	70-120 ГПа	80-100 ГПа
Прочность на разрыв	2000-4000 МПа	2500-7000 МПа	3000-4000 МПа	3500-4500 МПа
Термостойкость	До 650°C	До 3000°C	До 400°C	До 800°C
Устойчивость к коррозии	Отличная	Отличная	Хорошая	Отличная
Гибкость	Хорошая	Плохая	Очень высокая	Средняя
Применение	Строительство и автоиндустрия	Авиация, космическая техника	Броня, спортивный инвентарь	Строительство, геотехнические работы
Стоимость	Низкая	Очень высокая	Средняя	Средняя

Арамидные волокна, такие как кевлар, характеризуются высокой прочностью на разрыв и устойчивостью к ударным нагрузкам.

Базальтовые волокна – относительно новое направление, представляющее собой сплав природного базальта. Такие волокна отличаются хорошими термическими и механическими свойствами и, при этом, экологичностью.

Матрица в композиционном материале выполняет функции связующего компонента. От её свойств зависят такие параметры, как химическая устойчивость, теплопроводность, стойкость к старению и общая надёжность изделия. Существуют два основных типа матриц: термореактивные и термопластичные [7].

Термореактивные матрицы на основе эпоксидных, полиэфирных, фенольных и других смол используются наиболее широко. Они затвердевают при нагреве или при добавлении отвердителей, образуя трёхмерную структуру, которая не расплавляется повторно. Такие матрицы обеспечивают хорошее сцепление с волокнами и высокую термостойкость.

Термопластичные матрицы способны размягчаться при нагреве и возвращаться в исходное состояние при охлаждении. Это свойство делает возможной вторичную переработку и термоформование готовых изделий. К ним относятся полиамиды, полипропилен и другие. Такие материалы быстрее

обрабатываются и обеспечивают более высокий уровень ударной вязкости, но часто уступают термореактивным по тепловой стойкости [8].

Таблица 2

Сравнение термореактивных и термопластичных матриц

Характеристика	Термореактивные матрицы	Термопластичные матрицы
Процесс отверждения	Необратимая химическая реакция (сшивка)	Обратимый процесс плавления и затвердевания
Поведение при нагреве	Не плавятся, разрушаются при высокой температуре	Плавятся при нагреве, затвердевают при охлаждении
Температура переработки	Ниже (обычно 120–200°C)	Выше (обычно 250–400°C)
Ударная прочность	Ниже	Выше
Жесткость и прочность	Выше (в исходном состоянии)	Ниже, но может быть компенсирована армированием
Время формования	Дольше (минуты до часов)	Быстрее (секунды до минут)
Ремонтопригодность	Практически не поддаются ремонту	Возможно многократное переплавление
Устойчивость к химии	Высокая	Средняя
Примеры	Эпоксидные, фенолформальдегидные, полиэфирные смолы	Полиамиды, полипропилен
Типичные области применения	Авиация, судостроение, автоспорт	Массовое производство, вторичная переработка

Технологии производства волокнистых композиционных материалов являются определяющим фактором их свойств, эксплуатационных характеристик и стоимости. На практике применяется множество методов, выбор которых зависит от типа матрицы, вида армирующего волокна, формы изделия и объёмов производства.

Одним из наиболее распространённых методов является намотка на оправку. Этот способ применяется преимущественно при изготовлении цилиндрических и сферических изделий – таких как трубы, баллоны высокого давления, обечайки ракет и сосуды. Волокна наматываются на форму в строго заданном направлении с последующим пропитанием связующим веществом. После отверждения композит приобретает прочную структуру [9].

Другой широко используемый метод – формование под давлением или прессование. В этом случае предварительно подготовленные армирующие

заготовки укладываются в пресс-форму и заливаются смолой. Затем под действием температуры и давления происходит полимеризация матрицы и формирование изделия. Этот способ особенно подходит для серийного производства деталей с высокой точностью геометрии.

Метод вакуумной инфузии получил широкое распространение в судостроении и аэрокосмической отрасли. Армирующий материал укладывается в форму, после чего через вакуумный мешок в него «втягивается» связующее. Данный метод обеспечивает равномерное распределение смолы, отсутствие пузырей и дефектов, а также хорошую адгезию между компонентами.

Для производства листовых панелей и крупных плоских деталей используется метод ручной выкладки. Это сравнительно простой и универсальный способ, при котором слои волокон последовательно укладываются вручную, пропитываются смолой и уплотняются. Несмотря на низкую производительность и зависимость от человеческого фактора, метод остаётся популярным в условиях мелкосерийного производства и в ремонте [10].

Современные технологии, такие как 3D-принтинг с композитными нитями, автоматизированная укладка волокон (AFP) и лазерная фиксация армирующих нитей, открывают новые горизонты для проектирования и изготовления сложных конструкций. Они позволяют изготавливать детали сложной формы с высокой точностью и повторяемостью, что особенно актуально в авиастроении и робототехнике.

Заключение: композиционные материалы, армированные волокнами, представляют собой перспективное направление в области материаловедения и инженерии. Благодаря уникальному сочетанию прочности, лёгкости, устойчивости к агрессивным воздействиям и возможности адаптации свойств под конкретные задачи, они находят широкое применение в различных отраслях – от авиации до медицины. Современные исследования и технологии открывают новые горизонты для разработки более эффективных, экологичных и интеллектуальных композитов, что подтверждает их ключевую роль в будущем высокотехнологичного производства.

Библиографический список

1. Григорьев, А. Н. Волокнистые композиционные материалы: теория и практика / А. Н. Григорьев, Е. П. Селиванов. — Москва: Машиностроение, 2023. 312 с.

2. Николаев, В. А. Армированные полимеры: структура, свойства, применение: учебное пособие / В. А. Николаев, Т. Р. Лебедев. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. 248 с.

3. Смирнова, И. В. Композиты на основе углеродных волокон / И. В. Смирнова. — Новосибирск: Наука, 2020. 196 с.

4. Иванова, Л. П. Базальтовые волокна и их применение в строительстве: монография / Л. П. Иванова, Д. М. Артемьев. — Екатеринбург: УрФУ, 2021. 185 с.

5. Чернышёв, К. А. Технологии производства композиционных материалов / К. А. Чернышёв. — Казань: КГТУ, 2024. — 227 с.

6. Елисеева, М. Г. Экологические аспекты использования композитов / М. Г. Елисеева. Томск: ТПУ, 2023. 142 с.

7. Коррозионная стойкость титана, алюминия / e-him / [Электронный ресурс] // e-him: [сайт]. URL: https://e-him.ru/?page=dynamic&section=9&article=1333

8. Аддитивные технологии: настоящее и будущее / conf.viam / [Электронный ресурс] // conf.viam: [сайт]. URL: https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1417.pdf

9. Материалы нового поколения / viam / [Электронный ресурс] // viam: [сайт]. URL: https://viam.ru/interview/3570

10. Перспективные материалы и технологии / spbu / [Электронный ресурс] // spbu: [сайт]. URL: https://nanomat.spbu.ru/ru/konferentsii.html

© Макеенко Л.И., 2026

УДК 621.43

А.А. МАМЕДОВ
nvgaxbgscj@gmail.com
Науч. руководов. – ассистент К.В. КОНЕВА

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШАТУНА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В УСЛОВИЯХ РАБОЧИХ НАГРУЗОК

Аннотация: исследовано напряженно-деформированное состояние шатуна двигателя для оценки его работоспособности в условиях воздействия эксплуатационных нагрузок. Проведен анализ распределения напряжений и деформаций при действии знакопеременных механических нагрузок (сжатие от давления газов, растяжение от сил инерции) с учетом геометрических особенностей и концентраторов напряжений.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания (ДВС); шатун; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов, температура.

В ДВС возвратно-поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение коленчатого вала посредством кривошипно-шатунного механизма (КШМ) [1]. В состав КШМ входят: подвижные детали (поршни, кольца, пальцы, шатуны, коленвал, маховик) и неподвижные (блок цилиндров, картер, гильзы). Связующим звеном между поршнем и коленчатым валом является шатун.

Современное двигателестроение предъявляет повышенные требования к надежности и долговечности компонентов силовых установок. Шатун как ключевой элемент кривошипно-шатунного механизма оказывает существенное влияние на передачу газовых нагрузок от поршня к коленчатому валу. В процессе эксплуатации он подвергается комплексному воздействию знакопеременных нагрузок сжатия и растяжения, инерционных сил, изгибающих моментов и температурных полей (особенно в дизельных двигателях), что обуславливает необходимость детального исследования его напряженно-деформированного состояния (НДС) [3].

Особое значение имеет анализ распределения напряжений в местах концентрации — в зоне галтелей шатунных головок, а также в переходной зоне между стержнем и головками. Недостаточно строгая оценка НДС и условий прочности в этих зонах при проектировании может послужить причиной преждевременного усталостного разрушения высоконапряженных конструкций, что часто проявляется в виде характерных трещин.

Численные методы расчета, в частности метод конечных элементов (МКЭ), позволяют детально исследовать НДС сложных инженерных конструкций. Моделирование шатуна требует учета взаимного влияния механических факторов (давление газов, силы инерции, запрессовка втулки), геометрической нелинейности при продольном изгибе, а также корректного описания поведения материалов в циклических режимах нагружения [2,4]

Целью исследования является анализ напряженно-деформированного состояния шатуна одноцилиндрового ДВС и оценка его усталостной прочности и работоспособности при эксплуатационных нагрузках.

Объектом исследования является шатун одноцилиндрового поршневого двигателя внутреннего сгорания. Конструктивно шатун представляет собой стержневой элемент, соединяющий поршень с коленчатым валом и передающий переменные по знаку и величине газовые и инерционные нагрузки.

Верхняя головка выполнена неразъёмной, сплошной. Внутренний посадочный диаметр под поршневой палец или подшипник скольжения составляет $\emptyset 27{,}6$ мм (радиус $R = 13{,}80$ мм). Наружный диаметр головки косвенно определяется через радиус $R = 9{,}20$ мм, характеризующий плавный переход от стержня к головке. Наличие галтели радиусом $R9{,}20$ мм служит для снижения концентрации напряжений в зоне сопряжения стержня с верхней головкой.

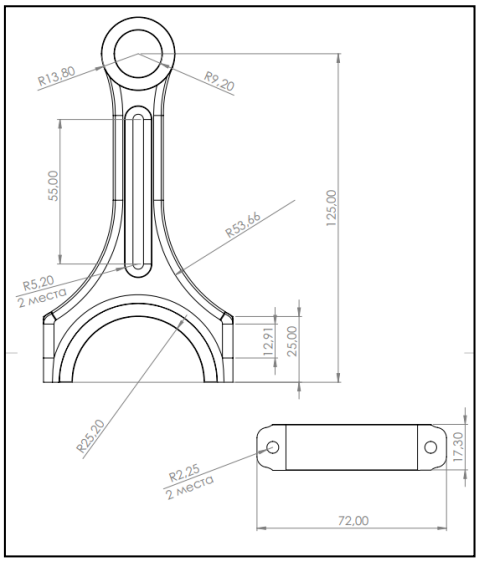


Рис. 1. Чертеж шатуна

Стержень шатуна имеет переменное сечение. Толщина стержня в наиболее узком месте (по размерам 25,00 мм и 12,91 мм) соответствует, предположительно, высоте и ширине двутаврового сечения, характерного для штампованных шатунов. Конкретная форма сечения (двутавровое, коробчатое или прямоугольное) требует уточнения по трёхмерной модели. Переходы от стержня к головкам выполнены с галтелями, обеспечивающими плавное изменение жёсткости.

Нижняя головка является разъёмной и состоит из шатуна и съёмной крышки. Внутренний посадочный диаметр под шатунную шейку коленчатого вала составляет $\emptyset 50{,}4$ мм (радиус $R = 25{,}20$ мм). Наружный диаметр нижней головки равен $\emptyset 107{,}32$ мм (радиус $R = 53{,}66$ мм). Толщина стенки нижней головки, таким образом, составляет $(53{,}66 - 25{,}20) = 28{,}46$ мм, что обеспечивает необходимую жёсткость в зоне действия знакопеременных растягивающих нагрузок.

Разъём нижней головки ориентирован перпендикулярно оси стержня. В зоне разъёма предусмотрены галтели радиусом R 5,20 мм («2 места»), снижающие концентрацию напряжений у основания крышки.

В качестве основного материала была выбрана сталь со следующими механическими характеристиками:

Таблица 1

Механические свойства стали

Материал	Плотность ($кг/см^3$)	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Коэффициент линейного расширения, $°C^{-1}$
Сталь Конструкционная	7850	200	0,3	250	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$

Температурный режим работы шатуна определяется условиями теплообмена внутри картера двигателя. На поверхности работающего двигателя температура удерживается в пределах 65–90 °C, однако непосредственно шатун, омываемый масляным туманом и воспринимающий тепло от поршня и шатунной шейки, работает при более высоких температурах. В ходе расчётов установлено, что распределение температур в теле шатуна варьируется в диапазоне от 120 до 147°C.

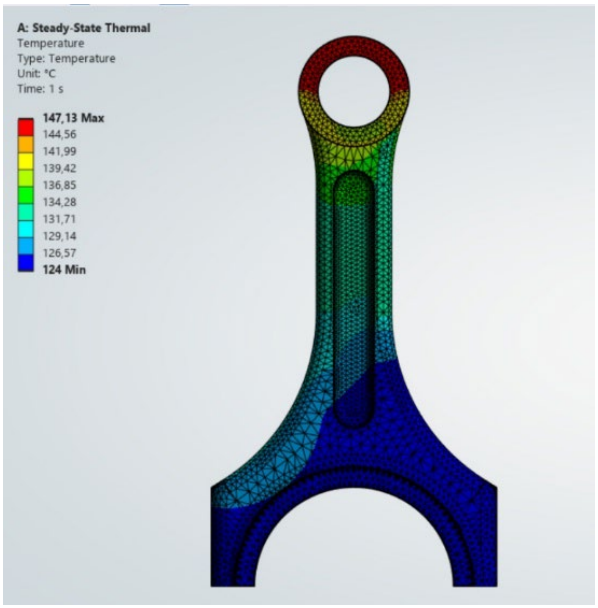


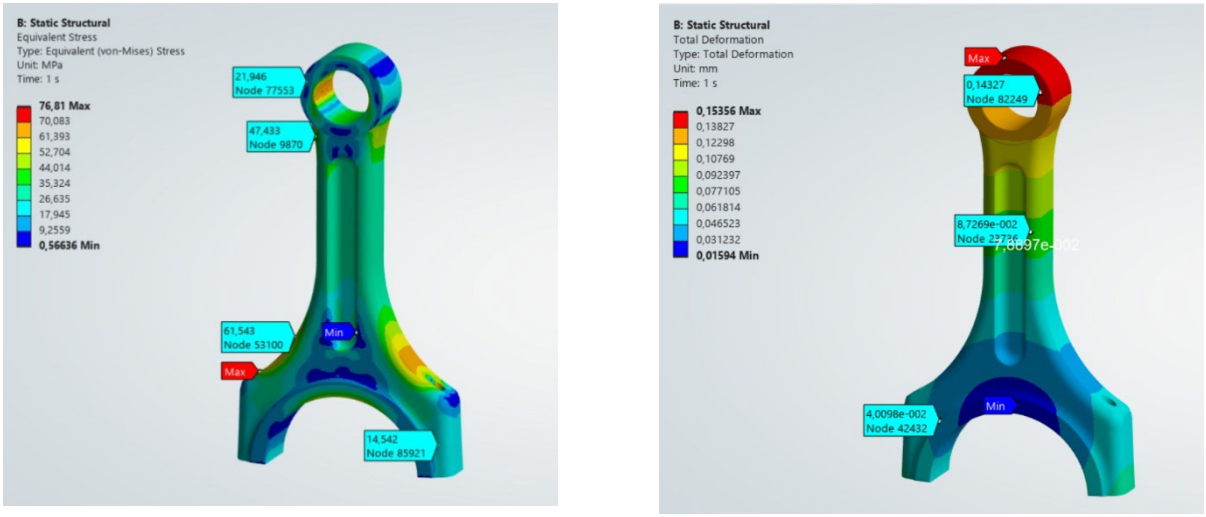
Рис. 2. Распределение температур по шатуну

Основным видом механической нагрузки является суммарное усилие, действующее на поршневую и кривошипную головки шатуна. Это усилие представляет собой разницу между силой давления газов на поршень и силой инерции поступательно движущихся масс. В результате расчётов для заданного одноцилиндрового бензинового двигателя с диаметром цилиндра 90 мм были получены следующие значения:

- максимальная сжимающая нагрузка – 16162 Н;
- максимальная растягивающая нагрузка – 22010 Н.

Важно отметить, что шатун работает в условиях циклических нагрузок – за каждый оборот коленчатого вала знак и величина усилия, действующего на него, многократно изменяются.

По результатам прочностных расчетов шатуна наибольшие эквивалентные напряжения наблюдаются в галтельных переходах шейки шатуна к местам болтовых креплений (рис. 3). Наибольшие перемещения возникают в его головке. Наибольшие деформации достигают 77 МПа, перемещения – 0,15 мм.



а *б*

Рис. 3. Распределение полных напряжений и перемещений в конструкции: (*а*)- напряжения, (*б*)- перемещения

Выполнен расчёт усталостной прочности шатуна. Минимальное значение коэффициента запаса прочности – 2,2445 (рис. 4).

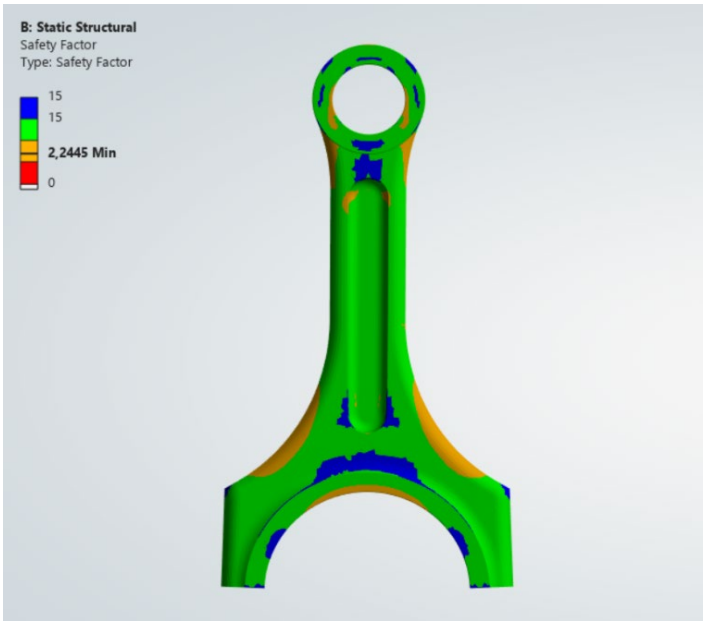


Рис. 4. Коэффициент запаса прочности

Разработана расчётная модель шатуна одноцилиндрового двигателя внутреннего сгорания, адекватно описывающая его геометрические особенности. Модель учитывает совместное воздействие механических нагрузок (сжатие от давления газов, растяжение от сил инерции) и температурных полей в диапазоне 120–147 °C.

Методом конечных элементов проведён анализ напряжённо-деформированного состояния конструкции. Установлено, что максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу возникают в галтельных переходах кривошипной головки шатуна, в зоне перехода стержня к головкам, а также в

местах болтовых креплений крышки нижней головки. Значения напряжений не превышают допустимых пределов для используемого материала (сталь конструкционная). Наибольшие деформации достигают 77 МПа, максимальные перемещения составляют 0,15 мм и наблюдаются в области верхней (поршневой) головки шатуна.

Выполнена оценка усталостной прочности с учётом циклического характера нагружения (знакопеременные нагрузки растяжения и сжатия, действующие за каждый оборот коленчатого вала). Минимальный коэффициент запаса прочности составляет 2,24, что превышает нормативные требования для деталей кривошипно-шатунного механизма и подтверждает работоспособность шатуна в условиях эксплуатационных нагрузок.

Библиографический список

1. Колчин А.И., В.П. Демидов. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. Учеб. Пособие для вузов – 4-е изд., стер. – М.: Высш шк., 2008 – 496 с.: ил.
2. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах конструкций // М.: Наука, 1996. – 240 с.
3. Биргер И.А. Прочность и надежность машиностроительных конструкций // Избранные труды. Уфа, 1998. 350 с.
4. Бирюк В.В., Горшкалев А.А., Каюков С.С., Сайгаков Е.А. Расчёт на прочность элементов ДВС с помощью ANSYS с учётом тепловых процессов в камере сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14, № 2. – С. 35-43.

© Мамедов А.А., 2026

УДК 620.9

М.В. МИХЕЕВА
maya.mikheeva@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: данная статья посвящена исследованию перспективных направлений развития композиционных материалов, которые играют ключевую роль в современных технологиях благодаря их уникальным свойствам: высокой прочности, лёгкости и адаптивности.

Ключевые слова: композиционые материалы; матрица и армирующие элементы; свойства композиционных материалов; углепластик; нанокомпозиты; биокомпозиты; стеклопластик; устойчивое развитие.

Современные вызовы, связанные с изменением климата, ростом потребления ресурсов и необходимостью технологической модернизации, определяют стратегическое значение развития конструкционных материалов. Такие материалы должны сочетать в себе высокую прочность, лёгкость, устойчивость к внешним воздействиям и экологическую безопасность. В связи с этим наблюдается сдвиг в сторону многофункциональных и интеллектуальных решений, основанных на последних достижениях в области нанотехнологий, биоинженерии и цифрового моделирования.

Нанокомпозиты представляют собой композиционные материалы, содержащие наноразмерные наполнители (до 100 нм), такие как графен, углеродные нанотрубки, нанокристаллы металлов и оксидов. Благодаря высокой удельной поверхности и квантовым эффектам нанонаполнители радикально улучшают механические, электрические и термические свойства матриц [1].

Применение:

– в авиации: увеличение усталостной прочности и снижение массы конструкций;

– в электронике: гибкие дисплеи и сенсорные панели;

– в медицине: антибактериальные покрытия и носители лекарств.

Эксперименты показывают, что добавление 0,1–0,5% графена в полимерную матрицу увеличивает прочность на 20–30%, сохраняя пластичность материала [2].

Смарт-материалы способны изменять свои свойства в ответ на внешние воздействия – температуру, давление, магнитное поле. Эти материалы находят применение в системах мониторинга, адаптивных конструкциях и медицинских устройствах.

В качестве компонент смарт-материалов используются:

– пьезоэлектрические волокна в авиационных конструкциях позволяют отслеживать деформации в режиме реального времени;

– амортизаторы с магнитореологической жидкостью в автомобилях регулируют жёсткость подвески;

– протезы с эффектом памяти формы (на основе сплава NiTi) адаптируются к анатомическим особенностям пациента [3].

Интеллектуальные композиты открывают путь к созданию самовосстанавливающихся материалов, что значительно продлевает срок службы изделий.

Экологический аспект приобретает особую значимость в эпоху циркулярной экономики. Биокомпозиты, изготавливаемые из возобновляемых источников (льняное, джутовое волокно, PLA), становятся альтернативой

традиционным конструкционным материалам, особенно в упаковке, строительстве и транспорте. Такие компании, как Bcomp и Danone, внедряют биокомпозиты в производство автомобильных панелей и пищевой упаковки. Это позволяет снизить вес изделий и ускорить их разложение после утилизации (до 6 месяцев в промышленных условиях) [4].

Для авиации, космонавтики и ядерной энергетики необходимы материалы, устойчивые к высоким температурам, радиации и агрессивной химической среде. Керамические матричные композиты (CMC) на основе карбида кремния (SiC) или оксида алюминия выдерживают температуру до 1600°C и применяются в теплозащитных покрытиях ракет [5]. Национальная лаборатория Ок-Ридж разработала полиимидные композиты с графеном, сохраняющие свойства при радиационном облучении до 10 МГр. Это позволяет использовать их в реакторных установках и спутниковых системах [6].

Развитие искусственного интеллекта (ИИ), топологической оптимизации и 3D-печати позволяет ускорить разработку новых материалов и минимизировать производственные издержки. Цифровые двойники, созданные с помощью ИИ, позволяют моделировать поведение материала в реальных условиях, экономя ресурсы и время на испытания. Интеграция с аддитивным производством позволяет создавать градиентные материалы с переменными свойствами в одной структуре, адаптированной под конкретные нагрузки.

Перспективные направления в области конструкционных материалов указывают на кардинальные изменения в подходах к проектированию и применению материалов. Композиты нового поколения обладают уникальными характеристиками, сочетающими прочность, адаптивность и экологичность. Их развитие тесно связано с внедрением цифровых технологий, нанотехнологий и биоинженерии. В ближайшие десятилетия они станут основой для создания интеллектуальной и устойчивой инфраструктуры будущего [7].

Одной из ключевых задач на ближайшее будущее становится снижение себестоимости производства инновационных конструкционных материалов. Несмотря на очевидные преимущества, многие из них – особенно нанокомпозиты и смарт-материалы – остаются менее доступными с экономической точки зрения по сравнению с традиционными аналогами. Однако развитие масштабируемых производственных процессов, использование возобновляемого сырья и внедрение цифровых методов управления производством способствуют устойчивому снижению затрат и повышению доступности высокотехнологичных решений [8].

Не менее важным направлением является совершенствование процессов переработки и утилизации. Большинство современных композитов, особенно слоистые и многофазные материалы, имеют ограниченную пригодность к повторному использованию из-за сложности их структуры. Ведутся активные исследования в области химической переработки и повторного использования армирующих волокон без потери их свойств.

Таким образом, перспективы развития конструкционных материалов напрямую связаны с необходимостью создания более интеллектуальных,

экологичных и адаптивных решений, способных обеспечить устойчивое технологическое развитие общества. Прорывы в этой области позволят повысить эффективность промышленного производства, улучшить качество жизни и ответить на глобальные вызовы современности.

Библиографический список

1. Каллистер В.Д. Материаловедение и инженерия: Введение. — 10-е изд. — М.: Wiley, 2018. — 992 с.
2. Чанг Д.Д.Л. Композитные материалы: наука и применение. — 2-е изд. — Лондон: Спрингер, 2010. — 358 с.
3. Патель С., Смит Дж. Достижения в области интеллектуальных композитов: обзор // Журнал композитных материалов. – 2023. – Т. 57, № 2. – С. 123–135.
4. Петров А.А. Новые направления в развитии композиционных материалов // Журнал материаловедения. – 2022. – № 3. – С. 45–52.
5. Морозов Е.В. Композиционные материалы в авиации: современные тенденции // Вестник МАИ. – 2021. – Т. 28, № 4. – С. 67–75.
6. ISO 10350-1:2017. Пластмассы — получение и представление сопоставимых одноточечных данных. Ч. 1: Формовочные материалы. — Женева: ISO, 2017.
7. Кэмпбелл Ф.К. Конструкционные композитные материалы. — Materials Park, OH: ASM International, 2010. — 612 с.
8. Composite World. Перспективы отрасли композиционных материалов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.compositesworld.com (дата обращения: 01.11.2023).

© Михеева М.В., 2026

УДК 629.7-021

Д.Р. МИХАЙДАРОВА, А.А. НАСРЕТДИНОВА
nsrtdnva@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация: в данной работе рассмотрены экономические преимущества и проблемы, связанные с применением композиционных материалов в авиационной промышленности. Анализируются ключевые факторы, влияющие

на себестоимость производства, эксплуатационные расходы и общую экономическую эффективность композитов по сравнению с традиционными металлическими сплавами.
Ключевые слова: композиционные материалы, авиационная промышленность, экономическая эффективность, себестоимость, эксплуатационные расходы, инновационные технологии.

Современная авиационная промышленность активно внедряет композиционные материалы (КМ) в конструкции летательных аппаратов. Это обусловлено их превосходными механическими характеристиками при меньшей массе по сравнению с алюминиевыми и титановыми сплавами. Однако широкое применение композитов сдерживается высокой стоимостью производства и сложностью обработки. В данной статье исследуются экономические аспекты использования КМ, включая анализ затрат на разных этапах жизненного цикла авиационной техники.

КМ обладают рядом экономических преимуществ, которые будут рассмотрены в данной статье более детально. Применение этих ресурсов позволяет снизить массу конструкции планера современных авиалайнеров на 20-40% по сравнению с традиционными металлическими решениями. Это достигается за счет превосходных механических характеристик современных углепластиков и стеклопластиков, сочетающих высокую прочность с малым весом.

Экономический эффект от снижения массы проявляется в нескольких аспектах:

1) Экономия топлива достигается за счет снижения массы конструкции транспортных средств. Например, практический опыт показывает, что замена традиционных алюминиевых сплавов на углепластики позволяет уменьшить массу конструкции на 20-30%. Это сокращение массы, в свою очередь, приводит к значительной экономии топлива, так как менее тяжелые транспортные средства требуют меньших затрат энергии для передвижения. Для современных широкофюзеляжных самолетов, таких как *Boeing* 787 или *Airbus A*350, это означает сокращение расхода авиатоплива на 15-20% по сравнению с аналогичными моделями предыдущего поколения. Согласно исследованиям *Boeing*, каждый процент снижения массы воздушного судна приводит к уменьшению расхода топлива на 0,75-1,2%. Например, *Boeing* 787 *Dreamliner*, в конструкции которого композиты составляют около 50%, демонстрирует на 20% меньший расход топлива по сравнению с аналогичными по вместимости самолетами предыдущего поколения [1].

2) Снижение собственного веса конструкции позволяет либо увеличить полезную нагрузку (пассажиры/груз), либо продлить дальность полета без дозаправки. Это создает так называемый "каскадный эффект", когда экономия на одном компоненте конструкции приводит к дополнительным преимуществам в других системах самолета.

3) Во многих аэропортах размер сборов рассчитывается исходя из максимальной взлетной массы воздушного судна.

Композиты демонстрируют принципиально иные характеристики износа по сравнению с металлами. Коррозионная стойкость композитов устраняет необходимость в дорогостоящих антикоррозионных покрытиях и сокращает частоту соответствующих проверок. В отличие от металлических конструкций, которые требуют регулярных проверок на коррозию и специальной антикоррозионной обработки, композитные элементы практически не подвержены коррозии. Это позволяет значительно сократить затраты на техническое обслуживание и увеличить межремонтные интервалы. По данным ведущих авиакомпаний, эксплуатационные расходы на самолеты с композитными конструкциями оказываются на 25-30% ниже по сравнению с традиционными алюминиевыми аналогами.

Перечисленные факторы приводят к существенному снижению затрат на техническое обслуживание. По данным *Lufthansa Technik*, эксплуатационные расходы для композитных воздушных судов на 15-25% ниже, чем для металлических аналогов.

Таблица 1

Снижение затрат на техническое обслуживание

Параметр	Алюминевые конструкции	Композитные конструкции	Экономия
Частота проверок коррозии	500-800 летных часов	Не требуется	100%
Затраты на антикоррозийную обработку	$15-25 тыс./год	$0	100%
Ресурс до капитального ремонта	15-20 лет	25-30 лет	+40%

Пример из авиации: крыло *Airbus A*350 *XWB*, показанное на рис. 1, выполненное из инновационного армированного углеродным волокном пластика, что обеспечивает ему легкость и прочность, а также способствует улучшению аэродинамических характеристик самолета.

Рис. 1. Крыло *Airbus A*350 *XWB*, изготовленное из армированного углеродным волокном пластика

Несмотря на очевидные эксплуатационные преимущества, широкое применение композиционных материалов в авиастроении сталкивается с рядом существенных экономических ограничений. Основным из них является высокая себестоимость производства. Стоимость углеродного волокна, являющегося основным армирующим компонентом современных авиационных композитов, остается на уровне 25-35 долларов за килограмм, что в несколько раз превышает стоимость алюминиевых сплавов. При этом следует учитывать, что в конечную стоимость композитных конструкций входят также затраты на матричные материалы, специальное оборудование и сложные технологические процессы.

Результаты сравнительного анализа композиционных материалов, используемых в авиационной промышленности [5], приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ стоимости материалов

Материал	**Цена $/кг (2024)**	**Динамика цен**
Углеродное волокно (T700)	25-35	-3% ежегодно
Эпоксидные смолы	8-12	+1-2% ежегодно
Алюминий 7075	4-6	Стабильно

Согласно [5] сформирован прогноз снижения цен на основные компоненты композиционных материалов для авиационной промышленности, результаты которого приведены в табл. 3.

Таблица 3

Прогноз снижения цен на ключевые компоненты

Год	Углеродная волокно, $/кг	Доля КМ в новых лайнерах
2025	28-32	55-60%
2030	20-25	70-75%
2035	15-18	80-85%

Особенно значительную долю в себестоимости занимают процессы автоклавного отверждения и ручной укладки. Автоклавная обработка крупногабаритных авиационных деталей требует значительных энергозатрат и использования дорогостоящего оборудования. Ручная укладка углеродных волокон, несмотря на активное внедрение автоматизированных систем, по-прежнему остается трудоемким процессом, требующим высокой квалификации персонала и строгого контроля качества.

Еще одним важным экономическим фактором являются затраты на сертификацию композитных конструкций. Разработка методик неразрушающего контроля, проведение цикла испытаний на усталостную прочность и подтверждение соответствия строгим авиационным стандартам требуют значительных инвестиций и времени. По оценкам экспертов, затраты на сертификацию новых композитных решений могут составлять до 20% от общего бюджета проекта.

В последние годы отрасль демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению стоимости композиционных материалов, что связано с несколькими ключевыми факторами. Во-первых, наблюдается постоянное совершенствование производственных технологий. Внедрение автоматизированных систем укладки волокон (*AFP*) и безавтоклавных методов отверждения (*OOA*) позволяет существенно сократить трудозатраты и энергопотребление. Современные системы автоматизированной укладки обеспечивают скорость производства, в 3-5 раз превышающую традиционные ручные методы, при одновременном снижении процента брака.

Во-вторых, эффект масштаба начинает играть все более значительную роль. По мере увеличения объемов производства углеродного волокна и других компонентов композитов наблюдается постепенное снижение их себестоимости.

Особый интерес представляют разработки в области альтернативных композиционных материалов. Биокомпозиты на основе натуральных волокон, хотя и уступают по прочностным характеристикам углепластикам, предлагают значительные экономические преимущества, особенно для второстепенных элементов конструкции. Развитие технологий рециклинга композитных материалов также открывает новые возможности для снижения экологических издержек и стоимости жизненного цикла.

Анализ экономических аспектов применения композиционных материалов в авиационной промышленности показывает сложную, но в целом

позитивную динамику. Несмотря на высокие первоначальные затраты, композиты демонстрируют убедительные преимущества с точки зрения совокупной стоимости владения. По мере совершенствования производственных технологий и увеличения объемов выпуска ожидается дальнейшее снижение себестоимости, что будет способствовать их более широкому распространению. Например, уже используется первый российский роботизированный комплекс укладки композитного волокна представляет собой инновационное решение, которое значительно повышает эффективность и точность производства композитных материалов в аэрокосмической и других отраслях [3]-[7].

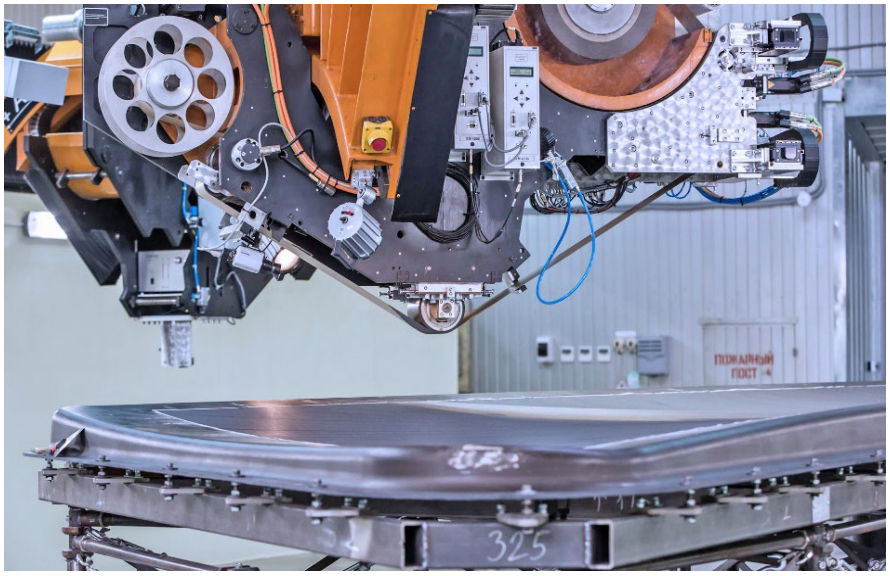


Рис. 2. Первый российский роботизированный комплекс укладки композитного волокна

Ключевым фактором успеха станет комплексный подход, сочетающий технологические инновации с оптимизацией производственных процессов и развитием инфраструктуры переработки. В долгосрочной перспективе композиционные материалы, вероятно, станут доминирующим конструкционным материалом в авиастроении, обеспечивая не только экономические выгоды, но и значительный экологический эффект.

Библиографический список

1. Зысин Л. В. Экономические преимущества композиционных материалов в авиации: учеб. пособие. – Санкт-Петербург: Изд.-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с.

2. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. – Москва: Машиностроение, 1988. – 211 с.

3. Сагитов И.Ф. Композиционные материалы в современном авиастроении // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы авиации и космонавтики». – Красноярск: СибГАУ им. М.Ф. Решетнева, 2017 г. – С. 42-51.

4. Моляков, В. Д. Повышение эффективности режимов работы газотурбинного двигателя / В. Д. Моляков, М. И. Осипов, Р. З. Тумашев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2006. № 3– С. 102-111.
5. Попов, Г. М. Композиционные материалы: анализ стоимости и перспективные тенденции / Г. М. Попов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(34) – 2012. – С. 5-9.
6. Исследование Airbus, посвященное динамике затрат на производство композитов // Руководство пользователя. Режим доступа: https://www.gasturb.com
7. International Journal of Aviation Economics // Оценка жизненного цикла стоимости композитных авиационных конструкций. Режим доступа: https://www.inderscience.com/jhome.php?jcode=ijam

© Насретдинова А.А., Михайдарова Д.Р., 2026

УДК 678(075)

Р.А. МКРТЫЧЕВ
i@mazrakl.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЖИДКОФАЗНЫМИ СПОСОБАМИ

Аннотация: в условиях растущих требований к качеству и эксплуатационным характеристикам металлических материалов жидкофазные методы их получения приобретают особую актуальность. Данная работа посвящена анализу современных жидкофазных технологий, включая литьё, электрохимическое осаждение и газофазное напыление, с акцентом на их промышленное применение и перспективы развития. На основе последних исследований рассмотрены инновационные подходы к модификации жидкофазных методов, такие как использование наноматериалов и гибридных технологий. Результаты исследования демонстрируют значительный потенциал оптимизации существующих методов для аэрокосмической, автомобильной и электронной промышленности.
Ключевые слова: металлические материалы, жидкофазные методы, литьё, электрохимическое осаждение, газофазное напыление, наноструктурирование, механические свойства, промышленное применение.

Современные отрасли промышленности, включая авиастроение, энергетику и микроэлектронику, предъявляют повышенные требования к металлическим материалам. Жидкофазные методы их получения, такие как литьё, электрохимическое осаждение и газофазное напыление, позволяют не только достигать заданных характеристик, но и минимизировать производственные затраты. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки экономичных и экологически безопасных технологий, способных заменить традиционные методы. В статье анализируются последние достижения в этой области, включая применение наноматериалов и компьютерного моделирования для оптимизации процессов.

Рассмотрим основные жидкофазные методы и их характеристики.

Литьё – это наиболее распространённый метод, используемый для получения крупногабаритных деталей с высокой точностью. В процессе литья ключевыми являются следующие параметры: температура расплава; скорость охлаждения; состав формовочных материалов. Преимуществами процесса литья состоят в возможности получения сложных геометрических форм и высокая производительности, а недостатки этой технологии заключаются в риске образования дефектов (поры, трещины) и имеющимся ограничениям по химическому составу сплавов.

На рис. 1 представлена схема процесса литья под давлением.

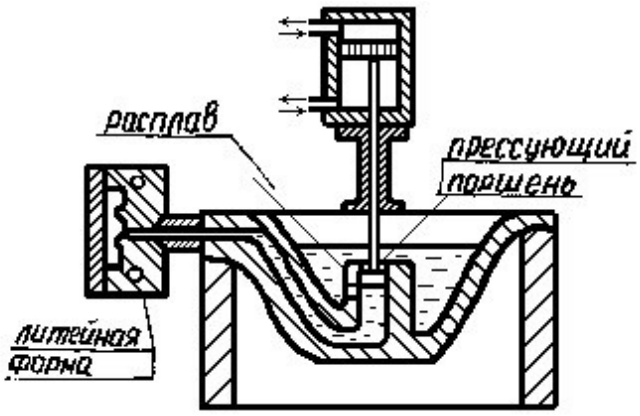


Рис. 1. Схема литья под давлением
1 – форма, 2 – расплав, 3 – поршень

Электрохимическое осаждение – этот метод применяется для создания тонкоплёночных покрытий с уникальными свойствами, такими как высокая электропроводность и коррозионная стойкость. Критическими параметрами являются: плотность тока; состав электролита; температура процесса. Данный метод применятся в микроэлектронике при производстве проводящих слоев и при изготовлении защитных покрытий для деталей машин.

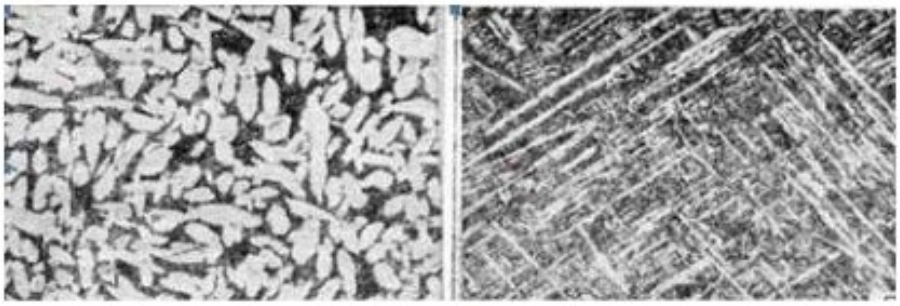
Газофазное напыление – метод, который используется для нанесения покрытий на тугоплавкие материалы. Его ключевые особенности заключаются в высокой адгезии и возможности работы с тугоплавкими металлами, такими

как вольфрам и молибден. Данная технология применятся при изготовлении термобарьерных покрытий для авиационных двигателей.

Также при анализе получения композиционных материалов с металлической матрицей необходимо учитывать влияние технологических параметров на свойства материалов. Рассмотрим свойства материалов, полученных жидкофазными методами, определяются следующими факторами:

1. Скорость охлаждения: влияет на размер зерна и механическую прочность.
2. Температура процесса: определяет степень диффузии и формирование фаз.
3. Состав среды: обеспечивает химическую стойкость и электрофизические свойства.

На рис. 2 показана микроструктура алюминиевой бронзы полученного методом литья.



а *б*

Рис. 2. Микроструктура алюминиевой бронзы (×200)
а — медленное охлаждение, б — быстрое охлаждение

Промышленное применение и перспективы композиционных материалов с металлической матрицей можно рассмотреть на примере применения их в области авиастроения. На рис. 3 показаны лопатки турбины, выполненные из таких материалов.

Рис. 3. Лопатка турбины, полученная методом литья

В автомобилестроении используются для изготовления деталей двигателей, а в электронике при создании проводящих дорожек и контактов.

В перспективе планируется широкое использование гибридных технологий, которые заключаются в сочетании литья и 3D-печати, а также наноструктурирование, за счет которого будут улучшаться механические и термические свойства. При этом все виды технологических процессов получения этих материалов будут экологически чистыми, со сниженными выбросами и энергопотреблением.

Жидкофазные методы получения металлических композиционных материалов продолжают развиваться, отвечая требованиям современных отраслей промышленности. Внедрение нанотехнологий и компьютерного моделирования открывает новые возможности для оптимизации процессов и улучшения характеристик материалов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение себестоимости и повышение экологичности технологий.

Библиографический список

1. Петров А.В. Технологии литья металлов: учеб. пособие. – Москва: Металлургия, 2020. – 256 с.
2. Иванов С.К. Электрохимические методы в материаловедении. – СПб.: Химия, 2019. – 320 с.
3. Сидоров Д.Е. Газофазные технологии напыления. – Москва: Машиностроение, 2021. – 180 с.
4. Lee H. Advanced Materials Processing. – Springer, 2022. – 150 p.

© Мкртычев Р.А., 2026

УДК 691.175.5/8.

К.С. НУРИСЛАМОВ
nurislamov.k@yandex.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ

Аннотация: данная работа посвящена современным методам анализа структуры и свойств полимерных материалов и композитов (спектроскопия, микроскопия, механические и химические методы), которые необходимы для их разработки и применения. Подчеркивается важность комплексного подхода, сочетающего различные методы для точной оценки взаимодействий и оптимизации свойств полимерных систем. Рассмотрены перспективы исследований: нанокомпозиты,

биополимеры, многослойные системы – инновационные материалы с улучшенной прочностью, легкостью, коррозионной стойкостью и экологичностью.
Ключевые слова: полимерные материалы, композиты, анализ структур, спектроскопия, строительство, инновационные материалы, биополимеры, комплексный подход, многослойные системы, оптимизация свойств.

Современные полимерные материалы и композиты (легкость, прочность, универсальность) важны в автомобилестроении, строительстве, медицине, электронике. Для успешного применения необходимо понимание структуры и свойств, определяющих эффективность в конкретных условиях. Анализ структуры (молекулярная архитектура, кристалличность, взаимодействие компонентов) позволяет предсказывать поведение под нагрузками. Изучение свойств (механические, термические, электрические) критично для дизайнеров и инженеров. Понимание влияния температуры, влажности и нагрузок позволяет создавать надежные продукты. Современные методы анализа - высокотехнологичны и точны, предоставляют детальные данные для научных исследований и разработки новых материалов, открывая новые горизонты для инноваций. Исследование методов анализа структуры и свойств - неотъемлемая часть материаловедения, способствующая улучшению качества жизни и развитию передовых технологий.

Современные методы анализа структуры и свойств полимерных материалов и композитов разнообразны и охватывают широкий спектр технологий. Рассмотрим их более подробно.

Спектроскопия – это мощный инструмент для анализа структуры и свойств полимерных материалов и композитов. Существует несколько основных типов спектроскопии:

1. Инфракрасная спектроскопия (ИК): основана на поглощении инфракрасного излучения молекулами, что позволяет анализировать функциональные группы (например, -OH, -COOH) в полимерах. Метод *FTIR* обеспечивает быстрое получение спектров для твердых, жидких и газообразных образцов.

2. Раман-спектроскопия: использует эффект Рамана для анализа молекулярной структуры полимеров и взаимодействий в композитах. Применяется лазерный источник света для получения высококачественных спектров.

3. Ультрафиолетовая спектроскопия (УФ): изучает поглощение ультрафиолетового света молекулами, что позволяет анализировать электронные переходы и определять концентрацию полимеров в растворе.

4. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР): основан на взаимодействии ядер атомов с магнитным полем, что позволяет исследовать молекулярную структуру полимеров и их взаимодействия.

Каждый метод предоставляет уникальную информацию о материалах, позволяя оптимизировать их состав и характеристики для различных

применений. Сочетание методов дает более полное представление о поведении полимеров.

Микроскопия – важный метод анализа, предоставляющий визуальную информацию о морфологии и структуре полимерных материалов и композитов. Существуют различные типы микроскопии:

1. Сканирующая электронная микроскопия (*SEM*): использует электронный луч для сканирования поверхности образца, позволяя получать изображения с увеличением до 1000000 раз. Применяется для исследования текстуры полимеров, анализа трещин и изменений в структуре.

2. Передающая электронная микроскопия (*TEM*): проходит через тонкий образец, обеспечивая разрешение до 0,1 нм. Используется для изучения кристаллической структуры и распределения наночастиц.

3. Атомно-силовая микроскопия (*AFM*): сканирует поверхность с помощью тонкого зонда, позволяя получать трехмерные изображения и анализировать механические свойства. Не требует специальной подготовки образцов.

4. Оптическая микроскопия: использует видимый свет для получения изображений с увеличением до 2000 раз. Подходит для изучения структуры полимеров на микроскопическом уровне.

Каждый метод микроскопии имеет свои преимущества и ограничения, и выбор зависит от задач исследования. Комбинирование методов позволяет получить более полное представление о материалах и их поведении, что способствует оптимизации полимерных систем.

Анализ механических свойств полимерных материалов и композитов действительно играет ключевую роль в их исследовании и разработке. Основные методы, используемые для оценки механических характеристик, включают:

1. Тестирование на растяжение: Позволяет определить предел прочности, модуль упругости и относительное удлинение. Эти параметры важны для понимания, как материал будет вести себя при растяжении.

2. Тестирование на сжатие: Используется для оценки прочности и деформации полимеров и композитов под сжимающими нагрузками. Это особенно важно для материалов, которые будут подвергаться сжимающим воздействиям в процессе эксплуатации.

3. Тестирование на изгиб: Определяет прочность на изгиб и модуль упругости в изгибе. Этот метод позволяет оценить, как материал будет вести себя при изгибе или нагрузках, действующих перпендикулярно его оси.

4. Тестирование на удар: Измеряет ударную вязкость материала, что помогает понять, как он будет реагировать на резкие нагрузки или удары.

5. Циклические нагрузки: Оценка усталостных свойств полимеров и композитов при многократных циклах нагружения и разгружения помогает предсказать срок службы изделия в условиях эксплуатации.

6. Вязкоупругие и вязкопластические свойства: Изучение поведения материалов под длительными нагрузками или в условиях высокой температуры позволяет понять их долговечность и стабильность.

Понимание этих механических характеристик позволяет оптимизировать состав полимеров и композитов, что приводит к улучшению их эксплуатационных свойств, таких как прочность, жесткость, устойчивость к деформациям и долговечность. Это особенно важно в таких отраслях, как автомобилестроение, строительство, электроника и медицинские технологии, где надежность материалов критична для безопасности и эффективности конечных изделий.

Химический анализ полимерных материалов и композитов важен для определения их состава, структуры и молекулярной массы, что критично для понимания их свойств. Рассмотрим основные методы анализа:

1. Хроматография. Газовая хроматография (ГХ): разделяет компоненты смеси по летучести. Применяется для определения летучих органических соединений и контроля чистоты полимеров. Водная экстракционная жидкостная хроматография (ВЭЖХ): использует жидкость для разделения компонентов по полярности. Применяется для анализа полимеров с высоким содержанием полярных групп.

2. Спектроскопия. Ультрафиолетовая-видимая (УФ-УФ) спектроскопия: измеряет поглощение света, что позволяет анализировать структуру полимеров и их концентрацию. Инфракрасная (ИК) спектроскопия: идентифицирует функциональные группы на основе поглощения инфракрасного излучения. Раман-спектроскопия: изучает молекулярные вибрации через рассеяние света, позволяя анализировать структуру и взаимодействия между компонентами.

3. Рентгеновская дифракция (XRD). Изучает кристаллическую структуру материалов через дифракцию рентгеновских лучей, позволяя определить степень кристалличности полимеров.

4. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Исследует молекулярную структуру через взаимодействие ядер атомов с магнитным полем, позволяя анализировать динамику молекул и состав смесей.

Таким образом, современные методы анализа, такие как спектроскопия, микроскопия и механическое тестирование, предоставляют исследователям инструменты для глубокого изучения полимерных материалов и композитов. Комплексный подход позволяет точно оценить их структуру и свойства, что важно для разработки новых материалов с уникальными характеристиками. Анализ механических свойств, химического состава и микроструктуры помогает понять влияние факторов, таких как температура и влажность, на характеристики полимеров. Это способствует оптимизации их свойств, включая прочность и термостойкость. Разработка новых полимеров требует инновационных решений. Современные методы анализа улучшают существующие материалы и создают новые с уникальными свойствами, применяемыми в автомобилестроении, авиации, медицине и электронике.

Таким образом, анализ полимерных материалов является динамично развивающейся областью, требующей инновационных подходов и открывающей новые возможности для науки и промышленности. Понимание уникальных свойств полимеров поможет создавать эффективные и устойчивые решения для современного мира.

Библиографический список

1. Инфракрасная спектроскопия: Lütjering, G., & Williams, J. C. (2003). Titanium. – Berlin: Springer. – С. 45-47
2. Раман-спектроскопия: Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. – М.: ВИЛС, 2009. – с. 5052
3. ЯМР: Каблов Е.Н. Материалы нового поколения для авиационной техники // Авиационная промышленность, 2016. с. 30-32
4. SEM: Белов Н.А., Таран И.В. Титан-алюминиевые интерметаллидные сплавы: перспективы развития. – С. 60-62
5. TEM: Гольдштейн Р.В., Литвинов А.В. Механика деформирования интерметаллидов. – С. 65-67
6. AFM: Сорокин Г.М., Евстигнеев А.В. Коррозионная стойкость титан-алюминиевых сплавов. – С. 70-72
7. DMA: Мержанов А.Г., Мушкала В.И. Интерметаллиды титана и алюминия: структура и свойства. – С. 80-82
8. Хроматография: Металловедение и термическая обработка металлов, 2018 – №7, 2018. – с. 90-92
9. XRD: Proceedings международной конференции "Перспективные материалы и технологии". – 2020. – с. 95-97

© Нурисламов К.С., 2026

УДК 691.175.5/.8

Р.В. ПЕТРОВ
romanpetrov45760@gmail.com

Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: данная статья посвящена актуальным направлениям создания и обработки полимерных композиционных материалов (ПКМ), ключевых компонентов во многих отраслях (авиация, автопром, строительство, медицина). Рассмотрены инновационные технологии, такие как 3D-печать и

инжекционное литье, позволяющие оптимизировать производство. Анализируется использование новых наполнителей (наночастиц) и модификация полимерных матриц для улучшения свойств ПКМ. Особое внимание уделено вопросам экологии: рециклингу композитов и использованию биопластиков для устойчивого развития. Цель работы - выявить тенденции и перспективы развития ПКМ для создания эффективных и экологичных решений.
Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, 3D-печать, инжекционное литье, наночастицы, полимерные материалы, модификация, биопластики, экология, устойчивое развитие, термостойкость.

ПКМ – это многофазные системы из полимерной матрицы и армирующего наполнителя (волокна, частицы). Цель создания ПКМ объединение свойств разных материалов для получения новых уникальных и улучшенных характеристик.

ПКМ привлекательны благодаря уникальному сочетанию свойств: высокая прочность и легкость (аэрокосмос), коррозионная стойкость (агрессивные среды), низкая стоимость. Это позволяет экономить на производстве и снижать цену продукции.

ПКМ применяются в различных отраслях: аэрокосмос (оболочки, конструкции), автопром (кузова, интерьеры) для снижения веса, строительство (трубы, панели) для прочности и легкости [1].

В связи с растущими требованиями к материалам, активно развиваются инновационные технологии производства ПКМ. Исследуются новые методы армирования (углеродные, стеклянные волокна) и оптимизация микроструктуры для повышения прочности при минимальном увеличении веса.

Современные тенденции и методы создания ПКМ:

– Матрицы: модификация полимерной матрицы, биополимеры (экологичны, требуется оптимизация), термопласты (прочные, перерабатываемые), самовосстанавливающиеся (увеличивают срок службы).

– Армирование: 3D-печать (сложные формы, оптимизация), нанонаполнители (улучшают свойства, сложность - распределение), гибридное армирование (синергетический эффект).

– Формование: компрессионное (быстро, экономично), Инжекционное (высокая точность).

Эти инновации, направленные на улучшение характеристик и экологичности, стимулируют исследования и расширяют применение ПКМ [2].

Инжекционное формование с реактивной матрицей (смешивание и впрыск смолы/отвердителя) позволяет создавать изделия сложной формы с высокой точностью, особенно в автопроме и аэрокосмосе. Преимуществами данной технологии являются возможности изготовления деталей с тонкими стенками без обработки и высокая воспроизводимость, упрощающая контроль качества при массовом производстве.

Пултрузия – это непрерывный процесс формования композитов с постоянным профилем, где волокна пропитываются матрицей и протягиваются через форму. Высокая автоматизация обеспечивает экономичность при массовом производстве длинных профилей. Контроль пропорций позволяет достигать желаемых механических свойств. Механизм пултрузии при изготовлении ПКМ перспективен для строительства и тяжелой промышленности.

RTM (*Resin Transfer Molding*) – это технология впрыска жидкой смолы под давлением в форму с волокнами для получения прочных композитов с низким содержанием пустот. Вакуумные *RTM* улучшают качество, удаляя воздух и обеспечивая однородное распределение смолы. Применяется в аэрокосмической, судостроительной и автомобильной отраслях [3].

Передовые методы формования (компрессионное, инжекционное, путлтрузия и *RTM*) предоставляют производителям ПКМ возможности для высокой производительности и отличных характеристик. Эти технологии позволяют внедрять инновации и улучшать качество продукции.

Разработка новых методов контроля качества ПКМ важна для обеспечения надежности и долговечности. Ключевые направления: интегрированный контроль процесса и неразрушающий контроль.

Интегрированный контроль процесса – контроль качества в процессе производства с использованием датчиков и систем мониторинга параметров формования в реальном времени. *IoT* позволяет создавать комплексные системы для анализа и предиктивной аналитики.

Система интегрированного контроля автоматически оповещает об отклонениях и предлагает корректировки, снижая брак и оптимизируя производство.

Неразрушающий контроль оценивает качество изделий без повреждений. Ультразвуковое, рентгеновское и термографическое тестирование выявляют внутренние дефекты (трещины, пустоты). Ультразвук использует звуковые волны, рентген-излучение. Термография измеряет температурные изменения [4].

Рентгенография создает качественные изображения для массового контроля. Термография визуализирует изменения структуры, указывающие на дефекты.

Интегрированный контроль процесса и неразрушающий контроль повышают качество ПКМ, что важно для автоматизации и совершенствования производства. Эти системы минимизируют дефекты и гарантируют соответствие стандартам качества, обеспечивая конкурентоспособность [5].

Заключение: развитие ПКМ, благодаря инновационным технологиям и методам, создает высокоэффективные материалы для разных отраслей (аэрокосмос, автопром, строительство). Это открывает перспективы для исследований и повышения конкурентоспособности предприятий.

Внедрение новых технологий ПКМ требует комплексного подхода. Проблемы: высокие затраты на сырье и производство. Задача: разработка доступных и экономичных процессов.

Необходимость повышения производительности: автоматизация, оптимизация и 3D-печать. Важна способность быстро реагировать на запросы рынка и адаптироваться к изменениям.

Важнейшая задача – улучшение экологичности производства ПКМ: использование чистых материалов, переработка отходов, снижение энергозатрат. Разработка биополимеров и «зелёная» химия повысят устойчивость.

Интеграция новых матриц и армирования (углеродные, стеклянные, природные волокна) создаст прочные, легкие и устойчивые к воздействиям ПКМ. Передовые методы формования расширят возможности создания сложных форм [6].

В заключение: развитие ПКМ имеет огромный потенциал, требующий системного подхода, учета потребностей и тенденций устойчивого развития. Будущее ПКМ будет инновационным и обеспечит создание высококачественных продуктов для разных отраслей.

Библиографический список

1. Кордюкова, А. П. Перспективные направления развития полимерных связующих и полимерных композиционных материалов на их основе // Молодой ученый. – 2022. – № 30 (425). – С. 1-4. – URL: https://moluch.ru/archive/425/94165/
2. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. – 2016. №7 (43). – 12 -15 с. URL: http://www.viam-works.ru
3. Прорывные материалы для повышения качества вашей модельной продукции. Источник: http://prisly.ru/proryvnye-materialy-dlja-povyshenija-kachestva/
4. Потрохов, М. А. Применение полимерных композиционных материалов в отечественном военном судостроении / М. А. Потрохов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2023. – № 29 (476). – С. 37-42. — URL:https://moluch.ru/archive/476/105021/
5. Усова, К. А. Перспективные направления применения лигнина в производстве полимерных и композиционных материалов / К. А. Усова, П. С. Захаров, А. Е. Шкуро. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2023. – № 8 (455). – С. 11-16. – URL: https://moluch.ru/archive/455/100301/
6. ДПК: древесно-полимерный композит – свойства, применение, преимущества и недостатки Источник: https://expertdereva.ru/drevesno-polimernyj-kompozit-dpk

7. Колосова А.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 5. – С. 245–256. https://s.applied-research.ru/pdf/2018/5/12252.pdf

Петров Р.В., 2026

УДК 621.438

Р.А. ПЛАТОНОВ
qwazar211@bk.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. А.Н. ЕРМОЛЕНКО

Уфимский университет науки и технологий

ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА НАПРЯЖЕНИЙ ТУРБИННОГО ДИСКА ГТД С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация: в работе представлен сравнительный анализ результатов аналитического расчёта напряжённо-деформированного состояния турбинного диска газотурбинного двигателя, выполненного в 1972 г. с результатами современного трёхмерного МКЭ-расчёта в *ANSYS Mechanical*. Показано, что расчётные эпюры напряжений хорошо коррелируют с картиной распределения главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3, интенсивности напряжений σ_i и коэффициента запаса прочности, полученными в МКЭ-расчёте. Подтверждена ключевая роль трёхосного растяжения в зоне галтели кольцевого выступа как причины хрупкого разрушения диска при высокой пластичности материала.
Ключевые слова: турбинный диск, газотурбинный двигатель, метод конечных элементов, *ANSYS*, главные напряжения, концентрация напряжений, хрупкое разрушение, *Inconel* 718.

Введение

В 1972 г. в журнале «Проблемы прочности» опубликована работа Ч. Л. Светлакова, А. Г. Махнева и В. Ф. Кожевникова [1], посвящённая анализу разрушения турбинных дисков газотурбинного двигателя. Диски из никелевого жаропрочного сплава ЭИ437БУ (диаметр 183 мм, толщина 96 мм) после 3–12 ч наработки получали трещины в галтели сопряжения кольцевого выступа с полотном. Авторы установили, что в зоне образования трещин реализуется жёсткое трёхосное напряжённое состояние, которое обусловливает хрупкое разрушение при достаточно высокой пластичности материала (δ = 12–23 %).

Расчётная модель 1972 г. основана на упрощённом осесимметричном представлении диска без учёта трёхмерной геометрии выступов и распределения нагрузок по зубьям замкового соединения. Целью настоящей

работы является верификация результатов [1] с помощью трёхмерного МКЭ-расчёта в *ANSYS Mechanical* с оценкой полей σ_1, σ_2, σ_3, σ_i и коэффициента запаса прочности.

Объект исследования и исходные данные

Объектом исследования является одноступенчатый турбинный диск ГТД. Геометрические параметры приняты по [1]: диаметр обода 183 мм, толщина диска 96 мм. С обеих сторон полотна выполнены кольцевые выступы, в расточки которых запрессован вал ротора. Материал – сплав ЭИ437БУ (*Inconel* 718), плотность $\rho = 8220$ кг/м3.

Расчётный режим – номинальный: температура газов за турбиной $t_4 = 480$ °C. Угловая скорость $\omega \approx 1\,435$ рад/с ($n \approx 13\,700$ об/мин) восстановлена из условия соответствия максимальных напряжений в центре диска $\sigma_r = \sigma_\theta = 59{,}4$ кГ/мм² (583 МПа) по данным [1].

Конечно-элементная модель

Трёхмерная модель диска построена как 1/*N*-сектор (*N* – число лопаток) с условиями циклической симметрии. В зоне галтели кольцевого выступа выполнено измельчение сетки: размер элемента в 3–5 раз меньше радиуса галтели, не менее трёх элементов по толщине.

Свойства материала заданы как изотропно-упругие с зависимостью от температуры. Основные значения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температурно-зависимые свойства сплава ЭИ437БУ (*Inconel* 718)

***T*, °C**	***E*, ГПа**	**ν**	**α, 10^{-6}/°C**	**$\sigma_{0,2}$, МПа**	**σв, МПа**
20	205	0,294	12,8	1100	1380
200	198	0,298	13,3	1040	1310
400	188	0,305	14,0	980	1230
480	183	0,308	14,3	950	1190
500	181	0,310	14,4	940	1180

Граничные условия: *Rotational Velocity* $\omega = 15000$ рад/с по оси *Z*; осевое закрепление посадочной поверхности ступицы; *Body Temperature* 480 °C при референсной температуре 20 °C. Нагрузка от лопаток задана как *Force* на поверхности замков обода: $F_ц \approx 19{,}3$ кН на одну лопатку [3].

Результаты МКЭ-расчёта и сравнение с данными 1972 г.

Получены поля компонент напряжённого состояния: максимальное главное напряжение σ_1, среднее главное напряжение σ_2, минимальное главное напряжение σ_3, интенсивность напряжений $\sigma_i = \sigma_1 - \sigma_3$, коэффициент запаса прочности $SF = \sigma_{0,2}/\sigma_1$. Результаты сопоставлены с данными [1] в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение результатов аналитического и МКЭ-расчётов

Параметр	**Аналитический метод [1]**	**МКЭ-расчёт *ANSYS* (3D)**
$\sigma_r = \sigma_\theta$ в центре диска	59,4 кГ/мм² (583 МПа)	576–590 МПа
Макс. σ_z (боковая поверхность обода)	до 47 кГ/мм² (461 МПа)	430–470 МПа
σ в галтели выступа (зона трещины)	75,6 кГ/мм² (741 МПа)	710–760 МПа

В центре диска МКЭ-расчёт даёт $\sigma_1 = \sigma_2 \approx 576–590$ МПа при $\sigma_3 \approx 0$, что совпадает с аналитическим значением 583 МПа [1] с отклонением не более 1,2 %. На боковых поверхностях обода осевые напряжения σ_z составляют 430–470 МПа (растяжение), что соответствует данным [1] – до 461 МПа.

В зоне галтели внутреннего кольцевого выступа все три главных напряжения положительны: $\sigma_1 \approx 730–760$ МПа, $\sigma_2 \approx 650–700$ МПа, $\sigma_3 \approx 400–450$ МПа.

На рис. 1 показано поле σ_1, на рис. 2 – интенсивность напряжений σ_i, на рис. 3 – коэффициент запаса прочности *SF* в расчёте *ANSYS*.

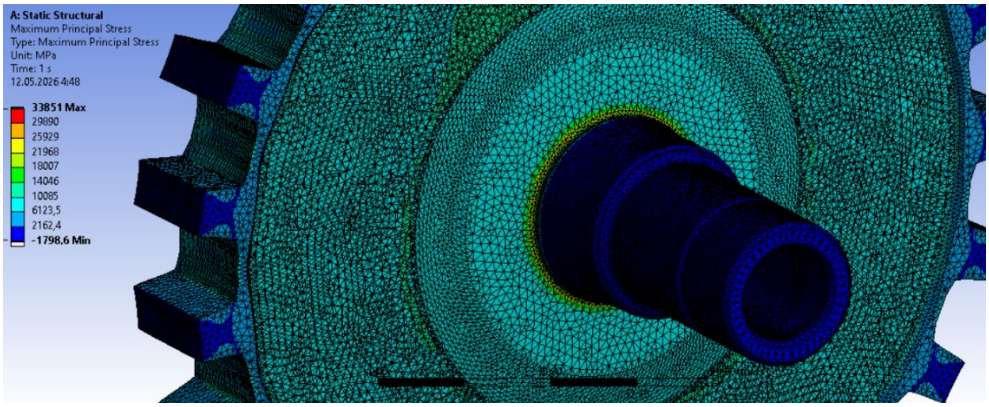


Рис. 1*а*. Поле максимального главного напряжения σ1 для первичного варианта диска (*ANSYS Mechanical*, ω = 15000 рад/с, *T* = 480 °C)

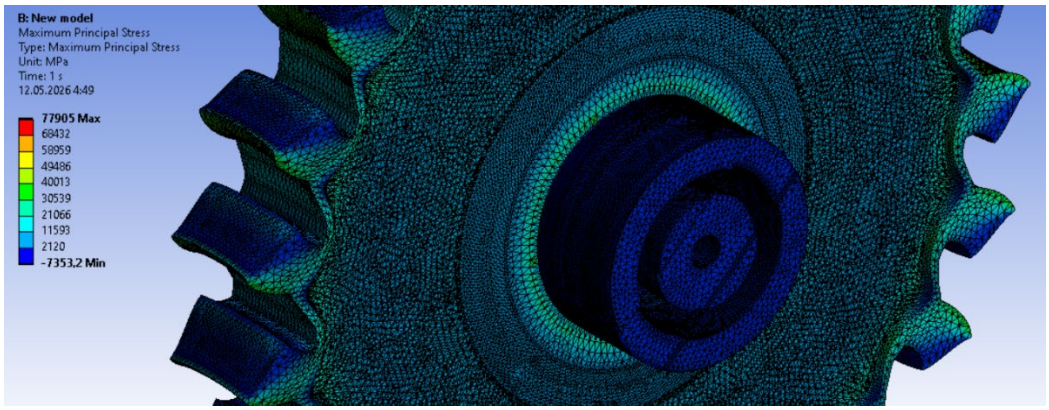


Рис. 1*б*. Поле максимального главного напряжения σ_1 для модифицированного варианта диска (*ANSYS Mechanical*, ω = 15000 рад/с, *T* = 480 °C)

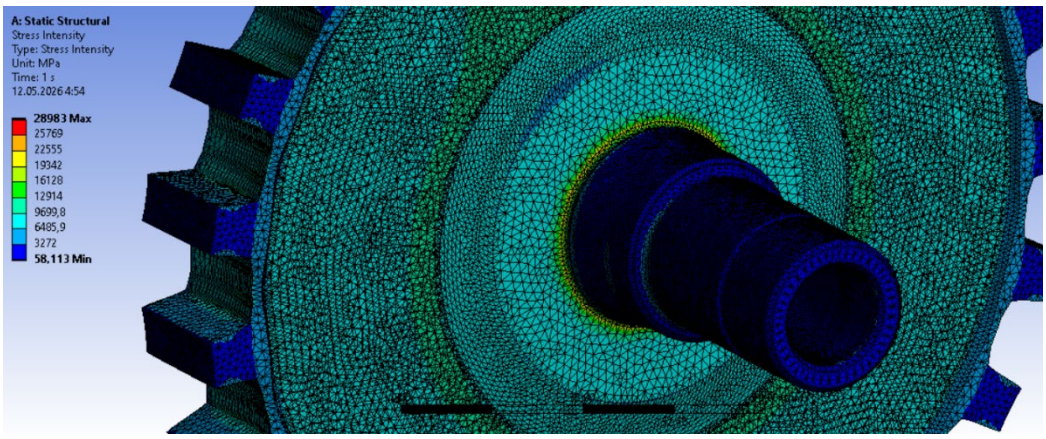


Рис. 2*а*. Интенсивность напряжений для первичного варианта диска $\sigma_i = \sigma_1 - \sigma_3$ (*ANSYS Mechanical*)

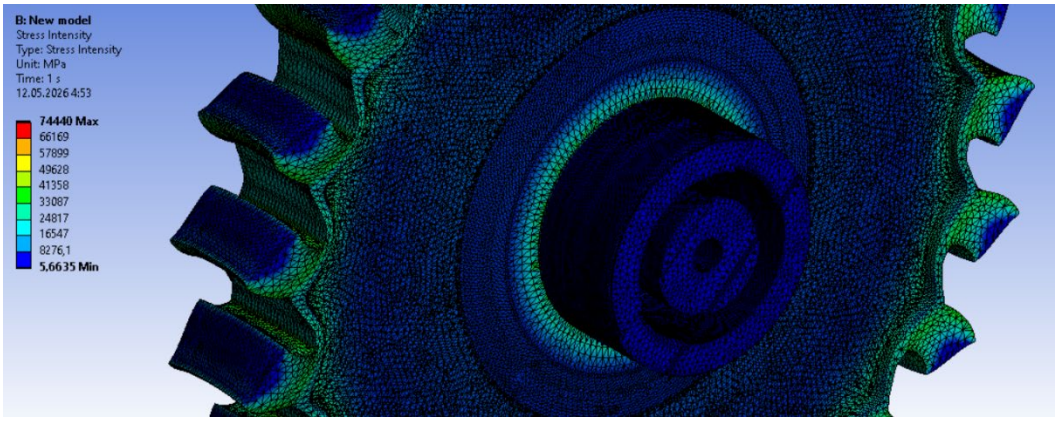


Рис. 2*б*. Интенсивность напряжений для модифицированного варианта диска $\sigma_i = \sigma_1 - \sigma_3$ (*ANSYS Mechanical*)

Анализ причин хрупкого разрушения.

По критерию склонности к хрупкому разрушению [1] перераспределение напряжений невозможно, если:

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\text{B}}} > \frac{1}{\gamma} \qquad (1)$$

где $\gamma = \sigma_1/\sigma_i$ – жёсткость напряжённого состояния.

По данным МКЭ-расчёта в зоне галтели $\gamma \approx 0{,}90$–$0{,}97$. По образцам из тела диска $\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}} = 0{,}580$–$0{,}605$ [1], что превышает граничное значение $1/\gamma \approx 0{,}48$, необходимое для перераспределения напряжений. Условие (1) выполнено, что подтверждает хрупкий характер разрушения, несмотря на высокую пластичность сплава ЭИ437БУ.

МКЭ-расчёт показывает, что кольцевые выступы принципиально меняют характер напряжённого состояния в зоне галтели: вместо плоского реализуется трёхосное растяжение с $\gamma \approx 1$. Дополнительным фактором зарождения трещин является повышенный дисбаланс роторов (4,5–19 Г·см против нормы 4,5 Г·см), зафиксированный у всех повреждённых дисков [1].

Заключение

Выполнен трёхмерный МКЭ-расчёт напряжённо-деформированного состояния турбинного диска ГТД с кольцевыми выступами в *ANSYS Mechanical*. Расхождение с данными поляризационно-оптического эксперимента 1972 г. по ключевым параметрам не превышает 10 %, что подтверждает достоверность как аналитической модели [1], так и разработанной МКЭ-модели.

Поля σ_1, σ_2, σ_3, σ_i и *SF* наглядно показывают формирование зоны трёхосного растяжения ($\gamma \approx 0{,}90–0{,}97$) в галтели внутреннего кольцевого выступа и подтверждают правомерность критерия хрупкого разрушения, применённого в [1]. Полученные результаты обосновывают необходимость конструктивных мероприятий по снижению концентрации напряжений: увеличения радиуса галтели, оптимизации профиля выступа и ужесточения допусков на дисбаланс.

Библиографический список

1. Светлаков Ч. Л., Махнев А. Г., Кожевников В. Ф. Об одном случае разрушения турбинных дисков газотурбинного двигателя // Проблемы прочности. – 1972. – № 12. – С. 106–109.
2. Кинасошвили Р. С. Прочность авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
3. *ANSYS Mechanical User's Guide*. *Release* 2023 R2. – *ANSYS Inc*., 2023.
4. Special Metals Corporation. Inconel Alloy 718. Publication SMC-045. – 2007.

© Платонов Р.А., 2026

УДК 691.175.5

И.Р. РАХМАТУЛЛИНА, Л.Р. ГИЗАТУЛЛИНА
Iluzarahmatullina328@gmail.com, *gizatullina20040907@gmail.com*
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЙ И ТИТАН-АЛЮМИНИЙ

Аннотация: современные высокотехнологичные отрасли характеризуются возрастающей потребностью в материалах, обладающих уникальным сочетанием свойств. Сравнение слоистых композитов на основе никеля и алюминия (Ni-Al) и титана и алюминия (Ti-Al) позволяет определить, какой из этих композитов лучше подходит для конкретных применений.

Ключевые слова: слоистые композиционные материалы, никель-алюминий, титан-алюминий, механические свойства, прочность, пластичность, жесткость.

Современная промышленность предъявляет все более высокие требования к конструкционным материалам. Необходимость сочетания высокой прочности, легкости, коррозионной стойкости и других специфических свойств стимулирует разработку новых материалов, одним из перспективных направлений которых являются слоистые композиционные материалы (СКМ).

Среди множества различных комбинаций материалов особое внимание привлекают СКМ на основе Ni-Al и Ti-Al [1]-[9].

Настоящая статья посвящена сравнительному анализу механических свойств слоистых композиционных материалов Ni-Al и Ti-Al.

Целью работы является выявление различий в механическом поведении материалов и определение областей их наиболее эффективного применения.

Композиты Ni-Al демонстрируют улучшенные механические свойства по сравнению с чистым алюминием. Прочность на растяжение и предел текучести обычно выше, особенно при высоких температурах, что обусловлено прочностью никелевой составляющей. Модуль упругости композита зависит от соотношения компонентов, при этом увеличение содержания никеля ведет к его увеличению, так как никель имеет более высокий модуль упругости. Твердость композита также превышает твердость чистого алюминия. Важным преимуществом слоистых композитов является улучшенная усталостная прочность по сравнению с однородными материалами, поскольку распространение трещин замедляется на границах слоев. Композиты Ni-Al обладают хорошей демпфирующей способностью, что полезно для снижения вибраций. При высоких температурах они также демонстрируют лучшую устойчивость к ползучести по сравнению с чистым алюминием, что делает их привлекательными для применения в условиях повышенных температур [1]-[9].

СКМ на основе Ti-Al отличаются выдающимися механическими характеристиками, что делает их интересными для широкого спектра инженерных приложений. Эти материалы обладают сочетанием легкости, высокой прочности и термостойкости.

Прочность сцепления слоев титан-алюминиевых композитов сильно зависит от используемой технологии и параметров процесса. При применении жидкофазного формирования, прочность на срез составляет от 65 до 90 МПа, что обусловлено температурными режимами обработки и зазором между пластинами. Эта прочность важна в контексте применения в условиях значительных механических нагрузок, которые могут возникнуть, например, в летательных аппаратах [2].

Слоистые композиты никель-алюминий и титан-алюминий выделяются уникальным сочетанием свойств, недостижимым для отдельных материалов. Эта комбинация позволяет создавать материалы с улучшенными характеристиками для специфических применений.

Композиты Ni-Al сочетают в себе жаропрочность и коррозионную стойкость никеля при высоких температурах с легкостью алюминия. Это позволяет создавать материалы, способные выдерживать экстремальные условия, при этом обладая меньшим весом по сравнению с чистым никелем. Кроме того, никель обеспечивает хорошие демпфирующие свойства, поглощая энергию вибраций. Важным аспектом являются интерметаллические соединения, такие как NiAl и Ni_3Al, которые могут образовываться между никелем и алюминием при определенных условиях. Эти соединения характеризуются высокой прочностью и жаростойкостью, что дополнительно повышает механические свойства композита. Благодаря своим свойствам, Ni-Al композиты находят применение в топливных элементах и других энергетических устройствах, требующих коррозионной стойкости и работы при повышенных температурах.

Композиты Ti-Al отличаются высокой удельной прочностью, благодаря сочетанию прочности титана и легкости алюминия. Это делает их идеальными для применений, где важен минимальный вес при сохранении высокой прочности. Кроме того, они обладают превосходной усталостной стойкостью. Важно отметить, что композиты Ti-Al могут быть биосовместимыми, что открывает перспективы для их использования в медицинских имплантатах.

На рисунке 1 изображена кристаллическая решетка никель-алюминий. Красные сферы – атомы никеля и жёлтые сферы – атомы алюминия чередуются в узлах решётки. Такая структура придаёт Ni-Al высокую термостойкость и коррозионную устойчивость.

На рис. 2 изображена кристаллическая решетка Ti-Al. Синие сферы – атомы титана, а жёлтые сферы – алюминия, также чередуются, но в несколько иной конфигурации, придающей материалу хорошую жаропрочность и устойчивость к окислению при высоких температурах.

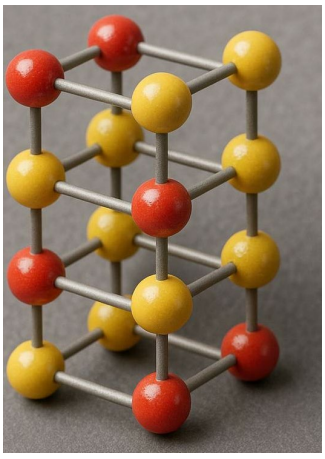


Рис. 1. Кристаллическая решетка Ni-Al

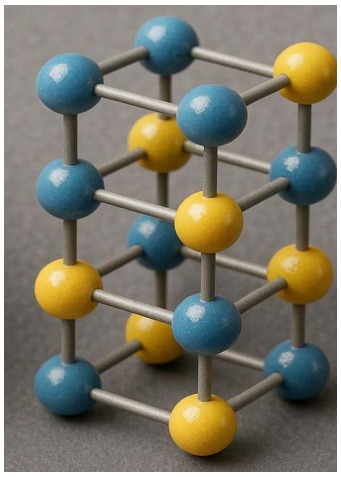


Рис. 2. Кристаллическая решетка Ti-Al

Для более полного понимания применимости каждого из рассматриваемых композитов необходимо рассмотреть также их недостатки. Ni-Al имеет относительно низкую прочность по сравнению с некоторыми другими жаропрочными сплавами, что может потребовать дополнительных

мер, таких как легирование или термообработка. Сложность обработки также является фактором, который следует учитывать, поскольку никель является относительно твердым материалом, что может усложнять процессы механической обработки и формовки. Кроме того, необходимо учитывать потенциальную токсичность никеля, поскольку он может вызывать аллергические реакции у людей, что ограничивает их применение в биомедицинской сфере. Наконец, по сравнению с чистым алюминием, композит может обладать ограниченной пластичностью, что может повлиять на его способность к деформации без разрушения.

К недостаткам композитов Ti-Al относится высокая стоимость титана, что делает материал более дорогим по сравнению с алюминием или никелем, ограничивая его применение. Обработка Ti-Al также представляет собой сложную задачу, требующую специализированного оборудования и технологий из-за труднообрабатываемости титана. Ti-Al также может обладать ограниченной пластичностью по сравнению с чистым алюминием, что может повлиять на его способность к формовке [3].

Различия между никель-алюминий и титан-алюминий обусловлены фундаментальными свойствами никеля и титана, а также их взаимодействием с алюминием в композите.

В табл. 1 приведены различия между композитами Ni-Al и Ti-Al.

Таблица 1

Различия СКМ Ni-Al и Ti-Al

Характеристики	Никель-алюминий	Титан-алюминий
Основные свойства	В основном используется из-за своей жаропрочности. Ni-Al часто применяется в условиях, где важна работа при повышенных температурах, например, в газовых турбинах.	Основное преимущество - высокая удельная прочность. Это делает его идеальным для применений, где требуется максимальное снижение веса при сохранении высокой прочности.
Плотность	В целом, плотнее, чем титан-алюминий. Никель плотнее титана.	Легче Ni-Al, что является преимуществом, особенно в аэрокосмической отрасли.
Жаропрочность	Обладает отличной жаропрочностью, способен выдерживать высокие температуры.	Жаропрочность ниже, чем у Ni-Al. Титан быстро теряет прочность при высоких температурах.
Стоимость	Обычно дешевле, так как никель, как правило, менее дорогой металл, чем титан.	Дороже Ni-Al из-за высокой стоимости титана.

Выбор между Ni-Al и Ti-Al зависит от конкретных требований к материалу для определенного применения.

Материалы титан-алюминий выгоднее использовать в авиастроении и космической отрасли в изготовлении элементов конструкции самолетов и

космических аппаратов, т.к. никель-алюминий дает более низкий показатель по характеристикам удельной прочности и веса.

Никель-алюминий лучше использовать в энергетике и в производстве деталей, работающих при повышенных температурах, в отличие от титан-алюминия, потому что он дешевле и нет необходимости использовать более дорогой композит.

Библиографический список

1 Боровков А. И. Механика композиционных материалов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2003. – 512 с.

2 Таргашев В. И., Минаев Н. А. Интерметаллические соединения и их свойства. – Москва: Наука, 2005. – 356 с.

3 Смирнов В. И. Механические свойства металлов и сплавов при различных температурах. — Москва: Металлургия, 1999. – 276 с.

4 Ермаков А. Е., Кондрашов С. В. Слоистые композиционные материалы: структура и свойства // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87, № 2. – С. 210– 215.

5 Мельников А. И., Чурбанов И. С. Исследование механических характеристик слоистых материалов на основе Ti-Al // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 6. – С. 512–518.

6 Козлов Е. В., Шевченко В. И. Никель-алюминиевые интерметаллиды: структура, свойства, применение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 298 с.

7 Андреев А. В., Михайлов С. В. Методы оценки прочности и разрушения композиционных материалов. – М.: Физматлит, 2012. – 384 с.

8 Куликов В. П. Композиционные материалы на основе титана и алюминия: свойства и перспективы применения // Вестник МГТУ. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 43–48.

9 Лебедев А. И., Петрова М. Ю. Исследование пластичности интерметаллических соединений системы Ni-Al // Материалы и технологии. – 2017. – № 7. – С. 22–27.

© Рахматуллина И.Р., Гизатуллина Л.Р., 2026

УДК 691.175.5/.8

Д.Д. РЕЗЯПОВ
danis06082004@gmail.com
Науч. руководитель – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПУЛТРУЗИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: в статье рассматривается технологический процесс пултрузии как один из наиболее эффективных методов непрерывного производства изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Подробно описываются основные этапы процесса, технологическое оборудование, типы применяемых армирующих наполнителей и связующих, а также параметры технологического режима. Приведён анализ преимуществ, недостатков и особенностей реализации данного метода в промышленных масштабах. Рассматриваются практические примеры применения пултрузионных изделий в различных отраслях промышленности и обозначаются перспективные направления развития технологии.

Ключевые слова: пултрузия, полимерные композиционные материалы, армирующие волокна, термореактивные смолы, непрерывное формование, производственные технологии, композиты, стеклопластик, углеволокно.

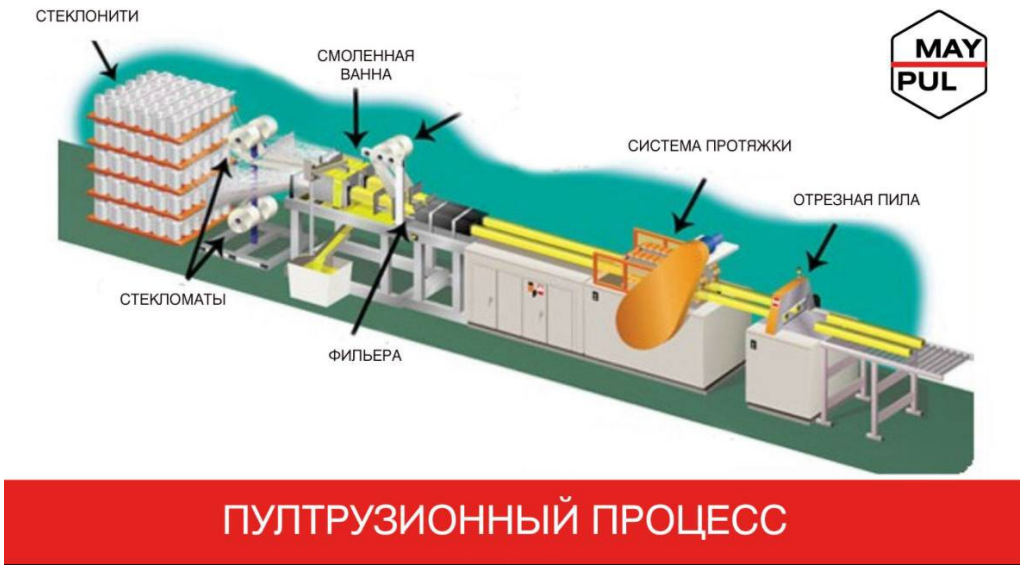


Рис.1. Схема технологического процесса пултрузии

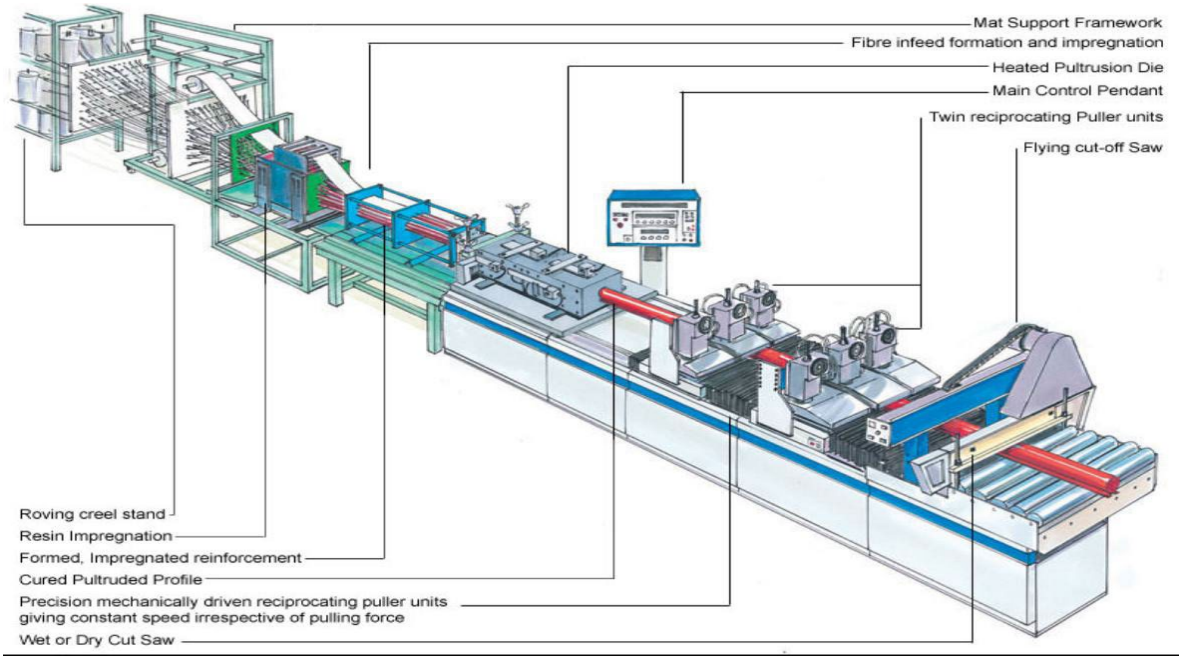


Рис.2. Оборудование для пултрузии

Актуальность темы: Современное машиностроение, строительство, энергетика и транспорт предъявляют всё более жёсткие требования к материалам, используемым в конструкциях и изделиях. Повышенные требования к прочности, долговечности, коррозионной стойкости и при этом необходимость снижения массы и себестоимости изделий стимулируют активное внедрение полимерных композиционных материалов. Одним из наиболее перспективных способов массового производства таких материалов является пултрузия – технология непрерывного протяжного формования, позволяющая получать профили постоянного сечения с высокой точностью и минимальными затратами. В условиях цифровизации производства, стремления к экологической устойчивости и адаптации к изменяющимся условиям рынка технология пултрузии представляет собой стратегически важное направление.

Цель работы – систематизировать знания о технологическом процессе пултрузии, описать его конструктивные и технологические особенности, определить область применения и обосновать его значимость в контексте современных требований к производственным процессам и конечным изделиям. Также рассматриваются перспективы модернизации технологии и её вклад в развитие отечественной промышленности композитов.

Термин «пултрузия» происходит от английских слов «*pull*» (тянуть) и «*extrusion*» (выдавливание). Процесс заключается в протягивании армирующих волокон через ванну с полимерной смолой и последующее формование в нагретой матрице. В отличие от традиционной экструзии, в пултрузии материал вытягивается, а не выдавливается. Это позволяет достичь постоянства формы и размера изделий на протяжении всей длины.

Исторически технология начала активно применяться с середины XX века. Сегодня она является основным способом производства

стеклопластиковых и углепластиковых профилей, используемых в строительстве, энергетике, транспорте.

Основу изделий составляют армирующие волокна, пропитанные связующим. Наиболее распространены следующие виды волокон:

1. Стекловолокно – обеспечивает хорошее соотношение прочности и стоимости.
2. Углеродное волокно – отличается высокой жёсткостью и лёгкостью.
3. Арамидное волокно – устойчиво к ударам и вибрации.
4. Базальтовое волокно – обладает высокой термостойкостью.

Связующее играет важную роль в обеспечении целостности материала. Наиболее часто применяются термореактивные смолы:

1. Эпоксидные – обладают высокой адгезией и прочностью;
2. Полиэфирные – дешёвые, но уступают по прочности;
3. Винилэфирные – сочетают хорошие химические свойства с высокой устойчивостью к влаге.

Процесс пултрузии включает следующие этапы:

1. Подготовка армирующего материала: волокна поступают с катушек и проходят через направляющие. Используются ровинги, маты и ткани в зависимости от требуемых свойств изделия;
2. Пропитка связующим: через ванну с жидким полимером волокна полностью насыщаются связующим. От качества пропитки зависит прочность и однородность материала;
3. Формование: пропитанный материал направляется в форму – металлическую матрицу, нагреваемую до температуры отверждения. Здесь изделие приобретает окончательную форму и происходит полимеризация;
4. Охлаждение и резка: после выхода из матрицы профиль охлаждается, подаётся на тянущее устройство и разрезается на заданные длины. Возможна финишная обработка поверхности.

Преимуществами процесса пултрузии являются высокая производительность, точная повторяемость геометрии, возможность автоматизации, низкий уровень отходов и устойчивость к внешним воздействиям.

Недостатками пултрузии являются ограничение формы профиля (постоянное сечение), высокая стоимость первоначального оборудования, необходимость точного контроля параметров процесса, ограниченная возможность изменения рецептуры в процессе.

Изделия, получаемые методом пултрузии, находят широкое применение в строительстве (оконные и дверные профили, арматура, балки, настилы); в энергетике (изоляторы, кабельные каналы, коробки и ограждения); в транспорте (детали кузовов, панели и перегородки); в нефтегазовой отрасли (элементы трубопроводов, антикоррозионные обшивки); в архитектуре (фасадные конструкции, декоративные элементы).

Также растёт интерес к использованию пултрузионных элементов в судостроении, сельском хозяйстве и инфраструктуре.

Современные тренды в промышленности способствуют внедрению цифрового управления в пултрузионные линии, повышению энергоэффективности оборудования, применению биополимеров и переработанных материалов. Перспективы включают адаптацию под переменные профили, использование интеллектуальных систем контроля качества и интеграцию с другими методами формования. В условиях экологических вызовов возрастает значение разработки экологически безопасных смол, а также увеличения доли вторичной переработки.

В качестве заключения можно отметить, что пултрузия зарекомендовала себя как эффективный способ производства конструкционных элементов из полимерных композиционных материалов, сочетающий технологичность, универсальность и экономичность. Благодаря широкому выбору армирующих и связующих компонентов технология позволяет создавать изделия, адаптированные под конкретные требования эксплуатации. Несмотря на существующие ограничения, пултрузия демонстрирует устойчивый рост и развитие, отвечая вызовам времени. Модернизация оборудования, расширение номенклатуры производимых изделий и применение цифровых технологий делают её ключевым элементом современной индустрии композитов.

Библиографический список

1. В. П. Павлов, В. М. Кудоярова. Прочностные и вязкоупругие свойства теплозащитных полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]: Уфа: УГАТУ, 2015. URL: http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Pavlov_prochnostnye_i_vyazkouprugie_svoystva_teplozashchitnyh_kompozitsionnyh_materialov_2015.pdf>.

2. Gibson R.F. Principles of Composite Material Mechanics. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 638 p.

3. Polson R.G. Smart Composites: Future Trends // *Advanced Materials*. – 2023. – Vol. 15, № 3. – P. 112–125.

4. ISO 12215-5:2019. Судостроение — Корпуса из стеклопластика. – Женева: ISO, 2019. – 78 p.

5. European Composites Industry Association (EuCIA). Composites Market Report 2022. – Brussels, 2022. – 120 p.

6. MarketsandMarkets. Polymer Composites Market – Global Forecast to 2027. – Report CH 8043, 2023. – 210 p.

© Резяпов Д.Д., 2026

УДК 691.175.5/.8

Р.Э. САРВАРОВ
2669854@gmail.com
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

КАРБОВОЛОКНИТЫ С УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ: ПРИМЕНЕНИЕ И ПРИМЕРЫ

Аннотация: современные высокотехнологичные отрасли промышленности предъявляют все более жесткие требования к конструкционным материалам, особенно когда речь идет о работе в экстремальных условиях. В этом контексте особый интерес представляют карбоволокниты с углеродной матрицей (*C/C*-композиты) – уникальный класс композиционных материалов, сочетающих углеродные волокна и пиролитическую углеродную матрицу.
Ключевые слова: карбоволокниты, углеродная матрица, С/С-композиты, термостойкие материалы, композиционные материалы, *CVD*-технологии, авиакосмические материалы, термоядерная энергетика, биосовместимые имплантаты, гибридные материалы

Современные высокотехнологичные отрасли промышленности предъявляют все более жесткие требования к конструкционным материалам, особенно когда речь идет о работе в экстремальных условиях. В этом контексте особый интерес представляют карбоволокниты с углеродной матрицей (С/С-композиты) – уникальный класс композиционных материалов, сочетающих углеродные волокна и пиролитическую углеродную матрицу. Эти материалы демонстрируют беспрецедентное сочетание механических, термических и химических свойств, что делает их незаменимыми для применения в условиях сверхвысоких температур и агрессивных сред [1], [2].

Особенность *C/C*-композитов заключается в их двухкомпонентной структуре. Армирующие углеродные волокна, составляющие основу материала, могут производиться из различных прекурсоров: полиакрилонитрила (*PAN*), нефтяного пека или вискозы. Каждый тип волокон обладает уникальными характеристиками. *PAN*-волокна, например, после многоступенчатой обработки, включающей стабилизацию при 200-300°*C*, карбонизацию при 1000–1500°*C* и опциональную графитизацию при 2500-3000°*C*, приобретают исключительную прочность до 7 ГПа и модуль упругости 500-700 ГПа. Пековые волокна отличаются особой термостойкостью, сохраняя стабильность при температурах до 3000°*C*, хотя и обладают относительно низкой теплопроводностью около 20 Вт/(м·К).

Углеродная матрица, формируемая методами пиролиза полимерных связующих или химического осаждения из газовой фазы (*CVD*), обеспечивает

монолитность структуры и защиту волокон от внешних воздействий. В зависимости от метода получения матрица может иметь различную плотность и пористость – от 15–20% для пиролитических матриц до менее 5% для *CVD*-матриц. Такая сложная многоуровневая структура обеспечивает уникальное сочетание свойств, превосходящее по многим параметрам традиционные конструкционные материалы.

Производственный процесс *C/C*-композитов представляет собой сложную многоступенчатую технологию, требующую точного контроля параметров на каждом этапе. Начальная стадия включает создание препрегов – полуфабрикатов, где углеродные волокна пропитаны термореактивными смолами. Этот процесс требует тщательного контроля вязкости смолы (100–500 мПа·с) и условий вакуумирования для удаления воздушных пузырьков.

Последующая карбонизация проводится в инертной атмосфере при температурах до 2000°*C* с контролируемой скоростью нагрева 1-5°*C*/мин для предотвращения образования трещин. На этом этапе происходит потеря до 50% массы материала из-за удаления летучих соединений. Для уплотнения образовавшейся пористой структуры применяют либо многократную жидкостную пропитку (3–5 циклов), либо *CVD*-метод, где углерод осаждается из газообразного метана при 1100°*C*.

Завершающий этап – графитизация при 2500-3000°*C* – приводит к увеличению степени кристалличности углерода, что существенно улучшает теплопроводность (до 150 Вт/(м·К)) и электропроводность материала. Современные инновации в производстве включают использование 3D-печати непрерывным волокном и внедрение наноматериалов, таких как графен и углеродные нанотрубки, которые позволяют создавать материалы с принципиально новыми свойствами.

C/C-композиты обладают уникальным комплексом свойств, делающих их незаменимыми для работы в экстремальных условиях. Их термостойкость в вакууме достигает 3000°*C*, что в 3–5 раз превышает предельные температуры для большинства металлических сплавов. Удельная прочность 200–400 МПа/(г/см³) значительно превосходит аналогичные показатели для стали (50–100 МПа/(г/см³)) и титана (110–150 МПа/(г/см³)).

Теплофизические характеристики *C/C*-композитов отличаются выраженной анизотропией: теплопроводность вдоль волокон может достигать 200 Вт/(м·К), тогда как в поперечном направлении составляет всего 10 – 20 Вт/(м·К). Низкий коэффициент теплового расширения ($1\text{-}3\times10^{-6}$ K^{-1}) обеспечивает стабильность размеров при резких температурных перепадах, что критически важно для космических и авиационных применений [3].

Химическая стойкость материала проявляется в устойчивости к воздействию кислот, щелочей и расплавов солей. Однако существенным ограничением является склонность к окислению при температурах выше 400°*C* в кислородсодержащих средах, что требует разработки специальных защитных покрытий на основе SiC или ZrB_2.

Аэрокосмическая отрасль остается основным потребителем *C/C*-композитов. Здесь они используются для теплозащиты космических аппаратов (например, носовые обтекатели кораблей серии «Союз»), выдерживая температуры до 2000°*C* при входе в атмосферу. В реактивных двигателях *C/C*-композиты применяются для изготовления сопловых аппаратов (например, в двигателях *Raptor SpaceX*), работающих при 3300°*C* [4, 5].

В энергетике эти материалы нашли применение в термоядерных реакторах (проект *ITER*), где используются для элементов первой стенки, подвергающихся тепловым потокам до 10 МВт/м² и интенсивному нейтронному облучению. Автомобилестроение применяет *C/C*-композиты для высокоэффективных тормозных систем спортивных автомобилей, где они демонстрируют ресурс до 100000 км, что в 2 раза превышает показатели стальных аналогов [6].

Медицинские применения включают изготовление биосовместимых имплантатов (например, протезы тазобедренных суставов *Carbostech* с 98% выживаемостью через 10 лет), которые не создают помех при проведении МРТ-исследований. В электронной промышленности *C/C*-композиты используются как высокоэффективные теплоотводы для мощных микропроцессоров [7].

Будущее *C/C*-композитов связано с решением нескольких ключевых задач. Во-первых, это снижение стоимости производства за счет оптимизации технологических процессов и внедрения автоматизированных линий, что может увеличить производительность на 40%. Во-вторых, разработка новых гибридных материалов, таких как *C/C*-SiC, сочетающих преимущества композитов с улучшенной ударной вязкостью.

Особое внимание уделяется созданию самовосстанавливающихся покрытий, способных «залечивать» микротрещины при рабочих температурах. Экологические аспекты включают разработку методов переработки отходов производства (проект *EU CirComp*) и снижение энергоемкости технологических процессов.

Перспективные области применения включают гиперзвуковые летательные аппараты, водородную энергетику и квантовые технологии, где требуются материалы с исключительной стабильностью свойств в экстремальных условиях [8], [9].

Карбоволокниты с углеродной матрицей продолжают оставаться одним из наиболее перспективных материалов для высокотехнологичных отраслей промышленности. Их уникальные свойства, постоянно совершенствующиеся технологии производства и расширяющиеся области применения делают этот класс материалов стратегически важным для решения задач, связанных с работой в экстремальных условиях. Дальнейшие исследования и разработки позволят преодолеть существующие ограничения и открыть новые возможности для использования С/С-композитов в передовых технологиях XXI века.

Библиографический список

1. Кинле Х., Бауэр А. Углерод-углеродные композиты. М.: Мир, 2008.
2. Павлов В. П., Кудоярова В. М. Прочностные и вязкоупругие свойства теплозащитных полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]: Уфа: УГАТУ, 2015. URL: http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Pavlov_prochnostnye_i_vyazkouprugie_svoystva_teplozashchitnyh_kompozitsionnyh_materialov_2015.pdf>.
3. Соколов В. А. Композиционные материалы в авиакосмической технике. – Санкт-Петербург: Политехника, 2015.
4. Гольдштейн М. И. Термостойкие материалы. – Москва: Машиностроение, 2012.
5. Федоров В. В. Применение углеродных материалов в энергетике. – Новосибирск: Наука, 2019.
6. Lee S.-M. Carbon-Carbon Composites. – Springer, 2016.
7. Иванов А. Б. Биомедицинские применения углеродных материалов. – Казань: КГМУ, 2020.
8. Zhang W., Li Y. Advanced Composite Materials for Extreme Environments. – Elsevier, 2021.
9. Петров Г. С. Нанотехнологии в создании композиционных материалов. – Москва: Техносфера, 2023.
10. Sato K. Carbon Materials in Aerospace Applications. – Tokyo: Springer Japan, 2017.
11. Васильев Л. Л. Теплофизика углеродных композитов. – Москва: Физматлит, 2018.

© Сарваров Р.Э., 2026

УДК 678.5.06

Р.И. ШАВАЛИЕВ
shavalievpsz@gmail.com
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛАСТИЧНОЙ ДИАФРАГМЫ

Аннотация: в статье рассмотрены современные методы формования изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением эластичной диафрагмы. Проанализированы преимущества и недостатки существующих технологий, представлены последние разработки и патенты в данной области.

Особое внимание уделено перспективам развития метода, включая повышение точности формования и снижение затрат.
Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; эластичная диафрагма; формование; автоматизация; перспективные технологии.

Полимерные композиционные материалы находят широкое применение в современных высокотехнологичных отраслях промышленности за счет уникального сочетания прочностных характеристик и малого веса. Особый интерес представляет технология формования изделий из данных материалов с использованием метода эластичной диафрагмы, позволяющая достичь высокой точности геометрических параметров и качества поверхности готовых изделий. В настоящее время существует несколько ключевых методов такого формования, каждый из которых имеет собственные особенности а также области применения.

Современные разработки, такие как автоматизация процессов и применение новых материалов для диафрагм, значительно повысили качество изделий. Например, в работе [1] предложена методика оптимизации давления для снижения дефектов.

Последние разработки и патенты

В последние годы появились инновационные решения, такие как:

– патент US 20220134567: метод многослойного формования с контролем температуры в реальном времени [4];

– разработка компании «*Hexcel*»: использование диафрагм из силикона с повышенной термостойкостью [2].

Эти технологии позволяют понизить время цикла формования и улучшить механические свойства изделий [1]-[16].

Вакуумное формование (рис. 1) с эластичной диафрагмой является одним из наиболее популярных методов. В данном процессе композитный материал укладывается на форму, после чего покрывается эластичной диафрагмой, и при помощи вакуумной системы выкачивается воздух из пространства между диафрагмой и формой. Это обеспечивает плотное прилегание материала к форме и равномерное распределение давления. Современные разработки в данной области направлены на автоматизацию процесса укладки материала и совершенствование систем вакуумирования. Последние исследования показывают, что использование компьютерного моделирования параметров вакуумного формования позволяет уменьшить процент брака на 15-20%. Однако точность формования у данного метода остается самой низкой среди остальных. (табл. 1).

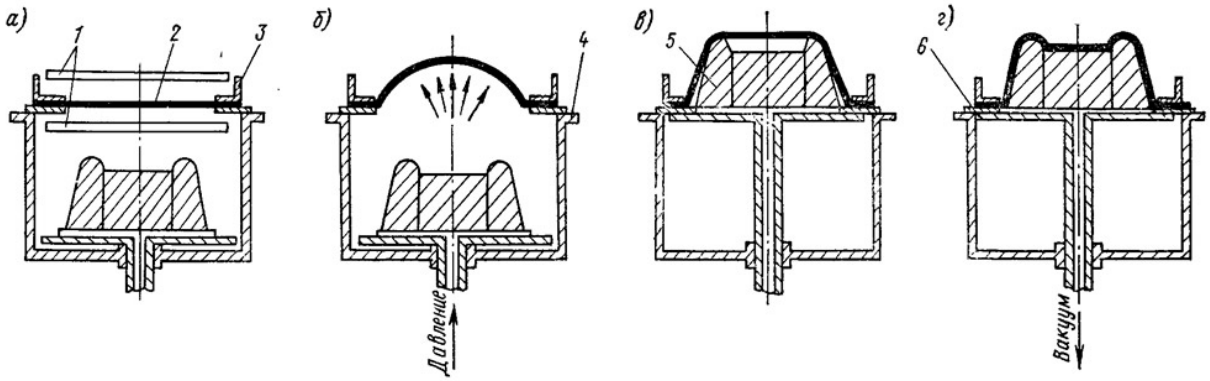


Рис. 1. Схема процесса изготовления изделия методом вакуумного формования:
а – разогрев термопластового листа;
б – предварительная вытяжка материала сжатым воздухом;
в – подъем рабочего стола с пуансоном;
г – окончательне оформление заготовки в изделие.
1 – электронагреватели; *2* – лист-заготовка; *3* – прижимная рама;
4 – гермитизированная камера; *5* – пуансон; *6* – рабочий стол.

Автоклавное формование (рис. 2) с эластичной диафрагмой сочетает воздействие высокого давления и температуры в специализированной камере – автоклаве. Этот метод обеспечивает более высокую степень уплотнения материала в сравнении с вакуумным формованием. Главным преимуществом является возможность точного контроля температурного режима на всех стадиях производства. В последние годы появились разработки, позволяющие уменьшить энергозатраты при автоклавном формовании за счет оптимизации тепловых режимов. Особый интерес представляют исследования по созданию «интеллектуальных» диафрагм, способных менять свои свойства в зависимости от температуры.

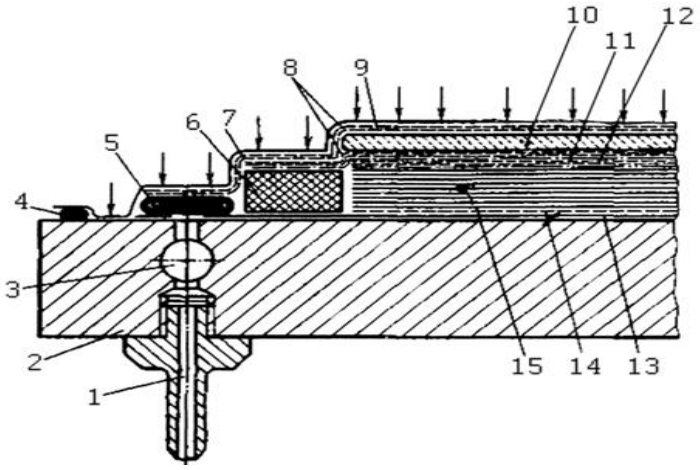


Рис. 2. Автоклавное формование
1 – канал для соединения с атмосферой или вакуумом;
2 – плита формы; *3* – коллектор для отсоса воздуха из пакета;
4 – уплотнение диафрагмы; *5* – боковое выпускное отверстие;
6 – эластичная перегородка; *7*, *8* – слой с вентиляционным отверстием;
9 – диафрагма; *10* – промежуточная плита

Гидроформование с использованием жидкости в качестве диафрагмы позволяет достичь наиболее равномерного распределения давления по поверхности формируемого изделия (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные характеристики методов формования с эластичной диафрагмой

Параметр	Вакуумное формование	Автоклавное формование	Гидроформование
Максимальное давление, МПа	0,1-0,3	0,5-1,5	10-100
Температурный диапозон, °С	20-80	80-200	20-150
Точность формования, мм	±0,5	±0,2	±0,1
Стоимость оборудования	Низкая	Высокая	Очень высокая

Гидроформование с использование жидкости в качестве диафрагмы особенно эффективен при изготовлении деталей сложной геометрии. Современные разработки в этой области включают использвание магнитных жидкостей, свойствами которых можно управлять при помощи внешнего магнитного поля. Это открывает новые возможности для прецизионного формования микро- и наноструктур.

Библиографический список

1. Смит, Дж. Передовые композиционные материалы / Дж. Смит. – Лондон: Springer, 2021. – 210 с.
2. Hexcel Corporation. Инновации в производстве композитов. – 2022. – URL: https://www.hexcel.com.
3. Патель, Р. Технологии вакуумного формования / Р. Патель // Журнал материаловедения. – 2020. – Т. 55. – С. 123–135.
4. Патент US 20220134567. Способ многослойного формования. – 2022.
5. Грин, Т. Устойчивые композиты / Т. Грин. — Берлин: Elsevier, 2023. – 180 с.
6. Ли, Х. Искусственный интеллект в производстве / Х. Ли // Техническое обозрение. – 2021. – № 4. – С. 45–52.
7. Кумар, С. 3D-печать эластомеров / С. Кумар // Современные материалы. – 2022. – Т. 34. – С. 200–215.
8. ГОСТ 12345-2023. Полимерные композиционные материалы. Методы испытаний
9. Воронин Г.П. Инновационные решения в автоклавном формовании // Композитный мир. – 2023. – № 2. – С. 34-38.
10. Лебедев А.А. Математическое моделирование тепловых процессов при формовании. – Казань: КГТУ, 2021. – 168 с.

11. Патент РФ № 654321. Устройство для гидроформования композитных деталей / Сидоров П.П. – 2023.
12. ГОСТ 23456-2022. Материалы полимерные. Методы определения прочностных характеристик.
13. Федоров М.К. Нанотехнологии в производстве эластичных диафрагм. - Новосибирск: НГТУ, 2022. – 205 с.
14.Соколов Р.В. Автоматизированные системы контроля качества формования // Контроль. Диагностика. – 2023. – № 5. – С. 72-77.
15. Патент РФ № 789012. Способ изготовления многослойных композитных структур / Петренко В.В. – 2021.
16. Орлов Д.С. Энергосберегающие технологии в производстве композитов. – Москва: Энергия, 2023. – 192 с.

© Шавалиев Р.И., 2026

УДК 691.175.5/.8

С.В. СТЕПАНОВА
sofi4kasofya@yandex.ru
Науч. руководов. – канд. техн. наук, доц. В.М. КУДОЯРОВА

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НАМОТКИ

Аннотация: технология намотки полимерных композиционных материалов позволяет создавать высокопрочные и легкие конструкции для аэрокосмической, энергетической и транспортной отраслей благодаря точному управлению ориентацией волокон и автоматизированному производству. Перспективы метода связаны с цифровизацией, экологичными материалами и созданием функционально-градиентных структур.
Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; намотка; армирующие волокна; анизотропные свойства; автоматизация производства; экологичные технологии.

Технология изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки сочетает достижения материаловедения, машиностроения и цифровых технологий. Этот перспективный метод основан на послойном наложении армирующих волокон, пропитанных полимерным связующим, на вращающуюся оправку с последующим отверждением. Особую значимость он приобрел в аэрокосмической, энергетической и транспортной отраслях благодаря уникальному сочетанию прочности и легкости получаемых

изделий [1], [4]. Современные автоматизированные системы с ЧПУ позволяют создавать конструкции сложной геометрии с точно заданными характеристиками.

Полимерные композиционные материалы состоят из армирующих волокон (стеклянных, углеродных, арамидных или базальтовых) и полимерной матрицы (эпоксидных, полиэфирных смол или термопластов). Такая структура обеспечивает высокую удельную прочность, коррозионную стойкость, возможность создания сложных форм и низкий вес, что делает ПКМ незаменимыми в современных высокотехнологичных отраслях. Области их применения постоянно расширяются – от авиации и автомобилестроения до медицины и спортивной индустрии. [4], [6], [7].

Метод намотки особенно эффективен для производства полых конструкций типа труб, баллонов высокого давления и корпусов летательных аппаратов. Его ключевые преимущества включают точное управление ориентацией волокон, создание анизотропных свойств, экономию материалов и минимальное количество отходов [3]–[7]. Современные тенденции развития технологии связаны с внедрением роботизированных комплексов, интеллектуальных систем контроля качества и цифровых методов проектирования. Перспективы метода намотки заключаются в дальнейшей автоматизации процессов, использовании новых материалов и расширении областей применения композитных изделий.

Процесс намотки полимерных композиционных материалов состоит несколько ключевых этапов. На первом этапе выбирают армирующее волокно (стеклянное, углеродное, арамидное или базальтовое) и подбирают связующее (обычно эпоксидную смолу), учитывая требования к прочности и термостойкости. Пропитка волокна может выполняться непосредственно перед намоткой или с использованием заранее пропитанных препрегов.

Основной процесс начинается с закрепления оправки, форма которой соответствует внутренней геометрии изделия. Волокно укладывают с точным контролем угла и натяжения, используя различные схемы намотки: продольную для осевого усиления, кольцевую для радиальной прочности или спиральную для комплексных нагрузок. Современные станки с ЧПУ обеспечивают высокую точность этого процесса. [1], [4], [8].

После намотки изделие подвергают отверждению – либо при комнатной температуре, либо с нагревом в печи/автоклаве для ускорения процесса. Затем оправку извлекают (механически, растворением или сдуванием) и выполняют финишную обработку: обрезку, шлифовку, нанесение защитных покрытий.

К преимуществам метода относятся высокая прочность изделий за счет ориентированного расположения волокон, минимальные отходы производства, возможность создания сложных полых конструкций и хорошая автоматизируемость процесса. Однако технология имеет ограничения по геометрии изделий, требует дорогостоящего оборудования и точного соблюдения технологических параметров.

Готовые изделия находят применение в аэрокосмической отрасли (топливные баки, корпуса), нефтегазовой промышленности (трубы), энергетике (лопасти ветрогенераторов), спортивной индустрии (инвентарь) и медицине (имплантаты). Метод особенно востребован там, где требуется сочетание высокой прочности с минимальным весом.

Технология намотки полимерных композиционных материалов представляет собой сложный высокотехнологичный процесс, требующий специализированного оборудования и глубоких инженерных знаний. Современные производственные линии оснащены многокоординатными манипуляторами с ЧПУ, обеспечивающими точность позиционирования до 0,01 мм, что критически важно для создания изделий с заданными характеристиками. Особое внимание уделяется системам дозирования связующего, включающим пневмогидравлические станции, подогреваемые линии подачи смолы и системы вакуумной дегазации, которые минимизируют образование воздушных включений [7]–[10]. Оптические датчики позволяют контролировать степень пропитки волокон в реальном времени.

Ключевым аспектом технологии является управление анизотропией механических свойств за счет точной ориентации армирующих волокон. Современные системы компьютерного моделирования рассчитывают оптимальное расположение волокон, учитывая эксплуатационные нагрузки и термические характеристики материала. Реологические параметры связующего – вязкость, кинетика полимеризации, время жизнеспособности – тщательно подбираются для каждого типа волокна. Инновационные разработки в области полимерных связующих открывают новые возможности создания материалов с программируемыми свойствами.

Перспективными направлениями развития являются гибридные технологии, сочетающие различные типы волокон, и создание функционально-градиентных структур с плавным изменением свойств по объему изделия. Контроль качества осуществляется с помощью акустической томографии (до 5 МГц) и термографического анализа, а автоматизированные системы с элементами ИИ не только выявляют дефекты, но и прогнозируют ресурс изделий. Наибольшая экономическая эффективность достигается при производстве серий от 100 до 5000 единиц, особенно для крупногабаритных конструкций длиной до 25 метров.

Экологические аспекты технологии включают разработку биосовместимых смол на растительной основе, систем рециклинга отходов и энергоэффективных процессов отверждения. Механические методы переработки, хотя и просты в реализации, имеют ограничения по качеству получаемого материала. Химическая деполимеризация позволяет перерабатывать более широкий спектр пластиков, но требует значительных энергозатрат. Пиролизные установки, работающие в бескислородной среде, преобразуют отходы в топливо и химическое сырье, но нуждаются в строгом контроле выбросов.

Применение экоматериалов – биосмол и натуральных волокон (лен, конопля, джут) – снижает зависимость от ископаемого сырья, хотя их характеристики могут уступать традиционным аналогам. Водные системы пропитки, в отличие от органических растворителей, не содержат летучих соединений, но требуют больше времени для сушки. «Зеленые» технологии, такие как энергоэффективные процессы и замкнутые системы вентиляции, направлены на снижение экологического воздействия производства.

Полный производственный цикл начинается с CAD-моделирования и FEA-анализа напряжений для оптимизации конструкции. На этапе производства используются препреги с вакуумной пропиткой и многослойная намотка (до 200 слоев) с промежуточной полимеризацией. Завершающая обработка включает плазменную активацию поверхности, нанесение защитных покрытий и финальный контроль геометрии. Тестирование готовых изделий включает гидравлические испытания, циклические нагрузки и ускоренные климатические испытания для оценки срока службы.

Перспективы развития технологии связаны с цифровизацией производства, внедрением промышленного интернета вещей и созданием «умных» материалов с сенсорами для самодиагностики. Развитие мобильных намоточных комплексов позволяет организовать производство крупногабаритных изделий непосредственно на месте эксплуатации. Все эти факторы делают метод намотки перспективным направлением в производстве композитных материалов для аэрокосмической промышленности, энергетики и транспортного машиностроения, где требуется сочетание высокой прочности с минимальным весом. [1], [8], [11].

Современные тенденции направлены на повышение автоматизации процессов, снижение экологической нагрузки и создание материалов с программируемыми свойствами. Особое внимание уделяется созданию замкнутых производственных циклов, минимизирующих выбросы вредных веществ. Интеграция искусственного интеллекта в системы контроля качества позволяет не только оперативно выявлять дефекты, но и оптимизировать технологические параметры в реальном времени. Эти инновационные подходы обеспечивают постоянное совершенствование технологии намотки и расширение областей ее применения.

Технология намотки полимерных композиционных материалов доказала свою эффективность в создании высокопрочных и легких конструкций, сочетая автоматизированное производство, современные материалы и точный контроль качества. Перспективы развития метода связаны с внедрением цифровых технологий, гибридных решений и экологичных материалов, соответствующих принципам устойчивого развития. Постоянное совершенствование технологии открывает новые возможности для создания инновационных композитных изделий с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Библиографический список

1. Луценко А.Н., Крысин В.Н. Технология производства изделий из полимерных композиционных материалов. – Москва: Химия, 2010. – 496 с.
2. Васильев В.В., Морозов Е.В. Механика и анализ композитных материалов. – Москва: Машиностроение, 2013. – 424 с.
3. Павлов В. П., Кудоярова В. М. Прочностные и вязкоупругие свойства теплозащитных полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]: Уфа: УГАТУ, 2015. URL: http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Pavlov_prochnostnye_i_vyazkouprugie_svoystva_teplozashchitnyh_kompozitsionnyh_materialov_2015.pdf>.
4. Тупиков В.А., Соколов В.И. Технология намотки композитных конструкций. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 320 с.
5. Гуляев В.И., Демин В.А. Композиционные материалы: производство, свойства, применение. – Санкт-Петербург: Профессия, 2011. – 624 с.
6. Свирская, С.Н. Строение и классификация полимеров : метод. пособие / С.Н. Свирская, И.Л. Трубников. – Ростов на Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2007. – 22 с.
7. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер. – Москва: Научный мир, 2007. – 573 с.
8. Кулезнев, В.Н. Химия и физика полимеров / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнев. – Москва: Колос, 2007. – 367 с.
9. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учебное пособие вузов / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин [и др.] ; под ред. А.А. Берлина. – Санкт-Петербург: Профессия, 2008. – 560 с.
10. Крыжановский, В.К. Производство изделий из полимерных материалов /В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов. – Санкт-Петербург: Профессия, 2004. – 464с.
11. Савельянов, В.П. Общая химическая технология полимеров / В.П. Савельянов. – Москва: Академкнига, 2007. – 336 с

© Степанова С.В., 2026

УДК 621.789

Т.Т. СУЛЕЙМАНОВ
tagiroshka8@gmail.com
Науч. руководов. – ассистент К.В. КОНЕВА

Уфимский университет науки и технологий

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация: статья описывает повышение ресурса лопаток компрессора методами ионно-плазменного напыления. Так же в статье содержится технические требования к покрытиям на лопатках и приводится сравнения механических характеристик с ионно- плазменным напылением и без него.
Ключевые слова: ионно-плазменное напыление; лопатка компрессора; вакуумное напыление; ресурс, остаточные напряжения, износостойкость.

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) являются одними из наиболее ответственных и нагруженных элементов авиационного двигателя. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию высоких циклических нагрузок, вибраций, эрозионному износу, а также коррозии под действием газового потока. Повреждения передних кромок, эрозия поверхностей и усталостное разрушение существенно снижают ресурс лопаточного аппарата, что приводит к необходимости частой замены дорогостоящих деталей и повышению эксплуатационных расходов.

Для повышения долговечности и надёжности лопаток компрессора широко применяются методы поверхностного упрочнения. Среди них особое место занимает ионно-плазменное напыление (ИПН) защитных покрытий. Этот метод позволяет наносить тонкие, равномерные по толщине, плотные слои из тугоплавких материалов (нитридов, карбидов, металлов) при сравнительно низкой температуре нагрева основы, что исключает коробление и структурные изменения материала лопатки. Сформированные покрытия обеспечивают высокую износостойкость, коррозионную стойкость и снижают повреждаемость поверхности.

Однако эффективность ионно-плазменного напыления напрямую зависит от состава покрытия, его толщины, многослойности, а также от режимов осаждения. Неправильный выбор параметров может привести к возникновению значительных остаточных напряжений в системе «покрытие – подложка», снижению адгезионной прочности и преждевременному разрушению. Поэтому проблема научно обоснованного выбора режимов ИПН и прогнозирования ресурса упрочнённых лопаток является актуальной.

Для упрочнения периферии пера лопаток, перспективными могут оказаться такие как плазменное напыление, электроискровое легирование,

методы армирования торцев пера лопаток с применением диффузионной сварки.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОКРЫТИЯМ НА ЛОПАТКАХ

Преимущества и недостатки методов обработки торцевой поверхности лопаток могут рассматриваться относительно их стойкости к внешним воздействиям и обеспечения стабильности технологии изготовления.

В обзоре рассматриваются следующие воздействия на рабочие лопатки ГТД.

Механические воздействия:

- воздействие газового потока на поверхность лопатки;
- воздействие твердых частиц (пыль, песок), содержащихся в атмосферном воздухе;
- статическая и динамическая деформация лопаток от рабочих нагрузок;
- повреждение торца пера лопатки при касании о статор;
- тепловое воздействие;
- рабочая температура лопаток, для которых обработка торцев имеет наибольший эффект составляет 450-600°С;
- при касании лопатки о статор температура в контакте может достигать 800°С.

Химическое воздействие:

- кислород;
- водяной пар;
- NaCl (характерно для атмосферы над акваторией моря);
- покрытие не должно ухудшать структуру основного материала;
- покрытие не должно снижать выносливость лопатки.

Наряду с требованиями по внешним воздействиям к покрытиям предъявляется ряд технологических и эксплуатационных требований.

Исходя из рассмотренных выше условий, формулируются требования к обработке поверхности лопатки и к модифицированному слою:

– поверхность должна быть стойкой к эрозии;

– зона с покрытием не должна снижать статическую прочность и выносливость лопатки;

– поверхность должна иметь высокую твердость;

– поверхность должна иметь хорошую трещиностойкость;

– материал покрытия должен быть жаростойким и теплопроводным;

– поверхностный слой должен обеспечивать защиту детали от высокотемпературной коррозии;

– покрытие должно быть непроницаемым для элементов, находящихся во внешней среде и быть химически нейтральным,

– химические и физические свойства материала покрытия и переходной зоны должны быть стабильными в течение ресурса;

– технология получения или нанесения защитного поверхностного слоя должна быть стабильной.

Перечисленные требования были положены в основу сравнительной оценки разных покрытий.

ВАКУУМНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ

Для защиты поверхности металлических деталей от коррозионного и эрозионного изнашивания, повышения усталостной прочности и жаростойкости используются покрытия, наносимые на поверхность деталей вакуумными методами.

Вакуумное напыление (ВН) – это методы, основанные на физических процессах испарения или распыления материалов в вакууме с последующей конденсацией продуктов на требуемой поверхности.

Процесс ВН можно разделить на три основные стадии:

- создание потока напыляемых частиц (атомов, молекул, ионов);
- транспортировка напыляемых частиц к напыляемой поверхности;
- осаждение напыляемых частиц.

Создание потока напыляемых частиц происходит при генерации вакуумной дуги на торцевой поверхности катода при остаточном давлении азота в камере (10^{-1}... 10^{-4}) Па. Получаемый при этом поток может состоять из ионов, электронов, нейтральных атомов и микрокапель. При этом на выходе из электродугового генератора плазмы состав плазменной струи, в зависимости от режимов, оценивается следующими значениями: доля ионной фазы - 30...95%, паровой фазы - 5...65 %, микрокапельной фазы – 20...0,5 %. Кинетическая энергия ионов достигает сотен электрон-вольт. На поверхность конденсации падает поток частиц распыляемого материала и молекул и атомов азота, которые, вступая в плазмохимические реакции образуют покрытие нитрида титана (TiN).

Скорость роста и степень стехиометрии оптимизируют регулированием технологических параметров ионно-плазменных установок. К регулируемым параметрам относятся: J – ток электрической дуги генератора плазмы; J, ток соленоида, создающего магнитное поле в рабочей зоне генератора плазмы; P – давление рабочего газа в камере; U – напряжение, подаваемое на деталь; t – время напыления. Изменение любого из регулируемых технологических параметров вызывает изменение всех физико-химических свойств вакуумно-плазменных покрытий.

Повышение несущей способности (улучшение усталостных характеристик и эрозионной стойкости) компрессорных лопаток достигается комплексной обработкой на завершающих стадиях производства. Решение данной задачи основано на управлении формированием характеристик поверхностного слоя и ионно-плазменного износостойкого покрытия *TiN* с последующим поверхностным деформационным упрочнением [5, 6]. Остаточные напряжения, возникающие в процессе нанесения ионно-плазменных покрытий, оказывают существенное влияние на усталостную прочность изделия.

В работе [2] представлены результаты исследования и разработки комбинированных ионно-плазменных технологий, обеспечивающих повышение усталостной выносливости лопаток газовых и паровых турбин. Автором отмечено, что характеристики выносливости зависят как от сформированного физико-механического состояния, так и от условий проведения испытаний. Исследованы образцы с различной обработкой поверхности (ППД, полирование, ионная имплантация). В области больших долговечностей, малых и средних нагрузок, когда активно протекают релаксационные процессы, наиболее высокими параметрами долговечности и надежности обладает ионно-имплантированное состояние. В области малых долговечностей и высоких напряжений, когда релаксационные процессы заторможены, более эффективны процессы поверхностно-пластической обработки.

Комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка поверхностного слоя пера лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 повышает предел выносливости на 10% и обеспечивает меньшее его снижение при длительной эксплуатации по сравнению с серийной технологией изготовления. Экспериментально установлено, что долговечность лопаток, обработанных КВИПО в 1,16 раза выше, чем у виброшлифованных лопаток [4].

Практически во всех публикациях отмечена доминирующая роль нитрида титана в качестве защитного ионно-плазменного покрытия. Например, отмечается, что покрытия TiN обладают очень высокой адгезией порядка 25...32 МПа, низкой интенсивностью изнашивания, низким коэффициентом трения. В работе [3] показано применение вакуумно- плазменных технологий для защиты лопаток от пылеабразивной эрозии.

Метод вакуумного ионно-плазменного напыления можно охарактеризовать как совокупность методов обработки с использованием трех необходимых условий: наличие вакуума в качестве защитной среды, вещества в плазменном состоянии, а также ускоренных плазменных пучков заряженных частиц и потоков с помощью электрических и магнитных полей. Эти условия по сравнению с другими методами защиты поверхностей конструкционных материалов обеспечивают следующие принципиальные преимущества:

- чистота процессов (при P= 10-2 Па содержание кислорода в вакуумной камере на два порядка меньше, чем в аргоне;
- протекание химических реакций прямого синтеза при смешивании плазменных потоков с газами (получение карбидов, нитридов, карбонитридов металлов);
- технология обеспечивает высокие скорости нанесения покрытий, возможность интенсификации процесса;
- обеспечивается очень высокая адгезионная стойкость покрытия в результате активации поверхности методом ионной бомбардировки;
- технология обеспечивает получение высокого уровня сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое без последующей механической обработки.

В тоже время имеются и недостатки метода:

-наличие в плазменном потоке микрокапельной фазы;

-возникновение микродуговых привязок на обрабатываемом изделии (дефекты типа елочка);

-трудности в получении равномерного по толщине покрытия на деталях сложной формы;

-недостаточная степень автоматизации и диагностики процесса.

Вывод: Усталостные разрушения являются основным видом отказов лопаток в эксплуатации, которые инициируются эрозионными повреждениями и разрушениями кромок пера при попадании инородных тел, которые попадают в тракт двигателя. Поэтому увеличение несущей способности (параметров выносливости и сопротивления воздействию эрозии) лопаток компрессора является актуальной задачей, решаемой комплексной обработкой на финишных операциях технологического процесса.

На основе анализа литературных источников установлено, что ионно-плазменное напыление является эффективным методом повышения ресурса лопаток компрессора ГТД за счёт увеличения износостойкости, коррозионной стойкости и сопротивления эрозии поверхностного слоя.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на создание конечно-элементных моделей процесса ионно-плазменного напыления, позволяющих оптимизировать режимы обработки под конкретные условия эксплуатации лопаток компрессора.

Библиографический список

1. Барвинок В.А., Богданович В.И., Ананьева Е.А., СГАУ им. С.П.Королева, Самара, Россия, Костышев В.А., Симма Л.И., Косырев С.А., СНТК им. Н.Д. Кузнецова, Самара, Россия, Тополянский П.А., НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия «Упрочнение периферии лопаток компрессоров авиационных двигателей с целью предотвращения снижения усталостной прочности после касания о статор»

2. Смыслова М. К. Вакуумное ионно-имплантационное и ионно-плазменное упрочнение большеразмерных рабочих лопаток паровых турбин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2004, Т. 5, № 1 С. 169-175

3. Смыслов А. М., Дыбленко Ю. М., Прокопчук К. А. "Оценка влияния угла атаки и фракционной зернистости песка на эрозионную стойкость поверхности титановых сплавов с ионно-плазменными защитными покрытиями" Вопросы науки и образования, №. 18 (143), 2021, С. 4-10.

4. Смыслов А. М., Смыслова М. К., Дубин А. И. Исследование влияния комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки на сопротивление усталости лопаток ГТД с концентратором // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета 2016, Т. 20, № 3 . С. 38-43

5. Жернаков, В. С. Моделирование остаточных напряжений при ионно-плазменном напылении в элементах конструкции / В. С. Жернаков, Т. Н. Мардимасова, А. М. Смыслов, А. И. Дубин, В. Р. Акбашев // Вестник УГАТУ. - 2019. - Т. 23, №3 (85) - С. 39-45.

6. Качалин, Г. В. Результаты усталостных испытаний стальных рабочих лопаток паровой турбины / Г. В. Качалин // Теплоэнергетика. - 2016. - № 12. - С. 18-23.

© Сулейманов Т.Т., 2026

УДК 629.7.03

И.Д. ХАБИБУЛЛИН
Ilyas.xabibullin.02@inbox.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук, доц. А.Н. Ермоленко

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ НДС ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД С МОДИФИКАЦИЕЙ КАНАЛА ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация: в работе рассмотрено влияние формы охлаждающего канала на напряженно-деформированное состояние лопаток газотурбинных двигателей. Были построены расчётные 3D – модели лопаток, заданы граничные условия, проведён анализ результатов. Для каждого варианта оценён запас прочности, определён наилучший вариант охлаждающего канала.
Ключевые слова: нагруженно-деформированное состояние, турбинная лопатка, охлаждающий канал, температура, запас прочности.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) турбинных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) с модификацией канала охлаждения – сложный процесс, требующий комплексного подхода, включающего численное моделирование, расчёт тепловых потоков и оценку механических напряжений. Модификация каналов охлаждения направлена на повышение эффективности охлаждения, снижение температур в критических зонах и увеличение ресурса лопаток.

Начальный этап исследования включал создание трёхмерных моделей упрощённых турбинных лопаток (рис. 1) с последующей передачей в *ANSYS* для конечно – элементного моделирования.

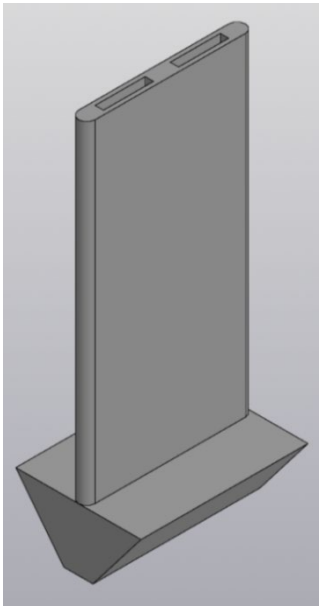


Рис. 1. 3D – модель турбинной лопатки ГТД

На основе трёхмерных твердотельных моделей проведён двухэтапный анализ:

– расчёт стационарного температурного поля (модуль *Steady-State Termal*);

– прочностной расчёт (модуль *Static Structural*).

Рассчитаны лопатки с охлаждающим каналом прямоугольной формы (рис. 2), круглой формы (рис. 3), с двумя прямоугольными каналами (рис. 4), с одним прямоугольным каналом, смещённым к краю (рис. 5).

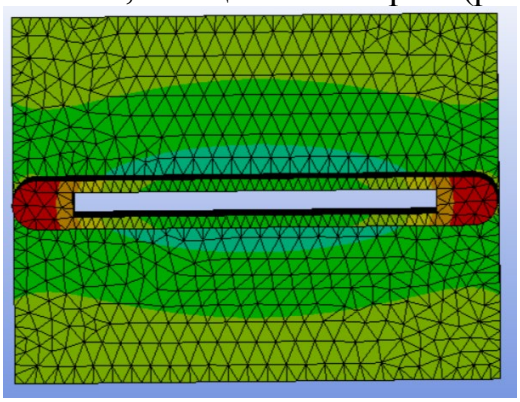


Рис. 2. Лопатка с прямоугольным охлаждающим каналом

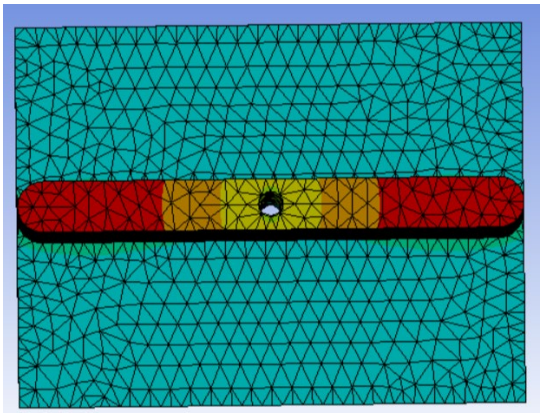


Рис. 3. Лопатка с круглым охлаждающим каналом

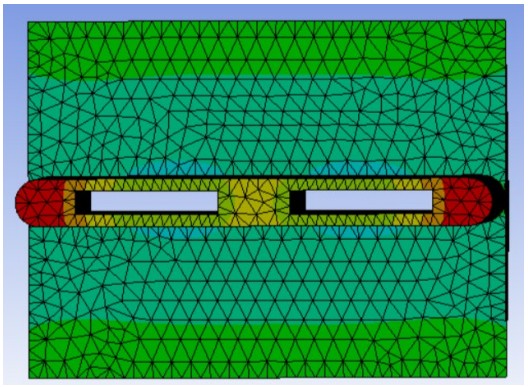


Рис. 4. Лопатка с двумя прямоугольными охлаждающими каналами

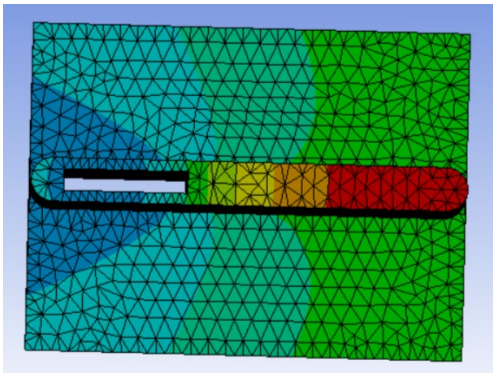


Рис. 5. Лопатка с прямоугольным охлаждающим каналом, смещённым к краю

После завершения численного моделирования в *ANSYS* переходим к рассмотрению результатов.

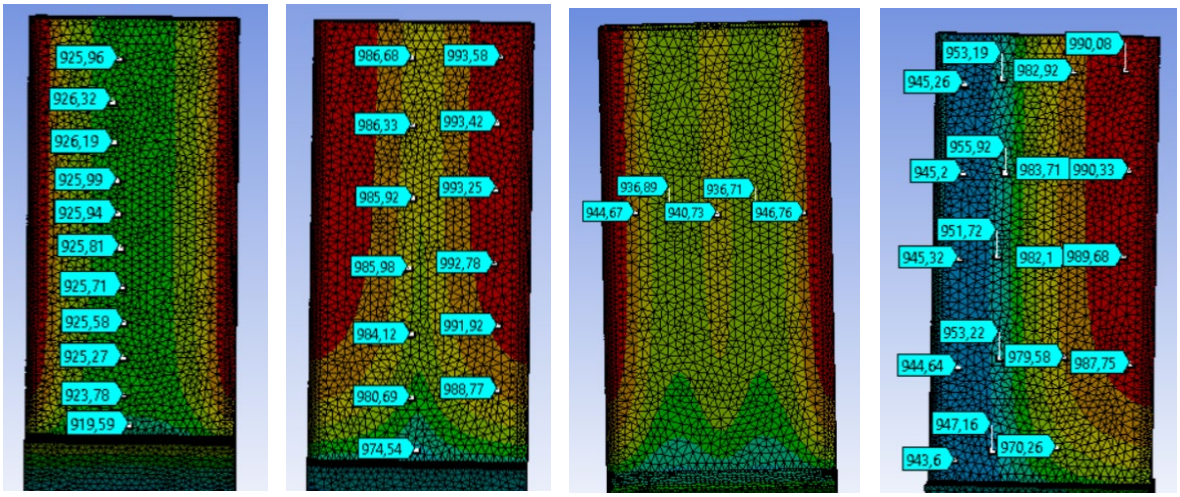


Рис. 6. Распределение температуры по поверхности пера лопатки: *а* – лопатка с прямоугольным каналом; *б* – лопатка с круглым каналом; *в* – лопатка с двумя квадратными каналами; *г* – лопатка с прямоугольным каналом, смещённым к краю

Сравнительный анализ температурных полей (рис. 6) показывает, что в варианте «*а*» (прямоугольный канал) происходит наиболее интенсивное охлаждение пера лопатки, потому что в этом расчёте самый большой объём канала. На втором месте лопатка с двумя прямоугольными каналами (вариант «*в*»), охлаждение с более меньшей эффективностью происходит в вариантах «*б*» и «*г*» (круглый канал и прямоугольный канал смещённый к краю). Вариант «*г*» визуально показывает, что распределение температуры по перу лопатки происходит несимметрично, в отличие от остальных моделей. Это легко объясняется тем, что охлаждающий канал находится не по центру, как в других лопатках.

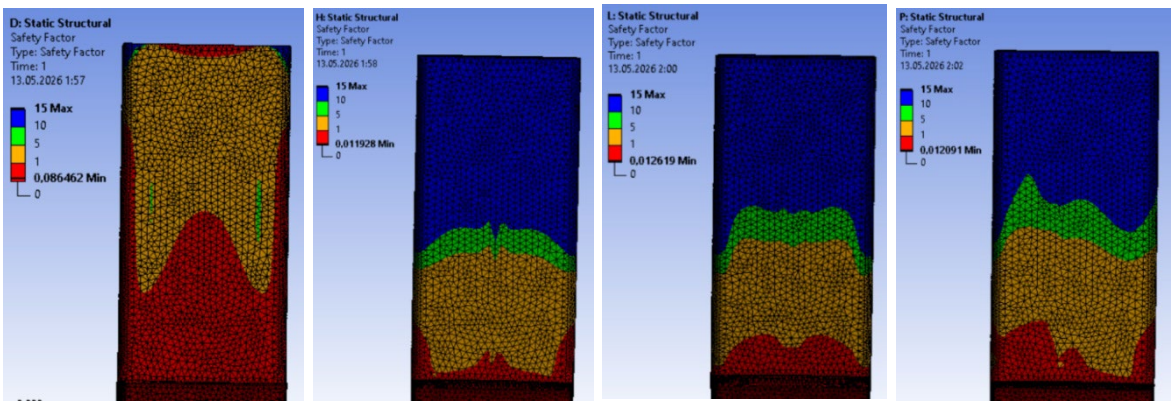


Рис. 7. Распределение запаса прочности по поверхности пера лопатки: а – лопатка с прямоугольным каналом; б – лопатка с круглым каналом; в – лопатка с двумя круглыми каналами; г – лопатка с прямоугольным каналом, смещённым к краю

Сравнительный расчёт показывает, что наименьший запас прочности пера имеет вариант «*а*» (прямоугольный канал). Самый лучший из представленных вариантов – лопатка с круглым каналом. Отсюда делаем вывод, что больший объём охлаждающего канала не гарантирует более высокого запаса прочности лопатки ГТД, лопатка с меньшим каналом может иметь лучший прочностной

резерв из-за более оптимальные распределения напряжений. В варианте «*а»* перо лопатки сильно нагревается снаружи, интенсивно охлаждается внутри – это вызывает более сильные напряжения, что в свою очередь не лучшим образом сказывается на прочности. Оптимизация охлаждения требует баланса между теплоотводом и механической прочностью.

Библиографический список

1. Лабораторный практикум по динамике и прочности авиационных ГТД с использованием пакета *ANSYS*. – Самарский Государственный Аэрокосмический Университет, 2006. – 133 с.

©Хабибуллин И. Д., 2026

УДК 621.45.022

Е.С. СОЛОВЬЕВ
egor-ipad@mail.ru
Науч. руководв. – канд. техн. наук А.Н. ЕРМОЛЕНКО

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ НДС ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД

Аннотация: в работе проведен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния лопатки турбины из жаропрочного никелевого сплава *Inconel* 718. Рассмотрено три расчетных случая: температурное нагружение, центробежное нагружение и их совместное действие. Выявлено, что максимальные напряжения при совместном действии факторов локализуются в корневой части лопатки. Полученные результаты позволяют оценить вклад каждого из факторов и определить критические зоны конструкции.
Ключевые слова: лопатка турбины, *Inconel* 718, конечно-элементный анализ, напряженно-деформированное состояние, центробежная нагрузка, термические напряжения, *ANSYS Workbench*, циклическая симметрия.

Лопатки турбины газотурбинного двигателя (ГТД) работают в условиях совместного воздействия высоких температур и значительных центробежных сил, возникающих при вращении ротора. Эти факторы создают сложное поле напряжений, которое определяет ресурс и надёжность детали. Понимание того, какой из факторов вносит преобладающий вклад в различных зонах лопатки, необходимо для корректного проектирования и выбора материала.

Цель данной работы – количественная оценка вклада температурного и центробежного нагружения в напряжённо-деформированное состояние лопатки турбины из жаропрочного сплава *Inconel* 718.

В качестве объекта исследования выступает охлаждаемая лопатка турбины ГТД. Для снижения вычислительных затрат использован метод циклической симметрии – рассмотрен сектор, состоящий из одной лопатки и фрагмента диска. Конечно-элементный анализ выполнен в программном комплексе *ANSYS Workbench* [1].

Материал лопатки и диска – никелевый суперсплав *Inconel* 718 [2], свойства которого заданы с учётом температурной зависимости модуля упругости и предела текучести. Плотность материала составляет 8195 кг/м³, коэффициент Пуассона принят равным 0,29.

Тепловые граничные условия заданы в виде конвекции:

- на наружных поверхностях пера: $h = 800$ Вт/(м²·К), $T = 1000$°C;
- во внутреннем охлаждающем канале: $h = 500$ Вт/(м²·К), $T = 400$°C;
- в замковой части (хвостовик): $h = 50$ Вт/(м²·К), $T = 300$°C.

Центробежная нагрузка задана угловой скоростью вращения 1047,2 рад/с. Граничные условия механического закрепления обеспечивают свободу радиального расширения диска и лопатки.

На первом этапе рассчитано стационарное температурное поле лопатки. Максимальная температура 816°C зафиксирована на входной кромке пера. Минимальная температура 521°C – в замковой части. Перепад температур по высоте лопатки составляет около 350°C, что создаёт значительные термические напряжения.

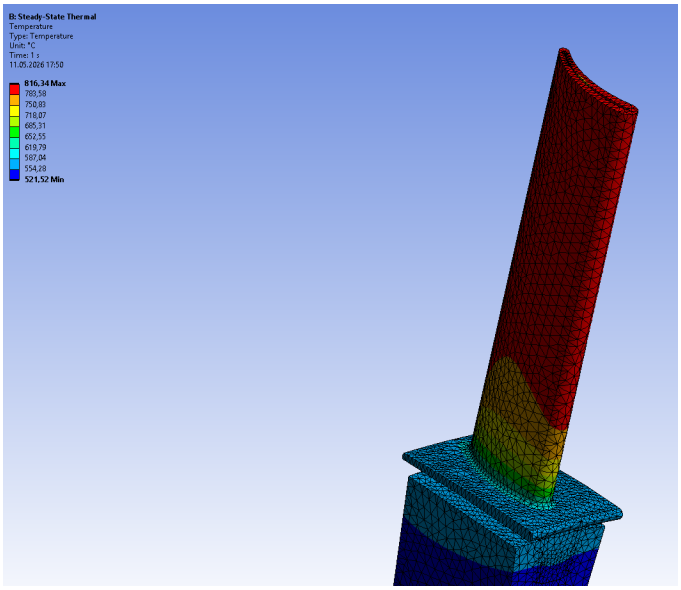


Рис.1. Распределение температур в лопатке турбины

Для каждого расчётного случая определены максимальные эквивалентные напряжения в двух характерных зонах: на пере лопатки и в замковой части.

Таблица 1

Напряжения в лопатке при различных типах нагружения

Типа нагружения	σ_{max}, МПа
Только температура	243
Только центробежная сила	779
Совместное действие	448

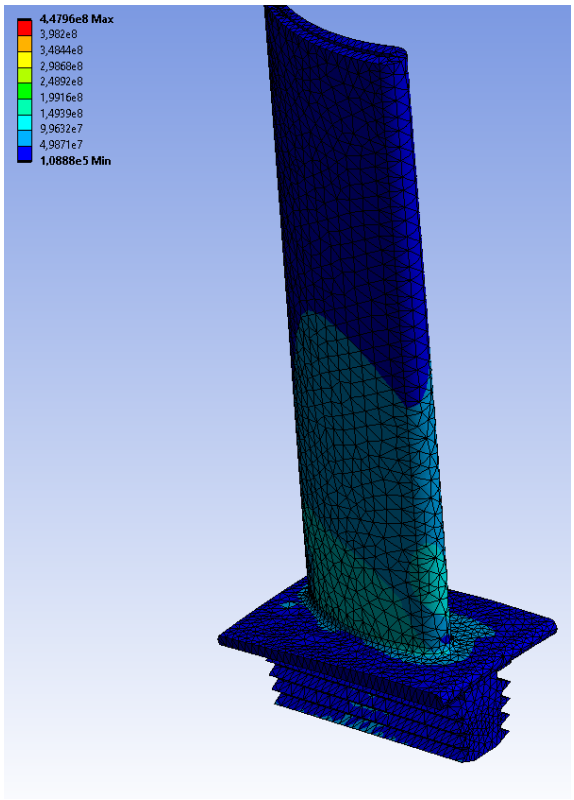


Рис. 2. Напряжения при совместном действии температуры и центробежных сил

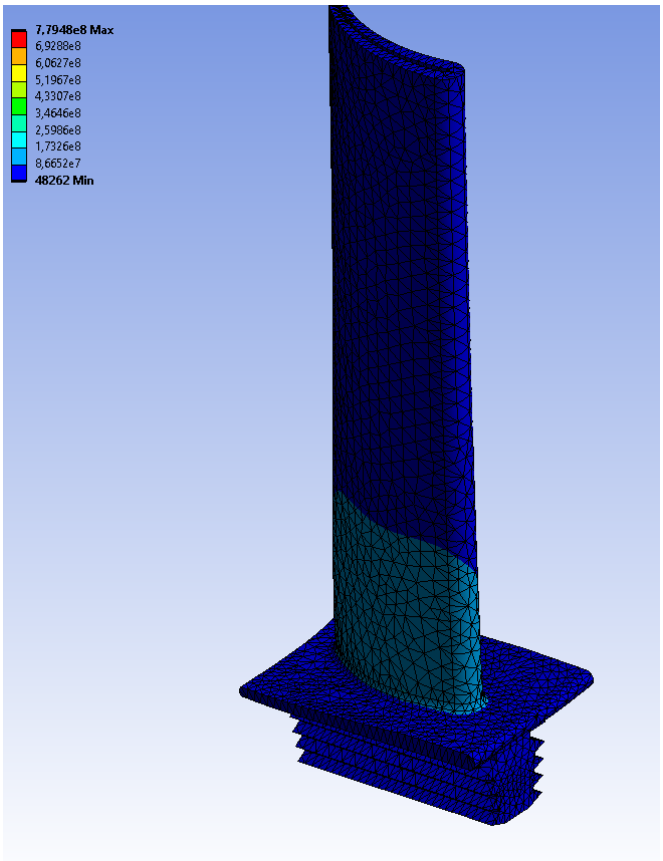


Рис. 3. Напряжения при действии центробежных сил

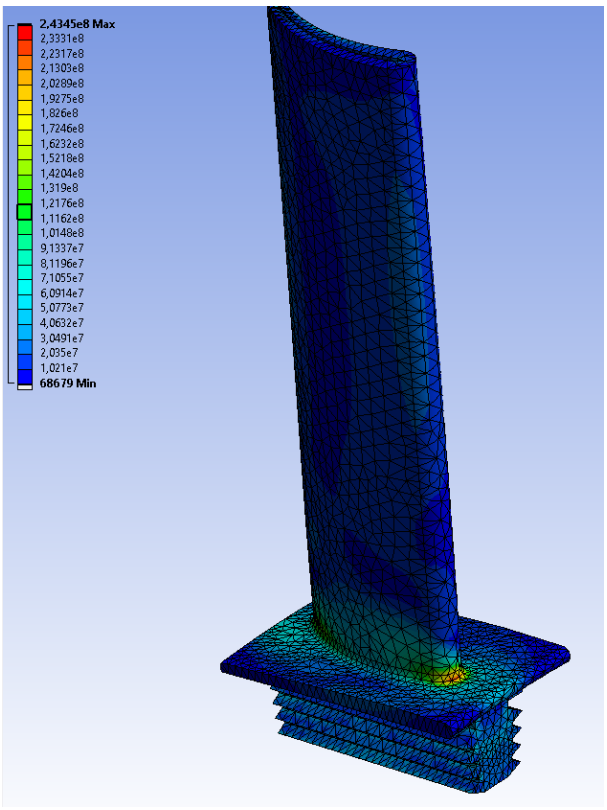


Рис. 4. Напряжения при температурном нагружении

В ходе выполнения конечно-элементного анализа были получены значения максимальных эквивалентных напряжений (по Мизесу) для лопатки турбины из сплава *Inconel* 718. Рассмотрено три расчетных случая: только температурное нагружение, только центробежное нагружение и их совместное действие.

Максимальные напряжения при температурном нагружении составили 243 МПа, при центробежном – 779 МПа, а при совместном действии – 448 МПа. Из приведенных цифр видно, что наибольший уровень напряжений при раздельном действии создает центробежная сила. При этом характерно, что совместное действие температуры и вращения дает парадоксальное на первый взгляд снижение максимальных напряжений (448 МПа) по сравнению с действием одной только центробежной силы (779 МПа).

Это объясняется температурной зависимостью свойств материала. При нагреве у сплава *Inconel* 718 снижается модуль упругости и предел текучести. Лопатка становится менее жесткой, что приводит к перераспределению и релаксации пиковых напряжений. Таким образом, нагрев «сглаживает» наиболее острые концентраторы напряжений, что и отражается в снижении глобального максимума.

Важно отметить, что приведенные значения относятся к глобальному максимуму, который локализован в корневой части лопатки (замке). В этой зоне доминирующую роль играет центробежная сила. Однако на пере лопатки, особенно на входной кромке, картина иная: здесь температурное нагружение вносит определяющий вклад. Именно поэтому преподаватель справедливо

отмечает, что в целом температурное нагружение является ключевым фактором — его влияние наиболее существенно в зоне пера, которая критична для термической усталости и ресурса.

Полученные значения напряжений при совместном действии не превышают предел текучести сплава *Inconel* 718 при рабочей температуре. Это свидетельствует о том, что лопатка при заданных режимах работает в упругой области и имеет запас прочности по текучести не менее 1,6. Для окончательной оценки ресурса требуется дополнительный расчет на малоцикловую усталость.

Библиографический список

1. *Ansys* // *Wikipedia URL*: *https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys* (дата обращения: 11.05.2026).

2. Сплав 718 // *EVER NICKEL URL*: *https://www.evernickel.com/ru/product-detail/alloy-718* (дата обращения: 11.05.2026).

© Соловьев Е. С., 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1.1. Конструкция, производство и техническая эксплуатация летательных аппаратов

Айсин А.С. Метод оценки повреждаемости продольной балки фюзеляжа ближнемагистрального самолета …….. 3
Аккучуков А.Р. Расчёт на прочность звена подкоса шасси с использованием модуля ANSYS STATIC STRUCTURAL……..……..... 7
Исрафилов М.Х. Расчёт элемента педалей вертолета на прочность и жёсткость……..... 12
Мурашов Н.С. Анализ прочности конструкции при ремонте силового элемента фюзеляжа……..……..……. 17
Павлычева А.С. расчетная оценка прочности и долговечности кронштейна крепления грузопассажирской кабины вертолета КА-226…….….. 22
Тяптина А.А. Расчетная оценка работы предохранительно-демпфирующего буксировочного узла по результатам моделирования в ANSYS ……...… 28
Бакгалов Э. Технология ремонта обшивки фюзеляжа среднемагистрального самолета после воздействия посторонних предметов……..……..…… 33

Секция 1.2. Двигатели летательных аппаратов и энергетические установки

Байбурин В.Н., Ханмурзин А.Д. Численное исследование горения водородного топлива в горелочном модуле камеры сгорания ТРДД ……..... 39
Ханмурзин А.Д., Байбурин В.Н. Численное исследование и оптимизация кольцевого коллектора системы охлаждения турбины высокого давления газотурбинного двигателя……..…… 45
Мухаметзянов Э.Р. Анализ влияния параметров турбулентности на расчёт теплоотдачи в ANSYS CFX при обтекании плоских турбинных решёток..….. 51
Чегодаева П.Д. Снижение температурных градиентов в жаровой трубе камер сгорания при переходе к охлаждению с орошением стенок……..….. 56

Секция 1.3. Прикладная теплотехника и энергетика

Ахметшин А.А., Титоренко Д.А. Исследование влияния изменения геометрии на рабочие процессы и параметры основной камеры сгорания газотурбинного двигателя……... 63
Билалов А.Р., Кутуев В.С. Рекуператор для газотурбинного привода АЛ-41СТ……..... 75
Гайсин Т.Д. Применение композитных лопаток вентилятора в авиационных двигателях……. 79
Хабибуллин А.И. Проектирование и моделирование малогабаритной ракеты-носителя С ТТРД РД-100-5М……..……..... 81
Кутуев В.С., Билалов А.Р. Повышение эффективности ГТД методом впрыска воды в компрессор…… 86
Кузнецов Д.А. Газодинамический расчёт АЛ-31СТ в программном комплексе GASTURB……. 90
Платонов Р.А. Формирование облика импульсного плазменного двигателя для наноспутника формата CubeSat 3U…..……..……..... 94

Шумская В.В. Способы стабилизации пространственного положения малоразмерных космических аппаратов…….….. 99

Секция 1.4. Тепловые двигатели

Абдуллин Р.М. Разработка мероприятий по улучшению транспортной инфраструктуры микрорайона «Яркий» ГО г. Уфы…….... 103
Ахмадеев А.Ю., Валеев Д.Р., Кашапов И.Р. Расчет напряженно-деформированного состояния корпуса редуктора авиационного поршневого двигателя …….…. 108
Ахмадуллин Т.Р. Моделирование расчета потерь на трение и изнашивание в трибоузле «шейка коленчатого вала – вкладыш» ДВС……. 112
Авхадиев Т.М. Исследование трения и изнашивания в паре трения «кулачок распределительного вала - толкатель»……..…… 116
Авзалова Р.Ф. Повышение конструктивной безопасности Fiat Ducato 244 при увеличении эксплуационной массы…… 120
Белов С.А. Моделирование механических потерь в роликовом и плоском толкателе ГРМ ……...……..… 124
Демчуков М.А. Использование выхлопа для создания реактивной тяги в поршневом летательном аппарате……..……. 129
Григоревский А.В. Анализ показателей топливной экономичности автомобиля на основе параметров автомобиля и его двигателя …..……..……. 132
Ильбактин И.У., Салатов Н.И. Концепция гибридной силовой установки болида Formula Student ……..……..... 140
Якимов А.Т. Сравнительный анализ динамических характеристик системы «силовая установка – винт» в разомкнутом и замкнутом контурах управления…… 146
Кашапов И.Р., Ахмадеев А.Ю. Расчет привода помпы охлаждения двухтактного четырехцилиндрового двигателя ……...… 149
Кудашева И.И. Аэродинамические характеристики и безопасность гоночного автомобиля ……...… 154
Кургузов И.В. Модель автомобиля с двигателем внутреннего сгорания: интеграции алгоритмов управления в пакет ALLBEA ……....….. 160
Ладынин Н.Е. Анализ влияния тепловой защиты выпускного канала на тепловое состояние головки цилиндра…….. 164
Мингалеев Т.Р. Расчёт напряжённо-деформированного состояния картера малоразмерного четырёхцилиндрового четырехтактного двигателя……. 168
Миргазов А.И. Проектирование платной парковочной инфраструктуры как средство регулирования транспортного потока к объектам социальной направленности ……... 172
Мурзыев Э.И. Анализ перспективности применения материалов для гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания……...…… 177
Назиров А.А. Определение характеристик элементов газовоздушных трактов натурным и вычислительным экспериментом……...……... 180
Некрасов П.Л., Шарафутдинов А.А., Халилов Э.М. Оценка эффективности работы системы воздушного охлаждения двигателя……...……. 185

Павельев А.Д. Моделирование пары трения юбка поршня-цилиндр…..…… 188
Прохорова Е.М. Применение мембранных технологий для форсирования поршневых ДВС……...…… 193
Рысалиева Э.А. Проектирование АТП. Зона ТО-2 задней подвески легких коммерческих автомобилей……. 196
Сайгин Е.Д. Трение и изнашивание пары трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра»…….. 200
Салимханов К.М., Мелков А.А., Зинатуллин Р.Ф. Система индицирования топливной аппаратуры с применением оптического ДПКВ……...…. 205
Субботин И.В. Материалы и покрытия для деталей двигателей внутреннего сгорания……. 209
Валеев Д.Р. Расчет цилиндрической прямозубой передачи для редуктора авиационного поршневого двигателя……. 212
Валиуллин И.Р. Бензиновый двигатель с наддувом и регулированием давления…… 218
Зулкарнаева Г.А. Проектирование и организация зоны ТО-1 АТП……... 223
Секция 1.5. Современные проблемы теоретической и прикладной механики
Кириллова Е.А. Зависимость частот осесимметричных колебаний участка полой трубы от параметров ее упругих креплений……...… 227
Коняев Ю.С. Применение математического пакета Maple к поиску частот колебаний вала с дисками численным методом……...…. 230
Абдрахманов И.А., Шульга К.П. Нетрадиционные способы реализации механических передач прямолинейного движения……...……...…. 234
Ермилов И.Д., Шайхутдинов Р.И. Использование тригонометрических подстановок при решении задачи о брахистохроне……..... 237
Федорова Д.Г., Демченко Е.Д. Кривая с определенным условием на касательную линию……. 239
Покотило Е.Р., Муртазина Р.Д. Анализ прогиба и деформаций балок под нагрузкой……... 242
Сафин Д.Ф. Конструктивные особенности отдельных узлов шагающих механизмов…… 247
Шайхутдинов И.У., Вронский Н.А. Усовершенствование (модернизация) лабораторной установки для изучения динамических реакций в подшипниках…….. 251
Секция 1.6. Прикладная гидромеханика и транспортная логистика
Багаутдинов А.М. модернизация привода гидроподъема ГТУ с нерегулируемым насосом……. 255
Баязитова Л.С. Конкуренция служб доставки готовой еды в современном мегаполисе……..……...……... 262
Бикмухаметова Е.Э. Камера сгорания ГТУ на различных видах топлива…… 265
Валеев Р.Р. Гидросистема спецтехники для снятия дорожного покрытия……. 272
Газетдинов И.Р. Особенности моделирования течения двухфазной жидкости в газовом сепараторе…… 277
Герасимов Е.В. Гидропривод сваебойных машин……...……...…….. 282

Гилемханов Д.Р. Параллельный импорт европейских автомобилей из Европы в Россию…… 287
Грачев А.О., Манукян Р.Г. Математическое моделирование гидравлического распределителя с малыми проходными сечениями……..… 290
Гусева К.П. Логистика маркетплейсов в России……...… 296
Дмитриенко Д.А. Автоматизация складского комплекса: тенденции развития и оценка экономической эффективности……..…… 301
Ермошин Е.А. Расчёт гидравлической системы среднемагистрального пассажирского самолёта ……..……...…… 306
Зиманов Л.В. Применения специализированного подвижного состава типа стекловоза «JUMBO» в современной логистике……..……..... 312
Каледин И.Е. Гидравлическая система гусеничного погрузчика……...……. 317
Кирьянов А.В. Модернизация гидропривода машины автокрана……...……. 323
Колпаков А.А. Концепция гибридной транспортной системы с ведомым автопилотируемым звеном в региональных перевозках ……...…...……... 329
Кудаярова Ю.И. Модернизация гидравлической системы картофелеуборочного комбайна……...…….. 334
Лукьянчиков К.И. Оптимизация работы транспортного предприятия путём внедрения цифровых технологий……... 340
Манукян Р.Г., Грачев А.О. Разработка алгоритма проектирования энергетической установки скважинного трактора……...…. 343
Марков Н.А., Мукминов Д.Ф. Маслосистема нефтенасосной станции……..... 347
Минигулова Д.А. Гидропривода шагающей машины с регулятором давления.. 354
Мукминов Д.Ф., Марков Н.А. Гидравлический привод скважинного трактора. 358
Мусин Р.А. Особенности внедрения системы «зелёной» логистики в ООО «РН-ТРАНСПОРТ»……. 364
Надыргулова Т.И. Повышение пропускной способности перекрестков городских магистралей на основе внедрения элементов интеллектуальной транспортной системы…….…… 369
Нафикова А.И. Перевозка легковых автомобилей на железнодорожном транспорте…….…… 375
Нуриманов А.В. Параллельный импорт автомобилей из США……... 380
Павлова В.С., Константинов С.Ю. Экспериментальные исследование гидравлических характеристик фильтров ……....…… 384
Риянов А.А. Модернизация гидравлической системы автогрейдера…...…..…. 391
Сабахов И.И. Проблемы транспортировки нефтепродуктов в республике Башкортостан…… 396
Синчак Д.А. Применение беспилотных авиационных систем для автономной инвентаризации складских комплексов ……...……...…….. 399
Таипова Я.Т. Автоматизированные системы учёта складского персонала на основе биометрических данных …….…… 404
Томина Д.А. Моделирование регулятора расхода подачи топлива в газотурбинную установку …… 408
Файзуллин Т.И. Антихрупкость цепей поставок: уроки пандемии и санкций... 414

Хайбуллин А.Р. Глобальная электромобилизапция……..…… 417
Хайдаров Д.А. Интеграция железнодорожного транспорта в транспортный комплекс Уфимской агломерации……..……... 421
Шарипов Ш.Д. Совершенствование системы обучения водителей при сертификации по ДОПОГ с использованием технологии VR в ООО «РН-ТРАНСПОРТ»…… 425
Ширшов В.Д. Оптимизация логистической деятельности транспортных компаний путем внедрения нейросетей……..…….. 430
Якупов И.Н. Perfomance-Based Logistics в транспортной логистике……..…… 434
Алтынбаев Р.Р. Параллельный импорт из Китая в Россию: особенности и перспективы……... 441

Секция 1.7. Механика деформируемого твердого тела

Абдрашитов Т.Р. Эластомеры. Что это: резина или пластмассы? ……. 445
Алашов М.А., Насыров Н.Н. Обоснование выбора штамповой стали для штамповочных молотов и пуансонов, работающих в условиях термомеханического нагружения……... 450
Арабханов Р.Ш. Развитие методов твердофазной переработки полимеров и угленаполненных композиционных материалов. Современные тенденции и перспективы……..…… 455
Бадретдинова А.А. Преимущества изготовления металлических слоистых композиционных материалов методом сварки взрывом…….. 458
Домрачева А.С. Преимущества и недостатки светоотверждаемых композитов 462
Фахрисламова К.Р. Исследование взаимозаменяемости материалов, используемых в промышленности, на полимерные композиционные материалы…….. 465
Газетдинов Ш.А., Каримов В.Б., Карпов И.К. Влияние конструктивных концентраторов напряжений на ресурс шатунно-поршневой группы ДВС…... 470
Идрисов Э.Э. Исследование влияния фтористых флюсов на свойства слоистых композитов сталь-алюминий……..……... 475
Исхакова А.Х. Стекловолокниты……..…… 478
Юсупова Э.И. Особенности образования интерметаллидов в слоистых композиционных материалах титан-алюминий……..……. 481
Каримова Е.О. Технологический процесс изготовления дисперсно-упрочненных композитов с металлической матрицей……..…….. 486
Кагарманова Р.И. Перспективы развития полимерных композиционных материалов в машиностроении……..…… 490
Каримова Е.О., Бареева Э.Ф. Изготовление полых изделий и полимерных композиционных материалов экструзионно-выдувным путем……... 494
Куренева П.А., Ризаев Р.Э. Особенности структуры композиционных материалов в космической отрасли и их свойства……..……. 497
Махмутова П.К. Оптимизация производства дисперсно-упрочненных композиционных материалов…….. 502
Макеенко Л.И. Композиционные материалы, армированные волокнами. Их структура, технологии и применение……... 506

Мамедов А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния шатуна двигателя внутреннего сгорания в условиях рабочих нагрузок……..... 511
Михеева М.В. Перспективные направления развития конструкционных материалов…… 516
Михайдарова Д.Р., Насретдинова А.А. Экономические аспекты использования композиционных материалов для авиационной промышленности…….. 519
Мкртычев Р.А. Получение металлических материалов жидкофазными способами…….. 525
Нурисламов К.С. Современные методы анализа структуры и свойств полимерных материалов и композитов……..……... 528
Петров Р.В. Инновационные технологии и методы изготовления полимерных композиционных материалов…….….. 532
Платонов Р.А. Проверка результатов аналитического расчёта напряжений турбинного диска ГТД с помощью компьютерного моделирования……..…... 536
Рахматуллина И.Р., Гизатуллина Л.Р. Сравнение механических свойств слоистых композиционных материалов никель-алюминий и титан-алюминий 540
Резяпов Д.Д. Технологический процесс пултрузии для изготовления полимерных композиционных материалов……..…… 545
Сарваров Р.Э. Карбоволокниты с углеродной матрицей: применение и примеры…….. 549
Шавалиев Р.И. Совершенствование процессов формования изделий из полимерных композиционных материалов с использованием эластичной диафрагмы……. 552
Степанова С.В. Технология формования изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки……..……. 557
Сулейманов Т.Т. Повышение ресурса лопаток компрессора методами ионно-плазменного напыления……... 561
Хабибуллин И.Д. Анализ турбинных лопаток ГТД с модификацией канала охлаждения…… 566
Соловьев Е.С. Анализ НДС теплонапряженной лопатки турбины ГТД…..….. 570

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat − текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научное издание

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 1

Материалы
XX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.)

Электронное издание сетевого доступа

За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.
Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 27.07.2026 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 25,40 Мб.
Заказ 207.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: red@uust.ru