

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»**

90 ЛЕТ УГАТУ НА СЛУЖБЕ НАУКЕ, ОБРАЗОВАНИЮ И БИЗНЕСУ

Всероссийская научно-практическая конференция



Уфа 2022

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

90 ЛЕТ УГАТУ НА СЛУЖБЕ НАУКЕ, ОБРАЗОВАНИЮ И БИЗНЕСУ

Всероссийская научно-практическая конференция

Научное электронное издание сетевого доступа

© УУНиТ
ISBN 978-5-7477-5588-8

Уфа 2022

90 лет УГАТУ на службе науке, образованию и бизнесу : материалы Всероссийской научно-практической конференции [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: УУНиТ, 2022. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-215.pdf

Содержатся тезисы, включенные в программу Всероссийской научно-практической конференции «90 лет УГАТУ на службе науке, образованию и бизнесу», состоявшейся в г. Уфе 21–22 ноября 2022 г.

Оргкомитет:

Еникеев Рустэм Далилович, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания»;

Агеев Георгий Константинович, проректор по инновационной деятельности;

Алчанова Регина Данисовна, проректор по экономике и финансам;

Рахманова Юлия Владиславовна, проректор по учебной работе;

Бикбулатова Олеся Фаритовна, начальник управления информационных технологий;

Уразбахтина Юлия Олеговна, декан факультета АВИАЭТ;

Ахмедзянов Дмитрий Альбертович, декан факультета АДЭТ;

Хусаинов Юлдаш Гамирович, директор Института авиационных технологий и материалов;

Ларцева Светлана Александровна, директор Института экономики и управления;

Юлдашев Артур Владимирович, старший преподаватель кафедры высокопроизводительных вычислительных технологий и систем;

Исмагилов Флюр Рашитович, профессор кафедры электромеханики;

Газизов Рафаил Кавыевич, профессор кафедры высокопроизводительных вычислительных технологий и систем;

Валиахметова Юлия Ильясовна, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики;

Вавилов Вячеслав Евгеньевич, заведующий кафедрой электромеханики;

Корзникова Елена Александровна, ученый секретарь оргкомитета, начальник отдела научных изданий, заведующий НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях».

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Компьютерная верстка *Р. М. Мухамадиева*

Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

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.

Подписано к использованию: 27.12.2022

Объем: 4,73 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

450076, Уфа, ул. З. Валиди, 32.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik@ugatu.su

УДК 658.5

Абдуллин Р. А.

ravab98@mail.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Науч. руковод. – канд. техн. наук *Агзамов Р. Д.*

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР МОДУЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Формирование маршрута обработки включает в себе сложный комплекс свода теоретических основ и выбора решений в зависимости от многих входных и выходных параметров. Для оптимизации подхода предлагается автоматизация процесса при помощи создания универсального модуля, присоединяемого к существующим программам САПР. В рамках данного литературного обзора исследуются основные правила, которые следует соблюдать при разработке технологического процесса.

Основные этапы разработки технологического процесса изготовления детали:

1. Изучение чертежа детали для понимания назначения детали и анализ соответствия его техническим требованиям и параметрам точности.

2. Расчет числа изготавливаемых деталей за единицу времени по установленному чертежу, обоснование типа и формы организации производственного процесса изготовления детали.

3. Выбор полуфабриката для изготовления из нее детали.

4. Выбора типа заготовки при невозможности или экономической нецелесообразности изготовления детали из полуфабриката.

5. Определение метода обработки поверхности заготовки и определение числа переходов, в зависимости от требуемого качества, для обработки каждой поверхности.

6. Определение последовательности обработки поверхностей заготовки.

7. Оптимальный выбор технологических баз.

8. Разделение маршрута обработки на операции и выбор оборудования для них.
9. Подбор стандартной технологической оснастки на каждую операцию, разработка требований к оснастке.
10. Расчет припусков и назначение межпереходных размеров с допусками на отклонения показателей точности детали.
11. Оформление чертежа заготовки.
12. Расчет и выбор режимов обработки, исходя из требуемых показателей качества и производительности.
13. Нормирование времени технологического процесса изготовления детали.
14. Разработка альтернативных вариантов технологического процесса для сравнения экономической целесообразности каждого из них и выбора наиболее оптимального.
15. Оформление технологической документации.
16. Разработка технического задания на конструирование специальной оснастки, режущего и измерительного инструмента.



Рис. 1. Схема определения необходимого количества переходов по обработке поверхности А детали

На выбор метода обработки и необходимого количества переходов влияет показатель коэффициент уточнения – отношение допуска на размер заготовки $T_{заг}$ к допуску на соответствующий размер готовой детали $T_{дет}$

$$\varepsilon = \frac{T_{заг}}{T_{дет}}$$

Этот коэффициент невозможно или невыгодно обеспечить за одну операцию, что создает необходимость создавать набор операций, которые превращают заготовку в готовую деталь. Каждая последующая операция на поверхности имеет более высокую точность, чем предыдущая, тогда

$$\varepsilon_k = \frac{T_{k-1}}{T_k},$$

где k – порядковый номер операции; T_{k-1} – допуск на размер, полученный на предыдущей операции; T_k – допуск на соответствующий размер, полученный на данной операции.

Таким образом, чем больше разница между допуском на заготовку и допуском на готовую деталь, тем больше методов обработки участвуют в обеспечении заданной точности детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабораторные и практические работы по технологии машиностроения: учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный, В. В. Непомилуев, А. Н. Семенов, и др.; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2013. 600 с.

УДК 378.147

Ахмедзянов Д. А.

ada@ugatu.ac.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С НАБОРОМ ПЕРЕДОВЫХ «ЦИФРОВЫХ» КОМПЕТЕНЦИЙ

Аннотация: В современных условиях геополитической обстановки, санкционных ограничений и потребностей в развитии высокотехнологичного сектора промышленности крайне актуально и востребовано воссоздание и развитие российской инженерной школы авиадвигателестроения, подготовка инженерных кадров и кадров высшей научной квалификации.

Ключевые слова: подготовка кадров, инженеры нового поколения, цифровые компетенции.

Akhmedzyanov D. A.

ada@ugatu.ac.ru

Ufa University of Science and Technology, Ufa

TRAINING OF NEW GENERATION ENGINEERS WITH A SET OF ADVANCED "DIGITAL" COMPETENCIES

Abstract: In the current conditions of the geopolitical situation, sanctions restrictions and the need for the development of a high-tech industry sector, it is extremely important and in great demand to recreate and develop the Russian aircraft engine engineering school, train engineering and the highest scientific qualification personnel.

Key words: personnel training, new generation engineers, digital competencies.

В современных условиях геополитической обстановки, санкционных ограничений и потребностей в развитии высокотехнологичного сектора промышленности крайне актуально и востребовано воссоздание и развитие российской инженерной школы авиадвигателестроения, подготовка инженерных кадров и кадров высшей научной квалификации.

Одним из самых успешных проектов – спецпроект «Крылья Ростеха» [1]. Это курируемая Государственной корпорацией «Ростех» программа АО «ОДК», которая предоставляет возможность амбициозным молодым людям получить образование мирового уровня и стать конкурентоспособными специалистами в области авиадвигателестроения. АО «ОДК» готовит инженеров нового поколения с набором передовых «цифровых» компетенций,

интегрированных в международное научное пространство, полностью готовых к работе в современных условиях на предприятиях авиадвигателестроительной отрасли (рис. 1).

Проект интересен всем участникам проекта.

Для вузов:

– Исполнение плана по зачислению абитуриентов на целевые места в соответствии с выделенными квотами

– Повышение среднего балла при поступлении на целевое обучение

– Внесение изменений в ООП в соответствии с потребностями реального сектора региональной экономики

– Предоставление дополнительных образовательных услуг на коммерческой основе (при необходимости англ. язык, IT, международные стажировки и др.)

Для предприятий:

– Обучение будущих работников с учетом требований к практической деятельности инженера-конструктора на предприятии

– Повышение уровня компетентности кадрового состава ОКБ за счет приема новых работников со знаниями международного уровня

– Внесение корректировок и предложений в ООП

– Сокращение периода адаптации вновь принимаемых работников – выпускников целевого обучения

– Уменьшение «утечки кадрового потенциала» из регионов

Для студентов:

– Социальная поддержка (оплата общежития, транспортной карты и интернета)

– Повышенная стипендия

– Оплата доп. программ (англ. яз., сдача международного экзамена TOEFL/IELTS, продвинутая IT-подготовка)

– Программы академического обмена

- Закрепление наставника от HR и от ОКБ
- Трудовой стаж с 1 курса обучения
- Карьерный рост



Рис. 1. Экскурсионная программа в ПАО «ОДК-УМПО» для студентов проекта «Крылья Ростеха»

В ФГБОУ ВО «УГАТУ» на факультете авиационных двигателей, энергетики и транспорта данный проект реализуется с 2021 года. Подготовка проекта пилотной группы ГК «Ростех» по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» осуществлена на основе сформированных ГК Ростех и АО «ОДК» требований к профессиональным компетенциям выпускника и сформирована компетентностная модель, прошедшая согласование в АО «ОДК» и ПАО «ОДК-УМПО» [2]. АО «ОДК» сформирован профиль профессиональных, цифровых и IT-компетенций, которыми должен обладать выпускник образовательной программы. Сформированы конкретные требования к уровню владения программным обеспечением в соответствии с индивидуальной траекторией обучения – CAD (Siemens NX CAD), CAE и CAO (ANSYS, IOSO), CAM (Siemens NX CAM), CAPP (Techcard, Imbase, Search), PLM (Siemens Teamcenter), MDM, объектно-ориентированное программирования (C++).

С 2022 года на факультете авиационных двигателей, энергетики и транспорта также реализуется сетевая программа с ООО «Газпром трансгаз Уфа» [3] и УГНТУ (рис.2). Реализация образовательной программы позволит эффективно использовать научно-технический потенциал Инженерно-технического центра ООО «Газпром трансгаз Уфа» для подготовки высококвалифицированных специалистов. В рамках программы разработаны новые образовательные курсы, такие как «Проектирование и эксплуатация газотурбинных установок тепловых электростанций», «Оборудование и системы автоматического регулирования компрессорных станций», «Рабочие процессы горелочных устройств и камер сгорания», «Диагностика и надежность основного и вспомогательного оборудования компрессорных станций», «Основы эксплуатации оборудования компрессорных станций» и др. Выпускники будут обладать компетенциями в области разработки, модернизации и сервисного обслуживания газотурбинных энергетических установок, используемых в газотранспортной системе, и крайне востребованы на рынке труда.



Сетевая программа совместно с Газпром Трансгаз Уфа и УГНТУ

Открыты в 2022 году (набрана 1 группа - 20 студентов)

Шифр	Направление / Специальность	Срок обучения
24.05.02	Проектирование авиационных и ракетных двигателей Специализация: «Проектирование наземных энергоустановок на базе авиационных и ракетных двигателей»	5,5 лет



- ✓ Образовательная программа относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации – гарантия высокой востребованности выпускников на рынке труда.
- ✓ Образовательная программа разработана совместно со специалистами ООО «Газпром трансгаз Уфа» - **прохождение практик в реальных производственных условиях.**
- ✓ Обучение по профильным дисциплинам **проводится ведущими специалистами УУНИТ, УГНТУ и ООО «Газпром трансгаз Уфа»** - оптимальное сочетание теоретических знаний и практико-ориентированной работы.






Рис. 2. Сетевая программа совместно с Газпром Трансгаз Уфа

Такой подход позволяет успешно вести подготовку квалифицированных кадров для различных отраслей экономики, накопить достаточный опыт как в реализации совместных с промышленными предприятиями проектов, так и во внедрении в производство инновационных разработок, а также закрепить будущих специалистов на высокотехнологичных производствах региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://rostecwings.ru/>
2. <https://umpo.ru/>
3. <https://ufa-tr.gazprom.ru/>

УДК 519.1

Баев А. Р.

airat.baev2002@gmail.com

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ТЕОРИЯ ИГР В ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация: В условиях ограниченного резерва времени на реализацию процессов технического обслуживания, наряду с решением задач поддержания высоких уровней эксплуатационной надежности авиационной техники, главной задачей является решение задач по планированию мероприятий, направленных на сокращение простоев воздушного судна на техническом обслуживании, которые во многом зависят от совершенства организации технологического процесса.

Ключевые слова: сетевой технологический график, линейный технологический график, Диаграмма Ганта, методы построения рациональных во времени технологических процессов и графиков.

Baev A. R.

airat.baev2002@gmail.com

Ufa University of Science and Technology, Ufa

GAME THEORY IN AIRCRAFT MAINTENANCE

Abstract: In conditions of a limited time reserve for the implementation of maintenance processes, along with solving the tasks of maintaining high levels of operational reliability of aviation equipment, the main task is to solve the tasks of planning activities aimed at reducing aircraft downtime during maintenance, which largely depend on the perfection of the organization of the technological process.

Key words: network technological graph, Linear technological graph, Gantt diagram, methods for constructing time-rational technological processes and graphs.

Сложно переоценить значимость отлаженного процесса технической эксплуатации. К примеру, час планового простоя самолета Ту-204, который наша страна снова планирует производить в скором времени, оценивается в \$1600 (по данным на 2017 г.).

Название работы “Теория игр” было выбрано не случайно. В результате поисков полезной информации в трудах Макаровского Игоря Мстиславовича «Основы технической эксплуатации и диагностики авиационной техники» встречаются необычные схемы процесса технической эксплуатации, которые больше всего напоминали широко известную задачу про пробки на парадокс Браеса.

Цель работы: применив теорию графов на практике, составить технологический процесс технического обслуживания шасси самолета, рассчитанный под определенное число исполнителей ($N=4$).

Материалы и методы. Условия реализации технологического процесса, такие как трудоемкость и количество исполнителей задавались согласно технологической карте технического обслуживания шасси самолета Ту 204. В качестве базовой модели для решения задачи был выбран сетевой технологический график так как он позволяет наглядно представить взаимосвязь между входящими в его состав операциями. На втором этапе, с учетом заданных условий реализации технологического процесса (числа исполнителей) и его базовой модели, строился рациональный во времени технологический график.

Результаты. Построенный линейный технологический график обеспечивает выполнение условного комплекса работ по технологическому обслуживанию шасси за 95 минут. Полученное значение коэффициента загрузки ($K_z = 85\%$) указывает на избыточное число исполнителей ($N=4$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаровский И. М. Основы технической эксплуатации и диагностики авиационной техники: учеб. пособие / Самар, гос. аэрокосм, ун-т. Самара, 2004. 116 с.
2. Писаренко В. Н. Техническое обслуживание воздушных судов как система поддержания летной годности гражданской авиационной техники: Самара, Издательство СамНЦ РАН, 2017. 170 с.

УДК 519.63

Белевцов Н. С.

nikitabelewtsov@mail.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ С ДРОБНОЙ СТЕПЕНЬЮ ОПЕРАТОРА ЛАПЛАСА

Аннотация: Выполняется исследование дробно-дифференциальных по пространству математических моделей диффузионных и волновых процессов в сложных средах. Нелокальность, создаваемая структурой среды, моделируется за счет использования дробной степени оператора Лапласа. Для возможности применения мультипольного подхода строятся факторизованные разложения фундаментальных решений рассматриваемых уравнений. Разрабатываются последовательные и параллельные мультипольные алгоритмы численного решения дробно-дифференциальных обобщений уравнений Пуассона и Гельмгольца.

Ключевые слова: нелокальность по пространству, дробная степень оператора Лапласа, фундаментальное решение, мультипольное разложение, мультипольный метод, численный алгоритм.

Belevtsov N. S.

nikitabelewtsov@mail.ru

Ufa University of Science and Technology, Ufa

ООО «RN-BashNIPIneft», Ufa

MULTIPOLE METHODS FOR INVESTIGATING FRACTIONAL MODELS WITH THE FRACTIONAL LAPLACIAN

Abstract: Space-fractional mathematical models of diffusion and wave processes in complex media are investigated. Non-locality, produced by the medium, is modeled by utilizing the fractional Laplacian. For the possibility of using a multipole approach, factorized expansions for corresponding fundamental solutions of considered equations are constructed. Sequential and parallel multipole numerical algorithms for fractional Poisson and Helmholtz equations are developed.

Key words: spatial non-locality, fractional Laplacian, fundamental solution, multipole expansion, multipole method, numerical algorithm.

Одной из актуальных задач математического моделирования является исследование диффузионных и волновых процессов, протекающих в сложных средах. В ряде случаев такие процессы характеризуются аномальной кинетикой протекания, которая не подчиняется гауссовой статистике и проявляется в виде нелокальности по времени и/или пространству. Для описания пространственной нелокальности могут использоваться многомерные интегро-

дифференциальные операторы по пространственным переменным, такие как, например, дробная степень оператора Лапласа или потенциал Рисса [1].

Дробное интегро-дифференцирование функций многих переменных может быть представлено в виде дробной степени оператора Лапласа $(-\Delta)^{\alpha/2}$, определяемой в терминах преобразования Фурье F как

$$(-\Delta)^{\frac{\alpha}{2}}u(\mathbf{x}) = F^{-1}(|\mathbf{k}|^{\alpha}(Fu)(\mathbf{k}))(\mathbf{x}). \quad (1)$$

Построение исследуемых в работе моделей выполняется с использованием феноменологического подхода, заключающегося в использовании классических законов сохранения вида

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} = 0 \quad (2)$$

и феноменологических гипотез с дробно-дифференциальными по пространству операторами, например, $\mathbf{q} \sim \nabla R^{\alpha}u$. Среда в этом подходе полагается однородной, а вся нелокальность, создаваемая сложной структурой среды, моделируется за счет таких операторов.

В силу нелокальности операторов дробного интегро-дифференцирования, численный анализ многомерных дробно-дифференциальных моделей приводит к колоссальному количеству вычислительных операций. Для уменьшения количества вычислительных операций могут быть использованы мультипольные методы [2]. Классическая теория мультипольных методов была развита для нахождения решений классических уравнений математической физики в работах В. В. Рохлина и Л. Грингарда [3].

В основе мультипольного подхода лежит использование факторизованных мультипольных разложений фундаментальных решений рассматриваемых уравнений. Фундаментальные решения позволяют построить для рассматриваемых линейных неоднородных уравнений вида $Lu = f$ интегральные представления решений

$$u(\mathbf{x}) = \int_{R^n} f(\xi)G(\mathbf{x} - \xi)d\xi, \quad \mathbf{x} \in R^n, \quad (3)$$

где $G(z)$ – фундаментальные решения соответствующих однородных уравнений $Lu = 0$. Факторизованные разложения

$$G(\mathbf{x} - \xi) = \sum_{m=0}^{\infty} \Phi_m(\mathbf{x}) \Psi_m(\xi)$$

позволяют переписать (3) в виде

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \Phi_m(\mathbf{x}), \quad a_m = \int_{\mathbb{R}^n} f(\xi) \Psi(\xi) d\xi,$$

что дает возможность применять мультипольный подход при построении численных решений рассматриваемых уравнений.

Одним из значимых преимуществ мультипольных методов является их хорошая масштабируемость с точки зрения параллельных вычислений [4], что позволяет еще больше сократить временные затраты при численном исследовании рассматриваемых моделей. Однако ранее ни последовательные, ни параллельные мультипольные алгоритмы не находили своего применения для построения численных решений дробно-дифференциальных уравнений с дробной степенью оператора Лапласа. В работе предлагаются последовательные и гибридные параллельные MPI + OpenMP версии разработанных мультипольных алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987.
2. Rokhlin V. Rapid solution of integral equations of classical potential theory // Journal of computational physics. 1985. Т. 60. №. 2. С. 187–207.
3. Greengard L., Rokhlin V. A new version of the fast multipole method for the Laplace equation in three dimensions // Acta numerica. 1997. Т. 6. С. 229–269.
4. Greengard L., Gropp W. D. A parallel version of the fast multipole method // Computers & Mathematics with Applications. 1990. Т. 20. №. 7. С. 63–71.

*Братченко Л. А.¹, Христофорова Ю. А.¹, Аль-Саммаррае С.¹,
Тупикова Е. Н.¹, Морятов А. А.^{2,3}, Каганов О. И.^{2,3}, Лебедев П. А.³,
Скуратова М. А.⁴, Братченко И. А.^{1а}*

^а iabratchenko@gmail.com

¹ Самарский университет, Самара

² Самарский государственный медицинский университет, Самара

³ Самарский областной клинический онкологический диспансер, Самара

⁴ Самарская областная больница им. В. Д. Середавина, Самара

ОПТИЧЕСКАЯ И ЖИДКОСТНАЯ БИОПСИЯ НЕИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ОСНОВЕ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Аннотация: В исследовании демонстрируется применение обычной Рамановской спектроскопии (РС) для анализа кожи и применение SERS для анализа сыворотки крови для определения рака и заболеваний почек и сердечно-сосудистой системы.

Ключевые слова: социально-значимые заболевания, Рамановская спектроскопия, оптическая биопсия, жидкостная биопсия.

*Bartchenko L. A.¹, Khrstoforova Yu. A.¹, Al-Sammarræ S.¹,
Tupikova E. N.¹, Moryatov A. A.^{2,3}, Kaganov O. I.^{2,3}, Lebedev P. A.³,
Skuratova M. A.⁴, Bratchenko I. A.^{1а}*

^а iabratchenko@gmail.com

¹ Samara University, Samara

² Samara State Medical University, Samara

³ Samara Regional Clinical Oncological Dispensary, Samara

⁴ Samara Regional Clinic named after V. D. Seredavin, Samara

NONINFECTIOUS DISEASES OPTICAL AND LIQUID BIOPSY BASED ON RAMAN SPECTROSCOPY

Abstract: The study demonstrates the use of conventional Raman spectroscopy (RS) for skin analysis and the use of SERS for analysis of blood serum to detect cancer and diseases of the kidney and cardiovascular system.

Key words: socially significant diseases, Raman spectroscopy, optical biopsy, liquid biopsy.

В современной мировой практике появляются перспективные методы диагностики, такие как «оптическая биопсия» и «жидкостная биопсия», которые используются для выявления биомаркеров специфических заболеваний в биологических тканях и жидкостях. Оптические методы могут преодолеть ограничения традиционных методов клинического анализа. Одним из наиболее перспективных методов оптического анализа (и оптической

биопсии) является Рамановская спектроскопия, которая может способствовать пониманию молекулярных основ заболеваний и созданию новых биоаналитических инструментов для диагностики заболеваний. Поскольку каждый вид биологической ткани и биожидкости имеет индивидуальный молекулярный состав и, следовательно, уникальный спектральный профиль, возникающий в результате перехода молекул вещества из одного колебательно-вращательного состояния в другое. Совокупность таких индивидуальных состояний функциональных групп нуклеиновых кислот, белков, липидов и углеводов позволяет охарактеризовать компонентный состав тканей и жидкостей, что в конечном итоге позволяет выделить маркеры заболеваний.

Наряду с использованием методов оптической биопсии возможно применение сверхчувствительной методики анализа биожидкостей на основе поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии (SERS), которая будет наиболее эффективна для выявления низких концентраций маркеров заболеваний в биологических жидкостях. В последнее десятилетие развитие нанотехнологий привело к созданию перспективных инструментов для решения новых задач в изучении различных заболеваний человека, что особенно важно для эффективного и целенаправленного лечения и более глубокого фундаментального понимания биохимии болезней.

Исследование оптической биопсии кожи больных раком кожи выполнено более чем у 600 пациентов Самарского областного клинического диспансера. Исследование оптической биопсии кожи проводили для трех групп испытуемых: целевая группа, состоящая из 85 больных гемодиализом с почечной недостаточностью (90 серий спектров), взрослая контрольная группа, состоящая из 40 здоровых добровольцев (80 спектров) без системных заболеваний и молодые контрольную группу составили 84 здоровых добровольца (168 спектров) без системных заболеваний.

Для жидкостной биопсии на основе SERS был выполнен анализ сыворотки крови человека *in vitro* у 205 человек, в том числе у 69 здоровых

и у 61 больного с хронической сердечной недостаточностью (ХСН). Разделение анализируемых групп на основе глубокого обучения было реализовано с помощью отдельной одномерной сверточной нейронной сети (CNN). Выбор архитектуры CNN для распознавания текущего набора данных SERS состоял из нескольких последовательных этапов. На первом этапе были рассмотрены проверенные конфигурации CNN и передовые практики глубокого обучения на основе CNN. Анализ работ других исследовательских групп показал, что возможными способностями к распознаванию спектров РС характеризуются следующие конфигурации CNN: последовательные CNN, CNN, содержащие модуль Inception, CNN с остаточными связями, ансамблевые СНС, CNN на основе комбинации сверточных слоев с повторяющимися слоями.

Достигнутая точность ROC AUC для CNN значительна ($p < 0,01$) по сравнению с реализацией PLS для всех трех анализируемых задач для рака кожи (доброкачественные и злокачественные, меланома и пигментные поражения, меланома и себорейный кератоз). Для различения злокачественных и доброкачественных новообразований достигнутая ROC AUC с внедрением CNN достигает 0,96 (0,94–0,97; 95% ДИ). Для двух других задач классификации дихотомии значения ROC AUC немного ниже. Результаты показывают, что анализ зашумленных спектров на основе CNN может давать ROC AUC, которые превосходят или, по крайней мере, равны результатам, предоставленным медицинскими специалистами. Применение РС для исследования кожи предплечья дало точность 0,96, чувствительность 0,94 и специфичность 0,99 с точки зрения выявления целевых субъектов с почечной недостаточностью.

Результаты данных SERS для ХСН демонстрируют, что CNN значительно превосходит стандартные методы анализа в качестве проекции на латентные структуры и позволяет выявлять ХСН с точностью 95-100%. С помощью многомерного анализа выделены информативные полосы спектра, ассоциированные с ХСН при прогрессировании заболевания. В целом

изложенный подход может лечь в основу мониторинга состояния здоровья больных ХСН и найти применение при изучении других патологических состояний организма человека.

Оптическая и жидкостная биопсия на основе комбинационного рассеяния может быть перспективной для выявления неинфекционных заболеваний, поскольку она обеспечивает быструю и оперативную диагностику неинфекционных заболеваний.

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021- 2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области.

Гиндуллина Т. К.¹, Демченко М. С.¹, Капустин В. Н.², Гаффарова А. Н.^{1а}

^а gaffarovaaline@yandex.ru

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа

² ООО «АЙПЛ Консалтинг», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BI СИСТЕМ В ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВОМ

Аннотация: Рассмотрена реализация информационно-аналитической поддержки процессов оперативного управления крупных предприятий. Приведены подходы и инструменты обработки больших данных, аспекты внедрения систем бизнес-аналитики. Фрагмент варианта реализации BI-системы на основе данных корпоративной информационной системы на машиностроительном предприятии.

Ключевые слова: корпоративная информационная система; BI-система; оперативное планирование; оперативное управление; мониторинг; информационно-аналитическая поддержка; машиностроительное предприятие.

Gindullina T. K.¹, Demchenko M. S.¹, Kapustin V. N.², Gaffarova A. N.^{1а}

^а gaffarovaaline@yandex.ru

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa

² IPL Consulting, LLC, Moscow

OPERATIONAL MANAGEMENT OF PRODUCTION USING BI SYSTEMS

Abstract: Realization of information-analytical support for operational management processes at large enterprises is considered. Tools, approaches for processing big data, aspects of implementing business intelligence systems are given. Fragment of an option of implementing a BI system based on data from a corporate information system at a machine-building enterprise is given.

Key words: corporate information system, BI-system; operational planning; operational management; monitoring; information-analytical support; machine-building enterprise.

По оценкам аналитической группы Gartner на сегодняшний день одним из востребованных ИТ-направлений для поддержки бизнеса является направление развития платформ, приложений и технологий, объединенных понятием «бизнес-аналитика» (Business Analytics). На рынке информационных технологий большое количество предложений платформ и сервисов для разработки новых систем поддержки принятия решений (СППР) — информационную бизнес-аналитику на основе облачных вычислений которая предоставляет возможность мониторинга поддерживаемых бизнес-процессов в режиме времени, близком к реальному.

Около 30% проектов внедрения BI - систем оказываются успешными – считают аналитики Technology Evaluation Centers (TEC). Общего подхода к выбору системы бизнес-аналитики не существует, каждое предприятие формирует собственные критерии выбора, исходя из особенностей бизнеса, возникших проблем и специфики отрасли. Основными результатами внедрения автомобильным холдингом «Атлант-М» системы QlikView Business Discovery являются формирование детальных аналитических отчетов для уровней управления от руководителя отдела автоцентра до генерального директора и возможность работы в едином информационном поле с проведением разностороннего анализа корпоративной информации в режиме реального времени [2]. При внедрении IBM Watson Analytics на предприятии ОАО Объединенные машиностроительные заводы были автоматизированы основные процессы управления рисками [4].

В рамках ведения BI-проекта одной из основных проблем является решение вопросов сбора и обработки требований заказчика, а также исходных данных – фундаментального компонента BI системы, без стандартизации которого велик риск получить некорректные результаты [3]. Имеет значение не только определение релевантной информации для формирования и обработки запросов с целью создания отчетов актуальных на сегодняшний день, но и прогнозирование - какие данные могли бы потребоваться в дальнейшем, какие формы отчетности могут быть востребованы; а также частота синхронизации данных, консолидация и очистка данных. Таким образом, при проектировании BI-системы для дальнейшего ее внедрения на машиностроительном предприятии был не только выполнен тщательный анализ данных, имеющихся на данный момент в корпоративной информационной системе, но и выявлена возможность создания функциональных доработок, позволяющих в полной мере удовлетворить требования предприятия к формату и содержанию отчетной документации, генерируемой системой бизнес-аналитики.

BI-платформа дает возможность получать регламентированные отчеты, строить произвольные запросы, но наибольший интерес для управляющего персонала представляет инструментарий управляющих панелей (Dashboards). Однако их проектирование и реализация являются одними из наиболее сложных задач. Процесс создания показателей эффективности, поддерживающих движение компании в сторону стратегических целей, определение их взаимосвязей и иерархий, обеспечение их достоверными данными, а также удобная их визуализация существенно влияют на результат всего проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.Н. Брускин. Методы и инструменты продвинутой бизнес-аналитики для корпоративных информационно-аналитических систем в эпоху цифровой трансформации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. №3-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-instrumenty-prodvinutoy-biznes-analitiki-dlya-korporativnyh-informatsionno-analiticheskikh-sistem-v-epohu-tsifrovoy> (дата обращения: 01.10.2022).
2. Сайт TAdviser. [https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Атлант-М_\(QlikView_Business_Discovery\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Атлант-М_(QlikView_Business_Discovery)) (дата обращения: 01.11.2022).
3. Е.Т. Беляева. Проблемы системы Business Intelligence // Евразийский научный журнал. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-sistemy-business-intelligence> (дата обращения: 01.10.2022).
4. Р.Р. Юмагулова. Business intelligence в отрасли машиностроения // Вестник магистратуры. 2016. №6-2 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/business-intelligence-v-otrasli-mashinostroeniya> (дата обращения: 01.10.2022).
5. Г.Г. Куликов, А.В. Речкалов, А.В. Артюхов. Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-sistemnogo-modelirovaniya-adaptivnogo-upravleniya-mashinostroitelnym-proizvodstvom> (дата обращения: 01.10.2022).

Гиндуллина Т. К.^а, Камалова Л. З.

^а *tamara_ugatu@mail.ru*

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ТРАЕКТОРИИ РАЗВИТИЯ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ

Аннотация: Рассмотрен подход формирования индивидуальной образовательной траектории развития обучающегося через автоматический поиск подходящих электронных ресурсов, исходя из предпочтения пользователя образовательного портала. Такой подход позволяет следовать образовательной цели, вектор которой смещен в сторону создания условий для самоопределения обучающегося и его самореализации.

Ключевые слова: индивидуальная траектория развития обучающегося, электронное образование, цифровое пространство, образовательный портал, диаграммы Ганта.

Gindullina T. K.^а, Kamalova L. Z.

^а *tamara_ugatu@mail.ru*

Ufa University of Science and Technology, Ufa

FORMATION OF THE DIGITAL TRAJECTORY OF THE STUDENT'S DEVELOPMENT

Abstract: An approach to formation of an individual educational trajectory of a student's development through an automatic search for suitable electronic resources is considered. This approach is based on the preferences of the user of the educational portal and allows to follow educational goal, which vector is shifted towards creating conditions for self-determination and self-realization of the student.

Key words: individual trajectory of a student's development, electronic education, cyberspace, educational portal, Gantt charts.

Выстраивание своего цифрового маршрута развития способствует формированию умений самостоятельной работы обучающимся. Возможность настраивать собственный темп работы, возвращаться к неусвоенным, непонятым разделам учебной программы позволяет обучающемуся не зависеть от времени и занятости преподавателя. Траектория развития позволит значительно повысить самостоятельность обучающегося, увеличить эффективность распространения учебных материалов, способствовать развитию электронного образования, личностно-ориентированных стандартов обучения, соответствовать принципу индивидуализации. Актуальность работы обусловлена тем, что в нынешней ситуации плодотворная деятельность обучающегося во многом возможна при условии реализации инновационного

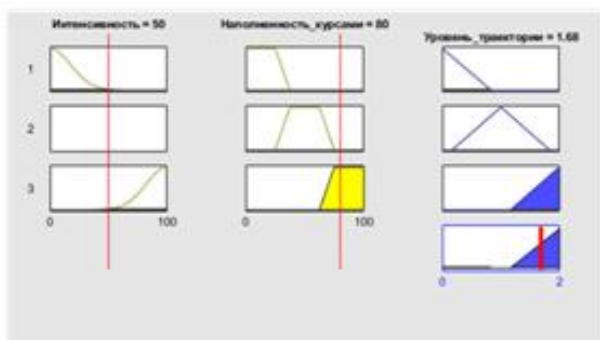
потенциала, заложенного в электронном обучении, развитию которого способствует появление возможности у обучающегося строить собственную траекторию развития.

На данный момент ни один образовательный портал не может обеспечить всеми инструментами, чтобы обучающийся мог самостоятельно сформировать свою собственную траекторию развития. Часто наличие лишь библиотеки курсов вынуждает обучающегося прибегать к помощи интернета, где он ведет поиск недостающей информацией. Всю найденную информацию приходится где-то у себя фиксировать, упорядочивать. Образовательный портал, который позволит формировать цифровую траекторию развития, повысит интерес со стороны обучающихся к получению знаний через цифровое пространство, что окажет благоприятное влияние на развитие электронного образования.

Индивидуальная образовательная траектория развития – это план реализации собственного потенциала в образовании. Целью построения маршрута является возможность иметь четкое представление того, чего желаешь достичь как в долгосрочной, так и в краткосрочной перспективе.

Для реализации проектируемой информационной системы предлагается использовать систему на основе нечеткой логики, в основе которой лежит математическая теория нечетких множеств, главная идея которой состоит в том, что человек в своей повседневной жизни мыслит и принимает решения на основе нечетких понятий. Фрагмент системы, который основывается на наполненность траектории образовательными курсами и интенсивность подготовки, представлен на рис. 1.

Общая схема системы нечеткой логики



Поверхность системы нечеткого вывода

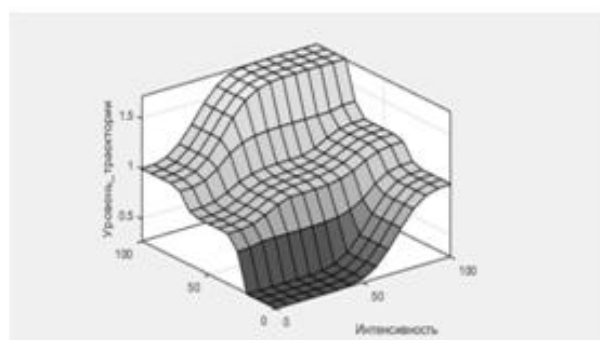


Рис. 1. Общая схема нечеткой логики и поверхность нечеткого вывода

На рис. 2. показана сформированная траектория развития обучающегося на примере старшеклассника. Предлагаемая траектория развития обучающегося выполнена в виде диаграммы Ганта. Это довольно удобный способ отразить задачи, которые необходимо по плану выполнить в определенный день. На траектории выводится общая информация о выбранной специальности. Ее название, код, выбранный вуз. Также располагается информация о текущей дате.

Сверху блока «Курсы» располагается справочная информация о том, в какой срок происходит подача документов для поступления. В показанном примере видно, что отражено начало приема документов, окончание приема документов, дата публикации конкурсных списков, окончание приема согласий на зачисление. На самой траектории данные даты отражены красным цветом, чтобы пользователю наглядно было представлено, в какие дни у него есть возможность подать документы.

Блок «Курсы» состоит из названия выбранного курса, даты начала по плану, плановая длительность прохождения курса, дата начала фактического выполнения курса и фактическая продолжительность прохождения курса на данный момент. Последние два столбца уже заполняется пользователем. Система располагает дни прохождения курсов с даты приема документов, так как дата приема в данном случае является конечной целью. Пользователь, конечно, может настроить какой-нибудь отдельный курс, чтобы планирование прохождения не учитывало время начала приема документов в высшие учебные заведения. Это на случай, когда старшеклассник планирует обучаться на данном курсе уже после поступления на выбранную специальность. Продолжая тему планирования, траектория на промежутке прохождения курса распределяет равномерно часы работы по дням. Пользователь вносит позже свои значения отработанного времени. Если пользователь работает недостаточно, то последний день прохождения курса будет сдвигаться. Также это работает и в обратном случае. Важно упомянуть последний столбец в блоке

Теперь старшекласнику, чтобы сформировать образовательную траекторию развития, достаточно посетить портал, который будет содержать все необходимые инструменты для построения траектории и работы с ней. Список образовательных курсов, список олимпиад, материалы для подготовки к экзаменам, специальности в вузах, ссылки на профориентационные тесты – все будет под рукой пользователя. Разработанная траектория развития содержит не только ссылки на различные курсы и учебные заведения, но позволяет планировать свое обучение и отслеживать ее выполнение.

Сокращение временных затрат на процесс формирования собственного маршрута развития позволит обучающемуся правильно и рационально распределить сэкономленные ресурсы на подготовку. В наше время многие выпускники общеобразовательных учреждений не имеют представления, с чем связать им свое будущее. Поэтому важно обеспечить их инструментами, благодаря которым они смогли бы развивать в себе умелых, востребованных специалистов, обладающих всеми необходимыми знаниями в выбранной ими профессиональной сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев И. В., Торский Р. Б., Кравченко С. В. Цифровая платформа как технология проектирования и реализации образовательных траекторий школьников в модели дополнительного образования «Территория интеллекта» // Научно-педагогическое обозрение. Pedagogical Review. 2019. 5 (27). С 107–116 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-platforma-kak-tehnologiya-proektirovaniya-i-realizatsii-obrazovatelnyh-traektoriy-shkolnikov-v-modeli-dopolnitelnogo> (дата обращения: 18.03.2021).
2. Куликов Г. Г., Брейкин Т. В., Арьков В. Ю. Интеллектуальные информационные системы: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1999. 129 с.
3. Кучугурина М. В. Использование онлайн-платформ для обеспечения индивидуальной образовательной траектории обучающихся // Образовательная социальная сеть nsportal.ru Опубликовано 18.11.2020. URL:<https://nsportal.ru/nachalnaya-shkola/obshchepedagogicheskie-tehnologii/2020/11/18/ispolzovanie-onlayn-platform-dlya> (дата обращения: 18.03.2021).
4. Об утверждении Положения о Министерстве цифрового развития государственного управления Республики Башкортостан. Уфа, 2019. 15 с. URL: <https://www.garant.ru/hotlaw/bashkor/1315136> (дата обращения: 18.03.2021).
5. Постановление Правительства РФ от 18 апреля 2016 г. № 317 «О реализации Национальной технологической инициативы» (с изменениями и дополнениями) // ГАРАНТ. URL: <https://base.garant.ru/71380666> (дата обращения: 18.03.2021).
6. Портал электронного образования Республики Башкортостан URL: <https://edu.bashkortostan.ru/> (дата обращения: 18.03.2021).

УДК 517.95

Голубятников В. П.

golubyatn@yandex.ru

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

МОДЕЛЬ ГЕННОЙ СЕТИ В ПРИСУТСТВИИ ДИФФУЗИИ

Аннотация: Получены необходимые условия существования периодических режимов функционирования трехмерной кольцевой генной сети в присутствии диффузии. Описаны возможные обобщения полученных результатов на подобные модели больших размерностей.

Ключевые слова: кусочно-линейные динамические системы, фазовые портреты, циклы, уравнение диффузии.

Golubyatnikov V. P.

golubyatn@yandex.ru

Sobolev Institute of Mathematics, SB RAS, Novosibirsk

ONE GENE NETWORK MODEL IN PRESENCE OF DIFFUSION

Abstract: Necessary conditions for existence of periodic regimes of functioning of 3D circular gene network in presence of diffusion are obtained. Possible generalizations of these results to higher-dimensional models are described.

Key words: piecewise linear dynamical systems, phase portraits, cycles, diffusion equation.

Изучается трехмерная динамическая система с разрывными правыми частями, моделирующая генную сеть кольцевого типа в присутствии диффузии ее компонент по объему биологической клетки:

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} - c_j^2 \Delta u_j = k_j (L_j(u_{j-1}) - u_j), \quad j=1,2,3; \quad j-1=3 \text{ при } j=1. \quad (1)$$

Здесь $k_j > 0$ положительные постоянные, описывающие разложение компонент генной сети. Оператор Лапласа вычисляется по координатам x, y, z в клетке и соответствует процессу диффузии этих компонент по ее объему.

Искомые функции $u_1(t, x, y, z)$, $u_2(t, x, y, z)$, $u_3(t, x, y, z)$ описывают концентрации этих компонент, монотонно убывающие ступенчатые функции L_j моделируют отрицательные связи между ними:

$$L_j(w) = k_j a_j \text{ при } 0 \leq w \leq 1; \quad L_j(w) = 0 \text{ при } 1 < w.$$

Будем рассматривать случай, когда $a_j > 1$ при всех j . Если $a_j \leq 1$ хотя бы для одного из номеров j , система (1) циклов не имеет, см. [1, 2].

Рассмотрим в фазовом портрете системы (1) инвариантную область $Q^3 = [0, a_1] \times [0, a_2] \times [0, a_3]$. Плоскости $u_j = 1$ разбивают ее на 8 блоков, которые нумеруются бинарными мульти-индексами: блок $\{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3\} \subset Q^3$ определяется неравенствами $0 \leq u_j \leq 1$ при $\varepsilon_j = 0$, и $1 < u_j \leq a_j$ при $\varepsilon_j = 1$. В каждом из этих блоков система (1) распадается на три независимых параболических уравнения. В работах [3,4] подобные инвариантные области и их разбиения построены и для многомерных аналогов системы (1). Обозначим через W_1 объединение шести блоков, перечисленных в следующей диаграмме

$$\{011\} \rightarrow \{010\} \rightarrow \{110\} \rightarrow \{100\} \rightarrow \{101\} \rightarrow \{001\} \rightarrow \{011\} \rightarrow \dots \quad (2)$$

В работе [2] показано, что если $c_j^2 = 0$ и $a_j > 1$ при всех $j=1,2,3$, то область W_1 инвариантна относительно положительных сдвигов вдоль траекторий системы (1) и содержит в точности один цикл C системы (1), который проходит по блокам согласно стрелкам диаграммы (2). В случае, когда диффузия в функционировании геной сети присутствует, справедлива

Теорема. Если $a_j > 1$ при всех j , то для каждой точки $X_0 = (x_0, y_0, z_0)$ в клетке начинающиеся в области W_1 траектории $(u_1(t, X_0), u_2(t, X_0), u_3(t, X_0))$ системы (1) проходят через блоки этой области согласно стрелкам диаграммы (2).

На основе комбинаторных схем построений таких диаграмм, см. [4, 5], полученные результаты переносятся и на широкий класс математических моделей бóльших размерностей, рассмотренных в [6,7].

Работа выполнена в рамках проекта FWNF-2022-0009 Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубятников В. П., Иванов В. В., Минушкина Л. С. // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. 2018. Т. 18, № 3. С. 27–35.
2. Голубятников В. П., Иванов В. В. // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. 2018. Т. 18, №. 4. С. 19–28.
3. Иванов В. В. // Сибирский журнал индустриальной математики. 2022. Т. 25, № 3. С. 25–32.
4. Glass L., Pasternack J. C. // Journal of Mathematical Biology. 1978. V. 6. P. 207–223.
5. Кириллова Н. Е., Минушкина Л. С. // Известия АлтГУ. 2019. Т. 108, С. 82–85.
6. Аюпова Н. Б., Голубятников В. П. // Сибирский журнал индустриальной математики. 2021. Т. 24, № 3. С. 19–29.
7. Голубятников В. П., Минушкина Л. С. // Сиб. матем. журнал. 2022. Т. 63, № 1. С. 95–103.

Демченко М. С. ^{1а}, Чернова Е. В. ^{1б}, Коростелев М. С. ¹, Набиев Р. Р. ^{1,2}

^а marina.demchenko@iplc.ru, ^б eva.chernova99@mail.ru

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа

² «АЙПЛ Консалтинг», Проектный офис, Уфа

СТРУКТУРИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НОРМАТИВНО-СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация: Описаны принципы работы и взаимосвязи объектов нормативно-справочной информации, системных моделей предприятия и инструкций пользователей, приведена схема их формирования. Сформированы принципы классификации объектов нормативно-справочной информации. Приведен фрагмент модели классификации объектов с использованием аппарата теории категорий.

Ключевые слова: корпоративная информационная система; нормативно-справочная информация; теория категорий; машиностроительное предприятие; классификация объектов машиностроительного предприятия; структуризация объектов машиностроительного предприятия.

Demchenko M. S. ^{1a}, Chernova E. V. ^{1b}, Korostelev M. S. ¹, Nabiev R. R. ^{1,2}

^а marina.demchenko@iplc.ru, ^б eva.chernova99@mail.ru

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa

² IPL Consulting, Project office, Ufa

STRUCTURING OF OBJECTS OF NORMATIVE REFERENCE INFORMATION OF A MACHINE BUILDING ENTERPRISE

Abstract: The principles of operation and the relationship of reference information, system models of enterprises and user instructions are described, and a scheme for their formation is given. Decisions on the decisions of normative and reference information are formulated. Fragments of resolutions of objects using analytical materials are given.

Key words: corporate information system; normative reference information; category theory; machine-building enterprise; classification of objects of a machine-building enterprise; structuring of objects of a machine-building enterprise.

На крупных предприятиях отрасли машиностроения одной из проблем при внедрении корпоративной информационной системы является проблема структуризации и приведения к единому формату данных нормативно-справочной информации. Отсутствие единого подхода к структуризации объектов нормативно-справочной информации влечёт за собой ресурсные затраты почти на каждом из этапов проектов по внедрению информационных

систем. Данная проблема возникает достаточно часто ввиду постоянного появления новых документов или обновления старых.

В данной статье представлены результаты исследования, целью которого является поиск, обозначение, а также формализация решений описанных выше проблем.

Драчев В. П.

v.drachev@skoltech.ru

Сколковский институт науки и технологий, Москва

ПЛАЗМОННЫЕ УСТРОЙСТВА В КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКЕ

Очевидным преимуществом технологии кремний-на-изоляторе (КНИ) является совместимость с существующими полупроводниковыми технологиями производства структур «металл-окисел-полупроводник».

В докладе будут представлены работы Лаборатории Плазмоники Сколтеха [1–4] по разработке фотонных интегральных схем для оптоэлектронных компонент радиофотоники и нового поколения беспроводной связи. Гибридная интегральная технология кремниевой фотоники и плазмоники позволяет изготавливать эффективные электрооптические устройства. Будут рассмотрены также перспективные применения, такие как опто-ТГц преобразователь/генератор и когерентное детектирование ТГц сигналов для беспроводной связи следующего поколения [5] и широкополосных аналого-цифровых преобразователей диапазона сверхвысоких частот [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pshenichnyuk I. A., Nazarikov G. I., Kosolobov S. S., Maimistov A. I., and Drachev V. P. Edge-plasmon assisted electro-optical modulator. *Phys. Rev. B* 2019; 100(19): 195434. DOI: 10.1103/PhysRevB.100.195434.
2. Маймистов А. И., Пшеничнюк И. А., Косолюбов С. С., Драчев В. П. Цепочки связанных микрорезонаторов в интегральной оптике, *Прикладная фотоника Т. 7, № 2 (2020)*. <http://doi.org/10.15593/2411-4367/2020.2.01>.
3. D.S. Zemtsov, D.M. Zhigunov, S.S. Kosolobov, A.K. Zemtsova, M. Puplauskis, I.A. Pshenichnyuk, and V.P. Drachev, Broadband silicon grating couplers with high efficiency and robust design, *Optics Letters*. Vol. 47. №. 13. 1 July 2022.
4. RF Patent 2021125699/28(054303) Косолюбов С.С., Пшеничнюк И. А., Жигунов Д. М., Земцов Д. С., Косолюбов В. С., Драчев В.П. Планарный электрооптический модулятор света на полевом эффекте возбуждения угловых плазмонов в гибридном волноводе.
5. T. Harter, S. Muehlbrandt, S. Ummethala, A. Schmid, S. Nellen, L. Hahn, W. Freude and C. Koos, Silicon–plasmonic integrated circuits for terahertz signal generation and coherent detection, *Nature Photonics* 12, 625–633 (2018).
6. Р. С. Стариков, Фотонные АЦП, «Успехи современной радиоэлектроники», 2015 г., № 2. Р. 3–39.

УДК 517.9

Зотова Е. И.¹, Муртазина Р. Д.^{1а}, Низамова А. Д.², Уразбахтина Л. З.¹

^а reginaufa@yandex.ru

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа

² Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ЭЙЛЕРА-ПУАССОНА С НУЛЕВЫМ ОБОБЩЕННЫМ ИНВАРИАНТОМ ЛАПЛАСА

Аннотация: Для трехкомпонентной системы уравнений Эйлера – Пуассона найдено решение с нулевыми главными инвариантами Лапласа.

Ключевые слова: система уравнений Эйлера-Пуассона, главный инвариант Лапласа, обобщенный инвариант.

Zotova E. I.¹, Murtazina R. D.^{1а}, Nizamova A. D.², Urazbakhtina L. Z.¹

^а reginaufa@yandex.ru

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa

² Mavlutov Institute of Mechanics of RAS, Ufa

THREE-COMPONENT SYSTEM OF EULER-POISSON EQUATIONS WITH ZERO GENERALIZED LAPLACE INVARIANT

Abstract: A solution with zero principal Laplace invariants is found for the three-component system of Euler-Poisson equations.

Key words: Euler-Poisson system of equations, principal Laplace invariant, generalized invariant.

Рассмотрим систему уравнений

$$u_{xy} + A \cdot \frac{1}{x+y} u_x + B \cdot \frac{1}{x+y} u_y = 0, \quad (1)$$

где A и B – квадратные матрицы третьего порядка, $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$.

Главный инвариант Лапласа определяется формулой

$$H_0 = (B - E) \cdot A \cdot \frac{1}{(x+y)^2}.$$

Преобразование вида $u = Tv$ (T – невырожденная матрица) систему (1) приведет к виду

$$u_{xy} + \tilde{A} \cdot \frac{1}{x+y} u_x + \tilde{B} \cdot \frac{1}{x+y} u_y = 0, \quad (2)$$

где $\tilde{A} = T^{-1}AT$, $\tilde{B} = T^{-1}BT$.

После преобразования матрица \tilde{H}_0 примет вид

$$\tilde{H}_0 = \frac{1}{(x+y)^2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Пусть выполнены условия существования и единственности обобщенных инвариантов

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial y} + A \cdot \frac{1}{x+y} \right) \cdot \text{Ker} X_k \subset \text{Ker} X_k; \\ & \left(\frac{\partial}{\partial x} - \left(B \cdot \frac{1}{x+y} \right)^T \right) \text{Ker} X_1^T \subset \text{Ker} X_1^T, \quad i=1,2,\dots,k; \\ & \text{Ker} X_1^T \subset \text{Ker} X_2^T \subset \dots \subset \text{Ker} X_k^T. \end{aligned}$$

Тогда обобщенные инварианты Лапласа для системы уравнений (2) вычисляются по формуле

$$\tilde{X}_n = \tilde{H}_n \cdot \dots \cdot \tilde{H}_0 = \frac{1}{(x+y)^{2(n+1)}} \cdot \begin{pmatrix} \prod_{i=1}^n \left(\tilde{b}_{11} - \tilde{a}_{11} - \frac{i^2 + i - 1}{i} \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где \tilde{a}_{11} и \tilde{b}_{11} – элементы матриц \tilde{A} и \tilde{B} соответственно.

Матрицы \tilde{A} и \tilde{B} когда обобщенный инвариант \tilde{X}_n равен нулю имеют один из следующих представлений

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \begin{pmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \tilde{a}_{23} \\ \tilde{a}_{31} & \tilde{a}_{32} & \tilde{a}_{33} \end{pmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{pmatrix} \tilde{b}_{11} - \frac{1}{n} - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \\ \text{или } \tilde{A} &= \begin{pmatrix} -n & 0 & 0 \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \tilde{a}_{23} \\ \tilde{a}_{31} & \tilde{a}_{32} & \tilde{a}_{33} \end{pmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{pmatrix} \tilde{b}_{11} + n - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \end{aligned}$$

$$\text{или } \tilde{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tilde{B} = \begin{pmatrix} n+1 & \tilde{b}_{12} & \tilde{b}_{13} \\ 0 & \tilde{b}_{22} & \tilde{b}_{23} \\ 0 & \tilde{b}_{32} & \tilde{b}_{33} \end{pmatrix};$$

$$\text{или } \tilde{A} = \begin{pmatrix} -n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tilde{B} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{n}+1 & \tilde{b}_{12} & \tilde{b}_{13} \\ 0 & \tilde{b}_{22} & \tilde{b}_{23} \\ 0 & \tilde{b}_{32} & \tilde{b}_{33} \end{pmatrix};$$

$$\text{или } \tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & 0 & 0 \\ \tilde{a}_{21} & 0 & 0 \\ \tilde{a}_{31} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tilde{B} = \begin{pmatrix} \tilde{b}_{11} & \tilde{b}_{12} & \tilde{b}_{13} \\ 0 & \tilde{b}_{22} & \tilde{b}_{23} \\ 0 & \mu(\tilde{b}_{22}-1) & \mu(\tilde{b}_{23}+1) \end{pmatrix};$$

$$\text{или } \tilde{A} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & 0 & 0 \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \tilde{a}_{23} \\ \tilde{a}_{31} & \lambda\tilde{a}_{32} & \lambda\tilde{a}_{33} \end{pmatrix}, \tilde{B} = \begin{pmatrix} \tilde{b}_{11} & \tilde{b}_{12} & -\frac{\tilde{b}_{12}}{\lambda} \\ 0 & \tilde{b}_{22} & -\frac{\tilde{b}_{22}-1}{\lambda} \\ 0 & \mu(\tilde{b}_{22}-1) & -\frac{\mu(\tilde{b}_{22}-1)}{\lambda}+1 \end{pmatrix}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жибер А. В., Соколов В. В. Метод каскадного интегрирования Лапласа и уравнения, интегрируемые по Дарбу. Уфа: Изд-е Башкирск. Ун-та, 1996. 56 с.
2. Кудашева Е. Г., Муртазина Р. Д., Низамова А. Д., Сидельникова Н. А. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. Устойчивость течения жидкостей в канале с линейным профилем температуры. М.: Русайнс, 2021. 134 с.
3. Зотова Е. И., Муртазина Р. Д. // Proceedings the 7th International Conference on Nonlinear Analysis and Extremal Problems (NLA-20022). Irkutsk: ISDCT SB RAS. 2022. С. 158–159.
4. Гурьева А. М. Метод каскадного интегрирования Лапласа и нелинейные гиперболические системы уравнений. Дисс. канд. физ.-мат. наук. 2005. 172 с.
5. Жибер А. В., Муртазина Р. Д., Хабибуллин И. Т., Шабат А. Б. Уравнения математической физики. Нелинейные интегрируемые уравнения. М.: Юрайт, 2022. 375 с.

Коггала Лианге Ч. М.^а, Шайхулова А. Ф.^б
^а chethanaliyanage41@gmail.com, ^б shaihulova@inbox.ru
Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ТРЕБОВАНИЯ ИНДУСТРИИ 4.0 К ОРГАНИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Аннотация: В статье представлены требования к внедрению индустрии 4.0 в организацию предприятий машиностроительной отрасли. Также в этой статье представлены принципы проектирования индустрии 4.0, цели индустрии 4.0 и то, как сотрудники могут получить информацию об изменяющихся технологиях и о том, как адаптироваться к ним, что не повлияет на их текущую работу. Наконец, в этой статье показаны преимущества внедрения индустрии 4.0 в организации более низкого поколения.

Ключевые слова: ИНДУСТРИИ 4.0; техническая подготовка производства; организация производства; производственный менеджмент; умные производства.

Koggala Liyanage C. M.^а, Shaihulova A. F.^б
^а chethanaliyanage41@gmail.com, ^б shaihulova@inbox.ru
Ufa University of Science and Technology, Ufa

INDUSTRY 4.0 REQUIREMENTS FOR THE ORGANIZATION OF ENTERPRICES IN THE MACHINE BUILDING INDUSTRY

Abstract: The article presents the requirements for the introduction of industry 4.0 in the organization of enterprises in the engineering industry. This article also presents industry 4.0 design principles, industry 4.0 goals, and how employees can learn about changing technologies and how to adapt to them without affecting their current work. Finally, this article shows the benefits of implementing Industry 4.0 in lower generation organizations.

Key words: Industry 4.0; technical preparation of production; organization of production; production management; smart manufacturing.

Введение

Четвертая промышленная революция, 4ПР или Индустрия 4.0, концептуализирует быстрые изменения в технологиях, отраслях и социальных моделях и процессах в 21 веке из-за растущей взаимосвязи и интеллектуальной автоматизации. Популярно придуманная основателем и исполнительным председателем Всемирного экономического форума Клаусом Швабом, она утверждает, что наблюдаемые изменения — это больше, чем просто повышение эффективности, но они отражают значительный сдвиг в промышленном капитализме [1].

Частью этой фазы промышленных изменений является объединение таких технологий, как искусственный интеллект, редактирование генов, с передовой робототехникой, которые стирают границы между физическим, цифровым и биологическим мирами.

При этом происходят фундаментальные сдвиги в том, как работает глобальная сеть производства и поставок за счет постоянной автоматизации традиционных производственных и промышленных методов, использования современных интеллектуальных технологий, крупномасштабной межмашинной связи (M2M) и Интернета вещей. (IoT). Эта интеграция приводит к повышению уровня автоматизации, улучшению связи и самоконтроля, а также к использованию интеллектуальных машин, которые могут анализировать и диагностировать проблемы без необходимости вмешательства человека [2].

Он также представляет собой социальный, политический и экономический переход от эпохи цифровых технологий конца 1990-х и начала 2000-х годов к эпохе встроенных средств связи, отличающейся универсальностью и общностью технологического использования во всем обществе (например, метавселенная), которая меняет способы мы переживаем и познаем мир вокруг нас. Он утверждает, что мы создали и входим в расширенную социальную реальность по сравнению только с естественными чувствами и промышленными способностями одних только людей [3].

Принципы проектирования Индустрии 4.0

Индустрия 4.0 построена на 4 основных принципах

– Совместимость

Способность машин, устройств, датчиков и людей подключаться и общаться друг с другом через Интернет вещей (IoT) или Интернета людей (IoP).

– Информационная прозрачность

Способность информационных систем создавать виртуальную копию физического мира путем обогащения цифровых моделей растений данными

датчиков. Это требует агрегирования необработанных данных датчиков в более ценную контекстную информацию.

- Техническая поддержка

- Во-первых, способность вспомогательных систем поддерживать людей путем сбора и визуализации информации понятно для принятия обоснованных решений и решения срочных проблем в короткие сроки.

- Во-вторых, способность киберфизических систем (КФС) физически поддерживать людей, выполняя ряд задач которые неприятны, слишком утомительны или небезопасны для их коллег-людей. ПРИМЕЧАНИЕ. CPS – это системы, объединяющие вычисления, сетевые и физические процессы.

- Децентрализованные решения

Способность СУЗ самостоятельно принимать решения и выполнять свои задачи максимально автономно. В случае исключения, помехи или конфликтующие цели, задачи делегируются на более высокий уровень [4].

Цели Индустрии 4.0

- Используйте глобальные возможности с помощью Интернета и комплексного управления данными

- Улучшенная связь с корпоративными системами и системами B2B

- Улучшенная отслеживаемость ресурсов и продуктов

- Интеллектуальная обработка и принятие решений локально на периферии сохраняя полный вид в облаке

- Более высокая гибкость и адаптивность производственной линии

- Более быстрая реконфигурация и адресация небольших партий

- Более высокое качество продукции

- Улучшенное техническое обслуживание и сокращение времени простоя

- Более высокая безопасность [4]

Системы в производстве

- ERP – Планирование ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning)

- MES – Система управления производством (Manufacturing Execution System)
- LIMS – система управления лабораторной информацией (Laboratory Information Management System)
- CMMS – Компьютеризированная система управления техническим обслуживанием (Computerized Maintenance Management System)
- EMS – система управления энергопотреблением (Energy Management System)
- SCADA – Диспетчерское управление и сбор данных (Supervision Control and Data Acquisition)
- HMI – человеко-машинный интерфейс (Human Machine Interface)
- PLC – программируемый логический контроллер (Programmable Logic Controller) [5]

Требования для Индустрии 4.0

Основным требованием индустрии 4.0 является понимание вышеприведенных систем и их особенностей.



Рис. 1. Системы в производстве

Заказы клиентов, запасы материалов и планирование ресурсов управляются в системе ERP. Здесь определяется все, что должно быть произведено, с какими материальными затратами и по какой цене. В ERP выдается окончательный выпуск производственного заказа, после чего он фактически производится.

В идеале уровень производства управляется MES. Здесь производственные заказы из ERP обогащаются машинными данными, так что создаются машинные рецепты. Кроме того, машинные данные записываются для расчета эффективности, мониторинга потребления и условий, а также для регистрации и сообщения о любых ошибочных ситуациях.

В LIMS хранятся и обрабатываются данные о качестве продукции и производственных материалов. Многие производственные процессы зависят от данных LIMS и контролируются ими.

Система управления техническим обслуживанием (CMMS) отслеживает требования к техническому обслуживанию всех машин и компонентов производственной линии и дает соответствующие инструкции по техническому обслуживанию, чтобы избежать поломок.

Управление энергопотреблением регистрирует (EMS) и оценивает потребление энергии, чтобы можно было разработать и контролировать меры по энергосбережению. Затем методы производства адаптируются и, в случае сомнений, даже активно воздействуют на них, чтобы избежать пикового потребления.

Система SCADA используется для мониторинга производственных машин. Здесь все данные процесса можно просмотреть в режиме реального времени и, при необходимости, можно вмешаться в контролирующем режиме.

Непосредственно на машине HMI является интерфейсом к системе управления для оператора. Оператор может контролировать работу машины и устанавливать параметры производства и машины.

Фактическая машина управляется интеллектуальным модулем, PLC. Здесь происходит автоматизация производственного процесса.

Не все эти системы необходимы для реализации Индустрии 4.0, но только наличие таких систем делает возможным путь к Индустрии 4.0. На первых шагах к Индустрии 4.0 коммуникации для реализации производственных процессов оцифровываются и автоматизируются. Подрайоны, которые не оцифрованы соответствующими системами, должны быть оснащены электронными пользовательскими интерфейсами для их интеграции [5].

Кроме понимания систем есть 4 основных требования

- Связь между системами
- Автоматизация производственных процессов
- Органы управления, датчики, приводы
- Связь
- Cloud
- Обучение сотрудников

Обучение и квалификацию квалифицированных кадров придется адаптировать к новым требованиям цифрового производства. Среди прочего, это коснется:

- i. Использование мобильных терминальных устройств, таких как планшеты и смартфоны, в производстве
- ii. Планирование и организация сетевого взаимодействия компонентов и модулей интеллектуальной системы.
- iii. Интеграция объектов в ERP-системы
- iv. Вертикальное объединение производственных площадок по всей цепочке добавленной стоимости через виртуальный мир Интернета [6].

Сотрудники будут играть важную роль в качестве решателей проблем, опытных экспертов и лиц, принимающих решения в этих производственных сетях, состоящих из виртуальных и мехатронных производственных последовательностей. Они останутся незаменимыми в будущем в качестве

генераторов идей и разработчиков новых продуктов и рабочих процессов, позволяя их способностям и навыкам постоянно развиваться в важный ресурс.

Преимущества Индустрии 4.0

Преимущества «Индустрии 4.0» включают повышение производительности и эффективности, повышение гибкости и маневренности, а также повышение прибыльности. Индустрия 4.0 также улучшает качество обслуживания клиентов.

Хотя технологии Smart Factory интересны и увлекательны, преимущества Индустрии 4.0 всегда должны быть в центре любого обсуждения. В конце концов, любые инвестиции, которые вы делаете в технологии, улучшенные производственные процессы или усовершенствованные системы, должны приносить прибыль.

В Индустрии 4.0 возможности окупаемости инвестиций значительны благодаря преимуществам, которые предлагают технологии.

Это включает в себя технологии, которые улучшают автоматизацию, межмашинное взаимодействие, производство за пределами площадки и процесс принятия решений [7].

Вот основные преимущества Индустрии 4.0

- Повышенная эффективность
- Расширение обмена знаниями и совместной работы
- Гибкость и ловкость
- Упрощает соблюдение
- Лучшее качество обслуживания клиентов
- Снижает затраты
- Создает инновационные возможности
- Более высокие доходы
- Повышение прибыльности
- Получение возврата инвестиций

Заключение

Весьма вероятно, что четвертая промышленная революция будет набирать дальнейшие обороты и постепенно распространяться на все сферы промышленного производства. В социальном плане это приведет к серьезным изменениям, как это произошло после предыдущих промышленных революций. Для потребителей всегда найдутся более качественные сетевые продукты с высокой степенью индивидуализации. В результате заводы будут нуждаться во все меньшем количестве фабричных рабочих, зато резко возрастет спрос на обслуживающие и творческие профессии. С технической точки зрения все больше и больше данных будут обмениваться все быстрее и быстрее, чтобы реализовать оптимальное производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Philbeck, Thomas; Davis, Nicholas (2018). "THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION: SHAPING A NEW ERA". *Journal of International Affairs*. 72 (1): 17–22. ISSN 0022-197X
2. November 2019, Mike Moore 05 (5 November 2019). «What is Industry 4.0? Everything you need to know». *TechRadar*. Retrieved 27 May 2020
3. Lee, MinHwa; Yun, JinHyo; Pyka, Andreas; Won, DongKyu; Kodama, Fumio; Schiuma, Giovanni; Park, HangSik; Jeon, Jeonghwan; Park, KyungBae; Jung, KwangHo; Yan, Min-Ren (21 June 2018). "How to Respond to the Fourth Industrial Revolution, or the Second Information Technology Revolution? Dynamic New Combinations between Technology, Market, and Society through Open Innovation". *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 4 (3): 21. doi:10.3390/joitmc4030021. ISSN 2199-8531
4. Industry 4.0 requirements: [Электронный ресурс]. URL: <https://training.ti.com/sites/default/files/docs/Industry-4dot0-Requirements.pdf> (дата обращения 2018 г).
5. Requirements for industry 4.0: [Электронный ресурс]. URL: <https://medium.com/@inray.industriesoftware/requirements-for-industry-4-0-what-is-technically-necessary-18ee6bbb7351> (дата обращения 19.09.2019).
6. Qualification for Industry 4.0: [Электронный ресурс]. URL: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/427050/brochure_Qi4_screen_56759en.pdf (дата обращения 19.09.2019).
7. Benefits of Industry 4.0: [Электронный ресурс]. URL: <https://slcontrols.com/en/benefits-of-industry-4-0/>.

УДК 621.96

Коногорова Л. В.^а, Хабарова А. В., Песин М. В., Макаров В. Ф.

^а *konogorova98@mail.ru*

Пермский национально исследовательский политехнический университет, Пермь

ПОСТОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ ИЗ НОВЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация: Приведены характеристики деталей, изготовленных методами аддитивного производства, а также деталей из новых титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой. Представлены особенности механической обработки таких деталей. Рассмотрены проблемы механической обработки деталей, изготовленных с использованием аддитивных технологий.

Ключевые слова: современные методы обработки, структура материала, машиностроение, механическая обработка, аддитивные технологии, ультрамелкозернистые сплавы, фрезерование.

Konogorova L. V.^а, Khabarova A. V., Pesin M. V., Makarov V. F.

^а *konogorova98@mail.ru*

Perm National Research Polytechnic University, Perm

POST-PROCESSING OF PARTS MADE BY THE ADDITIVE METHOD FROM NEW TITANIUM ALLOYS

Abstract: The characteristics of parts made by means of additive manufacturing, as well as parts from new titanium alloys with an ultrafine-grained structure, are given. Features of the machining of such parts are presented. The problems of mechanical processing of parts manufactured using additive technologies are considered.

Key words: modern processing methods, material structure, mechanical engineering, machining, additive technologies, ultrafine-grained alloys, milling.

В рамках четвертой промышленной революции применение новых материалов имеет высокое значение. Так, актуальность темы выражена в необходимости комплексного повышения свойств и методов обработки новых титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой, используемых при изготовлении высоконагруженных узлов техники. Помимо этого, в не полной мере исследован процесс механической обработки ответственных деталей, выращенных посредством аддитивных технологий.

Новые сплавы с объемной ультрамелкозернистой (далее – УМЗ) структурой можно получить посредством консолидации нанопорошков при повышенных температурах, либо посредством метода интенсивных

пластических деформаций (ИПД). Новым сплавам с УМЗ структурой характерны сверхпрочность, повышенные усталостные свойства, низкотемпературная пластичность, высокоскоростная пластичность, наличие термоэлектрического эффекта, повышенная биосовместимость.

Рассмотрим подробнее существующие результаты в области механической обработки титановых сплавов с УМЗ-структурой. Фрезерование является широко используемым методом обработки для формообразования деталей для различных областей машиностроения. Так, в процессе фрезерования исследователями было выявлено что качество обработанной поверхности ультрамелкозернистой структурой выше, по сравнению с образцами с крупнокристаллической структурой [1]. Также установлено, что формирование УМЗ-структуры способствует повышению качество коррозионностойкой стали 08X18H10Г2M2 в рамках процесса фрезерования. Более того, на сегодняшний день существуют исследования токарной обработки титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой, согласно которым при такой обработке сплав имеет лучшую обрабатываемость резаньем при таких параметрах как остаточные напряжения, шум и вибрация, шероховатость.

Основываясь на этих параметрах, исследователям удалось предсказать износ инструмента и повышение его стойкости [2]. Помимо этого, выявлено, что при термомеханической обработке УМЗ титановых сплавов класса ВТ22 и ВТ35 происходит формирование однородной по сечению прутка УМЗ структуры, средний размер элементов которой составляет около 0,5 мкм.

Поскольку новые детали с УМЗ-структурой могут быть созданы в том числе посредством аддитивных технологий далее рассмотрим проблемы механической обработки таких деталей.

В качестве выявленных проблем внедрения указанных деталей, изготовленных методов аддитивного производства (АП) можно выделить отсутствие точных данных по обеспечению высоких механических свойств таких деталей, качества поверхности, а также достижение точности формы и

выбор оборудования, режимов обработки, инструмента обработки. Для преодоления выделенных проблем необходимо создание гибридных технологий [3]. Новые гибридные технологии, на наш взгляд, должны включать в себя робототехнические комплексы, а также различные виды механической и упрочняющей обработки с прогнозируемыми параметрами режимов резания, а также возможностью быстрой смены режущего инструмента. Известно, что постобработка деталей является поэтапным процессом, на основании этого дефекты поверхности могут образовываться на разных этапах постобработки. Выращенные ультрамелкозернистые детали, обладая качеством высокой прочности, могут иметь сложную геометрию, что затрудняет выбор рационального подхода к их последующей обработке. Например, такой выбор может осуществляться между ленточнопильным, электроэрозионным и автоматизированным способами обработки. Зачастую детали сложной формы имеют труднодоступные каналы, в связи с чем встает вопрос о методах обработки внутри них, например, с целью достижения необходимых параметров шероховатости. Рассмотрим операцию фрезерования в качестве постобработки выращенной заготовки, при которой доступ режущего инструмента к внутренней поверхности детали невозможен (рис. 1).

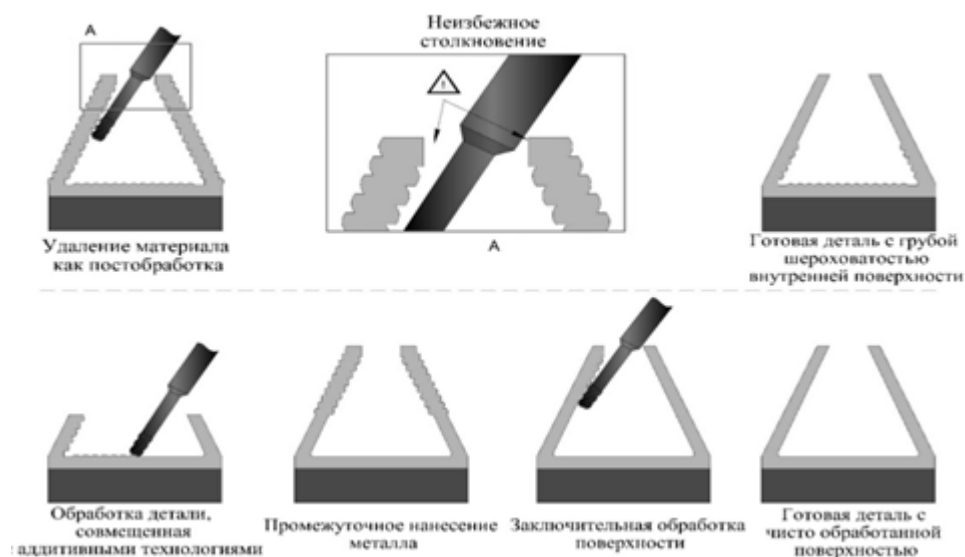


Рис. 1. Проблемы, связанные с операцией фрезерования выращенной заготовки

В таких случаях рекомендуется использовать механическую обработку в последовательном сочетании с наращиванием материала [4].

По итогам проведенной обзорной научно-практической работы сформулированы следующие тезисы:

1) в достаточной мере определены способы получения материалов с УМЗ структурой, а также выделены их характеристики.

2) фрезерная механическая обработка сплавов с УМЗ структурой отражает более высокое качество обрабатываемой поверхности, чем у классических сплавов;

3) формирование УМЗ структуры способствует повышению качества коррозионностойкой стали 08X18H10Г2М2 в рамках процесса фрезерования;

4) выявлены проблемы механической обработки деталей с УМЗ структурой, изготовленных посредством аддитивных технологий, а также представлены рекомендации по механической обработке таких деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. В. Филлипов, Н. Н. Шамарин, О. А. Подгорных // Исследование качества обработки поверхности при фрезеровании коррозионностойкой стали 08X18H10Г2М2 с крупнокристаллической и ультрамелкозернистой структурой. Материалы X Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении». 2019. С. 94 – 96.
2. В. Ф. Макаров, А. И. Гареев, И. Д. Казаков, А. В. Поляков // Механическая обработка ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2022. С. 376 – 378.
3. Балякин А. В. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей / А. В. Балякин, М. А. Олейник, Е. П. Злобин, Д. Л. Скуратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. №2. С. 50-54.
4. М. Ю. Куликов // Обеспечение качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий / М.Ю. Куликов, М. А. Ларионов, Д. В. Гусев, Е. О. Шевчук // Транспортное машиностроение. 2020. №12 (97). С. 5-7.

УДК 620.3

Корзникова Е. А.^а, Кистанов А. А.

^а Elena.A.Korznikova@gmail.com

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

НОВЫЕ ДВУМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ – ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ

Аннотация: В последнее десятилетие отмечен значительный прогресс физических фундаментальных исследований и большие успехи в практическом применении двумерных (2D) материалов и гетероструктур. На сегодняшний день исследование 2D материалов и гетероструктур по-прежнему является динамичной и быстрорастущей областью исследований. Здесь представлен краткий обзор этих новых интригующих материалов.

Ключевые слова: нанотехнологии; нанонаука; двумерный материал; наноиндустрия; новые материалы; технологии.

Korznikova E. A.^а, Kistanov A. A.

^а Elena.A.Korznikova@gmail.com

Ufa University of Science and Technology, Ufa

NOVEL TWO-DIMENSIONAL MATERIALS AND HETEROSTRUCTURES – A REVIEW ON CURRENT ACHIEVEMENTS

Abstract: The last decade has witnessed the significant progress of physical fundamental research and great success of practical application of two-dimensional (2D) materials and heterostructures. To date, the investigation of 2D materials and heterostructures is still a vibrant and fast-expanding research field. Here a brief review on these emerging intriguing materials is presented.

Key words: nanotechnology; nanoscience; two-dimensional material; nanoindustry; novel materials; technology.

В настоящее время двумерные (2D) материалы завоевывают ключевые позиции в различных технологиях, таких как фотокатализаторы, электронные устройства и устройства сбора энергии. Химическое разнообразие 2D материалов распространяется на многие составы и многие структуры, а также на несколько морфологий [1]. Среди них 2D материалы, состоящие из монослоя, скрепленного сильными ионоквалентными взаимодействиями, обладают многими уникальными свойствами, такими как большая площадь поверхности, высокие энергии связи экситонов из-за измененной диэлектрической функции в замкнутой среде [2], механические жесткость и

гибкость [3], и магнитные свойства с их высоким потенциалом для спин-орбитальной связи [4]. Помимо всем известных 2D материалов, таких как графен, силицен и фосфорен, в настоящее время активно исследуются более сложные по составу семейства материалов. Так были разработаны карбиды и нитриды переходных металлов, среди которых можно выделить монослой $Ti_3C_2T_x$, обладающий самым высоким эффективным модулем Юнга $\sim 0,33$ ТПа относительно других 2D материалов, включая оксид графена [5].

В качестве нового класса материалов в настоящее время в центре внимания появляются гибридные композиты, которые сочетают в себе преимущества и противодействуют недостаткам составляющих их соединений [6]. Такие материалы могут существовать в виде гетероструктур, состоящих из нескольких слоистых 2D материалов [7], таких как графен/фосфорен, графен/селенид индия, нитрид бора/фосфорен, или 2D слоев, состоящих из атомов различных элементов [8]. Было продемонстрировано, что гетероструктуры, образованные 2D материалами, которые нестабильны в условиях окружающей среды цепи, такими как фосфорен, и стабильными 2D-материалами, такими как графен, характеризуются повышенной стабильностью. К примеру, недавно был обнаружен стабильный аллотроп карбида фосфора (PC), двумерный монослой, состоящий из атомов углерода и фосфора [9]. Он имеет широкую запрещенную зону, достигающую 2,65 эВ, устойчивое сверхпроводящее поведение даже при растяжении, небольшую эффективную массу и сверхвысокую подвижность носителей. Так показано (Рис. 1а), что ширина запрещенной зоны, работа выхода и модуль Юнга такого монослоя α -PC легко контролируется с помощью различных методов, например, деформацией. Еще одной важной особенностью монослоя α -PC, является возможность его скручивания в нанотрубку при высоких деформациях сжатия. Эти трубки разных размеров обладают высокой термической стабильностью, обладают сравнительно высоким модулем Юнга (до 348,69

ГПа) и шириной запрещенной зоны, которая может варьироваться от 0 до 0,95 эВ.

Что касается гетероструктур, наибольшее количество исследований сосредоточено на таких гетероструктурах как, например, графен/борофен, фосфорен/нитрид бора [6]. В частности, примечательным результатом является возможность модуляции ширины запрещенной зоны гетероструктуры фосфорен/нитрид бора за счет изменения межслоевого расстояния (Рис. 1б). Создание таких гетероструктур открывает новые пути в создании высокопроизводительных наноустройств нового поколения.

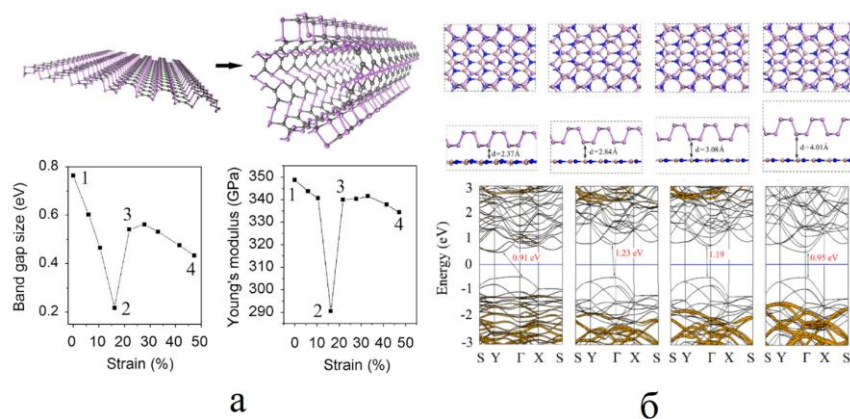


Рис. 1. (а) Модуляции ширины запрещенной зоны и модуля Юнга монослоя α -РС
(б) Модуляции ширины запрещенной зоны гетероструктуры фосфорен/нитрид бора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ch. Kunkel, J. T. Margraf, K. Chen, H. Oberhofer, K. Reuter // Nature Communications. 2021. № 12. P. 24–22.
2. S. Dufferwiel, S. Schwarz, F. Withers, A. A. P. Trichet, F. Li, O. Del Poro-Zamudio, C. Clark, A. Nalitov, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, K. S. Novoselov, J. M. Smith, M. S. Skolnick, D. N. Krizhanovskii, A. I. Tartakovskii // Nature Communications. 2015. № 6. P. 85–79.
3. A. A. Kistanov, S. A. Scherbinin, S. V. Ustiuzhanina, M. Huttula, W. Cao, V. R. Nikitenko, O. V. Prezhdo // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2021. № 12. P. 3436–3442.
4. J. Chen, K. Wu, W. Hu, J. Yang // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2021. № 12. P. 12256–12268.
5. A. Lipatov, H. Lu, M. Alhabeab, B. Anasori, A. Gruverman, Y. Gogotsi, A. Sinitskii // Science Advances. 2018. № 4(6).
6. A. R. Davletshin, S. V. Ustiuzhanina, A. A. Kistanov, D. Saadatmand, S. V. Dmitriev, K. Zhou, E. A. Korznikova // Physica B: Condensed Matter. 2018. № 534. P. 63–67.
7. A. A. Kistanov, Y. Cai, K. Zhou, S. V. Dmitriev, Y. W. Zhang // Physical Chemistry Chemical Physics. 2018. № 20. P. 12939–12947.
8. B. Mortazavi, M. Shahrokhi, X. Zhuang, T. Rabczuk // Journal of Materials Chemistry A. 2018. № 6. P. 11022–11036.
9. J. Guan, D. Liu, Z. Zhu, D. Tomanek // Nano Letters. 2016. № 16. P. 3247–3257.

*Кузин А. ^{1, 2a}, Чернышев В. ¹, Ковалюк В. ^{3, 4}, Ан П. ^{2, 4, 5}, Голиков А. ²,
Гольцман Г. ^{3, 5}, Горин Д. ¹*

^a Aleksei.Kuzin@skoltech.ru

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва

² Московский педагогический государственный университет, Москва

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва

⁴ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

⁵ Российский квантовый центр, Москва

КОМБИНАЦИЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОФЛЮИДНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ В БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Аннотация: Сегодня одна из самых актуальных проблем медицины — это поиск быстрых, высокочувствительных и компактных методов диагностики состояния человека. Актуальность данного проекта с одной стороны связана с необходимостью быстрой диагностики состояния человека с минимальной концентрацией маркера болезни за счет газового сенсинга или микрожидкостной биопсии, а с другой стороны, с отсутствием технологии создания полностью интегрированных микросхем с микрофлюидными каналами на нитрид кремниевой платформе.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, микрофлюидные каналы, сенсоры для ранней диагностики.

*Kuzin A. ^{1, 2a}, Chernyshev V. ¹, Kovalyuk V. ^{3, 4}, An P. ^{2, 4, 5}, Golikov A. ²,
Goltsman G. ^{3, 5}, Gorin D. ¹*

^a Aleksei.Kuzin@skoltech.ru

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow

² Moscow State Pedagogical University, Moscow

³ National Research University Higher School of Economics, Moscow

⁴ NTI Center for Quantum Communications, National University of Science and
Technology MISiS, Moscow

⁵ Russian Quantum Center, Moscow

COMBINATION OF PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS AND MICROFLUIDIC CHANNELS FOR HIGHLY SENSITIVE APPLICATIONS IN BIOMEDICAL APPLICATIONS

Abstract: Today, one of the most urgent problems in medicine is the search for fast, highly sensitive and compact methods for diagnosing a person's condition. The relevance of this project, on the one hand, is associated with the need for rapid diagnosis of a person's condition with a minimum concentration of a disease marker due to gas sensing or microfluidic biopsy. On the other hand, with

the lack of technology for creating fully integrated photonic integrated circuits with microfluidic channel microcircuits on a silicon nitride platform.

Key words: photonic integrated circuits, microfluidic channels, sensors for early diagnostics.

Сегодня одна из самых актуальных проблем медицины – это поиск быстрых, компактных и дешевых методов диагностики состояния, выявления заболеваний и инфекций в организме человека на ранней стадии. Для этого можно использовать химические экспресс-тесты, микрофлюидные устройства или объемные дорогие спектрометры. Однако данные подходы обладают либо сильно ограниченным пределом обнаружения, либо требуют высокий уровень квалификации исследовательского персонала. Одним из потенциально успешных направлений развития данной области является создание лаборатория на кристалле (LOC) с использованием фотонных интегральных схем. Фотонные интегральные схемы (PIC) – это устройства, которые работают аналогично электронным интегральным схемам, но используют фотоны вместо электронов. За счет использования пассивных интегрально-оптических компонентов (волноводов, резонаторов, интерферометров) оптическое излучение проходит через исследуемый образец и снимается спектральная характеристика устройства. Следующим шагом с помощью исследования полученных спектральных характеристик возможно восстановить показатель преломления прокаченного вещества (аналита) и его концентрацию. Микрофлюидные каналы отлично подходят для доставки исследуемого аналита к чувствительным областям интегрально-оптических элементов. С их помощью можно перекачивать через LOC частицы в буфере, истинные растворы, коллоидные растворы и газы. На данный момент были продемонстрированы чувствительность к нанесению монослойных пленок [1] и предел обнаружения таких датчиков [2]. Однако коммерчески доступной платформы для выявления заболеваний на ранней стадии с помощью данной комбинации технологий продемонстрировано не было.

Таким образом, интеграция микрофлюидных каналов с интегрально-оптическими схемами является перспективным и важным направлением для

выявления заболеваний на ранних стадиях за счет определения наличия специфических маркеров при сверхнизкой концентрации. Следовательно, актуальность предлагаемых исследований с одной стороны связана с необходимостью быстрой диагностики состояния человека с минимальной концентрацией маркера болезни, а с другой стороны, с отсутствием технологии создания полностью интегрированных микросхем с микрофлюидными каналами на нитрид кремниевой платформе. Поэтому основной целью проведения исследований в данной области является разработка и создание компактной интегрально-оптической лаборатории на чипе в интеграции с микрофлюидными каналами для изучения наличия и выявления различных аналитов (белков, экзосом и вирусов) при низких концентрациях в изучаемом буфере/растворе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aleksei Kuzin, Vasiliy Chernyshev, Vadim Kovalyuk, Pavel An, Alexander Golikov, Roman Ozhegov, Dmitry Gorin, Nikolay Gippius, and Gregory Goltsman. Hybrid nanophotonic–microfluidic sensor for highly sensitive liquid and gas analyses // *Optics Letters*. 2022. Т. 47. №. 9. P. 2358–2361.
2. Aleksei Kuzin, Vasiliy Chernyshev, Vadim Kovalyuk, Pavel An, Alexander Golikov, Gregory Goltsman, and Dmitry Gorin. In situ monitoring of layer-by-layer assembly surface modification of nanophotonic-microfluidic sensor // *Analytical Chemistry*. 2022.

УДК 004.891.3

Лопухова Е. А.

lopuhova.ekaterina@net.ugatu.su

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Аннотация: За последнее десятилетие алгоритмы машинного обучения находят все большее применение в медицине, снижая рутинную часть работы врачей, выделяя информацию из неструктурированных данных и участвуя в поддержке принятия решений, что отражается в повышении качества оказания медицинских услуг. Вместе с тем, разработка алгоритма с применением машинного обучения для конкретной медицинской задачи требует учета множества факторов для обеспечения требуемой эффективности, которые будут рассмотрены в данной работе.

Ключевые слова: медицина, машинное обучение, глубокое обучение.

Lopukhova E. A.

lopuhova.ekaterina@net.ugatu.su

Ufa University of Science and Technology, Ufa

MACHINE LEARNING METHODS IN MEDICAL DIAGNOSTICS

Abstract: In the last decade, machine learning algorithms have been increasingly used in medicine, reducing the routine part of doctors' work, extracting information from unstructured data and participating in decision support, which is reflected in improving the quality of medical services. However, the development of a machine-learning algorithm for a specific medical task requires consideration of many factors to ensure the required efficiency, which will be discussed in this paper.

Key words: medicine, machine learning, deep learning.

Применение систем автоматизации и машинного обучения за последние десятилетия распространилось практически во все сферы человеческой деятельности. В большинстве своем данные подходы призваны эмитировать поведение эксперта в рамках конкретных задач, что способствует снижению доли рутинной работы для самих экспертов или же их частичной замене в случае невозможности задействования одного. На саму возможность появления подобных систем повлияли несколько факторов, связанных с историческим развитием искусственного интеллекта. Прежде всего стоит отметить, что большинство алгоритмов машинного обучения, используемые и по сей день, были разработаны в середине двадцатого века [1], однако пик их актуальности

пришелся на начало первого десятилетия двадцать первого века. Это связано прежде всего с достижениями вычислительной техники и повышением распространенности графических процессоров, а также с накоплением достаточного объема цифровых данных. Таким образом, уже на данном этапе можно выделить два основных фактора эффективности разработки интеллектуального алгоритма: вычислительная мощность и достаточный объем цифровых данных.

Весь пул решаемых задач алгоритмами машинного обучения можно подразделить на: классификацию, регрессию, обнаружение выбросов/аномалий, кластеризацию, обучение ассоциативным правилам. Для применения данных алгоритмов к конкретно поставленной задаче необходимо свести ее к перечисленным ранее, что достигается путем формулирования отношения входных и выходных данных. Применительно к медицине, многообразие выделяемых данных в этой области можно свести к: табличным данным (анамнез, данные анализов пациента), временным рядам (электрокардиография, магнитно-резонансная томография) и визуальным изображениям (рентгенография, изображения с микроскопа).

Примером может служить работа [2], посвященная анализу снимка глазного дна, полученного при помощи оптической когерентной томографии. В контексте обнаружения заболевания сетчатки алгоритмы компьютерного зрения чаще всего выступают в качестве классификаторов, решения которых основываются на найденных на снимках предикторах. В работе было представлено приложение машинного обучения, которое использовало неконтролируемую идентификацию аномалий в качестве маркеров на ОКТ-сканировании сетчатки для обнаружения заболевания. Процесс принятия решения алгоритмом строился прежде на совокупности работ неконтролируемого алгоритма машинного обучения, кластеризующего аномалии на снимке, и классификатора, который на основе формы выделанных кластеров предоставлял на выход вероятность заболевания. Таким образом,

соотношение вход-выход было представлено как изображение – кластер – вероятность.

Однако за последние несколько лет все большую популярность приобретают алгоритмы анализа медицинских изображений, основанных на глубоком обучении, ввиду их высокой обобщающей способности. Самый широко используемый подход заключается в применении сверточных нейронных сетей, способных выполнять роль как классификатора, так и сегментатора патологий заболеваний [3], [4].

В заключении стоит отметить, что искусственный интеллект наряду с высокими технологиями демонстрирует впечатляющие результаты в области медицины ввиду достаточного объема накопленных цифровых данных, что позволяет повышать обобщающую способность алгоритмов. Для решения же конкретной медицинской задачи необходимо определить соотношение входной и выходной информации, что позволит выделить конкретный пул методов машинного обучения.

Благодарность. Исследование выполнено в НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники», государственное задание Минобрнауки России, код научной темы #FEUE-2021-0013, соглашение № 075-03-2021-014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. L. Fradkov. Early History of Machine Learning // IFAC-PapersOnLine. Vol. 53. № 2. P. 1385–1390. Jan. 2020. doi: 10.1016/J.IFACOL.2020.12.1888.
2. Seeböck P. et al. Unsupervised identification of disease marker candidates in retinal OCT imaging data // IEEE transactions on medical imaging. 2018. Vol. 38. № 4. С. 1037–1047.
3. Rim T. H. et al. Detection of features associated with neovascular age-related macular degeneration in ethnically distinct data sets by an optical coherence tomography: trained deep learning algorithm // British Journal of Ophthalmology. 2021. Vol. 105. № 8. P. 1133–1139.
4. Prahс P. et al. OCT-based deep learning algorithm for the evaluation of treatment indication with anti-vascular endothelial growth factor medications // Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. 2018. Vol. 256. № 1. С. 91–98.

УДК 621.91

Макаров В. Ф., Песин М. В.^а, Абзаев Р. С.

^а *m.pesin@mail.ru*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С ЦЕЛЬЮ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Аннотация: Рассмотрены проблемы, связанные с прекращением из-за санкций поставок импортного режущего инструмента из-за рубежа и возможностью полноценной замены этих инструментов на соответствующие режущие инструменты отечественного производства. Проведены комплексные сравнительные исследования влияния на физические параметры резания геометрии, материала и покрытий режущих пластинок токарных резцов различных зарубежных фирм и аналогичных отечественных пластин на режимах чистового, получистового и чернового точения с использованием центра компьютерной диагностики.

Ключевые слова: геометрия режущих пластинок, физические параметры, шум, вибрации, силы резания, шероховатость, сравнительная оценка.

Makarov V. F., Pesin M. V.^а, Abzaev R. S.

^а *m.pesin@mail.ru*

Perm National Research Polytechnic University, Perm

COMPARATIVE STUDIES OF THE EFFICIENCY OF DOMESTIC AND FOREIGN METAL-CUTTING TOOLS FOR THE PURPOSE OF IMPORT SUBSTITUTION

Abstract: The problems associated with the termination of the supply of imported cutting tools from abroad due to sanctions and the possibility of a full replacement of these tools with the corresponding cutting tools of domestic production are considered. Comprehensive comparative studies of the effect on the physical parameters of cutting of geometry, material and coatings of cutting inserts of turning tools of various foreign companies and similar domestic inserts in the modes of finishing, semi-finishing and rough turning using a computer diagnostics center have been carried out.

Key words: geometry of cutting plates, physical parameters, noise, vibrations, cutting forces, roughness, comparative evaluation.

Проблемы импортозамещения режущего инструмента на различных машиностроительных предприятиях и, прежде всего, на предприятиях авиационной, ракетно-космической и оборонной техники с каждым годом становятся все более актуальными. Здесь большое значение имеет введение экономических санкций зарубежными странами, ограничивающих поставки

импортного режущего инструмента, который занимает до 80–90% объема поставок на большинство российских машиностроительных предприятий для оснащения современных дорогостоящих импортных обрабатывающих центров и станков с ЧПУ. Поэтому рассмотрение проблем импортозамещения и нахождение путей и способов замены на полноценный отечественный инструмент является сегодня важной актуальной задачей для российского машиностроения. К этим проблемам можно отнести следующие:

1. Велики затраты предприятий на режущий инструмент импортного производства, стоимость которого в 4-5 раз выше стоимости отечественного аналогичного инструмента.

2. Отсутствуют научно обоснованные предложения и рекомендации ученых и практиков по импортозамещению различных видов режущих инструментов.

3. Не разработаны современные экспериментальные методики по ускоренному выбору эффективного инструмента для различного вида обработки различных материалов.

4. Существующие методики выбора режущего инструмента имеют значительные недостатки: большие материальные и временные затраты, не дают полную объективную оценку эффективности работы режущих инструментов.

5. Введение очередных санкций на прекращение поставки режущих инструментов может значительно затруднить работу машиностроительных предприятий в РФ.

Сегодня в мире существует множество фирм, занимающихся разработкой и поставкой твердосплавных режущих инструментов и связанных с ними приспособлений для механической обработки. Работоспособность таких инструментов различна. Фирмы утверждают, что пластины именно их производства обеспечат повышение производительности и эффективности производства, предлагая новые разнообразные продукты и услуги, которые

сокращают время и затраты на изготовление деталей. Но до настоящего времени практически никто не проводил сравнительных исследований эффективности применения пластинок различных фирм. Сегодня в России имеется ряд инструментальных предприятий, выпускающих различные виды режущих инструментов, зачастую не уступающим импортным. Среди них нужно отметить «Кировградский завод твердых сплавов», «Серпуховский инструментальный завод «Твинтос», ООО «Вириал» г. С-Петербург, «Свердловский инструментальный завод», «Томский инструментальный завод», завод «СКИФ» (Белгород), «Завод ТСМ» (Ульяновск) и др. Однако большинство машиностроительных предприятий в РФ ориентируются в основном на импортный инструмент, как более качественный, по их мнению, и более надежный и стойкий.

В связи с этим в стране проводятся многочисленные сравнительные испытания отечественных и импортных инструментов по различным методикам [1-5]. В результате проведенного анализа установлены следующие наиболее распространенные методики выбора лучшего режущего инструмента:

На основании проведенного анализа различных методик установлено, что в связи с широким применением цифровых технологий при мехобработке наиболее объективной представляется методика, основанная на сравнительной компьютерной диагностике таких физических параметров процесса резания, как сила резания, температура, шум, вибрации и мощность резания в зависимости от режима резания, материала и геометрии инструмента. Известно, что все эти физические параметры процесса резания изменяются в процессе износа и разрушения режущих инструментов и могут служить косвенными показателями эффективности их работы. Экспериментально доказано, что наиболее высокую стойкость имеют пластины, создающие в зоне резания минимальные значения температуры резания, вибрации, шума резания, мощности и силы резания.

Методика сравнительных экспериментальных исследований.

На кафедре ИТМ в ПНИПУ проведены сравнительные комплексные исследования влияния конструкции, марки инструментальных материалов режущих пластин различных ведущих зарубежных и отечественных фирм, режимов резания на изменение физических параметров резания при точении конструкционных углеродистых и нержавеющей сталей. Для этого выбраны четыре наиболее известных зарубежных производителей режущих пластин для токарной обработки: Sandvic Coromant (Швеция), SECO (Швеция), Kennametal (США), Pramet (Чехия) и отечественного производителя инструментов АО «Кировградского завода твердых сплавов» (КЗТС)» (Россия).

Для сравнительных экспериментальных исследований использовался специально разработанный в ПНИПУ компьютерный центр диагностики процесса резания (рис. 1) [8].

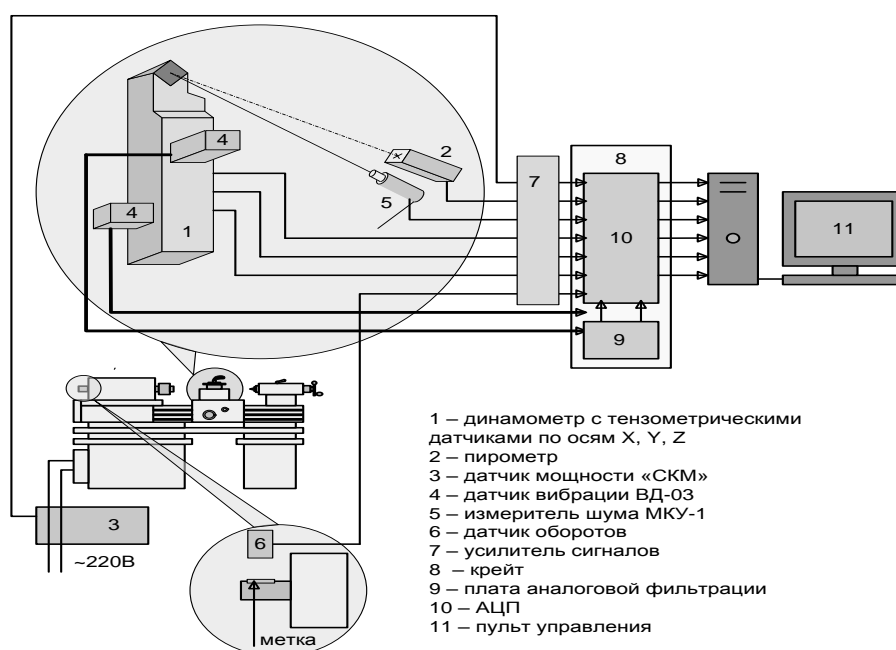


Рис. 1. Схема станда компьютерной диагностики процесса резания

Полученные цифровые данные по каждому физическому параметру резания обрабатывались с помощью специальной компьютерной программы Камертон и представлялись на графиках в виде гистограмм сравнительных величин.

На первом этапе исследований на компьютерном центре устанавливалась взаимосвязь между величиной износа режущих инструментов по задней грани и изменением основных физических параметров процесса резания - силой, температурой, шумом, вибрацией и мощностью резания [8]. В результате исследований установлено, что увеличение износа режущего инструмента в пределах от 0,005 мм до 0,6 мм приводит к росту всех показателей величин физических параметров процесса резания. Среди всех исследуемых параметров физических величин наиболее значимыми, напрямую зависящими от износа инструмента, оказались показатели шума и вибрации процесса резания. Кроме того, получены эмпирические математические модели, устанавливающие зависимость исследуемых физических параметров от изменения режима резания: скорости, подачи и глубины резания.

Сравнительные экспериментальные исследования режущих пластин различных фирм проводились при точении с использованием державки: DCLNR 2525 M12, где $l_1=150$ мм, $l_2=32,1$ мм, $f=32$ мм, $h=25$ мм, $b=25$ мм), на универсальном токарно-винторезном станке мод.16К20.

В качестве обрабатываемых материалов для исследований выбраны представители наиболее широко применяемых в машиностроении материалов группы Р и группы М по стандарту ИСО из углеродистой стали 45 и нержавеющей стали 30Х13. Обрабатывались заготовки диаметром 80 мм, длиной 350 мм и твердостью НВ 170. Длина рабочего хода инструмента: $L=210$ мм.; Время обработки и записи данных по каждому варианту исследований составляло 40–50 секунд. Обработка проводилась без применения СОЖ.

Результаты сравнительных экспериментальных исследований.

Результаты обработки сравнительных данных эффективности работы режущих пластин зарубежных фирм Sandvic Coromant (Швеция), SECO (Швеция), Kennametal (США), Pramet (Чехия) и отечественной фирмы КЗТС по физическим параметрам резания заготовок из стали 30Х13 и Ст. 45 приведены в виде гистограмм на графиках.

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что абсолютного лидера среди рассмотренных инструментальных фирм по эффективности резания стальных заготовок нет. Каждая фирма может иметь отдельные успехи и неудачи при различных видах точения различных сталей.

2. На основе предварительных исследований установлено, что снижение величин физических параметров в зоне резания - составляющих силы резания, температуры, шума и вибрации свидетельствует о более благоприятных условиях протекания процесса стружкообразования, уменьшении деформационных процессов, сил трения, обеспечения лучшего качества поверхностного слоя (снижения шероховатости), следовательно, уменьшение износа и повышение стойкости пластин.

3. Применение компьютерного центра диагностики процесса резания в ПНИПУ позволяет ускоренным методом выявить наиболее эффективные режущие инструменты при сравнительных испытаниях. Кроме этого обязательным при внедрении новых техпроцессов и при замене импортных инструментов является дополнительное длительное производственное испытание отобранных ускоренным методом рациональных СМП для оценки их фактической стойкости.

4. Установлено, что применение отечественных пластинок «Кировградского завода твердых сплавов» (Свердловская область) вместо импортных по параметрам качества обработанной поверхности, по физическим параметрам резания - силе и температуре резания, вибрации и шуму в зоне резания не уступает известным зарубежным фирмам, а иногда и превосходит их по режущим параметрам.

5. В связи с этим, отечественные режущие пластины КЗТС могут быть эффективно применены для замены импортных режущих инструментов, тем более, что и стоимость импортных инструментов выше отечественных в три-четыре раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка экспериментального стенда для определения эффективных режимов механической обработки резанием / В. Ф. Безъязычный и др. // Научные технологии на современном этапе развития машиностроения: материалы 8 МНТК 19–21 мая 2016 г. М.: Техполиграфцентр, 2016. С. 25–27.
2. Диагностика и сертификация металлорежущего оборудования: учеб. пособие / М. П. Козочкин и др. М. Инновационное машиностроение, 2017. 240 с.
3. Ингеманссон А. Р. Повышение эффективности обработки резанием за счет адаптивного управления в цифровых производственных системах // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 4. С. 39–48.
4. Задачи технической диагностики при создании и эксплуатации технологического оборудования / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров // Вестник УГАТУ. 2012. № 4. С. 98–104.
5. Динамометрическая система ускоренного определения режущих свойств инструмента / С.В. Михайлов и др. // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 1. С. 34–40.

УДК 621

Макеева К. И.

xenia.mackeeva@yandex.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ВИБРООБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация: Рассмотрен наиболее распространенный метод обработки. Виброударная обработка деталей основана на использовании двух- или трехкомпонентной вибрации, т. е. механических колебаний соответственно по двум и трем координатам.

Ключевые слова: вибрационная обработка, виброшлифование, поверхностный слой, эксплуатационные свойства, пластические деформирования, шероховатость, стальные шарики, керамический абразив, упрочнение поверхностным пластическим деформированием.

Makeeva K. I.

xenia.mackeeva@yandex.ru

Ufa University of Science and Technology, Ufa

VIBRATION PROCESSING DETAILS OF GAS TURBINE ENGINES

Abstract: The most common processing method is considered. Vibration shock treatment of parts is based on the use of two- or three-component vibration, i.e. mechanical vibrations, respectively, in two and three coordinates.

Key words: vibration treatment, vibration grinding, surface layer, operational properties, plastic deformations, roughness, steel balls, ceramic abrasive, hardening by surface plastic deformation.

Наиболее распространенным методом обработки является вибрационная обработка.

Цель вибрационной обработки состоит в последовательном нанесении на поверхности обрабатываемых деталей большого числа микроударов гранулами шлифовального материала под действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере.

Вибрационной обработке подвергают детали после окончательной механической и термической обработки.

Процесс вибрационной обработки в среде стальных шариков называется виброгалтовкой, а процесс вибрационной обработки в среде стальных шариков и керамического абразивного наполнителя называется виброшлифованием.

Процесс вибрационной обработки решает задачи как по замене и механизации ручных полировальных работ, так и по упрочнению поверхностным пластическим деформированием.

Вибрационная обработка позволяет:

– ликвидировать в поверхностном слое возможные после механической обработки растягивающие остаточные напряжения и создать сжимающие остаточные напряжения;

– понизить шероховатость;

– ликвидировать направленные риски после механической обработки;

– повысить усталостную прочность;

– повысить контактную выносливость.

Рабочую среду для виброобработки составляют из наполнителя и рабочей жидкости с поверхностно-активными, смазывающе-охлаждающими и антикоррозионными свойствами. При виброгалтовке наполнитель составляют из стальных шариков, при виброшлифовании наполнитель составляют из стальных шариков и абразивного материала – керамического абразива или другого виброгалтовочного наполнителя. Возможны другие составы рабочих сред.

К установке и приспособлениям данной обработки задаются определенные технические требования. Контроль после данной операции так же подвергается определенным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев А. П., Устинов В. П. Оптимальные режимы вибрационной отделочно-упрочняющей обработки. Вестник машиностроения.
2. Копылов Ю. Р. Виброударное упрочнение: моногр. Воронеж: ВИ МВД России, 1999. 384 с.
3. Копылов Ю. Р. Технологическая надежность процессов виброударного упрочнения авиационных деталей // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии. Липецк: ЛГТУ, 2012. С. 182–186.

Миловзоров Д. Г.^{1а}, Ясовеев В. Х.^{1б}, Галиев А. Л.^{2в},
Ахметов Ш. Р.^{2г}, Петров Ю. Е.^{1д}

^а *DGMilovzorov@yandex.ru*, ^б *yasov@mail.ru*, ^в *GalievAnvar@mail.ru*,

^г *Ahmetov.ShR@gmail.com*, ^д *petrov.yue@ugatu.su*

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа

² Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий,
Стерлитамак

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФЕРРОЗОНДОВОГО ГРАДИЕНТОМЕТРА С ПЕРЕМЕННОЙ БАЗОЙ В КОМПОНОВКЕ С БПЛА

Аннотация: Рассматриваются вопросы применения феррозондового градиентометра с программно управляемой базой в компоновке с БПЛА. Приведены результаты экспериментальных полевых исследований, которые показали, что градиентометр способен с достаточно высокой избирательностью определять место залегания ферромагнитных объектов под землей.

Ключевые слова: феррозондовый трехкомпонентный градиентометр; программно управляемая база; трехосевые феррозондовые преобразователи.

Введение

Феррозондовый трехкомпонентный магнитометрический градиентометр – это информационно-измерительная система, содержащая два или более трехкомпонентных магниточувствительных феррозондовых преобразователя, расположенных на одной оси на некотором расстоянии, называемом базовым, и предназначенный для измерения неоднородностей магнитного поля при измерении проекций, так и модуля вектора индукции магнитного поля. Градиентометр может применяться для измерения параметров неоднородности магнитного поля на определенном участке над поверхностью Земли. Неоднородности магнитного поля могут возникать по различным причинам, одной из которых является присутствие ферромагнитных материалов в области чувствительности датчиков.

В частности градиентометр применяется для поиска мест залегания магистральных трубопроводов, а также определения мест резких перепадов модуля вектора магнитной индукции, характеризующих наличие различных

дефектов или нарушение целостности изоляции трубопровода. При искажении естественного геомагнитного поля при наличии дополнительного поля ферромагнитного объекта величина вектора индукции магнитного поля в зоне чувствительного элемента – феррозонда изменяет свою величину и направление. Это и является признаком наличия ферромагнитного объекта.

Конструкция градиентометра

Представленный в данной работе феррозондовый градиентометр с программно управляемой базой позволяет получить данные измерений на различных базах (расстояниях между группами ортогональных феррозондовых датчиков), т. к. величина базы градиентометра влияет на разрешающую способность измерений [1, 2]. Чем меньше база градиентометра, тем меньшие по размеру дефекты могут быть обнаружены и проанализированы, но почувствовать эти дефекты можно лишь при малых удалениях от объекта. Большая база градиентометра отражает интегральные (суммарные) характеристики объекта, заметить которые можно с больших расстояний.

Возможны различные варианты построения и конструктивного исполнения градиентометров с феррозондовыми датчиками [2–6].

При разработке и изготовлении трехэлементного трехкомпонентного феррозондового градиентометра принимались во внимание следующие требования:

– проектируемый градиентометр должен иметь возможность работы как при носимом (пешем) обследовании, так и иметь подвес для крепления к беспилотному летательному аппарату (БПЛА) и/или иному носителю (буксиру);

– иметь достаточную прочность для сохранения целостности корпуса и внутреннего оборудования в рабочем состоянии при возможных ударах о ветки, стволы деревьев, землю, камни, которые могут произойти в случае неверного выбора высоты или траектории полета БПЛА (носителя);

– градиентометр должен сохранять работоспособность в широком диапазоне температур окружающей среды, а также при различных атмосферных явлениях (дождь, туман, снег).

Корпус градиентометра выполнен цилиндрической формы, которая по большей части лишена недостатков касающихся аэродинамического сопротивления. Турбулентные завихрения среды создаются только со стороны, противоположной движению или направлению ветра (суммы векторов собственной скорости и скорости ветра). При этом используемая математическая модель не подразумевает выделение отдельного компонента вектора магнитной индукции: используется корень квадратный из суммы квадратов горизонтальных компонент. Вертикальная составляющая в любом случае может быть сориентирована с большой точностью. В случае необходимости пространственной ориентации по осям, параллельным горизонтали на корпусе, могут быть нанесены метки с помощью краски, гравировки, либо иным способом, не создающим магнитные помехи (например, наплавлением пластиковых ребер).

Сигналы, измеряемые градиентометром – это проекции X, Y и Z на оси чувствительности трехкомпонентных феррозондовых датчиков. Уравнения связи измеряемых проекций и углов пространственной ориентации корпуса градиентометра определяются следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} T_X \cos \theta \cos \varphi - T_Y \cos \theta \sin \varphi + T_Z \sin \theta &= \cos \alpha \cos \vartheta \cdot T \\ T_X \sin \varphi + T_Y \cos \varphi &= -\sin \alpha \cos \vartheta \cdot T \\ -T_X \sin \theta \cos \varphi + T_Y \sin \theta \sin \varphi + T_Z \cos \theta &= \sin \vartheta \cdot T \end{aligned} \right\}.$$

где T_X , T_Y и T_Z – измеряемые проекции вектора магнитной индукции поля Земли \vec{T} ; φ , θ и α – апсидальный, зенитный и азимутальный углы пространственной ориентации корпуса градиентометра соответственно; ϑ – угол магнитного наклона для конкретной широты местности.

Важным определяемым параметром, определяемый каждый трехкомпонентным феррозондовым преобразователем градиентометра, является также модуль вектора магнитной индукции $|T|$:

$$|T| = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2},$$

который не зависит от углов пространственной ориентации корпуса градиентометра.

Текущее состояние базы градиентометра отображается на поле сервисной программы (рис. 1): up – большая база при подключении самого верхнего трехкомпонентного преобразователя, dwn – малая база при подключении среднего трехкомпонентного преобразователя. Пользователь имеет возможность оценивать изменение сигналов с градиентометра и в зависимости от ситуации оперативно изменить базу.

The screenshot shows a software interface with several data fields and control elements. At the top, there are three columns of data: X (39259), Y (31217), and Z (24058) in large digits, and their corresponding components in smaller digits (1,47; -11,63; -23,46). Below this, there are more data points (7,5; 39,1) and a red box containing the text 'up'. To the right, there are additional data points (60; 57; -136) and their components (0,377; 0,358; -0,854). At the bottom, there is a 'COM5' label and a '90' degree indicator.

X	39259	1,47	0,029
Y	31217	-11,63	-0,44
Z	24058	-23,46	-0,84
1.28109.E 153.4.M 39259 31217 24058 40419 30744 25333 2 60 57 65399 3010 3912			
	7,5	39,1	up
			X 60
			Y 57
			Z -136
			0,377
			0,358
			-0,854

Рис. 1. Фрагмент сервисной программы

Коммутация каналов осуществляется с помощью четырехканального аналогового ключа. Для управления переключением используются 3 сигнала, которые позволяют переключать отдельно 3 канала феррозондовых преобразователей двух трехкомпонентных преобразователей, расположенных по осям X, Y и Z. Особенностью отдельного управления процессом коммутации является необходимость одновременного переключения сразу всех трех датчиков для исключения ситуации функционирования неполного трехкомпонентного преобразователя.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования разработанного блока феррозондовых датчиков показали, что измерения со всеми включенными датчиками производятся со скоростью 5 измерений в секунду, а в случае фиксированной

базы скорость измерений составляет 10 измерений в секунду. Основным элементом, ограничивающим скорость измерения, является сигма-дельта АЦП AD7734, осуществляющий фильтрацию сигнала с помощью встроенного цифрового фильтра с подавлением частот 50/60 Гц.

Измерения проекций вектора индукции магнитного поля осуществляется в следующих возможных режимах, определяемых оператором при запуске БПЛА с градиентометром, представленных далее.

1. Режим фиксированной базы. База градиентометра назначается оператором, в течение измерительного полета не изменяется. Измерения осуществляются фиксированной парой групп феррозондовых датчиков.

2. Режим автоматического циклического изменения базы. База градиентометра меняется циклически автоматически. Режим позволяет получить данные для камерального анализа различной степени детализации, но на единой (фиксированной) траектории полета. Отбор данных для анализа, полученных с меньшей базой, для участков, подозрительных на наличие дефектов изоляции, осуществляется в последующем программно или специалистом-интерпретатором в организации.

3. Режим операторно-управляемой базы. База градиентометра назначается (изменяется) оператором при обнаружении локальных аномалий во время полета (явно видимым; по графикам поля, получаемым с магнитометра и визуализируемым на компьютере оператора). Возвратно-поступательный полет БПЛА над аномальной зоной может быть осуществлен под управлением оператора многократно с различными базами градиентометра на различных высотах с целью сбора полного измерительного материала для последующей более достоверной интерпретации в организации.

4. Режим автоматически управляемой базы. База градиентометра и высоты возвратно-поступательных полетов БПЛА над аномальной зоной (как и положение аномальной зоны) определяется программно автоматически по предварительному экспресс-анализу данных измерений при обнаружении локальных аномалий во время полета с целью сбора полного измерительного материала для последующей более достоверной интерпретации в организации. Экспресс-анализ данных производится бортовым компьютером БПЛА.

База 1 (группы датчиков ТФП-2 и ТФП-1dw) составляет 150 мм, база 2 (группы датчиков ТФП-2 и ТФП-1up) – 1590мм (fig. 2). Расстояние от нижней заглушки магнитного градиентометра до группы датчиков ТФП-2 составляет 116мм. При удалении магнитометра от трубы амплитуда модуля вектора магнитной индукции уменьшается. Модуль вектора магнитной индукции и градиент модуля вектора магнитной индукции на расстоянии одного метра для труб малых диаметров (менее 100 мм) практически не выделяет неоднородность при измерениях на большой базе (база 2). Градиентометр при измерениях на малой базе измерений (база 1) обладает большей чувствительностью по отношению к измерениям на большой базе (база 2).

Проведены полевые испытания разработанного градиентометра над магистральным трубопроводом диаметром 325 мм с толщиной стенки 10 мм, глубина залегания – около 1,2 м (диаметр и толщина определялись по фрагменту трубы на участке ее замены, глубина залегания – по фрагменту трубы на открытом участке /переход оврага/). Эксперименты производились на различных высотах перемещения датчиков магнитометрической системы над землей, с различными измерительными базами градиентометра

Объектом натуральных испытаний стал участок продуктопровода, идущего вдоль автодороги в Ишимбайском районе республики Башкортостан. Схема траектории производимых измерений указана на рис. 2. Схема расположения датчиков градиентометра, находящегося в вертикальном положении, показана на рис. 3. Высота h расположения градиентометра над землей – есть расстояние от земли до нижней заглушки градиентометра. Красным цветом ТФП-2 обозначена группа феррозондовых датчиков, которая участвует в измерениях при задании любой базы. Если при измерениях фиксируется база № 1 (15 см), то измерения компонент магнитного поля производятся на нижней группе датчиков – ТФП-1dw. Если при измерениях зафиксирована база № 2 (159 см), то измерения компонент магнитного поля, кроме группы ТФП-2 производятся на верхней группе датчиков – ТФП-1up.

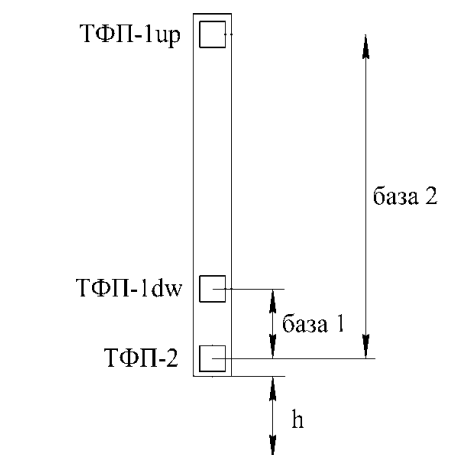


Рис. 2. Схема расположения градиентметра над объектом исследования

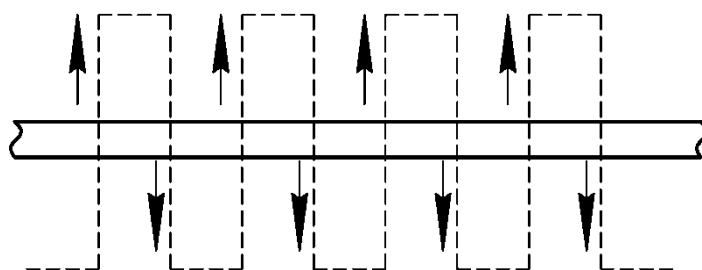


Рис. 3. Схема перемещения градиентметра над объектом исследования

Произведены несколько экспериментов.

1. Эксперимент 1: зафиксированная база № 1; высота $h=0.5$ м, в прямом направлении.
2. Эксперимент 2: зафиксированная база № 1; высота $h=1.0$ м, в обратном направлении.
3. Эксперимент 3: зафиксированная база № 2; высота $h=0.5$ м, в прямом направлении.
4. Эксперимент 4: зафиксированная база № 2; высота $h=1.0$ м, в обратном направлении.

Измеряемые проекции (X, Y, Z) точек наблюдения для эксперимента 1 в качестве примера показаны на рисунке 4. Измерения компонент магнитного поля, полученные для точек, имеющих одинаковые проекции X и Y усреднялись. Синим цветом (рис. 4) обозначены графики компонент поля, соответствующие варьируемой группе датчиков градиентметра ТФП-1, красным цветом – графики компонент поля по группе датчиков ТФП-2, зеленым цветом (рис. 5) отображены графики градиента модуля вектора магнитной индукции, полученные по данным датчиков ТФП-1 и ТФП-2.

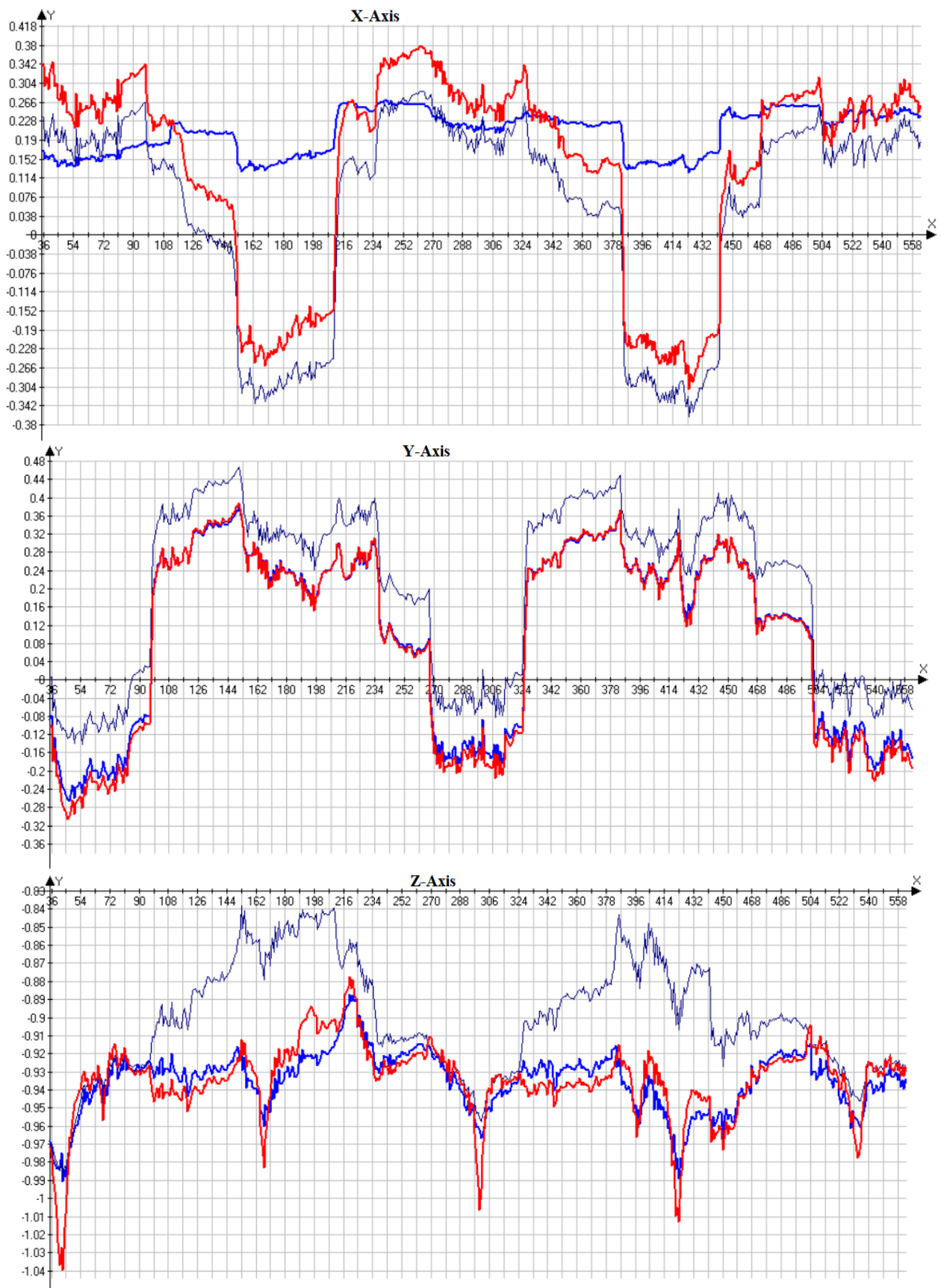


Рис. 4. Измеряемые проекции X, Y, Z

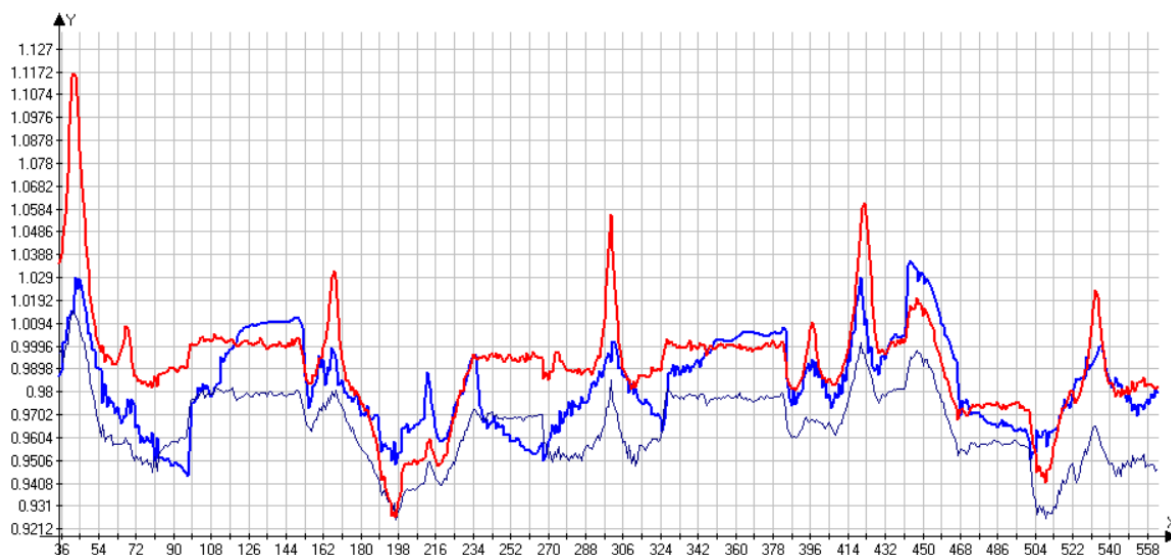


Рис. 5. Изменение модуля вектора магнитной индукции

Наблюдаемые ярко выраженные всплески в значениях модуля индукции магнитного поля соответствуют пересечению градиентометром трассы трубопровода.

На рис. 6 представлены поверхности модуля вектора магнитной индукции (нТл) ТФП-1ур, а на рис. 7 представлены поверхности градиента по оси z модуля вектора магнитной индукции (нТл/м) по данным датчиков ТФП-1ур и ТФП-2. На графиках максимумам модуля магнитной индукции и максимумам градиента по z модуля вектора магнитной индукции на траектории движения соответствуют точки, показывающие подземное расположение трассы трубопровода.

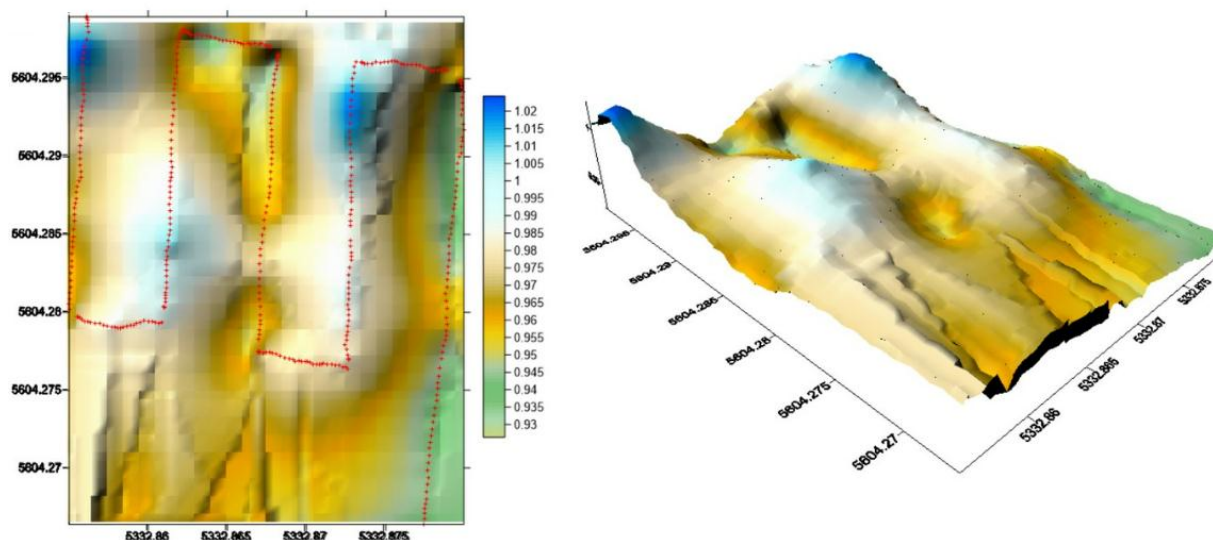


Рис. 6. Поверхности модуля вектора магнитной индукции (нТл) ТФП-1ур

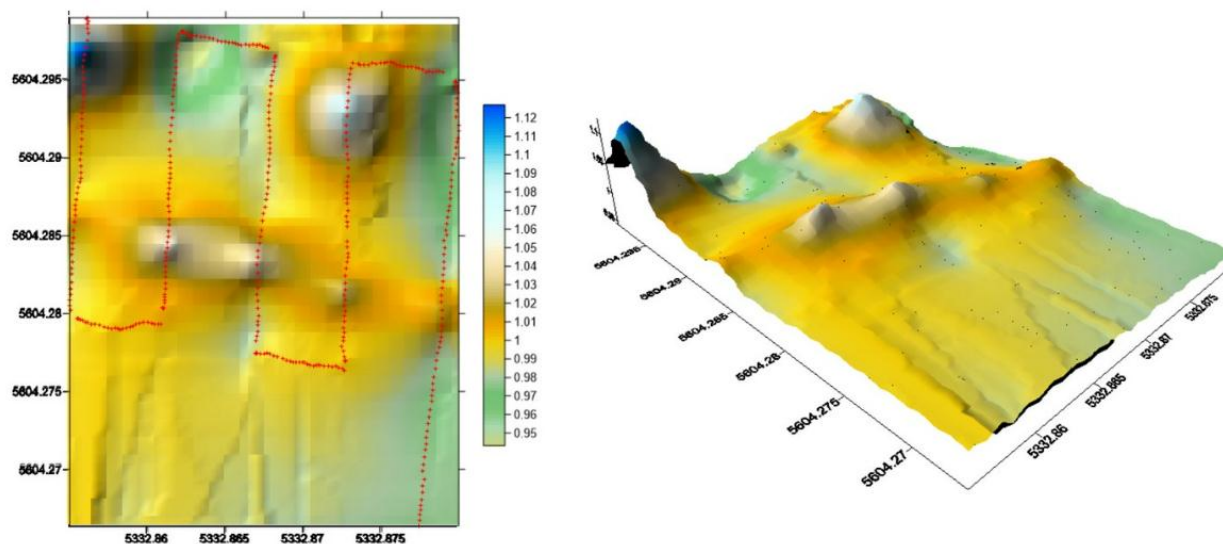


Рис. 7. Градиент по оси z модуля вектора магнитной индукции (нТл/м) по данным датчиков ТФП-1ур и ТФП-2

Заклучение

В результате проведенного эксперимента по измерениям параметров магнитного поля над исследуемым трубопроводом диаметром 325мм с толщиной стенки 10 мм., установлено, что градиентометр при измерениях на малой базе измерений (база 1) обладает большей чувствительностью по отношению к измерениям на большой базе (база 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Michal Janošek, Jan Vyhnánka and Antonín Platila. Compact magnetic gradiometer and its astatization // Procedia Engineering. 2015. № 120. P. 1249–1252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.841.
2. Hiergeist R.; Ketzler R.; Harcken H.; Ludke J.; Albrecht M.; Brand T.; Fischer A. A novel test ground for theequipment qualification of magnetic gradient sensors used for unexploded bomb detection. J. Appl. Geophys. 2015. 112. P. 242–248.
3. C. P. Foley, D. L. Tilbrook etc. Geophysical exploration using magnetic gradiometry based on HTS SQUIDS. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2001. № 11(1). P. 1375–1378. DOI: 10.1109/77.919607.
4. Ahmed L. Elrefai, Ichiro Sasada, Shoumu Harada. Gradiometer and Magnetometer Integration Using a Pair of Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate Sensor Heads // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. Vol. 51. Issue: 11. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2453345.
5. Gavazzi B.; Le Maire P.; Munschy M.; Dechamp A. Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV and airborne magnetic surveys. Lead. Edge 2016. 35. P. 796–797.
6. Sierra Luoma and Xiaobing Zhou. Construction of a Fluxgate Magnetic Gradiometer for Integration with an Unmanned Aircraft System. Remote Sensing. 2020. 12. DOI:10.3390/rs12162551.
7. Milovzorov D. G., Galiev A. L., Ahmetov S. R. Multielement triaxial fluxgate gradiometer with variable base // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia. P. 258–261, 2019. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278501.

8. Yao, L.; Mei-Ping, W.; Ping, W.; Shu-Ling, D.; Hao-Jun, L.; Jin-Long, W.; Zhan-Feng, A. Full magnetic gradient tensor from triaxial aeromagnetic gradient measurements: Calculation and application. *Appl. Geophys.* 2015, 12, P. 283–291.
9. Cunningham, M.; Samson, C.; Wood, A.; Cook, I. Aeromagnetic surveying with rotary-wing unmanned aircraft system: A case study from a zinc deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada. *Pure Appl. Geophys.* 2018, 175, pp. 3145–3158.
10. Sui, Y.; Miao, H.; Zhou, Z.; Luan, H.; Wang, Y. Correction and compensation of an airborne fluxgate magnetic tensor gradiometer. *Explor. Geophys.* 2019, 49, pp. 726–734.
11. Doll, W.E.; Sheehan, J.R.; Gamey, J.T.; Beard, L.P.; Norton, J. Results of an Airborne Vertical Magnetic Gradient Demonstration, New Mexico. *J. Environ. Eng. Geophys.* 2008, 13, pp. 277–290.
12. Milovzorov D.G., Yasoveev V.Kh. Mathematical modeling of fluxgate magnetic gradiometers // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2017. Vol. 53. № 4. Pp. 388-394. DOI: 10.3103/S8756699017040112
13. Milovzorov G.V., Milovzorov D.G., Yasoveev V.Kh., Redkina T.A. Gradiometric systems based on three-component variable-baseline magnetometer // *Italian Science Review.* ISSN: 2308-832X, 2014, pp. 53-60.
14. Nikulin, A.; de Smet, T.S. A UAV-based magnetic survey method to detect and identify orphaned oil and gas wells. *Lead. Edge* 2019, 38, 418–496.
15. Jordan, B.R. Collecting field data in volcanic landscapes using small UAS (sUAS)/drones. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2019, 385, 231–241.

УДК 681.586.5

*Морозов О. Г., Морозов Г. А., Нуреев И. И., Сахабутдинов А. Ж.,
Мисбахов Р. Ш., Кузнецов А. А.*

microoil@mail.ru

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань

ОНТОЛОГИЯ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР

Аннотация: Пять лет назад была предложена концепция адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС), которая представляет собой особый тип волоконной брэгговской решетки, одновременно выполняющей функции двухчастотного формирователя излучения и чувствительного элемента. В данной статье мы даем обзор теории и технологии АВБС, в том числе структур с тремя и более спектральными составляющими с различными сочетаниями разностных частот, как симметричными, так и асимметричными.

Ключевые слова: радиофотоника, волоконно-оптические датчики, волоконные брэгговские структуры, адресные волоконные брэгговские структуры.

*Morozov O. G., Morozov G. A., Nureyev I. I., Sakhabutdinov A. Zh.,
Misbahov R. Sh., Kuznetsov A. A.*

microoil@mail.ru

Kazan National Research Technical University n. a. A. N. Tupolev-KAI, Kazan

ONTOLOGY OF ADDRESSED FIBER BRAGG STRUCTURES

Abstract: Five years ago, the concept of an addressable fiber Bragg structure (AFBS) was proposed, which is a special type of fiber Bragg grating that simultaneously performs the functions of a two-frequency radiation shaper and a sensitive element. In this article, we give an overview of the theory and technology of AGBS, including structures with three or more spectral components with various combinations of difference frequencies, both symmetric and asymmetric.

Key words: microwave photonics, fiber optic sensors, fiber Bragg structures, addressable fiber Bragg structures.

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) получили широкое применение с момента их появления в конце 1970-х годов [1], особенно в качестве чувствительных элементов для измерения различных физических полей. Их привлекательные свойства, такие как компактность и малый вес, невосприимчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность и возможность объединения нескольких ВБР в единую систему, обеспечивают преимущества во многих областях [2].

На сегодняшний день разработано несколько методов мультиплексирования и опроса ВБР. Наиболее распространенные подходы, такие как мультиплексирование по длинам волн, по частоте, по времени и по пространственному разделению, реализуются с помощью сложных и дорогостоящих оптико-электронных устройств, таких как анализаторы спектра, перестраиваемые интерферометры Фабри-Перо, дифракционные решетки и т. д. Еще одной проблемой традиционных методов опроса является отсутствие адресуемости датчиков, что приводит к ошибкам опроса при перекрытии спектров. Чтобы смягчить эту проблему, были предложены методы опроса ВБР с оптическим кодированием спектра, в которых датчики опрашиваются в реальном времени в соответствии с автокорреляцией между спектрами датчика и его кодовой сигнатурой, что позволяет различать несколько ВБР в одном и том же спектральном диапазоне.

Был предложен другой подход, в котором ВБР выполняет тройную функцию: помимо восприятия, она действует как двухчастотный формирователь излучения, а также обеспечивает адресное мультиплексирование. Такие ВБР называются адресованными волоконными брэгговскими структурами (АВБС) [3-4]. АВБС — это тип ВБР, спектральный отклик которого имеет две узкие составляющие (пики). При подключении АВБС к широкополосному оптическому источнику формируется выходное излучение, состоящее из двух узкополосных частот, разность между которыми называется адресной частотой и относится к микроволновому диапазону (ГГц). Частота адреса инвариантна к смещению центральной длины волны АВБС, когда она подвергается деформации или изменениям температуры. Поэтому адресная частота используется как отличительный параметр, позволяющий опрашивать несколько АВБС даже при совпадении их центральных длин волн.

Использование АВБС значительно упрощает схему опроса по сравнению с вышеперечисленными оптико-электронными методами, так как требует только широкополосного источника света, оптического фильтра с заданной частотной характеристикой с наклонным профилем и фотоприемника.

Впоследствии понятие АВБС было расширено за счет включения в него структур с тремя и более спектральными компонентами, образующими две и более адресные частоты, которые также известны как многоадресные волоконные брэгговские структуры (МАВБС) [5]. Увеличение количества адресных частот позволяет повысить точность определения центральной длины волны, а также увеличить количество датчиков в системе.

В докладе рассмотрена комплексная классификация адресных волоконных структур Брэгга, включая как АВБС, так и МАВБС с различным относительным расположением компонентов спектрального адреса. Также обсуждаются теоретические и технологические аспекты реализации АВБС. Дан обзор широкого спектра применений АВБС, а также направления дальнейшего развития АВБС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill K. O.; Fujii Y.; Johnson D. C.; Kawasaki, B.S. Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication. *Appl. Phys. Lett.* 1978, 32, P. 647–649.
2. Hegde, G.; Asokan, S.; Hegde, G. Fiber Bragg Grating Sensors for Aerospace Applications: A Review. *ISSS J Micro Smart Syst*, 2022, 11. P. 257–275.
3. Morozov, O.G.; Sakhabutdinov, A.J. Addressed fiber bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems. *Comput. Opt.* 2019, 43. P. 535–543.
4. Agliullin T.; Gubaidullin R.; Sakhabutdinov A.; Morozov O.; Kuznetsov A.; Ivanov V. Addressed Fiber Bragg Structures in Load-Sensing Wheel Hub Bearings. *Sensors* 2020, 20.
5. Morozov O.; Sakhabutdinov, A.; Anfinogentov V.; Misbakhov R.; Kuznetsov A.; Agliullin T. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems. *Sensors* 2020, 20.

УДК 621.791

Муругова О. В.

murugova.oxana@mail.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ КОРПУСНОГО УЗЛА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПД-14

Аннотация: Статья посвящена проблеме моделирования сварочных процессов для геометрически сложного объекта – корпуса опоры турбины низкого давления двигателя ПД-14. В работе представлена методика оценки деформаций после аргонодуговой сварки плавящимся электродом со множеством сварных швов.

Ключевые слова: сварка плавящимся электродом, моделирование, ANSYS, тепловые поля, напряженно-деформируемое состояние, ПД-14.

Murugova O. V.

murugova.oxana@mail.ru

Ufa University of Science and Technology, Ufa

SIMULATION OF ROBOTIC WELDING OF THE ASSEMBLY OF THE NEW GENERATION AIRCRAFT ENGINE PD-14

Abstract: The article is devoted to the problem of modeling welding processes for a geometrically complex object - the support housing of the low-pressure turbine of the PD-14 engine. The paper presents a method for assessing deformations after argon-arc welding with a consumable electrode with many welds.

Key words: consumable electrode welding, modeling, ANSYS, thermal fields, stress-strain state, PD-14.

Двигатель нового поколения ПД-14 является полностью отечественной разработкой и предназначен для среднемагистрального узкофюзеляжного самолета МС-21, оснащенного в настоящее время американскими двигателями производства Pratt & Whitney (PW1431G).

Конструирование двигателя ПД14 потребовало освоения новых технологий, вошедших в перечень критических (например, полые стойки корпуса опоры турбины низкого давления, приведенного на данном слайде).

Стойки и наружное тело корпуса опоры ТНД выполнены из ограниченно свариваемого жаропрочного железоникелевого сплава ЭП718. Каждая стойка вваривается в наружное тело корпуса многопроходной ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом.

При освоении технологии сварки корпуса опоры ТНД сформировалась следующая проблема: при вварке 15-ти стоек в наружное тело возникающие деформации приводят к изменению изначально круглой формы корпуса к многограннику. Для компенсации этого эффекта в конструкции предусмотрено бандажное кольцо. Однако из-за повышенной жесткости конструкции образуются трещины в околошовной зоне и недопустимые деформации. Данные обстоятельства послужили причиной проведения научно-исследовательских работ по поиску путей уменьшения коробления конструкции.

Перспективным путем для решения проблемы деформаций корпуса является изменение режимов и способа сварки, а также порядка наложения швов. Данный подход не требует изменения конструкции корпуса опоры ТНД.

Традиционный способ сварки в авиадвигателестроении – это ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с присадочной проволокой. Однако совершенствование источников питания и роботизация производства обеспечила возможность перехода на роботизированную аргонодуговую сварку плавящимся электродом.

Для совершенствования порядка наложения швов целесообразно применение современных методов численного моделирования сварочных процессов, позволяющих резко снизить количество натуральных экспериментов и затраты на фазе освоения и подготовки производства.

В авиадвигателестроении используется ручная АрДС неплавящимся электродом. В рамках выполнения данной работы предложено заменить ручную АрДС роботизированной аргонодуговой СПЭ, позволяющей проводить сварку с пониженным тепловложением, и как следствие уменьшить остаточные деформации.

В соответствии с планом работ проведен ряд натуральных экспериментов по сварке платины из ЭП718 с присадочной проволокой ЭП533. Для уменьшения тепловложения использован метод поперечных колебаний сварочной горелки для корневого и облицовочного проходов в условиях импульсного режима работы источника питания.

Определены режимы сварки пластины ЭП718, на которых получено качественное сварное соединение. Соединение, полученное роботизированной сваркой, не только удовлетворяет требованиям существующего ГОСТа, но и обеспечивают значительно меньшие допуски размеров сварного шва для стыкового соединения.

Применение роботизированной аргодуговой СПЭ с поперечными колебаниями позволило снизить вводимую погонную энергию более чем на 40% в сравнении с классической технологией, а также позволило проводить сварку не в 3, а в 2 прохода. Анализ макро и микрошлифов показал наличие усиления шва, а также формирование обратного валика с плавным переходом от шва к основному металлу. Сварной шов имеет мелкодисперсную, разориентированную микроструктуру, не содержит пор, несплавлений, трещин, каких-либо других сварочных дефектов.

По результатам экспериментальных исследований роботизированной аргодуговой СПЭ получены и упорядочены необходимые данные для формирования базы знаний для конечно-элементного моделирования.

Для имитации наплавления металла по время сварки использовалась техника «смерти и рождения элементов». Заданы граничные условия контакта с медной подкладкой и с окружающей средой. Источник нагрева – объемный эллипсоид Голдака, запрограммированный под движение с поперечными колебаниями. Проведена калибровка формулы подвижного источника Голдака для получения хорошей сходимости термических циклов с натурных экспериментов.

Верификация деформационной модели осуществлена путем сопоставления величины поперечной усадки в крайних точках пластины после натурных экспериментов на пластине с полученными деформациями после математических экспериментов. В результате получена верифицированная термдеформационная модель роботизированной СПЭ пластины из ЭП718, позволяющая перейти к моделированию сварки на сложной пространственной геометрии корпуса.

В рамках работ по третьему этапу разработана математическая термодформационная модель сварки корпуса опоры ТНД. Полученная формула подвижного источника Голдака, имитирующая двухпроходную роботизированную сварку с поперечными колебаниями, адаптирована для движения по сложным криволинейным траекториям, соответствующим реальным траекториям при сварке.

На основании разработанной математической термодформационной модели сварки корпуса опоры ТНД проведены математические эксперименты с изменением следующих параметров: траектории сварных швов, порядок их наложения и порядок вварки стоек.

В качестве критерия применимости схемы для дальнейших экспериментов выбран размер максимального диаметра фланца наружного тела, полученного после сварки, так как он является важным и нормируемым в документации к корпусу опоры ТНД.

Предложенная схема по вварке стоек «крест-накрест, сначала узкие, потом широкие» дает меньший размер итогового диаметра после вварки всех стоек. Поэтому схема выбрана для проведения последующих экспериментов.

Схема наложения швов 2.2 удовлетворяет требованиям по допуску на максимальный диаметр фланца наружного тела корпуса опоры ТНД, обеспечивает наименьшую овальность конструкции после вварки всех стоек, с также наименьшие деформации в бандажном кольце и стойке.

На основании результатов проведенных работ сформулированы технологические рекомендации для сварки корпуса опоры ТНД. Для уменьшения деформаций корпуса опоры ТНД следует:

1. Перейти от ручной АрДС неплавящимся электродом к роботизированной аргодуговой СПЭ, позволяющей уменьшить более чем на 40% вводимую погонную энергию (до 140-150 кДж/м).

2. Установить очередность варки стоек «крест-накрест, сначала узкие, потом широкие», обеспечивающую уменьшение уровня остаточных деформаций корпуса опоры ТНД в более чем 4 раза (с 0,045 мм до 0,01).

3. Применить схему траекторий сварных швов при варке стоек ограниченными (80...110 мм) встречными участками вдоль стойки, обеспечивающую уменьшения уровня остаточных деформаций корпуса опоры ТНД в более чем в 3 раза (с 0,342 мм до 0,103 мм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атрощенко В. В., Никифоров Р. В., Муругова О. В. Моделирование тепловых процессов при дуговой сварке высокопрочной трубной стали с учетом структурно-фазовых превращений // Сварка и диагностика. 2018. № 2. С. 50–54.
2. Никифоров Р. В. Совершенствование технологии автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом стыковых соединений из тонколистовых коррозионно-стойких сталей с учетом термомодеформационных процессов в изделии: дис....канд. техн. наук: 05.02.10. Москва, 2014. 201 с.
3. Разработка технологии роботизированной сварки плавящимся электродом соединений сплава ХН45МВТЮБР / В. В. Атрощенко и др. // Сварка и диагностика. 2020. № 4. С. 46–49.

УДК 67.7822

Мустаев Р. Р.

mustaevroma@yandex.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЙ

Аннотация: В докладе рассматриваются вопросы использования магнитного метода неразрушающего контроля для выявления дефектов структуры изделий, выполненных из ферромагнитных материалов. Описываются алгоритмы методов, поднимаются их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: неразрушающий контроля, ферромагнитные материалы, остаточная намагниченность, магнитная дефектоскопия, коэрцитивная сила, магнитопорошковый метод неразрушающего контроля, магнитографический метод контроля.

Mustaev R. R.

mustaevroma@yandex.ru

Ufa University of Science and Technology, Ufa

THE USE OF PULSE-MAGNETIC PROCESSING TO CHECK THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE PRODUCT MATERIAL

Abstract: The report deals with magnetic method of non-destructive testing to identify structural defects of products made of ferromagnetic materials. The algorithms of the methods are described, their advantages and disadvantages are analyzed.

Key words: non-destructive testing, ferromagnetic materials, residual magnetization magnetic flaw detection, coercive force, magnetic powder method of non-destructive testing, magnetographic control method.

В настоящее время одной из актуальных проблем является использование магнитно-импульсной обработки для проверки характеристик изготавливаемых изделий. Актуальность разрабатываемой темы обосновывается востребованностью результатов анализа подобного рода исследований в области современного машиностроения. Востребованность получения результатов анализа применения магнитных методов неразрушающего контроля обосновывается насущной необходимостью выявления рисков возникающих дефектов структуры и обеспечение надежности их эксплуатации.

Методы неразрушающего контроля при помощи магнитно-импульсной обработки основаны на взаимодействии обрабатываемого изделия с магнитным полем и применяются для обнаружения внутренних и поверхностных дефектов объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов.

Магнитный метод контроля структуры и прочностных характеристик материала изделий машиностроения и металлургии востребован в современной промышленности. Контроль механических характеристик (твердости, временного сопротивления при разрыве, предела прочности, относительного удлинения, сужения и др.) стальных изделий применим для материалов, у которых есть взаимосвязь данных характеристик с магнитными свойствами металла. В современных исследованиях анализируются структурно-чувствительные магнитные характеристики: напряженность намагничивающего поля, соответствующего максимальной магнитной проницаемости; начальная и максимальная магнитные проницаемости; остаточная намагниченность; коэрцитивная сила и др. [Неразрушающий контроль: Справочник 2004; Бида и др. 2002; Михеев 1993].

Наибольшее применение в практике неразрушающего контроля структуры и механических свойств получили остаточная намагниченность и коэрцитивная сила, что позволяет нам согласиться с тезисом о том, что «коэрцитивной силой является напряженность внешнего магнитного поля, при котором намагниченность в материале, предварительно намагниченном до насыщения, становится равной нулю» [Матюк 2010, с. 1].

Различают следующие методы магнитного контроля:

- магнитная дефектоскопия;
- магнитопорошковый метод неразрушающего контроля;
- магнитографический метод контроля;
- феррозондовый и другие методы магнитного контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. В 7 т. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. / В. В. Клюев, В. Ф. Мужикский, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Кн. 2: Оптический контроль. / В. Н. Филинов, А. А. Кеткович, М. В. Филинов. Кн. 3: Радиоволновой контроль. / В. И. Матвеев. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.
2. Бида В. Г., Горкунов Э. С., Шевнин В. М. Магнитный контроль механических свойств проката. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 252 с.
3. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.

Мухутдинова А. А.^{1а}, Киреев В. Н.², Урманчиев С. Ф.¹

^а muhutdinova18@gmail.com

¹ Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ТЕЧЕНИЕ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Аннотация: В работе рассмотрено течение несжимаемой жидкости с температурной зависимостью вязкости в узком канале между двух коаксиальных цилиндров, на внутренней и внешней поверхностях которого задан конвективный теплообмен с окружающей средой согласно закону Ньютона-Рихмана.

Ключевые слова: термовязкая жидкость, кольцевой канал.

Mukhutdinova A. A.^{1а}, Kireev V. N.², Urmancheev S. F.¹

^а muhutdinova18@gmail.com

¹ Mavlutov Institute of Mechanics of RAS, Ufa

² Ufa University of Science and Technology, Ufa

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF HEAT TRANSFER ON THE FLOW OF A THERMO-VISCOUS FLUID IN AN ANNULAR CHANNEL

Abstract: The paper considers the flow of an incompressible fluid with temperature dependence of viscosity in a narrow channel between two coaxial cylinders with convective heat transfer to the environment on the internal and external surfaces according to the Newton-Richman law.

Key words: thermoviscous liquid, annular channel.

Задача о течении вязких жидкостей в кольцевых каналах является одной из актуальных задач гидродинамики [1–5].

В данной работе рассмотрено течение термовязкой несжимаемой жидкости в кольцевом канале малого радиуса, на внутренней и внешней поверхностях которого задан конвективный теплообмен с окружающей средой согласно закону Ньютона – Рихмана. Рассматриваются две зависимости вязкости жидкости: монотонная и немонотонная. В первом случае это монотонная зависимость, убывающая с ростом температуры, характерна для большинства капельных жидкостей [6–7]. Во втором случае речь идет об аномально термовязких жидкостях, вязкость которых немонотонно меняется в определенном температурном диапазоне [8]. Такими свойствами обладает ряд

полимерных жидкостей, применимых в химических технологиях и, например, как потокоотклоняющие реагенты при добычи нефти. Математическая модель состоит из уравнений неразрывности, Навье-Стокса и сохранения энергии, записанных в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии записанных в безразмерном виде. Система уравнений математической модели решалась численно с использованием метода контрольного объема [9]. В результате численного исследования получены графики скоростей в различных сечениях кольцевого канала, а также распределения полей температуры и вязкости. Установлено, что в зависимости от интенсивности теплообмена происходит образование высоковязких зон, определяющих характер течения жидкости в канале и ее расход.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект № 22-21-00915.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao H., Li R., A liquid plug moving in an annular pipe, Flow analysis Physics of Fluids vol 30, 2018.
2. Bagheri E., Wang B. C., Effects of radius ratio on turbulent concentric annular pipe flow and structures, International Journal of Heat and Fluid Flow, vol 86, 2020.
3. Lu G., Wang J., Experimental investigation on heat transfer characteristics of water flow in a narrow annulus, Applied Thermal Engineering, vol 28, p 8–13, 2008.
4. Bird R. B., Armstrong R. C., Hassager O., Dynamics of Polymeric Fluids, Fluid Mechanics, vol 1, p 649, 1987.
5. Valdes J.R., Miana M.J., Pelegay J.L., Núñez J. L., Pütz T. Numerical investigation of the influence of roughness on the laminar incompressible fluid flow through annular microchannels. 50(9-10). doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.006
6. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей Издательство "Наука", Ленинградское отделение, с. 592, 1975
7. Nizamova A. D., Kireev V. N., Urmancheev S. F., On stability of thermoviscous liquids laminar flow, Bulletin of Tyumen State University: Ecology and Nature Management, vol 1, № 2, p 104, 2015.
8. Urmancheev S. F., Kireev V. N., Steady flow of a liquid with a temperature anomaly of viscosity, Doklady Physics, vol 49, № 5, p 328-33, 2004.
9. Patankar S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow New York, Hemisphere Publishing Corporation, p 200, 1980.

Низамова А. Д. ^{1а}, Киреев В. Н. ², Урманчиев С. Ф. ¹

^а *adeshka@yandex.ru*

¹ Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ТЕПЛООБМЕННИКА

Аннотация: В работе рассмотрено течение несжимаемой жидкости с температурной зависимостью вязкости в кольцевом канале с заданными внутренним и внешним радиусами под действием постоянного перепада давления. Установлена зависимость критических параметров смены режима течения от геометрии канала.

Ключевые слова: гидродинамическая устойчивость, термовязкая жидкость, кольцевой канал.

Nizamova A. D. ^{1а}, Kireev V. N. ², Urmancheev S. F. ¹

^а *adeshka@yandex.ru*

¹ Mavlutov Institute of Mechanics of RAS, Ufa

² Ufa University of Science and Technology, Ufa

INVESTIGATION OF LIQUID FLOW STABILITY IN ANNULAR CHANNEL OF THE HEAT EXCHANGER

Abstract: The paper considers the flow of an incompressible fluid with a temperature-dependent viscosity in an annular channel with given inner and outer radii under the action of a constant pressure drop. The dependence of the critical parameters of the change in the flow regime on the geometry of the channel is established.

Key words: hydrodynamic stability, thermoviscous liquid, annular channel.

Задача об устойчивости течения жидкости является одной из актуальных задач гидродинамики [1–3].

В работе рассматривается течение несжимаемой жидкости с температурной зависимостью вязкости в кольцевом канале с заданными внутренним и внешним радиусами под действием постоянного перепада давления.

Построены обобщенные математическая модель и численная методика расчета для задачи об устойчивости течения термовязкой жидкости в канале кольцевого типа с нагревом внутреннего стержня. В ходе расчетов построены спектры собственных значений и собственные функции. Установлена зависимость критических параметров смены режима течения от геометрии

канала, то есть зависимость критического числа Рейнольдса и волнового числа от отношения внешнего радиуса к внутреннему кольцевого канала. Также, при изменении геометрии канала меняется вид спектра собственных значений, с увеличением отношения внешнего радиуса к внутреннему кольцевого канала нижняя вертикальная ветвь распадается на несколько, что обуславливает наличие большего количества не нулевых собственных функций (амплитуд возмущений поперечной скорости), а значит – большее количество возмущений поперечной скорости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 22-21-00915.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orszag S.A. Accurate solution of the Orr-Sommerfeld equation // J. of Fluid Mech. 50. 1971. Pp. 689–703. DOI: 10.1017/S0022112071002842
2. Nizamova, A.D., Murtazina, R.D., Kireev, V.N., Urmancheev, S.F. Features of Laminar-Turbulent Transition for the Coolant Flow in a Plane Heat-Exchanger Channel // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2021, Vol. 42, No. 9, pp. 2211–2215. DOI: 10.1134/S1995080221090249
3. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. Влияние зависимости вязкости от температуры на спектральные характеристики уравнения устойчивости течения термовязких жидкостей // Многофазные системы. 2019. Т. 14, № 1. С. 52–58. DOI: 10.21662/mfs2019.1.007

УДК 532.517

Низамова А. Д. ^{1а}, Муртазина Р. Д. ², Хасанов И. С. ², Шайхиев Э. Р. ²

^а *adeshka@yandex.ru*

¹ Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа

СРАВНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ

Аннотация: Для краевых задач рассматриваются численные методы нахождения собственных значений, выполняется оценка погрешностей вычислений.

Ключевые слова: конечно-разностный метод, спектральный метод, погрешность вычислений.

Nizamova A. D. ^{1а}, Murtazina R. D. ², Khasanov I. S. ², Shaihiiev E. R. ²

^а *adeshka@yandex.ru*

¹ Mavlutov Institute of Mechanics of RAS, Ufa

² Ufa University of Science and Technology, Ufa

COMPARISON OF RELATIVE ERRORS OF NUMERICAL METHODS FOR SOLVING BOUNDARY PROBLEM

Abstract: For boundary value problems, numerical methods for finding eigenvalues are considered, and calculation errors are estimated.

Key words: finite difference method, spectral method, calculation error.

В качестве метода решения проблемы собственных значений в конечно-разностной схеме [1] используется QR-алгоритм.

QR-алгоритм – это численный метод, определенный для решения проблемы собственных значений, то есть для поиска всех собственных чисел и собственных функций. Этот метод разработан в конце 1950-х годов двумя исследователями Кублановской В. Н. и Фрэнсисом Дж. [2].

Методы спектрального разложения позволяют отыскать спектр собственных значений, то есть решать основную проблему задачи об устойчивости течений жидкостей. Так, с помощью разложения по полиномам Чебышева были исследованы несколько первых собственных значений для течения термовязкой жидкости [3,4], а с помощью метода Галеркина по полиномам Лежандра был исследован спектр течения Блазиуса [5].

По построенным графикам относительной погрешности можно сделать вывод о том, что точность вычислений по количеству знаков больше у спектрального метода и равна до 14 знаков после запятой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Муксимова Р.Р. Особенности процесса накопления погрешностей при решении задач для простейших уравнений математической физики конечно-разностными методами // Сибирский журнал вычислительной математики. 2016. Т. 19. № 2. С. 139-152.
2. Туманов С.Н., Шкаликов А.А. О локализации спектра задачи Орра–Зоммерфельда для больших чисел Рейнольдса // Матем. заметки. 72:4. 2002. С. 561-569.
3. Е.Г. Кудашева, Р.Д. Муртазина, А.Д. Низамова, Н.А. Сидельникова. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. Устойчивость течения жидкостей в канале с линейным профилем температуры. М.: Русайнс, 2021. 134 с.
4. Nizamova A.D., Murtazina R.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F. Features of Laminar-Turbulent Transition for the Coolant Flow in a Plane Heat-Exchanger Channel// Lobachevskii Journal of Mathematics, 2021, Vol. 42, No. 9, pp. 2211–2215. DOI: 10.1134/S1995080221090249
5. Thomas L.N. The stability of plane Poiseuille flow // Phys. Rev. 1953. Vol. 90. Pp. 780-783.

УДК 004

Нургаянова О. С.

onurgayanova@yandex.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ СПЛАВОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТКИ

Аннотация: В статье рассматриваются способы обработки патентных данных для создания массива информации с последующим анализом и использованием ее в методах машинного обучения. На основе данных о химическом составе сплавов можно строить нейросетевые модели, позволяющие прогнозировать жаропрочность, что в целом позволит ускорить поиск новых составов и получать сплавы с повышенными свойствами. Информация о технологических параметрах сплавов, представленная в виде соответствующих нечетких правил позволит более точно настраивать параметры оборудования при изготовлении отливок.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, методы анализа данных, классификация сплавов, генетический алгоритм, искусственные нейронные сети.

Nurgayanova O. S.

onurgayanova@yandex.ru

Ufa State Aviation Technical University, Ufa

DECISION SUPPORT MODELS AND METHODS FOR PREDICTING ALLOY PROPERTIES AND DETERMINING PROCESS PARAMETERS FOR BLADE MANUFACTURING

Abstract: This article discusses how to process patent data to create an array of information with subsequent analysis and use it in machine learning methods. Based on data on the chemical composition of alloys, neural network models can be built to predict the heat resistance, which in general will accelerate the search for new compositions and produce alloys with improved properties. Information about the technological parameters of the alloys, presented in the form of appropriate fuzzy rules will allow to more accurately adjust the parameters of equipment in the manufacture of castings.

Key words: heat resistant nickel alloys, data analysis methods, alloy classification, genetic algorithm, artificial neural networks.

Производство современных авиационных двигателей является сложным высокотехнологичным и требующим постоянного контроля процессом. Наличие конструкционных материалов, обладающих повышенными свойствами в условиях работы высокоагрессивной горячей среды позволяет не только увеличить КПД двигателя, но и повысить ресурс некоторых его деталей, в частности дисков, лопаток и т. д. В настоящее время ведутся поиски

новых составов сплавов, обладающих повышенными свойствами, и в соответствии с конструкторскими требованиями к детали подбирается допустимая технология ее изготовления, а также определяются необходимые параметры настройки оборудования [1–3].

Использование систем поддержки принятия решений обеспечивает возможность учета многих факторов, способных оценивать поведение или свойства объекта по заданному набору характеристик, и связано с быстроедействием при обработке больших объемов информации, а также экономией временных и материальных ресурсов. В основе методологии процесса принятия технических и технологических решений лежит информация, полученная из множества разнородных источников и представленная в различной форме, а также модели и методы ее хранения и обработки. С одной стороны, наличие множества разрозненных источников данных и отсутствие механизмов их интеграции усложняет получение качественных результатов при подборе материала для конкретного вида деталей, а также прогнозирование свойств новых материалов. С другой стороны, конструкционная сложность самих деталей и технологий их изготовления, характеризующиеся большим количеством параметров и сложностью связей между ними, а также протекаемыми физико-химическими процессами, требуют тщательной настройки оборудования и определения допустимых режимов работы. Таким образом можно выделить три задачи:

1. Разработка моделей и методов сбора, структурирования и организации хранения информации о сложных технических объектах – сплавах, в виде организованной структуры данных с целью последующих оперативных обработки и анализа.

2. Разработка моделей и методов предсказания свойств сплавов на основе множества их характеристик.

3. Разработка моделей и методов определения допустимой технологии изготовления детали из перечня возможных материалов на основе требований к ней.

В настоящее время накоплен большой объем патентной информации о жаропрочных никелевых сплавах, который представлен на Интернет-ресурсах Европейского патентного ведомства (European Patent Office, <https://www.epo.org>), Яндекс.Патенты (<https://yandex.ru/patents>) и т.п. Сведения о сплавах – название, химический состав, физико-химические свойства, технологические параметры их получения организованы в виде текстовых электронных документов, представляющие собой слабоструктурированные данные.

Известно, что к странам, развивающим технологии синтеза литейных жаропрочных сплавов в настоящее время относятся Россия и США, ранее также определенные успехи были достигнуты в Германии, Франции, Англии и Японии, однако европейские страны в последние годы сократили поиски составов новых сплавов в следствии ограниченности природных ресурсов, а доступная информация о японских сплавах существенно ограничена в виду языковых особенностей [2, 4]. Таким образом, проведение патентного поиска ограничивается странами-производителями. Наличие структурированных данных делает возможным применение методов математического моделирования, искусственного интеллекта и машинного обучения для построения зависимостей «состав-свойство», которые в дальнейшем могут быть использованы в практической деятельности, позволив тем самым уйти от традиционных методов синтеза, основанных на знаниях физико-химических свойств металлов, трудоемкости и сопровождающихся большим количеством расходования дорогостоящих материальных и временных ресурсов [3].

Можно выделить следующие этапы решения первой задачи – сбор, структурирование и хранение данных о сплавах:

1. Проведение патентного поиска по литейным жаропрочным никелевым сплавам. Такой поиск можно осуществить при помощи парсинга web-страниц на соответствующих web-ресурсах, например, ЕРО или Яндекс.Патенты (с помощью такого web-скребка можно получать большой корпус текста для

задач распознавания, любые количественные данные и т.п.) Собранные релевантные документы отправляются в хранилище данных, из которого затем последовательно будут обрабатываться надлежащим образом.

2. Разметка документов (автоматическое назначение меток на основе анализа текстовых данных для повышения эффективности работы с неструктурированными и слабоструктурированными текстовыми документами) и формирование датасетов для тренировки и обучения нейронных сетей и их ансамблей (нормализация данных и представление их в формате, воспринимаемым нейронной сетью).

Реализация первого этапа достигается использованием соответствующих библиотек и доработкой программного обеспечения. Реализация модуля парсера возможна при помощи использования технологии фреймворка Selenium Python, интерфейсная часть написана на языке программирования C#. Организация работы с хранилищем и базой данных осуществляется при помощи фреймворка Entity Framework, для окончательного формирования размеченных данных в виде xls-файла используется вывод EPPlus. Ниже представлены архитектура приложения для парсинга сайтов с автоматической разметкой текста (рис. 1) и результаты работы модуля-парсера Яндекс.Патенты (рис. 2)



Рис. 1. Архитектура приложения для парсинга сайтов и автоматической разметки документа

Название	Автор	Номер	Ссылка
ЖАРОПРОЧНЫЙ ПОРОШКОВ...	Открытое Акционерное Общес...	RU 2 348 726 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ НА О...	Открытое акционерное общес...	RU 2 371 502 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ НА О...	Открытое акционерное общес...	RU 2 257 420 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ЛИТЕЙНЫЙ	Открытое акционерное общес...	RU 2 219 272 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ДЕФОРМИР...	Федеральное государственное...	RU 2 365 657 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ПОРОШКОВЫЙ ЖАРОПРОЧН...	Открытое акционерное общес...	RU 2 289 919 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ПОРОШКОВ...	Открытое акционерное общес...	RU 2 294 393 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ПОРОШКОВ...	Открытое акционерное общес...	RU 2 410 457 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ДЕФОРМИР...	Российская Федерация, от им...	RU 2 404 275 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ДЕФОРМИР...	Федеральное государственное...	RU 2 280 091 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ НА О...	Российская Федерация в лице ...	RU 2 465 359 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ НА О...	Федеральное Государственное...	RU 2 318 030 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ДЕФОРМИР...	Федеральное государственное...	RU 2 571 674 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ СВАРИВАЕМ...	Федеральное государственное...	RU 2 301 277 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ДЕФОРМИРУЕМЫЙ ЖАРОПР...	Публичное акционерное общес...	RU 2 695 097 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...
ЖАРОПРОЧНЫЙ ПОРОШКОВ...	Открытое акционерное общес...	RU 2 371 495 C1	https://yandex.ru/patents/doc/R...

Рис. 2. Результаты работы парсера Яндекс.Патенты

Рассмотрим формализацию и решение задачи разметки документов. Задача назначения меток текстам по своей сути – это задача multilabel-классификации, которая отличается от обычной мультиклассовой классификации тем, что одному объекту может соответствовать не один класс, а сразу несколько классов. Основную проблему в решении задачи text tagging представляет необходимость проводить предобработку текстов. Любой текст содержит множество служебных слов (предлогов, частиц, междометий, союзов), которые не влияют на тематику, но «размывают» частоту ключевых слов. Для решения этой проблемы используются списки стоп-слов, которые помимо служебных слов включают в себя знаки препинания, специальные символы и слова наподобие «являться», «есть», «быть» – часто употребляемые в качестве связок между другими словами, но не оказывающие влияния на суть текста. Далее необходимо привести все слова к неким одинаковым стандартным формам. Для этого проводится лемматизация или стемминг.

Лемматизация – это приведение к начальным формам: «научному» – «научный», «цифровизации» – «цифровизация». Сложность этого процесса связана с необходимостью определения части речи (POS-тега) слова [3].

Стемминг – это выделение основы слова: «живой» – «жив». Сложность стемминга связана с тем, что у не имеющих общего значения слов можно выделить одинаковую основу: «university», «universe», «universal» – «univers».

Альтернативой стеммингу и лемматизации является поиск биграмм или n -грамм – словосочетаний из n слов, например, «компьютерный анализ»

или «интерпретация данных» – это биграммы. Такой подход позволяет точнее извлекать из текстов словесные обороты, но требует больше усилий в реализации [2].

Имеется некоторый набор текстов (патентов) на указанном естественном языке, который иначе называется корпусом текстов или коллекцией документов. Каждый текст – это некоторый набор слов заданного языка. Задача состоит в том, чтобы каждому документу коллекции автоматически поставить в соответствие метки, которые тем или иным образом будут характеризовать этот документ. Назначаемые метки (иначе теги или ключевые слова) могут как входить в список слов корпуса, так и быть выбранными извне.

Пусть дан корпус D , состоящий из документов d :

$$D = \{d_1, \dots, d_{|D|}\},$$

множество меток L : $L = \{l_1, \dots, l_{|L|}\}$.

Каждому документу d_i соответствует некоторый набор меток из L так, что: $Y_i = \{0; 1\}^{|L|}$, где $Y_{ij} = 1$ означает, что метка l_j назначена документу d_i .

Пусть $\{Y_1, \dots, Y_{|D|}\} = Y$. Существует некоторая неизвестная целевая функция Φ , устанавливающая соответствие между документами и метками:

$$\Phi: D \times L \rightarrow Y.$$

Задача text tagging таким образом состоит в построении классификатора $\Phi': D \times L \rightarrow Y$, максимально близкого к Φ .

Таким образом в патентных источниках были выделены названия химических элементов и их содержание, а также помимо жаропрочности некоторые другие свойства.

Вторая задача, связана с разработкой моделей и методов предсказания свойств сложных объектов на основе множества их характеристик. Для ее решения можно применить ряд методов, таких как регрессия, оптимальное планирование эксперимента и т.д., однако у многих из них есть один существенный недостаток – требуется иметь хотя бы примерное представление о виде зависимости между химическим составом сплавов и их жаропрочностью

при заданной температуре. Нейронные сети же позволяют избежать этой проблемы, поскольку в процессе их обучения на некоторой заданной выборке, благодаря их способности к обобщению, в неявном виде они позволяют определить вид этой зависимости [4].

Постановка задачи

Имеется информация об исходном множестве жаропрочных сплавов (исходная выборка). Для каждого сплава из выборки известны доли содержания различных легирующих элементов, жаропрочность при определенных температурах.

Пусть дано множество Y , состоящее из n измерений жаропрочности сплавов, y_i – жаропрочность i -го измерения, c_i^j – доля содержания в i -ом сплаве j -го химического элемента, t_i – температура.

Тогда задача сводится к нахождению такой функции

$$g(c^1, c^2, \dots, c^k, t), \quad (1)$$

где c^j – доля содержания в сплаве j -го химического элемента, t – температура, которой соответствуют предсказываемые значения жаропрочности

$$\hat{y}_i = g(c_i^1, c_i^2, \dots, c_i^k, t_i) \quad (2)$$

являются наиболее близкими к фактической жаропрочности y_i .

Для оценки качества предсказаний используются следующие показатели:

Стандартное отклонение предсказания:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

Средняя относительная ошибка:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4)$$

Требуется на основе исходного множества сплавов при помощи нейронных сетей спрогнозировать жаропрочность для сплава с заданными долями легирующих элементов при заданной температуре.

В работе использована квадратичная функция потерь:

$$\text{loss} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (5)$$

Эта функция дифференцируема на всей области определения и симметрична, ее часто используют в регрессионном анализе при решении других задач [6]. В качестве метода обучения полносвязной нейронной сети были рассмотрены:

a) Общий градиентный спуск

Данный алгоритм позволяет рассчитать наиболее стабильный градиент, также в данных меньше шума.

Недостатком алгоритма является слишком высокая вычислительная сложность, в связи с чем может потребоваться больше памяти [7].

b) Стохастический градиентный спуск

Данный алгоритм отличается от градиентного спуска тем, что «далает» шаги по одному элементу из обучающей выборки, что позволяет ускорить процесс обучения нейронной сети и снизить ресурсы вычислительной системы.

Нейронная сеть обучается данным методом не столь быстро, как в случае использования адаптивных методов.

Существуют также методы (например, momentum, [8]) позволяющие за счет накопления импульса ускорить работу стохастического градиентного спуска.

c) Адаптивные методы

К адаптивным методам относятся Adam, RMSprop и AdaGrad. Все они основаны на стохастическом градиентном спуске и отличаются подстройкой скорости обучения в зависимости от обучающей выборки.

С одной стороны считается, что они работают лучше, чем стохастический градиентный спуск. С другой стороны, есть ряд исследований, показывающих, что эти методы хуже обобщают зависимости в данных [9].

Таким образом, в связи со всем вышеперечисленным, для дальнейшей реализации был выбран алгоритм стохастического градиентного спуска. В

принципе, изменение используемого алгоритма обучения происходит легко благодаря использованию средства Tensorflow Keras более подробно о котором говорится ниже.

Для реализации нейронной сети был выбран Tensorflow — фреймворк для машинного обучения, разработанный компанией Google. Является наиболее популярным фреймворком для машинного обучения, Tensorflow имеет множество руководств и удобное средство для визуализации Tensorboard.

Недостатком данного фреймворка является высокий порог вхождения для начинающих пользователей. С другой стороны, в данный фреймворк входит высокоуровневая библиотека Keras, которая значительно ускоряет и облегчает создание простых нейронных сетей и не требует от пользователя глубоких знаний машинного обучения [10].

Язык Python является основным при работе с Tensorflow и хотя Tensorflow поддерживает ряд других языков, таких как C#, C++, Java, Haskell, Go и др., документация фреймворка для этих языков программирования неполна и не поддерживает часть его функциональности. Поэтому для реализации был выбран язык Python, а вместо стандартной среды был использован Jupyter Notebook, облегчающий процесс использования Python в машинном обучении [9 – 11].

До обучения нейронной сети требуется провести ряд действий.

а) Нормализация исходных данных

Нормализация данных — приведение набора данных к некоторой канонической форме.

В данном случае нормализация производится по следующей формуле:

$$a'_i = \frac{a_i - M(a)}{\sigma(a)} \quad (6)$$

где a'_i — нормализованное значение i -го наблюдения некоторого параметра a , a_i — ненормализованное значение i -го наблюдения, $M(a)$ — математическое ожидание параметра a , $\sigma(a)$ — стандартное отклонение параметра a .

Операция нормализации применяется ко всем долям химических элементов, содержащихся в сплаве, а также к значениям температуры и жаропрочности. Полученные в процессе нормализации математические ожидания и стандартные отклонения каждой величины запоминаются для дальнейшего использования.

В дальнейшем, все операции по обучению нейронной сети будут происходить с использованием нормализованных данных. Операции же по оценке качества предсказаний будут происходить с использованием ненормализованного значения жаропрочности.

Поскольку в результате обучения нейронной сети по нормализованным данным, она будет предсказывать нормализованную жаропрочность, которую можно перевести в ненормализованную жаропрочность по формуле:

$$\hat{y}_i = \hat{y}_i' * \sigma(y) + M(y) \quad (7)$$

где \hat{y}_i' – нормализованное предсказанное значение жаропрочности.

b) Разделение имеющейся выборки на обучающую и тестовую

Точность предсказаний обученной нейронной сети будем оценивать по тестовому набору данных. При этом необходимо, чтобы тестовый набор данных не пересекался с обучающим. В противном случае в процессе оценки точности предсказания будет происходить переоценка точности.

В связи с этим, логично разделить имеющуюся исходную выборку на две непересекающихся подвыборки: обучающая выборка (80% исходной выборки) и тестовая (20% исходной выборки).

Существует множество способов такого разделения, в данном же случае разобьем исходную выборку на обучающую и тестовую случайным образом.

Для повышения точности предсказаний было принято решение составить несколько нейронных сетей, различающихся по параметрам, затем независимо друг от друга провести их обучение на обучающей выборке и сравнить точность предсказаний на тестовой выборке.

а) Архитектура нейросетей

Для построения было выбрано 6 вариантов архитектур нейронных сетей, различающихся по числу нейронов в скрытых слоях, числу скрытых слоев и функции активации нейронов:

Модель 1 – нейронная сеть с 2 скрытыми полносвязными слоями, каждый слой которой имеет по 128 нейронов, а в качестве функции активации используется ReLU.

Модель 2 – нейронная сеть с 2 скрытыми полносвязными слоями, в которой каждый скрытый слой имеет вдвое большее количество нейронов, т.е. по 256 нейронов, в качестве функции активации используется ReLU.

Модель 3 – нейронная сеть с 2 скрытыми полносвязными слоями, в которой каждый скрытый слой имеет вдвое меньшее количество нейронов, т.е. по 64 нейронов, в качестве функции активации используется ReLU.

Модель 4 – нейронная сеть с увеличенным числом скрытых слоев, то есть с 3 скрытыми полносвязными слоями, в которой каждый скрытый слой имеет по 128 нейронов, в качестве функции активации используется ReLU.

Модель 5 – нейронная сеть с уменьшенным числом скрытых слоев, то есть с 1 скрытым полносвязным слоем, в которой каждый скрытый слой имеет по 128 нейронов, в качестве функции активации используется ReLU.

Модель 6 – нейронная сеть с 2 скрытыми полносвязными слоями, каждый слой которой имеет по 500 нейронов, а в качестве функции активации используется softmax.

б) Тестирование и сравнение моделей

После реализации и обучения описанных ранее архитектур нейронных сетей было проведено их тестирование на тестовой выборке. Результаты тестирования представлены на рисунке 3 (*а* и *б*). Как видно, стандартные отклонения моделей 1 и 4 довольно близки друг к другу, модель 6 – показывает себя хуже остальных.

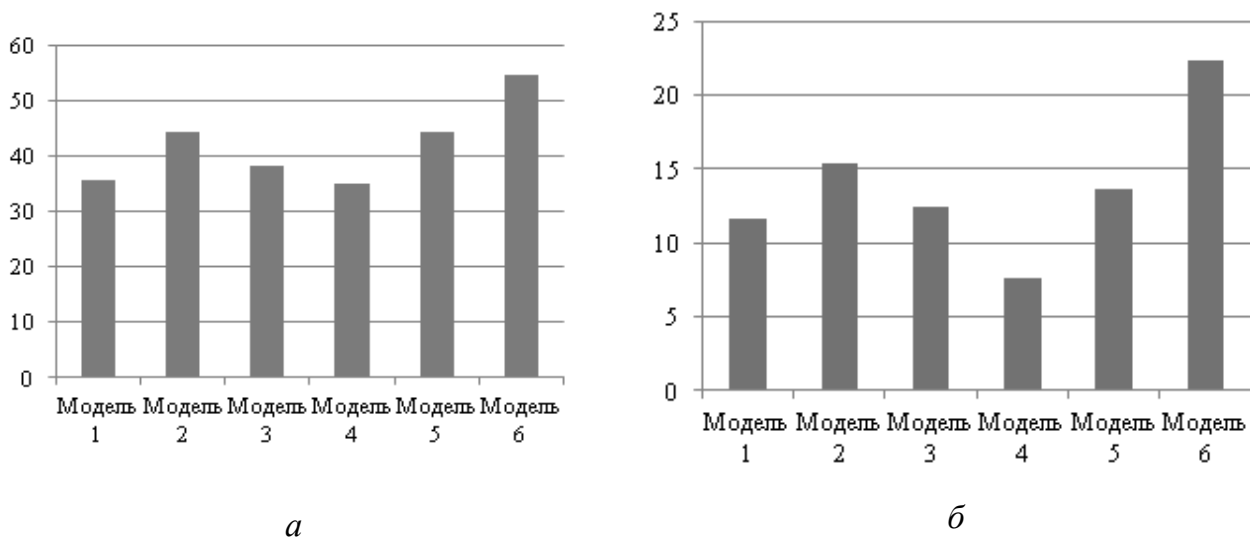


Рис. 3. Результаты тестирования моделей:
а – стандартное отклонение моделей;
б – средняя относительная ошибка моделей в %

При сравнении по относительной ошибке, лучше всего показала себя модель 4. Модель 6 показала себя хуже и по данному показателю.

По обоим показателям модель 4 показала себя лучше всего. Это связано с ее большим числом скрытых слоев, вследствие чего модель имеет большие способности к обобщению и выявлению неявных зависимостей. В среднем ее относительная ошибка равна 7,5 %.

Модель 6 показала себя хуже по обоим показателям, вероятно вследствие использования другой функции активации.

Для дальнейшего повышения точности предсказаний был применен ансамбль моделей нейронных сетей.

Ансамбль моделей – совместное использование нескольких моделей нейронных сетей для достижения лучшей точности прогнозирования, чем возможно получить по каждому из методов в отдельности.

В данной работе создание ансамбля использовалось для уменьшения стандартного отклонения моделей на тестовой выборке, в связи с чем, средняя относительная ошибка только упала.

а) Используемые методы создания ансамбля моделей нейронных сетей

В работе использовались два подхода к построению ансамблей моделей – ансамбль, полученный с помощью метода наименьших квадратов и ансамбль, созданный с помощью новой нейронной сети. Рассмотрим их подробнее:

Ансамбль посредством метода наименьших квадратов (МНК):

Пусть предсказанное ансамблем значение определяется по формуле

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^6 b_i * \hat{y}_i \quad (8)$$

где \hat{y}_i – значение, предсказанное i -ой моделью, b_i – неизвестный весовой коэффициент модели i .

Тогда для создания ансамбля достаточно найти неизвестные коэффициенты b_i

Для нахождения этих коэффициентов на основе обучающей выборки достаточно минимизировать следующее выражение

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^6 \hat{y}_{ij} b_j)^2, \quad (9)$$

где y_i – известное значение жаропрочности i -ой записи обучающей выборки, \hat{y}_{ij} – значение жаропрочности, предсказанное для i -ой записи j -ой нейронной сетью.

Для минимизации уравнения (9) можно воспользоваться множеством средств, в данном случае была использована библиотека `scipy` для Python.

Ансамбль посредством новой нейронной сети:

В данном случае предполагается создать новую нейронную сеть, которая будет состоять из шести уже обученных нейронных сетей, а также нескольких полносвязных слоев для вычисления жаропрочности на основе уже предсказанных нейросетями значений. После создания эту нейронную сеть требуется обучить, используя данные обучающей выборки.

К сожалению, библиотека `Tensorflow Keras` не дает возможности зафиксировать отдельные модели в данной нейронной сети, в связи с чем, модели 1–6 в будучи в ее составе заново начнут обучаться, что может привести не к очень хорошим результатам.

Схема ансамбля на основе новой нейронной сети представлена на рисунке 2, где в нижних трех блоках указаны количество выходных нейронов очередного полносвязного слоя нейросети и соответствующие функции активации.

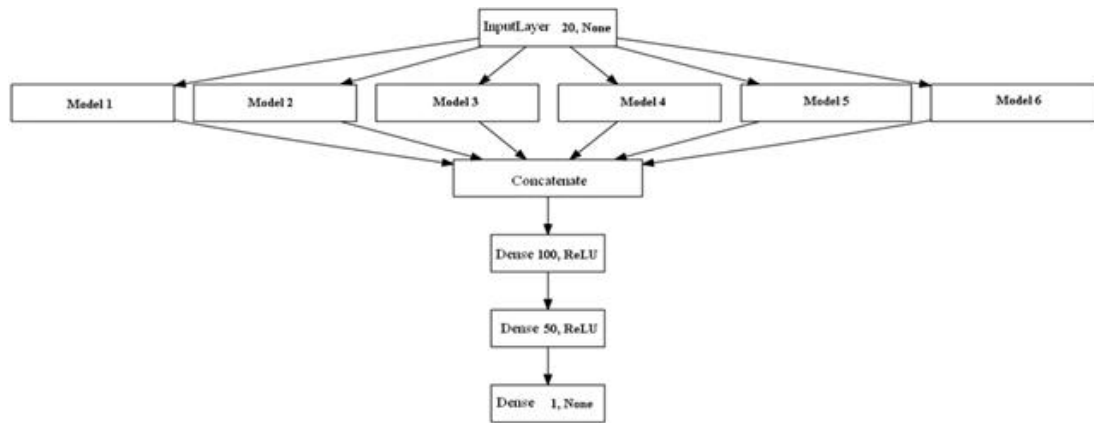
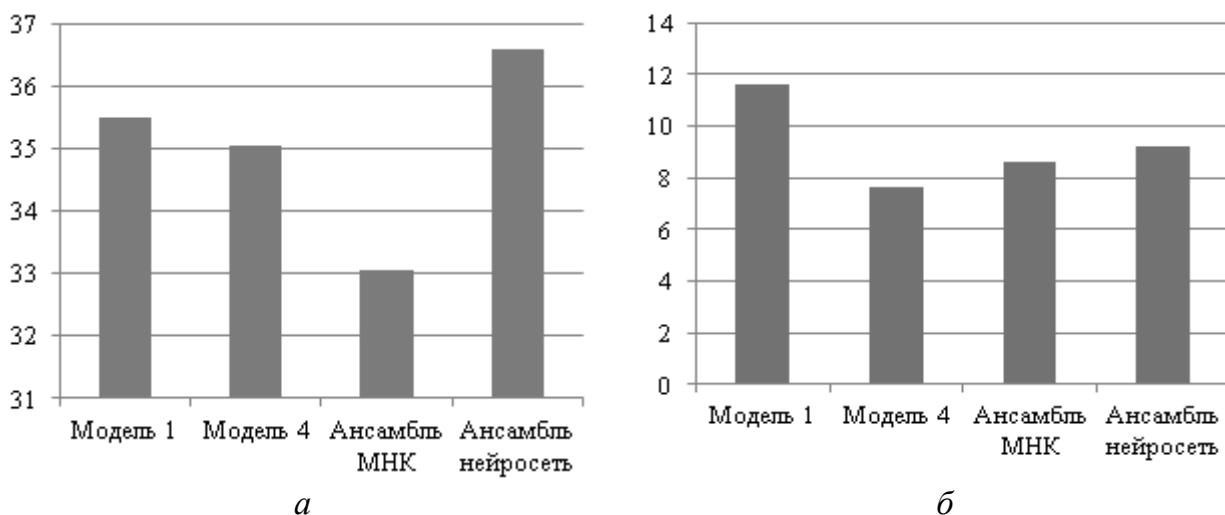


Рис. 4. Схема ансамбля посредством новой нейронной сети

b) Оценка точности ансамблей

Для полученных ансамблей была проведена проверка точности. Стандартное отклонение и средняя относительная ошибка представлены на рис. 5 (для сравнения приведены также значения для моделей 1 и 4).

Как видно, ансамбль на основе МНК показал себя лучше по стандартному отклонению, чем отдельно взятые модели. При использовании ансамбля посредством новой нейронной сети, стандартное отклонение только увеличилось (рис. 5a). Это можно объяснить тем, что отдельно взятые обученные модели, включенные в этот ансамбль, при обучении в совокупности продолжают обучаться.



*Рис. 5. Оценки точности моделей и ансамблей моделей нейронных сетей:
а – стандартное отклонение моделей и ансамблей моделей нейронных сетей;
б – средняя относительная ошибка моделей и ансамблей моделей нейронных сетей*

Исправить данный недостаток можно перейдя от высокоуровневого фреймворка Tensorflow Keras к более низкоуровневому – Tensorflow, однако этот вопрос не рассматривается в данной работе.

В том, что относительная ошибка у ансамблей выше, чем у модели 4, нет ничего удивительного, поскольку при их построении производилась попытка минимизировать стандартное отклонение, а относительная ошибка игнорировалась. В случаях же, когда минимизации относительной ошибки является приоритетнее, ансамбли строятся аналогично.

В таблице 1 представлено 3 случайных сплава из тестовой выборки (процентное содержание химических элементов, составляющих эти сплавы приведены в левом столбце), а также реальные и предсказанные моделями 1, 4 и ансамблями моделей значения жаропрочности этих сплавов при заданной температуре. Как видно, все модели и ансамбли неплохо справились со сплавами 1 и 3, однако все они очень сильно (примерно на 35%) переоценивают жаропрочность сплава 2.

Предсказанные значения жаропрочности для 3-х сплавов

	Сплав 1	Сплав 2	Сплав 3
C, %	0.15	0.11	0
Cr, %	8	5.5	2
Co, %	10	9.4	3
Mo, %	0.7	0.9	0.4
W, %	10	12	5
Ti, %	1	1	0.2
Al, %	5.5	5.3	5.7
Nb, %	0	1.6	0.1
Ta, %	3	0	8
B, %	0.015	0	0
Zr, %	0.05	0	0
Hf, %	1.5	0	0.15
V, %	0	0.9	0
Re, %	0	0	6
Ni, %	60.085	63.29	69.45

	Сплав 1	Сплав 2	Сплав 3
Температура, С	850	750	1093
Значение жаропрочности, МПа	559	535	175
Предсказание модели 1	521,6	720,46	184,13
Относительная ошибка модели 1, %	6,69	34,67	5,22
Предсказание модели 4	505,76	725,4	166,93
Относительная ошибка модели 4, %	9,52	35,59	4,61
Предсказание ансамбля МНК	516,23	723,88	175,96
Относительная ошибка ансамбля МНК, %	7,65	35,30	0,55
Предсказание ансамбля нейросетью	493,94	729,82	180,58
Относительная ошибка ансамбля, нейросетью %	11,64	36,41	3,19

На рис. 6 представлен фрагмент результата работы программы, демонстрирующий процесс предсказания жаропрочности для сплава 1.

При запуске программы пользователю предлагается ввести доли элементов сплава в процентах. Если данный элемент отсутствует в сплаве, то стоит ввести 0. Далее пользователю предлагается ввести температуру в градусах Цельсия. В течение 5–10 секунд происходят все требуемые вычисления и выводятся результаты предсказаний всеми моделями 1–6 и обоими ансамблями.

Разработанное программное обеспечение позволило провести ряд численных экспериментов, которые продемонстрировали резервы повышения жаропрочности существующих сплавов, а также на основе созданного ряда нейронных сетей, способных по составу сплавов предсказывать жаропрочность

при заданной температуре, показали возможность применения такого подхода для проектирования новых составов сплавов на никелевой основе.

```
(tf) ~/diplom$ python output.py
Enter metal's structure(in percents for each element):
C: 0.15
Cr: 8
Co: 10
Mo: 0.7
W: 10
Ti: 1
Al: 5.5
Nb: 0
Ta: 3
B: 0.015
Zr: 0.05
Hf: 1.5
V: 0
Re: 0
Ru: 0
Ir: 0
Ni: 60.085
temperature: 850
Predicted by model 1: 521.6041870117188
Predicted by model 2: 509.0759582519531
Predicted by model 3: 519.1522216796875
Predicted by model 4: 505.76416015625
Predicted by model 5: 499.1940612792969
Predicted by model 6: 528.291259765625
Predicted by least squares ensemble: 517.7993966178922
Predicted by new neural network ensemble: 493.94788
```

Рис. 6. Предсказание жаропрочности для сплава 1

Для улучшения точности предсказания жаропрочности были рассмотрены два подхода к созданию ансамбля нейронных сетей, один из которых показал существенное увеличение точности предсказания значений жаропрочности.

Решение третьей задачи разработка моделей и методов определения допустимой технологии изготовления детали из перечня возможных материалов на основе требований к ней в настоящее время ведется на основе применения моделей и методов нечеткой логики и требует времени для представления и оформления результатов.

Таким образом на примере разработки жаропрочных никелевых сплавов показано, что применение методов машинного обучения в наукоемкой производственной сфере, какой является разработка новых материалов, позволяет ускорить процесс поиска новых составов сплавов с перспективой повышения их свойств, а также существенно сократить временные и материальные ресурсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power 2nd Edition Chester T. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hagel © 1987 by John Willey & Sons Inc. [T. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hagel “Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power 2nd Edition Chester” 1987 by John Willey & Sons Inc.]
2. Нургаянова О. С. Автоматизированное проектирование литейных жаропрочных никелевых сплавов на основе методов искусственного интеллекта: дис. канд. техн. наук. Уфа, УГАТУ, 2006.
3. Трунин В. Ф. Разработка жаропрочных сплавов на никелевой основе с рабочей температурой до 1300 С: дис. канд. техн. наук. Москва, МИСИС, 2007
4. Нургаянова О. С. Применение искусственных нейронных сетей в задачах классификации многокомпонентных сплавов // Proceedings of the 6th All-Russian Scientific Conference «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support», Volume 3, May 28-31, Ufa-Stavropol, Russia
5. G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, “On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions,” *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. A247, pp. 529–551, April 1955. (*references*)
6. J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
7. I. S. Jacobs and C. P. Bean, “Fine particles, thin films and exchange anisotropy,” in *Magnetism*, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271–350.
8. Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, “Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface,” *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetics Japan, p. 301, 1982].
9. M. Young, *The Technical Writer’s Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
10. Н. И. Юсупова, О. С. Нургаянова, Р.А. Фаррахов, «Об организации архитектур и алгоритмов обучения нейронных сетей для прогнозирования жаропрочности многокомпонентных сплавов» «Системная инженерия и информационные технологии», 2021 Т.3, №3(7) <http://siit.ugatu.su>
11. G. Cybenko. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function//*Mathematics of Control, Signals, and Systems*. - 1989. N 2. – С. 303-314
12. Jasbir Singh Arora. *Introduction to Optimum Design*. – М.: Academic Press, 2017 – 968с.: ил. ISBN 978-0-12-800806-5 [Singh Arora Jasbir “*Introduction to Optimum Design*”. – М.: Academic Press, p.968, 2017]
13. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Универсальный градиентный спуск: М. МФТИ, 2018 – 286 с.: ил ISBN 978-5-7417-0667-1 [A.V. Gasnikov, *Modern numerical optimization methods. Universal gradient descent*: М. МИПТ, 2018 - 286 p .: IL ISBN 978-5-7417-0667-1]
14. Micol Marchetti-Bowick, *Convex Optimisation Lecture 6* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.stat.cmu.edu/~ryantibs/convexopt-F13/scribes/lec6.pdf> (дата обращения 4.05.2022)
15. Wilson, Ashia C.; Roelofs, Rebecca; Stern, Mitchell; Srebro, Nathan; Recht, Benjamin. *The Marginal Value of Adaptive Gradient Methods in Machine Learning*, 2017.
16. Mateusz Opala. *Deep Learning Frameworks Comparison – Tensorflow, PyTorch, Keras, MXNet, The Microsoft Cognitive Toolkit, Caffe, Deeplearning4j, Chainer*. [Электронный ресурс] URL: <https://www.netguru.com/blog/deep-learning-frameworks-comparison> (дата обращения 4.05.2022)
17. Project Jupyter. [Электронный ресурс]. URL: <https://jupyter.org/> (дата обращения 4.05.2021)

Песин М. В.^{1а}, *Макаров В. Ф.*¹, *Казаков И. Д.*², *Коногорова Л. В.*¹,
*Хабарова А. В.*¹, *Семенова И. П.*², *Поляков А. В.*²

^а *m.pesin@mail.ru*

¹ Пермский национально исследовательский политехнический университет,
Пермь

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ НОВЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Аннотация: В исследованиях используется ряд режимов обработки титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой с варьированием параметров резания. По критериям обеспечения минимальной шероховатости и других благоприятных параметров качества (вибрации, шум, потребляемая мощность, шероховатость, величина и распределение остаточных напряжений, микроструктура приповерхностного слоя) при достаточно высокой производительности обработки определены рациональные режимы резания сплава ВТ6.

Ключевые слова: титановые сплавы, ультрамелкозернистая структура, обработка резанием, аддитивные технологии, ультрамелкозернистые сплавы.

Pesin M. V.^{1а}, *Makarov V. F.*¹, *Kazakov I. D.*², *Konogorova L. V.*¹,
*Khabarova A. V.*¹, *Semenova I. P.*², *Polyakov A. V.*²

^а *m.pesin@mail.ru*

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm

² Ufa University of Science and Technology, Ufa

INVESTIGATION OF CUTABILITY OF NEW TITANIUM ALLOYS WITH ULTRA FINE GRAIN STRUCTURE

Abstract: The research uses a number of processing modes for titanium alloy VT6 with an ultrafine-grained structure with varying cutting parameters. According to the criteria for ensuring the minimum roughness and other favorable quality parameters (vibrations, noise, power consumption, roughness, the magnitude and distribution of residual stresses, the microstructure of the near-surface layer), rational cutting modes of the VT6 alloy were determined at a sufficiently high processing performance.

Key words: titanium alloys, ultrafine-grained structure, cutting, additive technologies, ultrafine-grained alloys.

Повышение эксплуатационных требований к деталям авиационных двигателей приводит к постановке технологических задач о создании новых материалов и конструкций из них. Так разработаны новые титановые сплавы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, например, для изготовления

ответственных деталей (дисков, втулок, валов, лопаток и т. д.). Сложности в изготовлении деталей из этих сплавов обусловлены их прочностными свойствами. Выбор станочного оборудования, инструмента, приспособлений, расчет режимов резания для обработки титановых сплавов – задачи, над которыми работают ведущие мировые ученые и специалисты машиностроительных предприятий [1]. Исследование обрабатываемости резанием титановых сплавов с УМЗ структурой является не только актуальной, но и новой задачей в машиностроении [2]. Целью исследований является определение рациональных методов обработки новых материалов и выявление рациональных технологических режимов обработки. Основной задачей является провести сравнительные исследования обрабатываемости резанием новых высокопрочных модифицированных титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой и титановых сплавов с обычной, крупнозернистой структурой с определением рациональных режимов токарной обработки.

В исследовании использовался образец/заготовка сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой диаметром 30 мм. Образец был локально проточен по 8 режимам с различными величинами параметров (интенсивность, скорость резания и др.). Затем заготовка была разрезана вдоль по оси вращения на две части. Поверхность образца в разрезе была отполирована и протравлена для металлографических исследований. Микроструктура исследовалась как в центре (на оси симметрии), так и в приповерхностном слое. Для регистрации структурных изменений после точения были произведены измерения микротвердости в теле образца и на глубине 50 мкм от поверхности. Микротвердость измерялась с помощью твердомера *Struers Duramin DK-2750*. Исследования микроструктуры проводились на оптическом микроскопе *Olympus GX51*.

1) Результаты измерения микротвердости представлены в виде диаграммы на рис. 1. По результатам измерения видно, что после токарной обработки значения микротвердости в приповерхностном слое становятся выше, чем в теле заготовки. По анализу выходных и сопутствующих параметров обработки, таких как шероховатость поверхности, величина

остаточных напряжений, шум и вибрация выделены 5 и 8 режимы как наиболее благоприятные.

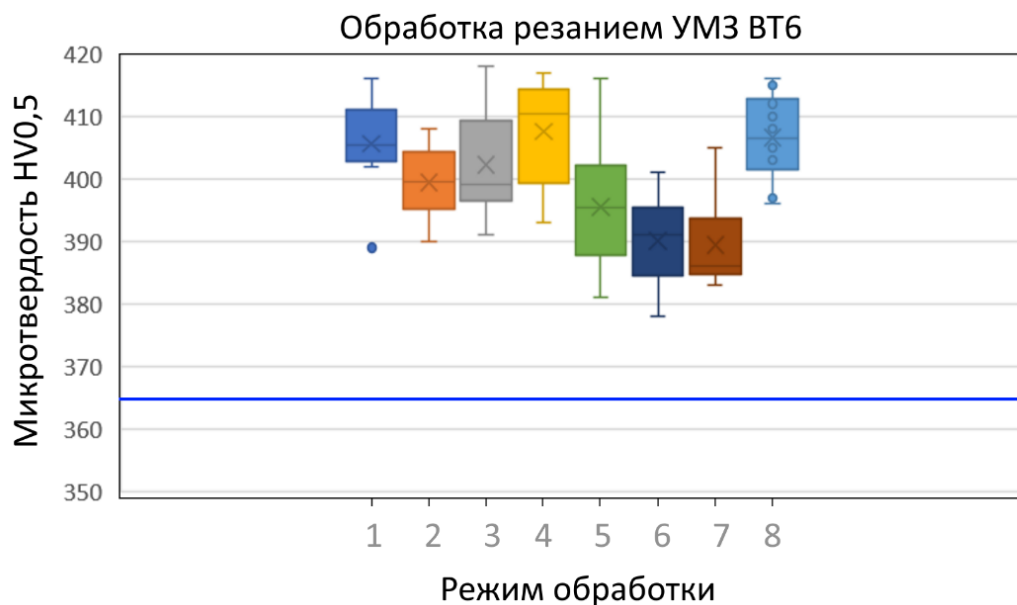


Рис. 1. Микротвердость в приповерхностном слое в зависимости от режима резания. Синей линией обозначен уровень микротвердости в теле образца

По результатам микроструктурных исследований установлено, что изменения происходят в приповерхностном слое на глубине 100-200 мкм. Граница слоя слабо различима, в некоторых случаях не установлена. На рис. 2 показаны типичные микроструктуры для участков, соответствующих режимам 5 и 8. Как видно, микроструктурные изменения невыразительны несмотря на значительный прирост твердости в случае режима 8.

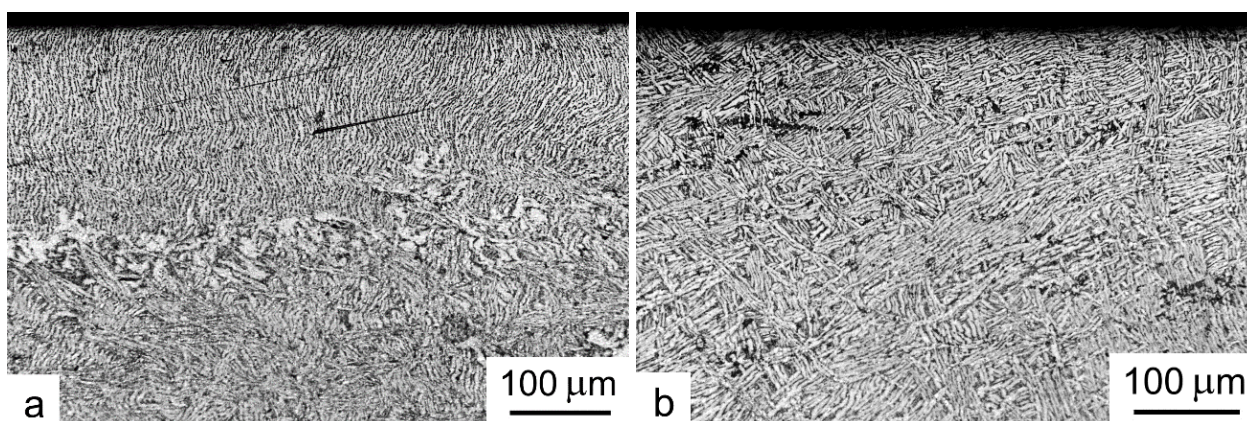


Рис. 2. Микроструктура заготовки УМЗ титанового сплава ВТ6 в местах, соответствующих режимам 5 и 8 токарной обработки

Установлено, что новый титановый сплав при токарной обработке имеет лучшую обрабатываемость резанием по таким параметрам, как шероховатость поверхности, шум и вибрация при резании, более благоприятный характер остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое. По этим факторам можно предсказать значительное уменьшение износа инструмента и повышение его стойкости по сравнению с обработкой обычного крупнозернистого титана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Александров. И.В. - Москва, Академкнига, 2007. – 398 с.
2. А. В. Филлипов, Н. Н. Шамарин, О. А. Подгорных // Исследование качества обработки поверхности при фрезеровании коррозионностойкой стали 08X18H10Г2М2 с крупнокристаллической и ультрамелкозернистой структурой. Материалы X Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении». 2019. С. 94 – 96.
3. В. Ф. Макаров, А. И. Гареев, И. Д. Казаков, А. В. Поляков // Механическая обработка ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2022. С. 376 – 378.
4. Балякин А. В. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей / А. В. Балякин, М. А. Олейник, Е. П. Злобин, Д. Л. Скуратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. №2. С. 50-54.
5. М. Ю. Куликов // Обеспечение качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий / М.Ю. Куликов, М. А. Ларионов, Д. В. Гусев, Е. О. Шевчук // Транспортное машиностроение. 2020. №12 (97). С. 5-7.

УДК 681.5

Петров П. В.^а, Сайранов С. А.^б

^а pgl.petrov@mail.com, ^б regentrofen@gmail.com

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА СТАДИИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация: Работа посвящена обзору и обсуждению основных проблем математического моделирования гидромеханических регуляторов ГТД на стадии практического проектирования. Показано, что на практике, традиционно анализ и синтез устройств гидроавтоматики авиационных ГТД выполняется на основе линейных частотных методов теории автоматического регулирования, которые позволяют получать приближенные характеристики: точность, устойчивость, управляемость. На конкретном примере обсуждаются вопросы алгоритмического моделирования, анализа и численного исследования динамических характеристик системы автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя на переходных режимах.

Ключевые слова: САУ ГТД, MatLab Simulink, HMAR, математическое моделирование, виртуальные стенды, автоматизированные программные комплексы.

Petrov P. V.^а, Sayranov V. A.^б

^а pgl.petrov@mail.com, ^б regentrofen@gmail.com

Ufa University of Science and Technology, Ufa

MODELING OF HYDROMECHANICAL DEVICES OF AIRCRAFT AUTOMATION AT THE STAGE OF PRACTICAL DESIGN.

Abstract: The article is devoted to the review and discussion of the main problems of mathematical modeling of hydromechanical regulators of GTE at the stage of practical design. It is shown that in practice, traditionally, the analysis and synthesis of hydraulic automation devices of aviation GTE is carried out on the basis of linear frequency methods of the theory of automatic regulation, which allow obtaining approximate characteristics: accuracy, stability, controllability. The main task in this case is to develop such assumptions and solutions that would allow solving the problem in an analytical form. However, the number of nonlinear problems completed by analytical methods is negligible. In such a situation, computer modeling becomes an alternative. Using a concrete example, the issues of algorithmic modeling, analysis and numerical study of the dynamic characteristics of the automatic control system of an aviation gas turbine engine in transient modes are discussed.

Key words: ACS GTE, MatLab Simulink, HMAR, Mathematical modeling of ACS, Virtual stands, Automated software systems.

Состояние вопроса

Как правило анализ и расчет нелинейных гидромеханических систем приходится вести по нелинейным дифференциальным уравнениям.

К сожалению, дифференциальные уравнения в нелинейной постановке не поддаются точному аналитическому решению. Приближенные аналитические методы (фазовые траектории и плоскости, припасовывание и др.) реализуются за счет существенных упрощений, имеют очень узкую сферу применения и, как правило, используются для описания систем небольших порядков [1].

Широкое распространение линейных методов анализа устройств гидроавтоматики связано в первую очередь со сложностью, а иногда и невозможностью решения нелинейных уравнений (и их систем), качественно и количественно (в некотором диапазоне) с достаточной точностью. А использование численного метода решения упиралось в уровень развития вычислительных средств и его программного обеспечения [2].

Развитие методов компьютерной математики существенно изменило ситуацию в этом вопросе. Если раньше программирование было делом продвинутых программистов, то теперь многие сложные задачи решаются сравнительно неопытными пользователями.

Сегодня уже на первых этапах проектирования всегда есть возможность отказаться от некоторых допущений и проводить исследования на более адекватных математических моделях, эта возможность в настоящее время используется редко. Потому что, во-первых, как уже говорилось, невозможно создать полную математическую модель или же эта модель настолько сложна, что найти решение по ней практически невозможно. Во-вторых, для полной модели требуется большой спектр необходимой информации, – которая не всегда доступна и большей частью специфична (у каждого отдельного элемента есть свои особенности – физические, химические свойства, конструктивные особенности), поэтому приходится преобразовывать найденную информацию в удобный для конкретной модели вид. И, в-третьих, наиболее труднопреодолимая проблема – многообразие и разобщенность методик расчетов объектов и дальнейшего математического моделирования. Но это направление со временем должно стать широко используемым методом.

Решения последних двух проблем, т. е. накопление информации и методов ее преобразования из одного вида в другой, а также разработка универсальных методов расчета, моделирования с последующим анализом позволит избавиться от проблем как проектировщика изменения вида представления модели, так и программиста от изучения сущности каждого конкретного агрегата.

Особенно существенный прогресс в этом вопросе имеет место у прикладного программного обеспечения. Здесь помимо роста числа стандартных программ наблюдается знаменательное качественное изменение. Компьютерное моделирование в процессе многолетнего развития позволяет создавать информационное поле, включающее все потенциально полезные модели и оперативное их использование.

Прежде чем приступать к компьютерному моделированию, необходимо определиться с постановкой задачи и целями, которые мы должны достигнуть в результате моделирования исследуемой системы. Большое разнообразие гидромеханических систем обуславливает разнообразие моделей, применяемых при выборе базовых параметров. Разомкнутый и следящий гидроприводы, системы управления и регулирования летательного аппарата или двигателя, приводы станка или транспортной машины и прочие гидросистемы требуют индивидуального подхода. К примеру, выбор параметров системы стабилизации режима авиационного двигателя должен выполняться с целью достижения заданной точности, т.е. в данном случае система приемистости двигателя должна обеспечить заданную траекторию разгона. Другой пример: гидропривод системы управления летательного аппарата, помимо безусловного преодоления статических нагрузок и скоростей, должен отвечать определенным динамическим требованиям, или в станочном гидроприводе большое значение уделяется точности и плавности движения и т. п. Такое разнообразие существенно затрудняет выработку общих рекомендаций моделирования систем. Приходится ограничиваться некоторыми рекомендациями по использованию статистических соображений и прикидочных расчетов [3].

Несколько иначе выглядит задача моделирования отдельных устройств. С одной стороны, ситуация является более простой, число требований значительно меньше и назначение приоритетного требования более определено. С другой – требуется выбрать большее число более конкретизированных базовых параметров (проходные сечения дросселирующих устройств, жесткости пружин, площади гидроцилиндров и т. п.). Для простых устройств имеется возможность, по крайней мере, некоторой механизации процесса моделирования. Имеются многочисленные подходы, среди которых наиболее успешным, несомненно, является метод типовых динамических звеньев, позволяющий генерировать практически любую, но непременно линейную структуру. В этом методе принимается во внимание только динамическое поведение системы. Передаточные функции показывают, как звено передает динамический сигнал. При этом совершенно неважно, из чего устроено это звено, главное – то, что оно делает. Получается весьма наглядный и универсальный инструмент анализа динамики. Как же в данном случае рассматривать устройства, имеющие более сложную структуру, построенную на различной элементной базе? Основы компьютерного моделирования подобных систем в нелинейной постановке на данный момент практически отсутствуют [4].

Постановка задачи

На рис. 1 приведена принципиальная схема гидромеханического регулятора, который обеспечивает работу как установившихся статических режимов, так и переходных (разгон и дросселирование) [5].

Линейная математическая модель данного типа регулятора общеизвестна [4]. Как правило, модель в линейной постановке предназначена для тестирования и определения наиболее перспективных направлений исследования нелинейной задачи.

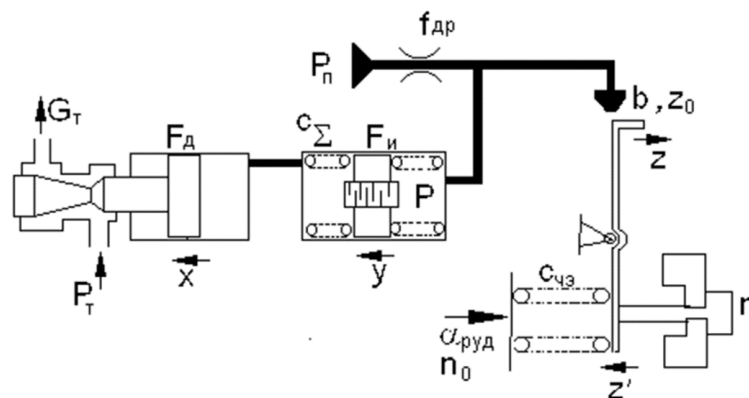


Рис. 1. Схема изодромного регулятора

В ГТД на неустановившихся режимах работы протекают очень сложные процессы. Полное аналитическое описание их не представляется возможным. Более того, некоторые процессы не имеют даже надежной физической трактовки. Весьма важно рассмотреть те обстоятельства и факторы, которые оказывают существенное влияние на адекватность математического описания, но не менее важно опустить те детали, которые являются второстепенными. Поэтому в процессе разработки динамической модели принимаются следующие положения:

Перечень уравнений и их содержание у динамической поэлементной модели принимаются такими же, как у наиболее распространенной статической модели. Это означает, что балансы мощностей, расходов газа и энергии записываются в виде дифференциальных уравнений с учетом возможности накопления в переходном процессе [6].

Допущения также, в основном, соответствуют статической модели [4].

В данном случае рассматриваются только процессы торможения и разгона в диапазоне частот вращения, где в сопловом аппарате и критическом сечении сопла реализуются надкритические перепады.

КПД элементов двигателя считаются постоянными. Мощность, затрачиваемая на привод агрегатов, и расход воздуха на охлаждение считаются малыми.

Одних дифференциальных уравнений недостаточно для полной математической постановки задачи. Помимо них, необходимы еще

алгебраические уравнения, описывающие процессы, которые в данной модели принято считать квазистационарными. Некоторые из них хорошо известны. Это выражение для подогрева воздуха в компрессоре, связь полных давлений на входе и выходе камеры сгорания и пр.

Некоторые задачи, являющиеся частным случаем нашей общей задачи, уже решены аналитически. Так, в случае малых возмущений (меньше двух-трех процентов) дифференциальные уравнения могут быть существенно упрощены путем их линеаризации. В принципе их можно свести к одному уравнению. Однако нас интересует общая задача, в которой: 1) приходится решать несколько уравнений одновременно; 2) нельзя пренебречь ни одним членом уравнений; 3) в уравнениях имеются нелинейности, которые при конечных возмущениях невозможно линеаризовать; 5) уравнения являются совместными. Так, частота вращения в первом уравнении является искомой величиной, а во втором и четвертом выступает в роли параметра, и т. д.

Любого из перечисленных свойств достаточно, чтобы отказаться от аналитического решения.

Численное исследование и обобщенный анализ работы гидромеханической САР

Модель системы регулирования в самом простом варианте включает в себя, по крайней мере, еще одно уравнение для регулятора. Если предположить, что поршень гидроцилиндра – невесомый и перепад давления на нем отсутствует, то модель регулятора может быть получена из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
 F \frac{dz}{dt} &= K_{Qx} x_{щ}; \\
 x_{щ} &= K_p y - K_{oc} z; \\
 y &= K_{чэ} n; \\
 G &= K_{ou} z,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где F – площадь поршня гидроцилиндра; z – перемещение дозирующей иглы; K_{Qx} – коэффициент усиления по расходу; $x_{щ}$ – ширина щели золотника;

K_p – коэффициент усиления рычага; y – перемещение чувствительного элемента; K_{oc} – коэффициент обратной связи; $K_{чэ}$ – коэффициент усиления чувствительного элемента; G – расход топлива; $K_{ди}$ – коэффициент усиления дозирующей иглы.

Первые три уравнения дают известное выражение для следящего гидроусилителя:

$$T_{гy} \frac{dz}{dt} + z = K_{гy} \Delta n, \quad (2)$$

где $T_{гy} = \frac{F}{K_{Qx} K_{oc}}$; $K_{гy} = \frac{K_{чэ} K_p}{K_{oc}}$ – постоянная времени и коэффициент усиления гидроусилителя.

Для случая торможения двигателя на величину Δn_0 , правая часть выражения будет иметь вид: $\Delta n = -\Delta n_0 + n_0 - n$, а для разгона $\Delta n = \Delta n_0 - n_0 + n$.

Для астатического регулятора для случая внешних воздействий соответствующая система имеет вид:

$$\begin{aligned} F_{пор} \frac{dz}{dt} &= K_{Qx} x; \\ x &= K_p y; \\ y &= K_{чэ} \Delta n. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, с учетом сделанных допущений и ограничительных функций, математическая модель гидромеханического всережимного регулятора примет вид:

$$\left. \begin{aligned}
m \frac{d^2 y}{dt^2} &= F_u \Delta p - k_e \frac{dy}{dt} - c_{\Sigma} \Delta y - F_{mp}; \\
\mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 - \Delta p)} &= \left(\begin{aligned}
&\mu b \Delta z_{\text{ш}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 + \Delta p)} + \\
&\mu f_{\text{II}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} + F_u \frac{dy}{dt} + \frac{V_0 + F_u \Delta y}{E} \frac{dp}{dt}
\end{aligned} \right); \\
f_{\text{II}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} + F_u \frac{dy}{dt} &= F_{\text{дл}} \frac{dx}{dt}; \quad \Delta z = \frac{l_2}{l_1} k_{\text{чэ}} \Delta n; \\
J \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} &= \left(\begin{aligned}
&\frac{G_{\Gamma} \cdot R \cdot T_{\Gamma}^*}{\chi_{\Gamma}} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{\Gamma}^*} \right)^{\chi_{\Gamma}} \right] \eta_{\Gamma}^* \cdot \eta_m - \\
&\frac{G_{\text{В}} \cdot T_{\text{ВХ}}^* \cdot R}{\chi_{\Gamma}} \left[\pi_k \chi_{\Gamma} - 1 \right] \frac{1}{\eta_k^*}
\end{aligned} \right); \\
\frac{V_k}{R \cdot T_k} \frac{dP_k^*}{dt} &= G_{\text{В}} - m_{\text{крГ}} \frac{P_{\Gamma}^* \cdot q(\lambda_{\text{са}}) \cdot F_{\text{са}}}{\sqrt{T_{\Gamma}}}; \\
\frac{V_{\text{Тс}}}{R \cdot T_{\Gamma}^*} \frac{dP_{\Gamma}^*}{dt} &= m_{\text{крГ}} \frac{P_{\Gamma}^* \cdot q(\lambda_{\text{са}}) \cdot F_{\text{са}}}{\sqrt{T_{\Gamma}^*}} - m_{\text{крГ}} \frac{P_{\Gamma}^* \cdot q(\lambda_{\text{кр}}) \cdot F_{\text{кр}}}{\sqrt{T_{\Gamma}^*}}; \\
C_{\text{рэф}} \frac{V_{\text{кс}} P_{\Gamma}^*}{R T_{\Gamma}^*} \frac{dT_{\Gamma}^*}{dt} &= C_{\text{рэф}} G_{\text{В}} T_k + (G_{\text{Т0}} \pm \Delta G_{\text{Т}}) \cdot H_u \cdot \eta_k^* - C_{\text{рэф}} G_{\text{Т}} T_{\Gamma}^*.
\end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения турбины; J – момент инерции турбины; G_{Γ} – расход воздуха на выходе из компрессора; $T_{\text{ВХ}}^*$ – температура газа на входе; T_{Γ}^* – температура газа перед турбиной; P_{Γ}^* – давление газа перед турбиной; χ_{Γ} – степень сухости газа; π_{Γ}^* – степень понижения давления в турбине; π_k^* – степень повышения давления в компрессоре; η_{Γ}^* – КПД турбины по параметрам заторможенного потока; η_m – КПД за турбиной; R – газовая постоянная; η_k^* – КПД компрессора по параметрам заторможенного потока; V_k – объем за компрессором; T_k – температура газа за компрессором; P_k^* – давление торможения на выходе из компрессора; $q(\lambda_{\text{са}})$ – производительность соплового аппарата; $F_{\text{са}}$ – геометрическая площадь соплового аппарата; $V_{\text{Тс}}$ – объем между турбиной и реактивным соплом; P_{Γ}^* – давление торможения на выходе из турбины; T_{Γ}^* – температура газа

за турбиной; $F_{кр}$ – геометрическая площадь критического сечения реактивного сопла; $q(\lambda_{кр})$ – производительность критического сечения реактивного сопла; $C_{рэф}$ – теплоемкость газа при нестационарном подводе тепла; $V_{кв}$ – объем между входным соплом и турбиной; H_u – удельная теплота сгорания; G_B – массовый расход воздуха на входе в компрессор; G_{T0} – расход топлива.

Как видно из полученной системы уравнений (4), математическая модель регулятора включает в себя большое количество переменных и очень большой разброс их числовых значений, что сильно затрудняют решение и составление общих характеристик. Поэтому основное исследование выполняется с использованием безразмерных переменных.

Безразмерные переменные определяются как отношения размерных величин и соответствующих масштабов:

$$\bar{t} = \frac{t}{T_{дв}}; \quad \bar{n} = \frac{n}{n_0}; \quad \bar{p} = \frac{p}{p_0}; \quad \bar{z} = \frac{z}{y_m}; \quad \bar{y} = \frac{y}{y_m}; \quad \bar{x} = \frac{x}{y_m} \quad (5)$$

После введения в (4) масштабов и несложных преобразований получена система безразмерных уравнений, принятых к систематическому исследованию.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{1 - \Delta \bar{p}} = \left(1 + \frac{y_m}{z_0} \cdot (-\Delta \bar{z}_0 + \Delta \bar{z}) \right) \cdot \sqrt{1 + \bar{p}} + \\ \bar{T}_y \cdot \frac{d\bar{y}}{dt} + \bar{f}_{II} \cdot \sqrt{\Delta \bar{p}} + \bar{T}_v \cdot (1 + \Delta \bar{y}) \cdot \frac{d\bar{p}}{dt}; \\ \bar{f}_{II} \cdot \sqrt{\Delta \bar{p}} + \bar{T}_y \cdot \frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{T}_y \cdot \bar{F}_{ид} \cdot \frac{d\bar{x}}{dt}; \\ \bar{T}_c^{-2} \cdot \frac{d^2 \bar{y}}{dt^2} = \Delta \bar{p} - 2 \cdot \xi \cdot \bar{T}_c \cdot \frac{d\bar{y}}{dt} + \Delta \bar{y}; \\ \frac{d\bar{n}}{dt} + \Delta \bar{n} = k_{дв} \cdot (\Delta \bar{G}_T + \Delta \bar{f}_e); \\ \Delta \bar{z} = \bar{k}_n \cdot \Delta \bar{n}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $T_\Gamma = \frac{F_u y_m}{Q_0}$, $T_c = \sqrt{\frac{m}{c_\Sigma}}$, $T_v = \frac{p_0 V_0}{E Q_0}$ – соответственно, постоянная времени

гидроусилителя, период собственных колебаний поршня и постоянная времени

наполнения; $\bar{T}_\Gamma = \frac{T_\Gamma}{T_{\text{ДВ}}}$, $\bar{T}_c = \frac{T_c}{T_{\text{ДВ}}}$, $\bar{T}_v = \frac{T_v}{T_{\text{ДВ}}}$ – соответствующие относительные времена, критерии гомохронности; а также безразмерные коэффициенты, входящие в эту систему уравнений, будут определяться по следующим формулам:

$$\left(\begin{array}{l} \bar{k}_{\text{ДВ}} = \frac{k_{\text{ДВ}} k_{\text{ду}} y_m}{n_0}; \xi_v = \frac{k_V}{2\sqrt{mc_\Sigma}}; \\ \bar{k}_n = \frac{k_{\text{чз}} \frac{l_2}{l_1} n_0}{y_m}; \bar{f}_{\text{II}} = \frac{f_{\text{II}}}{f}; \bar{F}_{\text{ид}} = \frac{F_{\text{ид}}}{F_{\text{II}}} \end{array} \right). \quad (7)$$

Решение безразмерной системы ищется в виде зависимости безразмерных функций $\bar{n}, \bar{p}, \bar{y}, \bar{x}$ от безразмерного времени и комплексов, критериев подобия $\bar{t}, \bar{T}_\Gamma, \bar{T}_c, \bar{T}_v, \bar{k}_n, \xi_v, \xi_c, \bar{f}_{\text{II}}, \bar{f}, \bar{F}_{\text{ид}}, \bar{f}_1$.

Безразмерная система так же, как и размерная интегрируется методом Рунге-Кутта, но здесь требуется минимальное количество шагов, так как все величины имеют почти один порядок. Безразмерные и размерные переходные процессы, в случае корректного преобразования уравнений, должны быть идентичны с учетом соответствующего преобразования шкал.

Протекание переходных процессов в автомате разгона зависит от семи безразмерных комплексов: $\bar{T}_c, \bar{T}_v, \bar{k}_n, \bar{f}_{\text{II}}, \bar{T}_\Gamma, \bar{F}_{\text{ид}}, \bar{f}_1$. Однако, как показали расчеты, первые три комплекса практически не влияют на характер переходных процессов. Относительная площадь дроссельного пакета изодрома подбирается из условия благоприятного протекания переходных процессов изодромного регулятора и для автомата разгона является заданной величиной. Поэтому синтез динамических характеристик временного автомата разгона следует осуществлять по трем последним комплексам [7].

На основе дальнейшего моделирования и анализа переходных процессов строятся обобщенные характеристики, к примеру график обобщенной характеристики быстродействия системы в зависимости от параметров $\bar{T}_\Gamma, \bar{f}_1, \bar{F}_{\text{ид}}$ (рис. 2).

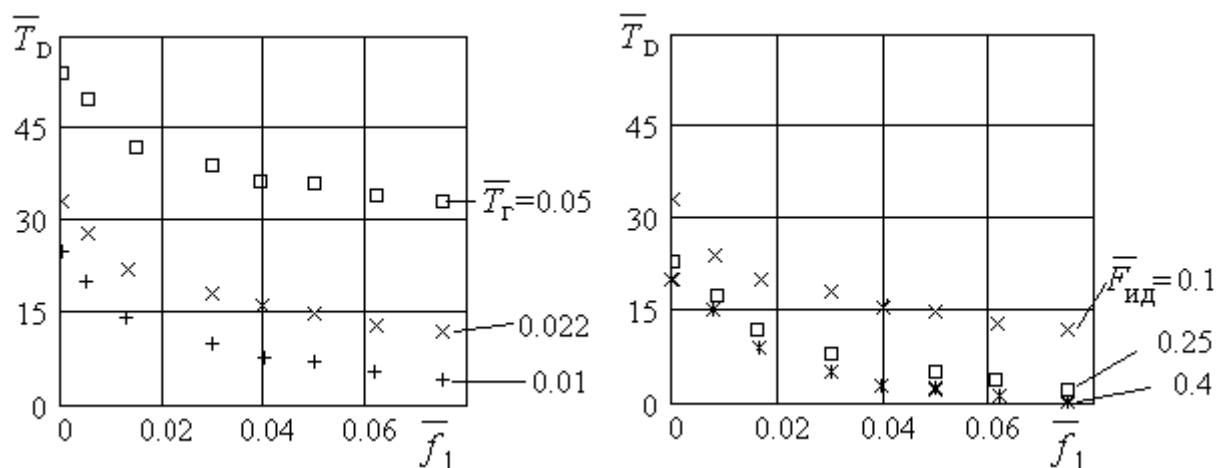


Рис. 2. Обобщенные характеристики быстродействия

Количественную оценку быстродействия удобно осуществить по времени \bar{T}_D , которое определяется как время достижения поршнем изодрома рабочего положения. На рис. 2 показаны результаты численного определения этого времени в зависимости от относительных площадей поршней $\bar{F}_{ид}$, гидравлической постоянной времени и обводного дроссельного пакета \bar{f}_1 . Как видно из рис. 2, быстродействие увеличивается при увеличении площадей и уменьшении гидравлической постоянной времени.

Для автомата разгона приоритетными являются требования к характеру переходного процесса. Точки переключения и характер протекания процессов между ними строго регламентируются в техническом задании.

Рассмотренная в работе поэлементная модель двигателя является промежуточной. Уже сейчас ясно, что необходимо дальнейшее ее развитие, но не ожидается изменение структуры.

Совершенствование поэлементной модели САР связано с введением переменности коэффициентов полезного действия, использование приведенных к внешним условиям параметров и характеристик, переход к обобщенным параметрам, разработка моделей двигателей других схем и пр.

Заключение

В статье была рассмотрена проблема проектирования энергоэффективных и надежных гидромеханических систем управления за счет разработки теоретико-экспериментальной методологии, инженерных и практических рекомендаций по интенсификации процесса разработки, проектирования и отработки основных гидромеханических узлов управления авиационным двигателем.

Таким образом, в работе реализованы новые принципы математического описания нелинейных гидромеханических устройств ДЛА и на их основе разработан комплекс нелинейных математических моделей, алгоритмов и программ, описывающих гидромеханические процессы, протекающие в устройствах гидроавтоматики с учетом наиболее существенные нелинейные явления.

Составленные динамические поэлементные модели (построенные на натуральных фундаментальных уравнениях сохранения) описывающие процессы, протекающие в силовых приводах систем управления ДЛА, позволили достаточно точно отразить физические процессы, протекающие в системе управления и максимально полно учесть все присущие нелинейности и особенности работы силовых гидроприводов на режиме автоколебаний.

Полученные результаты в виде набора алгоритмических моделей позволили оценить состояние гидроагрегатов при критических режимах, а также определить параметры, при которых они будут работать наиболее эффективно, т.е. появилась возможность предварительного параметрического синтеза системы, а в дальнейшем, появляется возможность диагностирования работы устройств гидроавтоматики на предконструкторском этапе. В свою очередь, представленные в статье автоматизированные программные комплексы наглядно показывают каким образом можно автоматизировать численный анализ и предварительный параметрический синтез гидравлической системы силовых приводов и тем самым значительно ускорить и упростить ряд выполняемых работ на этапе ранних предконструкторского синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. Петров, П. В. Сравнительная оценка вариантов возможных решений линейных и нелинейных задач гидромеханики с учетом результатов прогнозных исследований / П. В. Петров, Л. Р. Вакилова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 2(88). – С. 79-87.
3. Петров П. В., Целищев В. А. Основы алгоритмического моделирования нелинейных гидромеханических устройств: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2012. – 137 с.
4. Петров, П. В. Совершенствование численных методов расчета гидромеханических устройств автоматики летательных аппаратов / П. В. Петров, В. А. Целищев, Д. А. Кудерко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 66. – С. 79-87. – DOI 10.15593/2224-9982/2021.66.08.
5. Петров, П. В. Численное моделирование и обобщенный анализ работы гидромеханических САР ГТД на установившихся режимах / П. В. Петров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2019. – Т. 23. – № 2(84). – С. 106-120.
6. Петров, П. В. Численное моделирование работы систем автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя на установившихся и переходных режимах / П. В. Петров, В. А. Целищев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 57. – С. 7-16. – DOI 10.15593/2224-9982/2019.57.01.
7. Машков, М. А. Обобщенные характеристики электрогидравлического следящего привода / М. А. Машков, А. В. Матросов, Р. А. Сунарчин // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем, Санкт-Петербург, 30 ноября – 05 2015 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2015. – С. 91-93.

УДК 62.234

Прошкин С. С., Минигалеев С. М., Мухаммадеев В. Р.

msergem@mail.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ЗУБЧАТО-РЕЕЧНАЯ ПЕРЕДАЧА С ГИПЕРБОЛОИДНЫМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Аннотация: В статье рассмотрены предложения по повышению нагрузочной способности зубчато-реечной передачи (ЗРП). Предложена конструкция передаточного трехзвенного механизма для обратимого преобразования вращательного движения в поступательное.

Ключевые слова: рейка зубчатая, колесо червячное, напряжения контактные и изгибные, нагрузочная способность.

Prokshin S. S., Minigaleev S. M., Mukhamadeev V. R.

msergem@mail.ru

Ufa University of Science and Technology, Ufa

RACK-AND-PINION TRANSMISSION WITH HYPERBOLOID GEARING

Abstract: The article discusses proposals to increase the load capacity of rack and pinion transmission (ZRP). The design of a three-link transmission mechanism for the reversible transformation of rotational motion into translational motion is proposed.

Key words: rack toothed, worm wheel, contact and bending stresses, load capacity.

Преобразование поступательного движения во вращательное кинематически просто реализуется применением передач винт-гайка или зубчато-реечной передач и редко является лимитирующим звеном кинематической цепи какого-либо механизма. Однако появились ситуации, в которых отказы зубчато-реечных передач приводят к весьма существенным последствиям. Примером такого состояния являются чрезвычайно напряженные конструкции механизмов поворота подъемных кранов, особенно в режимах пуска и останова, сопровождающихся большими угловыми ускорениями при значительных массах и моментах инерции металлоконструкций. Схема этого механизма показана на рис. 1.

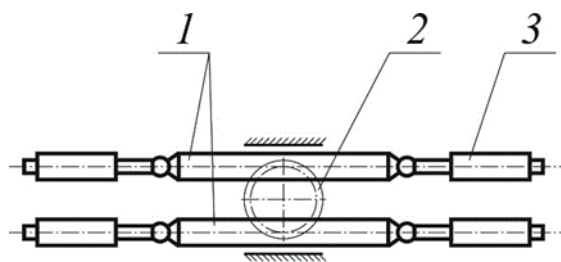


Рис. 1. Схема механизма

Задачей, решаемой в пределах этой статьи, является создание зацеплений с повышенной нагрузочной способностью, обеспечивающих в тех же габаритах конструкции безотказное функционирование. Предлагается увеличение длины контактных линий в зацеплении река – зубчатое колесо, определяющее более благоприятное распределение нагрузки по сравнению с известными конструкциями.

Задача, предлагаемая к достижению эффекта повышения нагрузочной способности ЗРП, может быть решена в обычной передаче по исходному контуру ГОСТ 13755-81 двумя способами – увеличением длины контактных линий или радикальным изменением механических свойств материалов. Объективное рассмотрение этих вариантов определяет выбор в пользу совершенствования зацепления, поскольку резервы по свойствам материалов по технологическим и компоновочным решениям исчерпаны.

Сопоставление нагрузочной способности ЗРП передачи с обычным зацеплением и зацеплением гиперболоидным (второго рода) [1] можно выразить в виде допускаемой нагрузки, распределенной по контактным линиям с учетом разницы в допускаемой нагрузке на контакт, определяемой на основе формула Герца.

Принимая механические характеристики материалов реек и колес одинаковыми в соответствии с ГОСТ 21354-87, для случая, когда твердость рабочих поверхностей реек 55 HRC, а для червячного колеса и колеса прямозубого соответственно HB 320, имеем:

для прямозубого зацепления $[\sigma_H]_{\text{ПР}} = 710 \text{ МПа}$;

для гиперболоидного при – $[\sigma_H]_1 = 1135$ МПа (рейка-червяк), $[\sigma_H]_2 = 710$ МПа (червячное колесо), $[\sigma_H]_{ГП} = 922$ МПа

Подстановка параметров для рассматриваемых передач в выражение, полученное из формулы Герца, дает возможность найти предельную нормальную силу в зацеплении, а также оценить соотношение, характеризующее повышение нагрузочной способности для рассматриваемых передач в виде [2, 3]

$$\frac{[F_n]_{ГП}}{[F_n]_{ЗРП}} = \frac{q \cdot m \cdot \delta \cdot \varepsilon_\alpha \cdot \xi}{b_w \cdot \cos \gamma} \cdot \frac{\rho_{ГП}}{\rho_{ЗРП}} \cdot \left(\frac{[\sigma_H]_{ГП}}{[\sigma_H]_{ЗРП}} \right)^2 = 2,87,$$

где $[F_n]_{ГП}$ и $[F_n]_{ЗРП}$ – допустимая нормальная нагрузка, соответственно для передачи с гиперболоидным зацеплением и для обычной ЗРП.

Изгибная прочность колес рассматриваемых передач может стать причиной ограничения ее нагрузочной способности. Для прямозубого колеса обычной ЗРП получаем $\sigma_{F \max} \approx 630$ МПа, а для гиперболоидного зацепления напряжения изгиба – $\sigma_{F2 \text{ ГП}} = 187$ МПа.

Прототип передачи представлен на рис. 2.

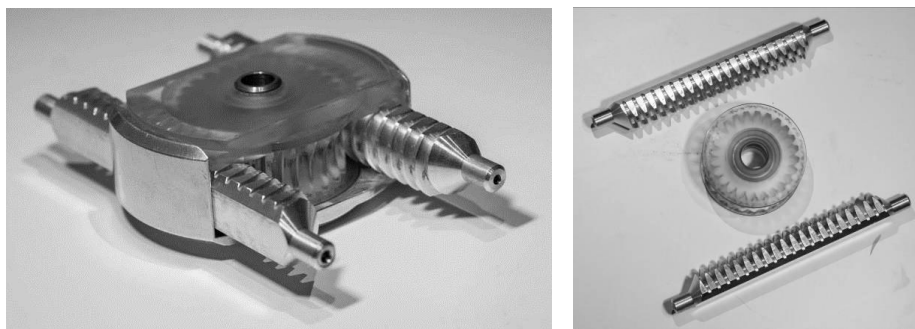


Рис. 2. Прототип предлагаемой ЗРП

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев В.Н. Зубчатые и червячные передачи // Справочник металлиста: В 5 т. М.: Машиностроение, 1976, т. 1. С. 584–699.
2. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение, 1995. Детали машин. Конструктивная прочность. Трение, износ, смазка. Т. IV-1 / под общ. ред. Д. Н. Решетова.
3. Решетов Д. Н. Работоспособность и надежность деталей машин. М.: Высшая школа, 1974. 204 с.

*Речкалов А. В.*¹, *Куликов Г. Г.*², *Капустин В. Н.*³, *Новиков В. Н.*^{3а}

^а *oka_project@mail.ru*

¹ АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа

³ ООО «АЙПЛ Консалтинг», Москва

КОНЦЕПЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СБОРОЧНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ В КОНТУРЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация: В статье рассматривается концепция информационной системы управления сборочным производством, включая систему поддержки принятия решения, которая обеспечит устойчивое управление процессами сборочного производства. Определены ключевые объекты и процессы управления сборочным производством, их взаимосвязи. Рассмотрены принципы и методы принятия решения в процессах управления сборочным производством для поддержания устойчивого функционирования системы.

Ключевые слова: производственные системы, система поддержки принятия решения (СППР), информационная система управления, цифровой двойник (digital twin), онтологии.

*Rechkalov A. V.*¹, *Kulikov G. G.*², *Kapustin V. N.*³, *Novikov V. N.*^{3а}

^а *oka_project@mail.ru*

¹ United Engine Corporation, JSC, Moscow

² Ufa University of Science and Technology, Ufa

³ IPL Consulting, LLC, Moscow

THE CONCEPT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR ASSEMBLY PRODUCTION MANAGEMENT WITHIN THE FRAMEWORK OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

Abstract: This article focuses on the concept of an information system for assembly production management, including a decision support system that will ensure sustainable management of assembly production processes. The key objects and processes of assembly production management, their interrelations are defined. The principles and methods of decision-making in the processes of assembly production management to maintain the sustainable functioning of the system are considered.

Key words: production systems, decision-making support system information system, digital twin, ontology.

Исследуется кибернетический подход к построению системной модели производственных процессов машиностроительного производства на примере ключевого сборочного процесса. Показано, что их модели должны соответствовать структуре управляемых объектов, характеризующихся входными координатами управления, координатами состояния и координатами

наблюдения. Формально можно сказать, что наблюдаемость позволяет по выходу модели судить о процессах, происходящих внутри неё. Это является необходимым условием в управления с помощью обратных связей.

Достаточным условием эффективного управления являются:

Управляемость – возможность привести систему в любое заданное состояние с помощью соответствующего воздействия на входы процесса (системы).

Наблюдаемость – возможность по значениям на выходе системы определить ее состояние.

С точки зрения концепции построения замкнутого контура управления подразумевается применение данных моделей в системе управления путем моделирование принимаемых решений. Такой класс моделей принято называть цифровыми двойниками.

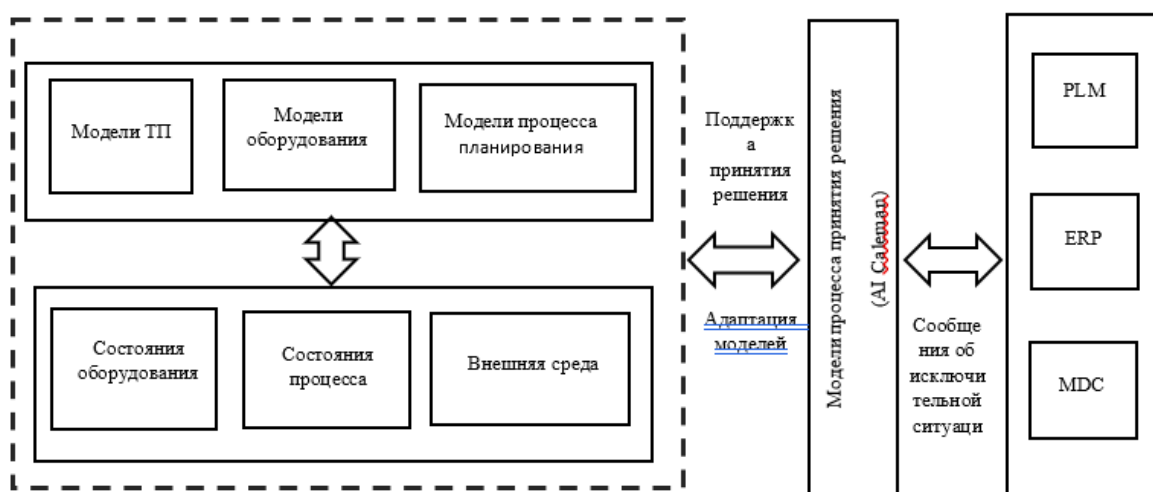


Рис. 1. Структура системы ППР

Речкалов А. В.¹, Артюхов А. В.¹, Куликов Г. Г.^{2а}

^а gennadyg_98@Yahoo.com

¹ АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ТРАНСФОРМАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ МП НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ ЦД

Аннотация: Методология и методы системной инженерии позволяют сегодня создавать цифровые модели реальных объектов с отображением их внутреннего содержания и внешнего взаимодействия в системе. В функциональном аспекте это модели реальных объектов дополненные виртуальными составляющими, и наоборот, модели виртуальных объектов, дополненные реальными составляющими. Так, например, сочетание информационных моделей технологических и производственных объектов с реальным оборудованием позволяет создавать и управлять реально-виртуальными производственными процессами (ПП) в соответствии с методологией умного производства в концепции Industry 4. В теоретическом аспекте в основе разработки системных моделей объектов, их связей лежит проблема формального непротиворечивого определения (грамматического исчисления) объективных функциональных закономерностей взаимодействия исследуемого множества реально – виртуальных объектов объединенных в гетерогенную систему. Цель исследования – разработать подход и принципы методологии системного моделирования производственных объектов и их связей для замкнутого управления (прогнозирование, планирование, учета, регулирования и др.) в производственной среде машиностроительного предприятия в форме их цифровых двойников (ЦД).

Ключевые слова: системные модели, производственные процессы, информационные системы, цифровой двойник, digital twin, система поддержки принятия решения (СППР), smart factory, система планирования.

Rechkalov A. V.¹, Artyukhov A. V.¹, Kulikov G. G.^{2а}

^а gennadyg_98@Yahoo.com

¹ JSC United Engine Corporation, Moscow

² Ufa University of Science and Technology, Ufa

TRANSFORMATION OF THE FUNCTIONAL ARCHITECTURE OF THE INFORMATION SYSTEM FOR PLANNING AND MANAGING THE PRODUCTION PROCESSES OF THE MP BASED ON THE METHODOLOGY OF THE CD

Abstract: The methodology and methods of system engineering today make it possible to create digital models of real objects with a display of their internal content and external interaction in the system. In a functional aspect, these are models of real objects supplemented with virtual components, and vice versa, models of virtual objects supplemented with real components. For example, the combination of information models of technological and production facilities with real

equipment allows you to create and manage real-virtual production processes (PP) in accordance with the smart production methodology for the concept Industry 4. In the theoretical aspect, the development of system models of objects and their connections is based on the problem of a formal, consistent definition (grammatical calculus) of objective functional patterns of interaction of the studied set of real-virtual objects united in a heterogeneous system. The purpose of the study is to develop an approach and principles of methodology for system modeling of production facilities and their relationships for closed-loop control (forecasting, planning, accounting, regulation, etc.) in the production environment of a machine-building enterprise in the form of their digital twins (CD). *Key words:* system models, production processes, information systems, digital twin, digital twin, decision support system (DSS), smart factory, planning system.

Введение

В последние годы развитие ИТ все больше ориентируется на формирование и применение цифровой инфраструктуры концепции Industry 4 для определения и классификации реально – виртуальных объектов и их взаимосвязей в форме их цифровых двойников (digital twin) [1, 2, 3]. Система цифровых двойников в отличие от традиционных алгоритмически решаемых задач планирования, ориентированных на эпизодические коррекции планов, может учитывать только ситуации, которые удастся предсказать, позволяет анализировать большой поток данных по Байесовскому принципу анализа апостериорной информации. Появляется возможность обрабатывать и анализировать данные о текущем состоянии производства путем сравнения ЦД ПП и ЦД производственного плана, так как их структуры подобны.

Определение ЦД производственного процесса

Первоначально «цифровые двойники» (Digital Twin) элементов ПП ассоциативно определяются в виртуальном пространстве предприятия на основе *теоретико – множественных операций принадлежности, включения, соответствия, отношения и функциональной зависимости* моделей средств труда (СТ), предметов труда (ПТ), трудовых ресурсов (ТР), продукта (ПР) в универсум пространства и времени. (рисунок 1).

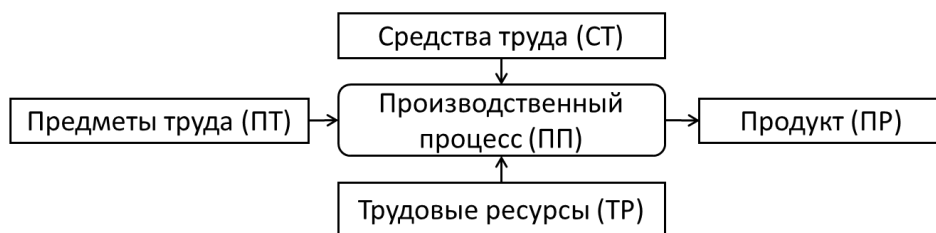


Рис. 1. Состав элементов производственного процесса

В целом на этапе моделирования совокупность этих элементов представляет собой виртуальный цифровой двойник производственной системы (ЦД ПС) (рисунок 2).

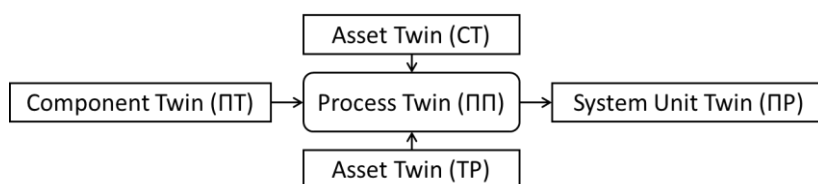


Рис. 2. Состав элементов ЦД производственной системы

Цифровой двойник производственной системы представляет собой цифровую модель, которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения реального объекта с целью синхронного представления данных о статусе, условиях работы, конфигурации продукта и состоянии ресурсов ¹.

Определение цифрового двойника как программно-аппаратного комплекса для исследования и управления позволяет представить процесс производства в виде контура управления, где собственно реальный производственный процесс (ПП) выступает как объект управления, а его ЦД – как реально – виртуальный процесс управления с обратной связью (рисунок 3).

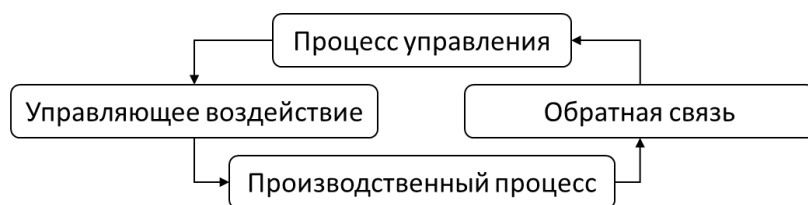


Рис. 3. Процесс производства как контур управления

¹ ПНСТ 429-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2020. 8 с.

Т.о. принцип формирования цифрового двойника производственного процесса основывается и на определении обратной связи, как его внешнего взаимодействия с АСУ.

Архитектура (Метаструктура) ЦД производственного процесса

ЦД производственного процесса, определяемый как представление процесса взаимодействия моделей СТ, ПТ, ТР и ПР , содержащих данные, только необходимых для реализации ПП, эти данные являются отображением технологического процесса, который определяет статическую (структурную, метаданные) организацию производственного процесса, [4, 5].

В общем виде модели определяются как статические, представляющие объекты в стационарных состояниях, и как динамические в переходных процессах.

Количественные и временные характеристики взаимодействия ресурсов в процессе производства, определяемые спросом на готовую продукцию, формируют исходные данные для модели планирования или ЦД планирования производственного процесса.

Очевидно, что структура модели планирования, прежде всего, зависит от структуры исходных данных, формируемых по результатам планирования спроса. Анализ моделей планирования и управления, основанный на описаниях MRP алгоритмов и ERP систем, позволяет выделить два типа данных спроса: объемно-календарный и позаказный, а также определить комплекс моделей управления ПП. Соответственно, ЦД планирования ПП может быть представлен двумя связанными ЦД: ЦД объемно-календарного планирования ПП и ЦД позаказного планирования ПП, а комплекс моделей обратной связи и управляющего воздействия – ЦД управления ПП.

Соответственно, развернутая модель ЦД ПП приобретает вид совокупности взаимосвязанных контуров управления, которые можно

сформулировать как функциональные области (ФО) цифрового двойника (рисунок 4).

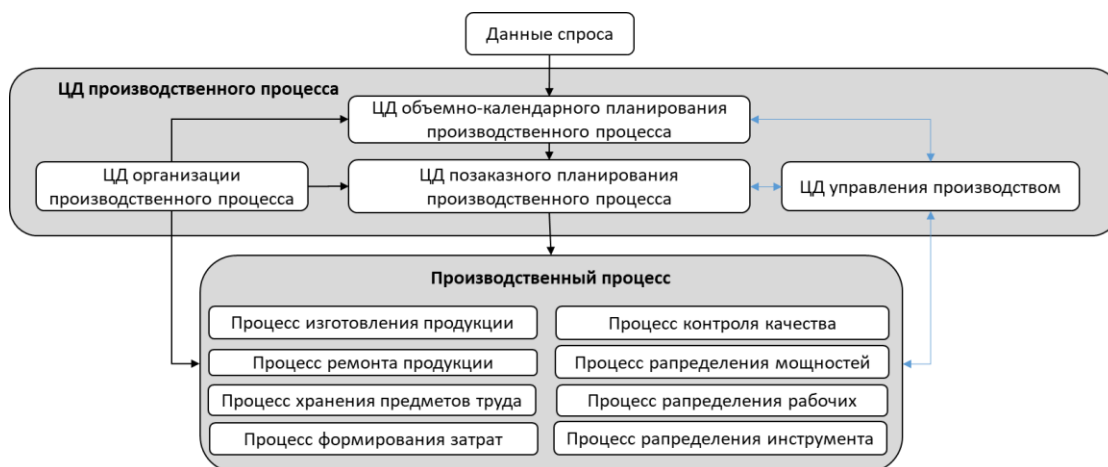


Рис. 4. Развернутая верхнеуровневая структура ЦД производственного процесса

Каждый цифровой двойник состоит из контуров управления соответствующих функциональных областей. Каждая ФО в рамках детального описания моделей может содержать трехуровневую структуру: процессы, процедуры, шаги. Соответственно, цифровой двойник производственного процесса представляет собой совокупность моделей, сформированную на основе состава функций каждого ЦД, соответствующих ФО и иерархического описания моделей (рисунок 5).

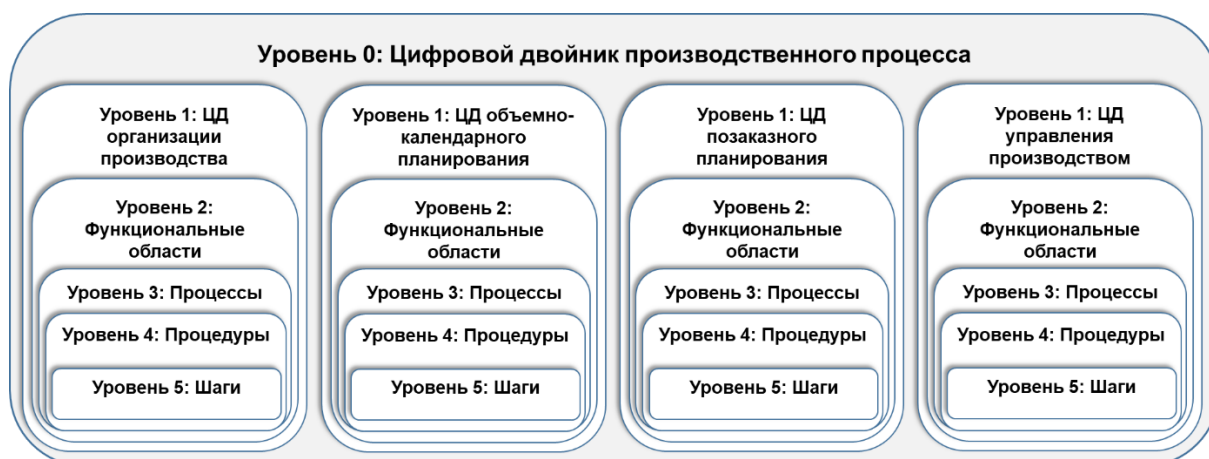


Рис. 5. Обобщенная структура ЦД производственного процесса

Представленная на рисунке 5 обобщенная структура ЦД ПП может быть положена в основу идентификации и построения конкретных функциональных

и информационных моделей функциональных областей цифровых двойников производственного процесса.

Идентификация ЦД производственного процесса

Понятие структурной и параметрической идентификации систем можно определить как совокупность методов для построения математических моделей динамической системы по данным наблюдений, [1].

Исходя из особенностей содержания ЦД, процесс идентификации должен основываться на следующих принципиальных положениях:

Идентификация ЦД организации производства, как содержащего статическую модель производственного процесса, основывается на анализе структуры и параметров технологического процесса, документированных в стандартах ЕСТД.

Идентификация ЦД процесса объемно-календарного планирования и ЦД процесса позаказного планирования основывается на структуре процессов, определенных в международных стандартах производственного планирования и управления APICS, методологии MRP/ERP и параметрах, определяемых на основе анализа совокупности производственных процессов.

Идентификация ЦД процессов управления производством в части процессов учета производства, анализа и принятия решений основывается на принципах Эшби [6], предполагающих обеспечение максимальной детализации планово-учетных характеристик производственного процесса, определяющих поддержание гомеостаза производственной системы.

Таким образом, для обеспечения идентифицируемости моделей ЦД ПП необходимо определить структуру и набор параметров, определяющих идентифицируемость каждого вида объектов ПП (СТ, ПТ, ТР, ПР), процессов их взаимодействия и перечень технических ограничений, определяющих условия идентификации.

Пример идентификации ЦД на примере ЦД организации ПП

Рассмотрен подход к идентификации ЦД ПП на основе формализации знаний, сформулированных в стандартах Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) в терминах математической теории категории множеств.^{2,3} Определены модели СТ (*Ctr*), ПТ (*Ptr*), ТР (*Trr*), ПР (*Pro*) представляющие собой множества объектов, а их множество связей морфизмы. При исключении из рассмотрения динамических параметров ПП (количества, время и др.) формируется графическое представление ЦД организации ПП в форме графа онтологической модели, который определяет структурные границы ЦД ПП. Для более корректного представления структуры объектов в составе СТ выделяем мощности (оборудование, склады, производственные площади) (*Msch*) и инструменты (инструменты и приспособления) (*Ins*) (рисунок 6).

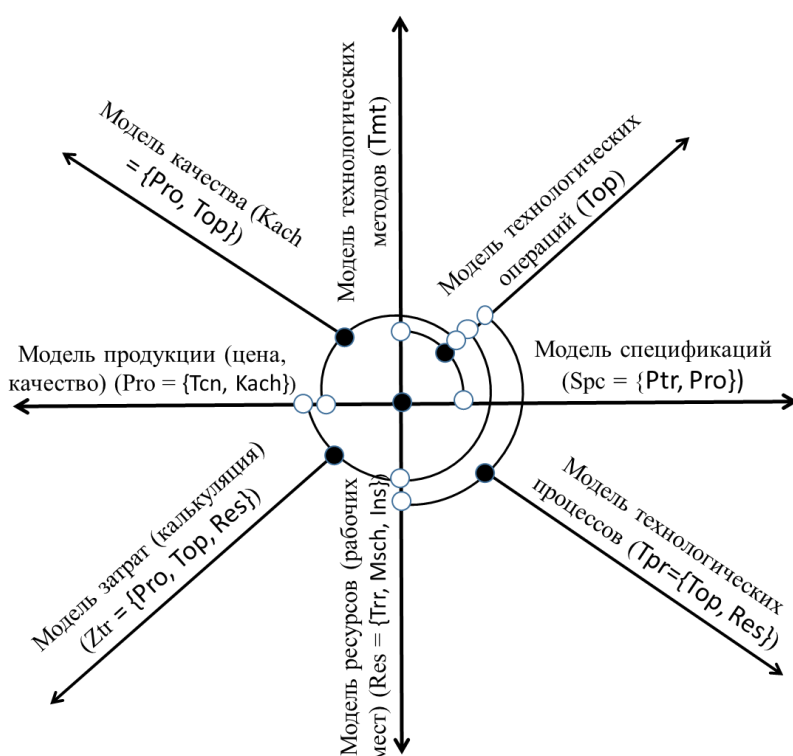


Рис. 6. Графическое представление метаструктуры ЦД организации ПП

² ГОСТ 3.1109-82 Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов, 1981. 15 с.

³ ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов, 2009. 8 с.

На первом этапе анализируется текстовое и табличное представление данных множеств объектов, отраженных в стандартах ЕСТД. Например, множество объектов $Tmt = \{tmt1, tmt2, \dots, tmtn\}$ представляет собой перечень элементов структуры и характеристики методов взаимодействия предметов труда Ptr , множество спецификаций $Spc = (spc1, spc2, \dots, spcn)$ представляет собой взаимосвязанный перечень предметов труда $Ptr = (Ptr1, Ptr2, \dots, Ptrn)$ – закупаемых материалов, полуфабрикатов, покупных заготовок, а также изготавливаемых деталей и сборочных единиц, находящихся на операциях⁴. При этом, для каждой пары элементов множества Spc и множества Tmt формируется множество морфизмов – технологических операций $Top = \{top1, top2 \dots topn\}$, т.е. $Tmt \subset Top$ и $Spc \subset Top$.

Множество производственных рабочих с указанием профессий и квалификационных характеристик $Ttr = \{ttr1, ttr2, \dots, ttrn\}$, множество мощностей $Msch = \{msch1, msch2, \dots, mschn\}$, множество инструментов $Ins = \{ins1, ins2, \dots, insn\}$ входят в множество ресурсов (рабочих мест) $Res \subset Ttr$, $Res \subset Msch$, $Res \subset Ins$. Аналогичным образом формируются другие множества представленной структуры ЦД ОПП.

На следующем этапе на основе графоаналитического и синтаксического анализа документов ЕСТПП формируются характеристики каждого объекта множества. Результатом идентификации моделей ЦД организации ПП является формальная структура системной модели ЦД организации ПП (Таблицы 1 и 2).

⁴ ГОСТ 3.1109-82 Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. - М.: Издательство стандартов, 1981. 15 с.

Таблица 1

Структура ЦД организации производственного процесса			
Модели предметов труда		Состав технологических методов	Модели технологических операций
Состав ПТ	Структура ПТ		
Изделие	Идентификация ПТ: А - Анонимный ПТ Н - Номерной ПТ П - Номерная партия ПТ З - Заказной ПТ Тип прослеживаемой входимости: А - А А - П А - Н А - З П - П П - Н П - З Н - Н Н - З З - З	Литье	МТО1 МТО2 МТО3 МТО4 МТО5 МТО6 МТО7 МТО8 МТО9
Материал		Формование	
Основной материал		Раскрой материала	
Вспомогательный материал		Ковка	
Полуфабрикат		Объемная штамповка	
Заготовка		Листовая штамповка	
Исходная заготовка		Поверхностное пластическое деформирование	
Листоштампованное изделие		Обработка резанием	
Отливка		Обработка термическая	
Поковка		Обработка электрофизическая	
Комплектуемое изделие		Обработка электрохимическая	
Деталь		Обработка гальванопластика	
Сборочная единица		Слесарная обработка	
Сборочный комплект		Сборка	
Готовое изделие		Сварка	
Агрегат		Клепка	
Отремонтированное изделие		Пайка	
Шихта		Склеивание	
Сплав		Нанесение покрытия	
Блок заготовок		Технический контроль	
Дефектное изделие		Испытания	
Технологические потери		Комплектование	
Вторичные материальные ресурсы		Разукомплектование (разборка)	
Используемые отходы		Транспортирование	
Неиспользуемые отходы		Хранение	
Безвозвратные отходы		Ремонт	
		Переработка отходов	

Структура ЦД организации производственного процесса				
Модель организационной структуры	Модели рабочих мест		Модели организации операций технологического процесса	Модели межоперационных процессов
	Структура рабочего места	Тип рабочего места		
Подразделения: - Склады закупаемых ПТ - Склады реализуемых ПТ - Склады выведенных из производства ПТ - Склады находящихся в производстве ПТ - Склады законченных обработкой и готовых к сборке ПТ - Склады консигнационные собственные - Склады консигнационные не собственные - Производственные цехи - Производственные участки	Группа механизмов Механизм Группа рабочих Рабочий	Простое рабочее место Многостаночное рабочее место Комплексное рабочее место	Модель однопредметного переналаживаемого процесса Модель однопредметного переналаживаемого процесса Модель многопредметного переналаживаемого процесса	Модели формирования производственных партий ПТ Модели формирования передаточных партий ПТ Модели формирования страхового запаса Модели ожидания обработки ПТ

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. Сформулированы основные методологические принципы формализации и трансформации функциональной архитектуры информационной системы планирования и управления производственными процессами МП на основе декомпозиции и последовательного определения теоретико – множественных операций принадлежности, включения, соответствия, отношения и функциональной зависимости реально – виртуальных объектов ПП в систему их ЦД.

2. Показано, что применение основных положений теории множеств, и, в частности, положений теории категорий множеств и положений формальной логики позволяет сформировать подход к структурно – параметрической идентификации модели ЦД ПП. Представлен пример идентификации ЦД организации ПП, основанный на логико-семантическом анализе положений стандартов ЕСТПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Речкалов А.В., Артюхов А.В., Куликов Г.Г., Новиков В.Н. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия. Вестник УГАТУ, Вып. 26, № 1(95), 2022, с. 120-135.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб — «Эксмо», 2016 — (Top Business Awards) ISBN 978-5-699-90556-0
3. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.
4. Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун. MES — основа для создания «цифрового двойника» производственной системы. Вестник МГТУ СТАНКИН, №2 (49), 2019. С. 52-56.
5. Гаврилов, Д.А. Управление производством на базе стандарта MRP II / Д.А. Гаврилов— СПб: Питер, 2002. — 320 с.: ил. — (Серия «Теория и практика менеджмента»).
6. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику. – М.: КомКнига, 2006. - 432 с.

Самматов И. Х., Тастиев П. Р., Каримов Н. Р.
Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕНТОЧНОГО СУХОГО ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК ГТД

На сегодняшний день остро стоит проблема получения качественной поверхности лопаток

ГТД. Наиболее эффективным для этой цели считаются способы электролитно-плазменного полирования. Также существует недавно разработанный способ сухого электрополирования, который дает более высокое качество поверхности, однако существуют проблемы неравномерной обработки поверхностей лопатки.

Цель исследования.

Установить возможности обработки детали типа «Лопатка рабочая ГТД» методом сухого электрополирования, разработку способа, устройства и установки для обеспечения метода СЭП.

Задачи исследования

- изучить причину неудовлетворительного качества обработки поверхностей сложной формы методом СЭПГ;
- рассмотреть возможность обработки деталей сложной формы за счет замены гранул лентой из волокон анионитов.

Технология СЭП основана на ионном уносе материала поверхностного слоя детали при ее обработке в среде гранул-анионитов, содержащих электролит, соответствующий материалу полируемой детали.

Одной из причин неудовлетворительного качества обработки поверхностей сложной формы методом СЭПГ может являться то, что при хаотичном движении гранул происходит неоднородная концентрация обработки.

Принцип ленточного СЭП, поясняется следующей схемой процесса. Вокруг всей обрабатываемой поверхности детали, с зазором, эквидистантно профилю пера лопатки располагают охватывающий электрод. В образовавшийся между охватывающим электродом и поверхностью пера вводят ленту из волокон анионитов, подают потенциал на лопатку и охватывающий электрод и осуществляют полирование детали при непрерывном перемещении ленты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грилихес С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: теория и практика. Влияние на свойства металлов / С.Я. Грилихес. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленигр. отд-е, 1987. 232 с.
2. Добрынин Д.А. Электролитно-плазменное полирование титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1 Труды ВИАМ №7 (55).
3. Патент РФ № 2700226. Способ электрополирования металлической детали. / Мингажев А.Д., Криони Н.К., Мингажева А.А./ Заявка: 2018134887. / 2019.
4. Патент РФ № 2752835. Способ электрополирования металлической детали. / Мингажев А.Д., Криони Н.К./ Заявка: 2021100145. / 2021.

Сураева Д. Т.

sirdilara@gmail.com

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

ПОДМОДЕЛИ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ СО СПЕЦИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЕМ СОСТОЯНИЯ

Аннотация: Рассматриваются уравнения газовой динамики с уравнением состояния в виде давления, равного сумме функций плотности и энтропии. Системе соответствует 12-мерная алгебра Ли. Оптимальная система неподобных подалгебр построена. По трехмерной подалгебре строится инвариантная подмодель ранга 1 и дается представление движения частиц в пространстве по полученному точному решению.

Ключевые слова: уравнения газовой динамики, уравнение состояния, допустимая подалгебра, инвариантная подмодель, точное решение, линейное поле скоростей.

Siraeva D. T.

sirdilara@gmail.com

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa

SUBMODELS AND EXACT SOLUTIONS OF THE GAS DYNAMICS EQUATIONS WITH SPECIAL STATE EQUATION

Abstract: The gas dynamics equations with special state equation in the form of pressure being the sum of the density and entropy functions are considered. The system corresponds to a 12-dimensional Lie algebra. An optimal system of nonsimilar subalgebras has been constructed. Based on the three-dimensional subalgebra, an invariant submodel of rank 1 is constructed and a representation of the motion of particles in space is given using the obtained exact solution.

Key words: gas dynamics equations, state equation, admissible subalgebra, invariant submodel, exact solution, linear velocity field.

Рассматривается система уравнений газовой динамики [1]:

$$D\vec{u} + \rho^{-1}\nabla p = 0, \quad D\rho + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad Dp + \rho f_p \nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (1)$$

где $D = \partial_t + (\vec{u} \cdot \nabla)$ – оператор полного дифференцирования; $\nabla = \partial_{\vec{x}}$ – градиент по пространственным независимым переменным \vec{x} ; \vec{u} — вектор скорости; ρ — плотность; p — давление; t — время. Уравнение состояния имеет специальный вид [2]

$$p = f(\rho) + h(S). \quad (2)$$

из которого определяется энтропия S . Последнее уравнение системы (1) может быть заменено уравнением для энтропии.

$$DS = 0.$$

По трехмерной подалгебре 3.36 из оптимальной системы подалгебр [2] построена инвариантная подмодель ранга 1 и получено новое точное решение системы (1), (2). Подмодель определяет решение с линейным полем скоростей с неоднородной деформацией. Решение задает изохорическое движение частиц с постоянным давлением вдоль каждой мировой линии частицы. Движение вихревое, ограниченное движущейся плоскостью. Частицы движутся по параболам и по лучам в параллельных плоскостях. Движение объема частиц рассматривается при нулевом значении параметра подалгебры. В конечные моменты времени частицы из сферы попадают на эллипсоид, и в каждый момент времени объем эллипсоида равен объему исходной сферы [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.В. Овсянников. Программа «Подмодели». Газовая динамика // Прикладная математика и механика. Москва: РАН. 1994. Т. 58, № 4. С. 30-55.
2. Д.Т. Сираева. Оптимальная система неподобных подалгебр суммы двух идеалов // Уфимский математический журнал. 2014. Т. 6, № 1. С. 94-107.
3. Nikonorova, R.; Siraeva, D.; Yulmukhametova, Y. New Exact Solutions with a Linear Velocity Field for the Gas Dynamics Equations for Two Types of State Equations // Mathematics. 2022. V. 10, 123. DOI 10.3390/math10010123

Спиридонов Е. К.^а, Исмагилов А. Р.^б, Хабарова Д. Ф.^в

^а spiridonovek@susu.ru, ^б ismagilovar@susu.ru, ^в khabarovadf@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЗАПОРНОГО УСТРОЙСТВА ЭЖЕКЦИОННОГО ТИПА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫХЛОПА АГРЕССИВНЫХ ГАЗОВ

Аннотация: Многие технологические процессы на промышленных предприятиях сопровождаются выхлопами агрессивных газов, ухудшающие экологическую обстановку окружающей среды. Разработано устройство пневматического запорного устройства эжекторного типа. Описана физико-математическая модель сложного газодинамического процесса струйных течений активного и пассивного потоков газа в устройстве. Представленные характеристики аппарата позволяют установить взаимосвязь режимных параметров с геометрическими.

Ключевые слова: выхлоп, газ, запорное устройство, эжекция, пневматика, характеристика

Spiridonov E. K.^а, Ismagilov A. R.^б, Khabarova D. F.^в

^а spiridonovek@susu.ru, ^б ismagilovar@susu.ru, ^в khabarovadf@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A PNEUMATIC SHUT-OFF DEVICE OF AN EJECTION TYPE TO PREVENT AN EXHAUST OF CORROSIVE GASES

Abstract: Many technological processes at industrial enterprises are accompanied by corrosive gases, which worsen the ecological situation in the environment. A pneumatic shut-off device of the ejection type has been developed. A physico-mathematical model of a complex gas-dynamic process of jet flows of active and passive gas flows in a device is described. The presented characteristics of the device make it possible to establish the relationship between operating and geometric parameters.

Key words: exhaust, gas, shut-off device, ejection, pneumatics, characteristic.

Многие технологические процессы на промышленных предприятиях металлургической, химической, нефтяной, газовой и смежных отраслях сопровождаются выхлопами агрессивных газов, ухудшающие экологическую обстановку окружающей среды.

Рассматриваемые технологические процессы сопровождаются загрузкой сыпучего материала во внутреннюю полость реактора (рис. 1). При загрузке запорное механическое устройство открыто. Химические реакции протекают под давлением выше атмосферного, что приводит к выхлопу агрессивных газов

через загрузочное устройство. Вместе с тем, работа механических запорных устройств сопровождается частыми выходами из строя [1].

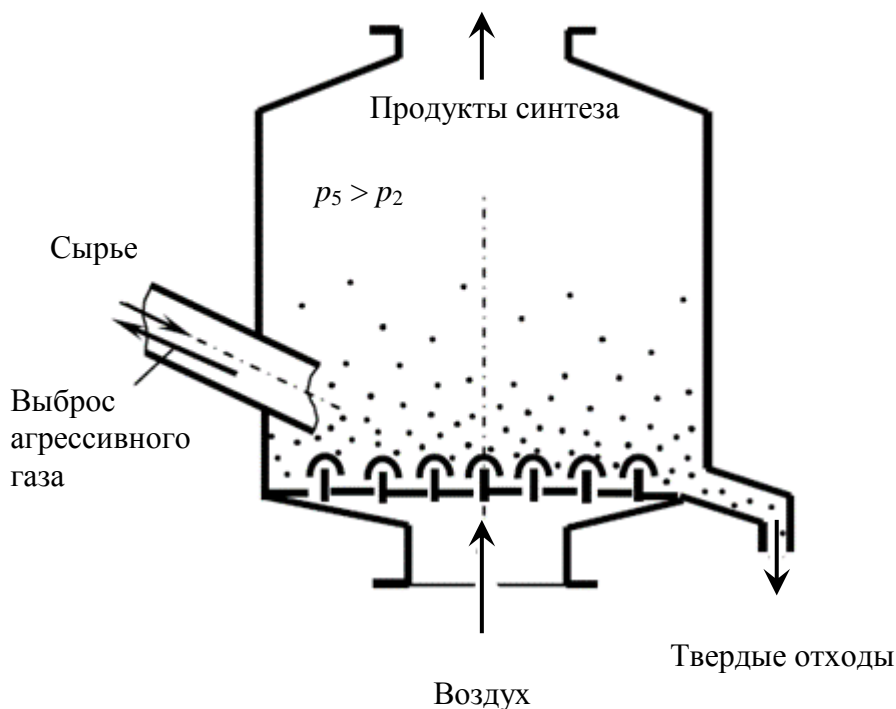


Рис. 1. Печь с противодавлением

Установка пневматического запорного устройства эжекционного типа (рис. 2) предотвратит выхлоп агрессивных газов противотоком газа или смеси газов под давлением, равным или превышающим давления в реакторе. Данный аппарат не содержит подвижных частей.

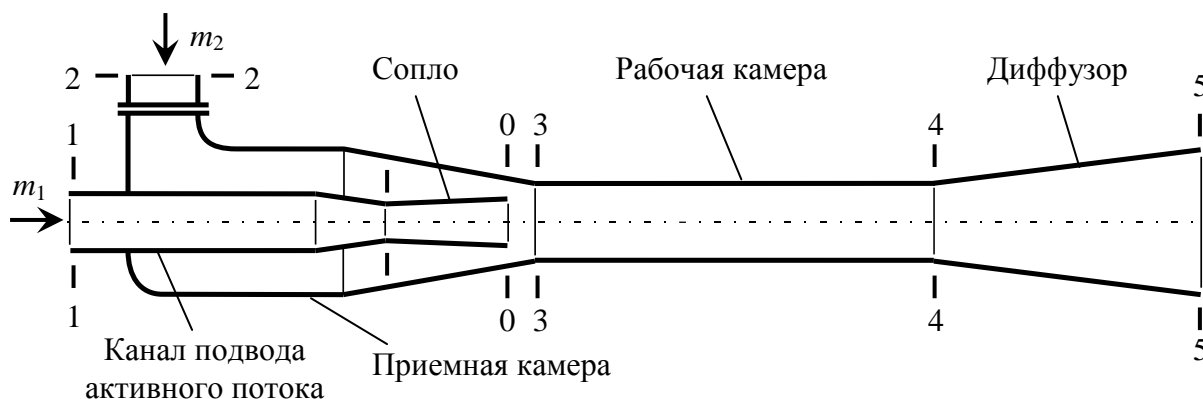


Рис. 2. Расчетная схема пневматического запорного устройства эжекционного типа

Для расчета пневматического запорного устройства эжекционного типа применена схема газового эжектора со сверхзвуковым соплом (см. рис.2) [2, 3]. Его работа сопровождается сложным гидромеханическим процессом

энергообмена активной и пассивной среды при их смешении в проточной части аппарата.

Разработана физико-математическая модель на основе уравнений состояния, сохранения массы, количества движения и энергии в канале загрузки, рабочей камере и канале выхлопа:

$$\frac{p_5 - p_2}{p_2} = k \cdot \Pi_* \cdot \Omega_* \cdot \frac{p_1}{p_2} \cdot \left[\varphi_0 \cdot \varphi_3 \cdot \lambda_0 - \varepsilon_* \cdot \left(\frac{1}{\varphi_4} - 0,5 \right) \cdot \Omega_* \cdot \frac{v_5}{v_1} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{m_1}{A_3} = \frac{k \cdot \Pi_*}{V_*} \cdot \Omega_* \cdot p_1, \quad (2)$$

где p_i – давление потоков в i -м сечении; k – постоянная адиабаты; ε^* и Π^* – газодинамические функции; Ω_* – соотношение площадей нормальных сечений соплового устройства и загрузочного трубопровода; φ – коэффициенты скорости; λ_0 – приведенная скорость потока в выходном сечении сопла, равная соотношению скорости потока к критической скорости; v – удельный объем газа; m_1 – массовый расход активного потока; A – площадь сечения; V_* – критическая скорость газового потока:

$$V_* = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot R \cdot T_1}{k + 1}}; \quad (3)$$

R – газовая постоянная.

Решая систему уравнений (1), (2) и (3), рассматривая модель совершенного газа, получаем

$$0,615 \cdot \Omega_* \cdot \lambda_0 \cdot \frac{p_1}{p_2} - 0,344 \cdot \Omega_*^2 \cdot \frac{p_1^2}{p_2 \cdot p_5} \cdot \frac{T_5}{T_1} - \frac{p_5 - p_2}{p_2} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{m_1}{A_3} = 0,04 \cdot \frac{\Omega_* \cdot p_1}{\sqrt{T_1}}. \quad (5)$$

Полученные выражения позволили установить взаимосвязь между ключевыми режимными параметрами (давление питания p_1 , массовый расход активного газа m_1 , давления в реакторе p_5 , относительное повышение давления в затворном устройстве $(p_5 - p_2)/p_2$, абсолютных температурах активного потока T_1 и в реакторе T_5) и геометрическими параметрами (соотношение площадей

нормальных сечений соплового устройства и загрузочного трубопровода Ω_*), как размерных, так и безразмерных.

Получены результаты расчета в виде размерной (рис. 3) и безразмерной характеристики (рис. 4).

На рис. 3 показано, что увеличение температуры активного потока T_1 уменьшает его массовый расход m_1 и энергозатраты на работу пневматического затвора эжекционного типа.

График на рис. 4 позволяет установить взаимосвязь между физическими и базовым геометрическим параметром – относительной площадью сопла Ω_* , через который возможно определить основные геометрические размеры, на основе рекомендаций [2, 4, 5].

Графики на рис. 3 и 4 позволяют рассчитать геометрические размеры пневматического запорного устройства эжекционного типа при заданных режимных параметрах.

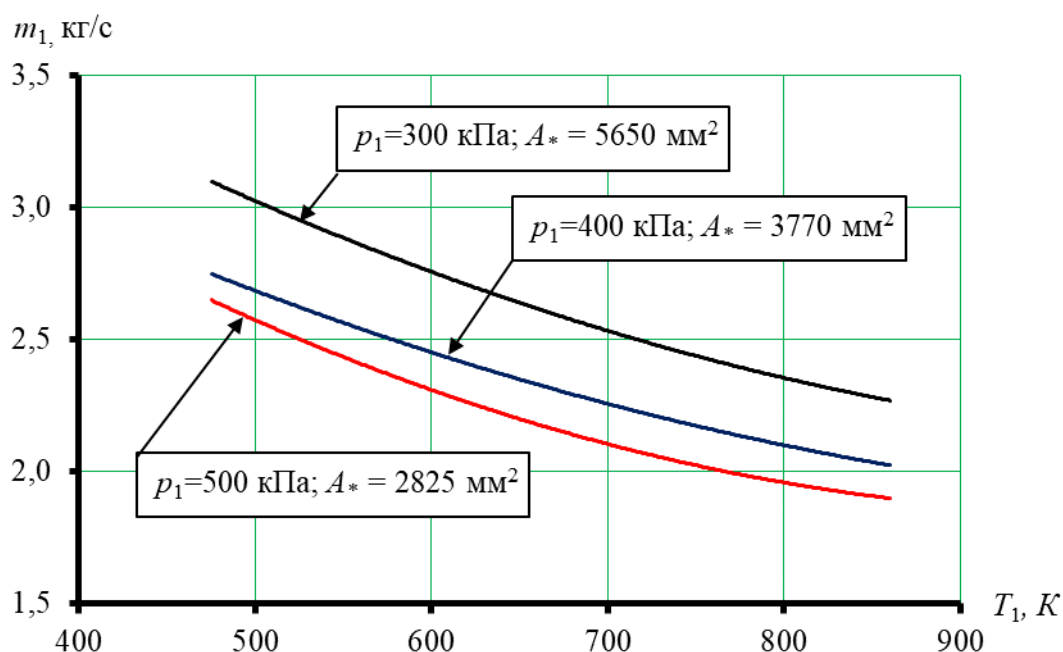


Рис. 3. Влияние температуры и давления активного потока на массовый расход

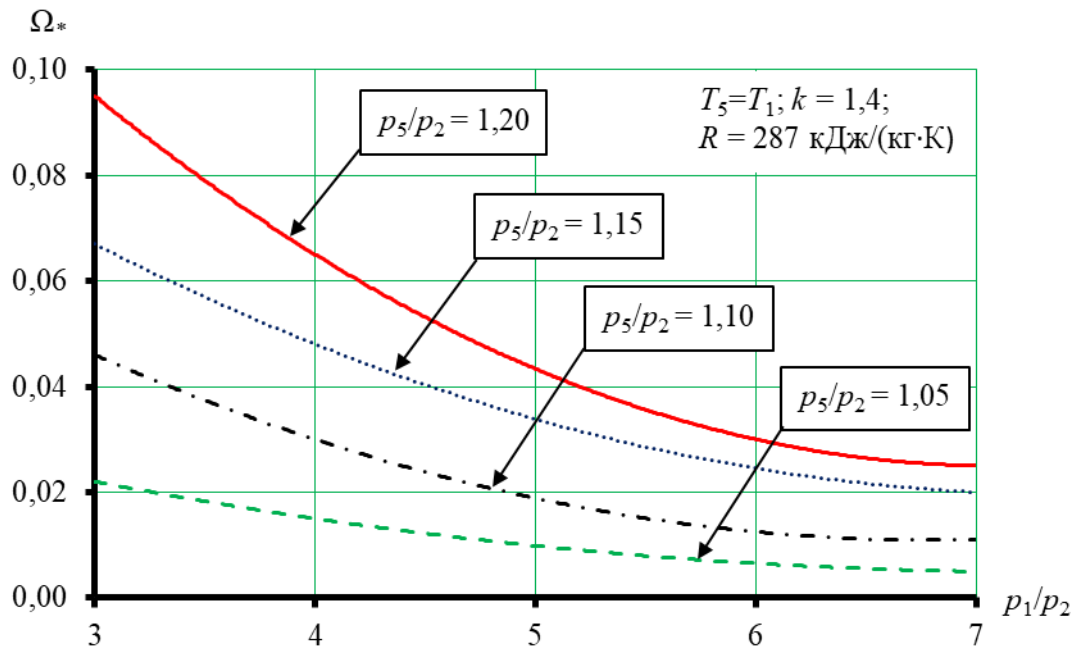


Рис. 4. Зависимость относительной площади горловины сопла от степени расширения струи активного потока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бигеев В.А. Основы металлургического производства / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др. – СПб.: Лань, 2017. — 615 с.
2. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. Бачурин А.Б. Экспериментальные и теоретические исследования особенностей течения в регулируемых соплах с центральным телом / А.Б. Бачурин, А.М. Русак, В.А. Целищев // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 5 (40). С. 52-61.
4. Александров В.Ю. Оптимальные эжекторы (теория и расчет) / В.Ю. Александров, К.К. Климовский. – М.: Машиностроение, 2012. – 136 с.: ил.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: в 2 ч. Ч.1. Учеб. руководство для вузов / Г.Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука: Гл. ред. физ-мат. лит., 1991. – 600 с.

Сысоев С. Е.

sysoev.se@ugatu.su

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ФОРМУЛЫ ОБРАЩЕНИЯ ДЛЯ СФЕРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДОНА

Аннотация: Рассмотрена задача восстановления функции с носителем в единичном шаре по ее интегралам по семейству сфер. Показано, что эта задача эквивалентна задаче обращения преобразования Радона, что позволило получить явные формулы для определения исходной функции. Такие формулы важны для задач термоакустической и фотоакустической томографии, гидролокации и радиолокации.

Ключевые слова: сферические средние, преобразование Радона, формулы обращения.

Sysoev S. E.

sysoev.se@ugatu.su

Ufa University of Science and Technology, Ufa

RECONSTRUCTION FORMULAS FOR THE SPHERICAL MEAN RADON TRANSFORM

Abstract: The problem of recovering a function supported in the unit ball from its integrals over a family of spheres is considered. It is shown that this problem is equivalent to the inverse problem for the Radon transform, which made it possible to obtain explicit formulas for determining the original function. Such formulas are important for problems of thermoacoustic and photoacoustic tomography, sonar and radar imaging.

Key words: spherical means, Radon transform, inversion formulas.

В евклидовом пространстве R^n со скалярным произведением $\langle x, y \rangle = x_1 y_1 + \dots + x_n y_n$ обозначим $x^2 = \langle x, x \rangle$, $B = \{x \in R^n : |x| < 1\}$. Для $a \in R^n \setminus \{0\}$, через $S(a)$ обозначим сферу $\{x \in R^n : (x - a)^2 = a^2 + 1\}$ с центром в точке a и радиусом $\sqrt{a^2 + 1}$. Для функции $f \in C_0^\infty(B)$ определим сферическое преобразование Радона $Mf(a) = \int_{S(a)} f(x) dS$, где dS – евклидов элемент площади поверхности сферы $S(a)$. Рассмотрим задачу восстановления функции f по значениям $Mf(a)$, заданным для всех сфер $S(a)$, $a \in R^n \setminus \{0\}$. В [4] доказана единственность решения подобной задачи с неполными данными. В [1, 2, 3] решены задачи обращения сферического преобразования Радона,

заданного на некоторых семействах сфер, путем сведения к решению эквивалентной задачи для классического преобразования Радона. Аналогичным образом получено решение рассматриваемой здесь задачи. Для $\xi \in S^{n-1}$, $p \in R$ через $L(\xi, p)$ обозначим гиперплоскость $\{y \in R^n : \langle \xi, y \rangle = p\}$. Для функции $g \in C_0^\infty(B)$ определим классическое преобразование Радона $Rg(\xi, p) = \int_{L(\xi, p)} g(y) d\sigma$, где $d\sigma$ – евклидов элемент площади поверхности $L(\xi, p)$.

Теорема 1. Для функций f и g с носителями в B следующие соотношения при $0 < |p| < 1$ эквивалентны

$$f(x) = \frac{2^{n-1}(1+x^2)}{(1-x^2)^n} g\left(\frac{2x}{1-x^2}\right), \quad Rg(\xi, p) = \frac{1}{\sqrt{1+p^2}} Mf\left(-\frac{\xi}{p}\right).$$

Обозначим $M_B f(\xi, p) = \frac{1}{\sqrt{1+p^2}} Mf\left(-\frac{\xi}{p}\right)$, $0 < |p| < 1$.

Теорема 2. Для $f \in C_0^\infty(B)$ имеют место формулы обращения сферического преобразования Радона:

$$f(x) = \frac{(-1)^{(n-1)/2}(1+x^2)}{2\pi^{n-1}(1-x^2)^n} \int_{S^{n-1}} \frac{\partial^{n-1}}{\partial p^{n-1}} M_B f\left(\xi, \frac{2\langle \xi, x \rangle}{1-x^2}\right) d\xi, \quad \text{при } n = 2k + 1$$

$$f(x) = \frac{(-1)^{(n-2)/2}(1+x^2)}{2\pi^{n-1}(1-x^2)^n} \int_{S^{n-1}} H \frac{\partial^{n-1}}{\partial p^{n-1}} M_B f\left(\xi, \frac{2\langle \xi, x \rangle}{1-x^2}\right) d\xi, \quad \text{при } n = 2k,$$

где H – преобразование Гильберта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Denisjuk A.S. // Fractional Calculus and Applied Analysis. 1999. № 2(1). P.31-46.
2. Bae J., Kwon B., and Moon S. // Inverse Problems. 2018. № 34(10). 105004.
3. Moon S. // Inverse Problems. 2020. № 36(3). 035007.
4. Сысоев С.Е. // Успехи математических наук. 1997. №4(52). С. 213-214.

Фазлетдинов С. У.¹, Путьок Ю. А.^{1,2}, Муллаянов А. И.^{1,2}

Pityukua@bnipti.rosneft.ru

¹ Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, Уфимский университет науки и технологий

² ООО «РН-БашНИПИнефть»

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ В НАСЫПНЫХ МОДЕЛЯХ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Понимание фильтрационных процессов в насыпных моделях с контролируемой геометрии порового пространства важны с точки зрения выбора эффективного агента для увеличения нефтеотдачи пласта. Насыпные пористые среды могут быть изготовлены на основе различных частиц, например, частиц песка [1], стеклошариков [2] и т.д. Такие модели широко применяются в исследованиях и являются идеализированными 2D пористыми средами, где частицы моделируют зерна горной породы, а пространство между частицами – поры. Целью настоящей работы было численное исследование эффективности вытеснения нефти в насыпных моделях пористой среды в зависимости от кривизны относительных фазовых проницаемостей (ОФП).

Методика создания физической насыпной модели пористой среды основывалась на спекании стеклошариков в муфельной печи. Сами ячейки собирались из минерального стекла, и образованная полость заполнялась стеклошариками и утрамбовывалась.

При лабораторных исследованиях модель в начале эксперимента полностью заполнялась вазелиновым маслом, и вытесняющие агенты закачивались при постоянном объемном расходе с помощью шприцевого насоса. Рассматривалось два вытесняющих агента: вода и раствор для образования микроэмульсий (мицеллярный раствор), который состоял из воды, хлорида натрия (NaCl), ПАВ додецилсульфат натрия (СДС) и бутанола в соотношении 90:5:1.25:3.75, соответственно.

Для численного моделирования использовался пакет OpenFOAM с многомасштабным решателем hybridPorousInterFoam [3]. Для описания двухфазной фильтрации в насыпных моделях рассматривалась модель Дарси с ОФП, удовлетворяющими модели Brooks&Corey [4]:

$$p_c(S_w) = p_{c,0} S_w^{-1/m}, \quad k_{r,n}(S_w) = k_{r,n}^{\max} (1 - S_w)^{(3m+2)/m}, \quad k_{r,w}(S_w) = k_{r,w}^{\max} S_w^{(3m+2)/m},$$

где $p_{c,0}$ – начальное капиллярное давление, $k_{r,n}, k_{r,w}$ – ОФП для несмачиваемой (n) и смачиваемой (w) фаз, соответственно, индексом «max» обозначены максимальные значения, S_w – насыщенность смачиваемой фазы, m – число, характеризующее кривизну ОФП.

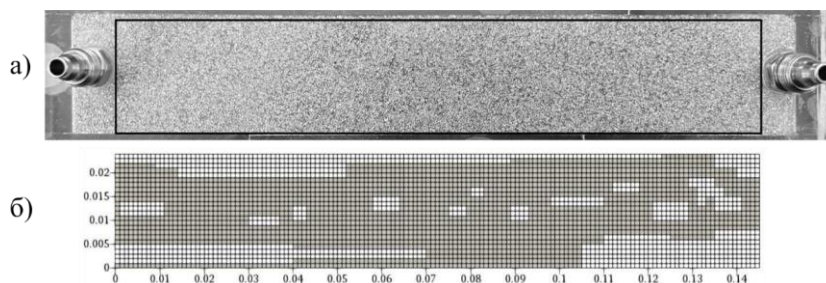


Рис. 1. Насыпная модель пористой среды: (а) физическая модель; (б) численная модель с высокопроницаемыми (серый цвет) и низкопроницаемыми (белый цвет) областями (дискретизация расчетной области обозначена черными линиями)

Для физической насыпной модели размером 162 мм × 25 мм × 1 мм из спеченных стеклошариков (рис. 1б) построена дискретизация расчетной области. Преимуществом этой модели является неизменяющаяся структура порового пространства. Аналогично лабораторным исследованиям фильтрация происходит при постоянном расходе 0.2-0.5 мл/мин справа налево, на границе задается условие прилипания, на выходе постоянное давление. На основе экспериментальных данных определена неоднородность пористой среды. Проницаемость высокопроводящих участков модели 62Д, низкопроводящих 0.1мД, пористость модели 25%. Проведена серия расчетов для вытеснения вазелинового масла с динамической вязкостью 60 сПз и плотностью 800 кг/м³ составом на водной основе с динамической вязкостью 1 сПз и плотностью 1000 кг/м³, соответствующих экспериментальным данным. Рассматривалось несколько режимов фильтрации и ОФП. На рис. 2а представлено распределение

насыщенности, на рис. 2б поле скорости в модели пористой среды при расходе 0.2 мл/мин и кривизне ОФП $m=3$ после 10 мин закачки воды в модель. Результаты качественно согласуются с экспериментальными данными (рис. 2в). Из рис. 2 видно образование вязких пальцев из-за большой разницы в вязкостях закачиваемой и вытесняемой жидкости, также наблюдается образование недренируемых участков с низкой проницаемостью.

На рис. 3 представлено согласование численных результатов с экспериментальными данными для различных агентов вытеснения. Расхождение значений насыщенности масла в пористой среде на ранних временах объясняется неточным воспроизведением граничных условий на входе в численной модели, поскольку не учитывается, что в физической модели существует дополнительный объем пористой среды для создания потока. Из рис. 3 видно, что остаточная насыщенность масла на поздних временах вытеснения в случае мицеллярного раствора меньше на 10%, чем в случае вытеснения водой. Таким образом, состав для образования микроэмульсий является наиболее эффективным агентом вытеснения по сравнению с водой.

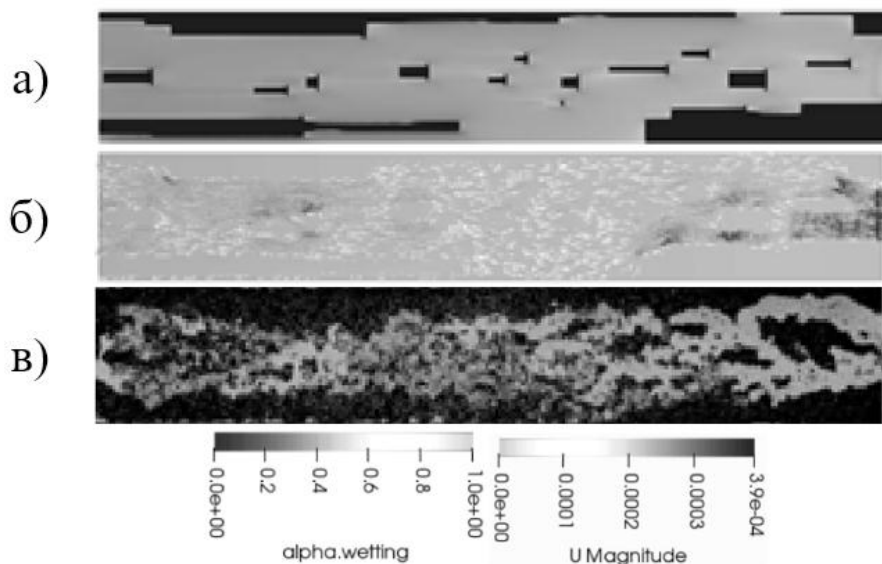


Рис. 2. Фильтрация воды (светлый) и масла (темный) в насыпной модели пористой среды: (а) распределение насыщенности в численной модели, (б) поле скорости в численной модели, (в) распределение насыщенности в физической модели

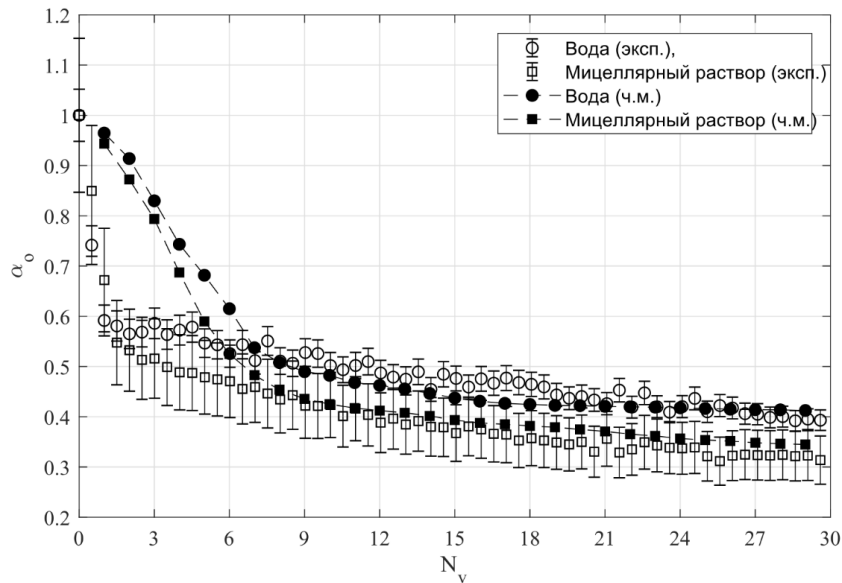


Рис. 3. Изменение насыщенности пористой среды маслом при вытеснении водой и мицеллярным раствором для 0.2 мл/мин: сравнение результатов численного моделирования (ч.м.) с экспериментальными данными (эксп.)

Результаты проведенной работы показывают, что предложенный подход для изучения фильтрации в насыпных моделях с контролируемой геометрией можно использовать для выбора эффективного агента вытеснения с целью увеличения нефтеотдачи пласта.

Работа поддержана РФФ (грант № 21-79-10212).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guerrero F., Bryan J., & Kantzas, A. Visualization of Chemical Heavy Oil EOR Displacement Mechanisms in a 2D System. // *Energies*. 2021. V. 14, No. 4, P. 950.
2. Zhou X., Dong M., Maini B. The dominant mechanism of enhanced heavy oil recovery by chemical flooding in a two-dimensional physical model // *Fuel*. 2013. V. 108. P. 261-268.
3. Carrillo F.J., Bourg I.C., Soulaine C. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach // *Journal of Computational Physics*. 2020. V. X. 8:100073.
4. Brooks R., Corey A. Hydraulic Properties of Porous Media // *Hydrol. Pap.* 1964. V.3. P. 1-27.

УДК 656.073

Целищев Д. В.
nuked@mail.ru

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация: Статья посвящена обзору текущего состояния и проблемам цифровой трансформации логистики. Среди основных проблем цифрового развития рассматривается существующий в отрасли кадровый голод и введенные западные санкции.

Ключевые слова: транспорт, логистика, цифровизация, проблемы, санкции, IT-специалисты.

Tselischev D. V.
nuked@mail.ru

Ufa University of Science and Technology, Ufa

DIGITALIZATION OF TRANSPORT PROCESSES

Abstract: The article is devoted to an overview of the current state and problems of the logistics digital transformation. Among the main problems of digital development, the existing personnel shortage in the industry and the imposed Western sanctions are considered.

Key words: transport, logistics, digitalization, problems, sanctions, IT specialists.

Среди предпосылок бурного развития логистики в гражданском обществе в 60-х годах прошлого столетия выделяется появление микропроцессорной техники. Появление персональных компьютеров и технологий передачи, обработки и хранения данных позволило оперировать большими объемами информации о товарах, передавать их на большом расстоянии за короткое время при этом минимизировать количество ошибок по сравнению с бумажным документооборотом.

В ближайшие годы мировой бизнес будет усиленно вкладываться в развитие форм практического применения технологии искусственного интеллекта (ИИ). Подавляющее большинство компаний уже озаботились внедрением данной технологии в свои бизнес-процессы и планируют кратно увеличить свои расходы, чтобы получить конкурентные преимущества.

Среди новых цифровых технологий, развиваемых в транспортной сфере можно выделить: технологии ИИ, блокчейн, BigData и т.д. На сегодняшний

день технология ИИ является одной из наиболее динамично развивающихся. «Искусственный интеллект, безусловно, - это основа очередного рывка вперед всего человечества в своем развитии» - президент РФ В.В. Путин [1].

По сути начатая в России с конца нулевых цифровизация обрела свою юридическую форму только в 2018 году, когда в РФ официально начала действовать национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации».

С этих самых пор в России возникла острая потребность в специалистах IT-сферы, что, как следствие, вызвало кадровый голод в среде высококвалифицированных кадров способных к решению прикладных задач программирования начиная с небольших мобильных приложений для поддержки клиентов малого бизнеса, заканчивая созданием цифровых экосистем крупного бизнеса. В свою очередь крупные компании, в том числе с гос. участием, стали переманивать одаренных айтишников друг у друга, как следствие, IT-специалисты как класс, до этого никого особо в РФ не интересовавшие, стали получать достаточно высокие зарплаты и различные преференции. Компании ими стали дорожить, уровни заработных плат по некоторым позициям стали достигать 500 тыс. руб. в месяц [2].

Таким образом, резкое осознание бизнесом и государством, потребности в этих специалистах, закономерно привело к дефициту кадров узкоспециализированного характера, способных решать прикладные задачи разработки и отладки новых цифровых сервисов и клиентских мобильных приложений.

При этом зарубежные крупные компании, начавшие процесс цифровизации бизнеса и экономики раньше России, продвинулись в этой сфере дальше [3], не забывая при этом оттягивать на себя талантливых российских молодых айтишников. А тем, кто не хотел переезжать в Европу или США, по тем или иным причинам, иностранные компании предлагали работу на удаленной основе. При этом высококвалифицированные IT-специалисты,

работая на зарубежные компании и, живя в России, получали заработную плату в долларах, что при высоком курсе последнего делало их работу очень достойной.

Подстегнутая пандемией цифровизация в России шла полным ходом: открывались новые цифровые платформы и сервисы, развивались всевозможные интеллектуальные системы, онлайн-продажи товаров били все рекорды, о цифровизации всего что только возможно не говорил только ленивый и звучало это из каждого утюга.

Однако с началом специальной военной операции (СВО) на Украине все изменилось. Ввиду того, что коллективный Запад, денонсировав важнейшие договора о безопасности, планомерно наращивая группировку НАТО на границах с РФ и обещая принять Грузию и Украину в ее состав, проигнорировал предложения, предусматривающие гарантии безопасности для России и не оставил других вариантов кроме как начать специальную военную операцию на территории Украины. После чего Западное сообщество объявило Россию врагом и значительно усилило санкционное давление, вплоть до отключения ряда банков от SWIFT, ареста 300 млрд долларов, введения секторальных санкций, введения эмбарго и установки потолка цен на энергоносители, запрета полетов, импорта/экспорта и прочих неприятных для экономики России рестрикции. Потери ВВП могут составить двузначную цифру по итогам 2022 года.

На этом фоне часть IT-контингента нашей страны была вынуждена уехать за рубеж, еще более замедлив отечественную цифровизацию [4]. В некоторых случаях это было связано с закрытием или ограничением необходимых для работы зарубежных платформ и сервисов. В некоторых случаях осложнилась дальнейшая работа на иностранные компании с территории России из-за санкций и начавшихся проблем с оплатой труда. Позже часть уехавших все же вернулась. Возможно испытыв сложности с адаптацией на новом месте жительства, соскучившись по семье или найдя выход из сложившихся

трудностей [5]. По разным оценкам в настоящее время дефицит IT-специалистов на рынке труда в России составляет до 1 млн человек [6].

Так или иначе, даже крупные коммерческие компании РФ, до СВО испытывавшие дефицит квалифицированных IT-кадров, после 24 февраля столкнулись с целым рядом проблем поддержания «летней годности» своих действующих IT-проектов и развития новых. Некоторым российским IT-компаниям пришлось всерьез рассматривать вопросы релокации своих сотрудников. Если же говорить о небольших компаниях или государственных учреждениях с невысоким уровнем оплаты труда, то для них кадровый голод в IT-сфере стал ощущаться еще более отчетливо. Если до этого цифровизация шла нарастающими темпами, то после начала СВО многие проекты были заморожены.

Помимо этого ситуация усугубилась вынужденным переходом российских компаний и учреждений на альтернативное, в том числе российское программное обеспечение. В особенности это коснулось критически важных областей экономики и госсектора. Это было связано с тем, что многие вендоры, IT-компании и производители оборудования опасаясь вторичных санкций за работу с российскими потребителями, ушли из России [7]. Начавшийся на фоне пандемии бурный подъем использования различного рода онлайн-сервисов, платформ коммуникации и прочих инструментов цифровизации был грубо остановлен необходимостью перехода на импортозамещенное программное обеспечение, а также оборудование, которое порой не отвечало предъявляемым требованиям или требовало длительной отладки.

Несмотря на то, что российский IT-сектор старается импортозаместить уходящие программные продукты, показывая небывалый рост, но все равно это капля в море, по сравнению с понесенными потерями от первичных и вторичных западных санкций.

Кроме того ситуация усугубляется тем, что функционирующее на сегодняшний день в России IT-оборудование сплошь иностранного

производства и оно постепенно стареет и выходит из строя. Запаса оборудования ушедших с рынка брендов хватит на некоторое время: по разным оценкам определенных видов оборудования может хватить на пару лет. Однако за этот срок заместить ушедшие с рынка компании уввы не получится, в этом, как и в любом другом сложном технологическом производстве, важен накопленный годами опыт. С виду спасительный параллельный импорт на поверку оказывается фактором удорожания услуг и товаров для конечного пользователя и является временным решением проблемы поставок.

Что же касается цифровизации транспортных процессов, то в 2021 году была утверждена Стратегия цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации на период 2022-2030 гг. (далее Стратегия) [8].

В рамках Стратегия до 2030 года планируется организовать ни много ни мало «инфраструктуру для движения беспилотников всех видов транспорта, провести роботизацию транспортно-логистических хабов, создать единый цифровой инструмент оплаты проезда для всех видов транспорта, создать системы отслеживания грузоперевозок с использованием электронных навигационных пломб, развить электронные площадки заказа грузовых перевозок, логистических услуг и eCommerce (FaaS) в целях сокращения количества часов на прохождение контрольных мероприятий на границе, разработать информационную систему учета и планирования работ/затрат на проектирование, строительство, ремонт и содержание объектов транспортной инфраструктуры, развить системы моделирования транспортных потоков с применением технологий искусственного интеллекта в целях повышения скорости принятия решений по разрешению чрезвычайных и кризисных ситуаций на транспорте и снижения материального ущерба от них, внедрить интерактивную систему предварительного информирования о пассажирах и др. в целях снижения количества актов незаконного вмешательства и ущерба от них на объектах транспортной инфраструктуры». Последнее несомненно бы пригодилось в условиях террористических последствий проведения СВО.

Но глобальные планы требуют столь же глобальных финансовых вливаний, а именно, если обратиться к разделу X - финансово-экономическому обоснованию Стратегии, то можно увидеть, что для реализации последней требуется более 1,5 трлн руб. до 2030 года [8] – сумма, составляющая более 12% от общего объема Фонда национального благосостояния на 1 сентября 2022 года [10]. Если еще при этом учитывать затраты государства на преодоление последствий от Covid-19 (3,71 трлн руб. за 2020-2021 гг.) и необходимость финансирования СВО – на которую по самым скромным прикидкам тратится 21 млрд руб. в день [11], что составляет более 5 трлн руб. за 8 месяцев, то становится понятно, что реализация стратегии в той мере, в которой она изложена на сегодняшний день в паспорте Стратегии является проблематичной, если не сказать утопичной. На 2021 год было запланировано освоение всего лишь 15 млрд руб., но информации о реализованных мероприятиях Стратегии и ее финансировании в открытых источниках найти не удалось. Ко всему прочему несколько смущает пункт раздела II Стратегии: «проект имеет срок реализации с 2021 по 2030 год и на текущий момент не обеспечен финансированием».

Помимо этого в Республике Башкортостан в 2021 году была утверждена региональная стратегия в области цифровой трансформации отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления Республики Башкортостан (далее Стратегия РБ) [9].

Отдельной стратегии цифровой трансформации транспортной сферы Республики Башкортостан не существует. Однако в общей Стратегии РБ в разделе транспорта и логистики в качестве основных проблем, которые предстоит решать цифровизации выделяются следующие: «низкая пропускная способность дорог; увеличение количества ДТП на дорогах; отсутствие решения для моделирования загруженности дорог; высокая стоимость создания и обслуживания транспортной инфраструктуры; быстрое изменение технологий, что требует перестройки производства, логистики и потребления» [9].

Далее среди основных задач приводятся две: 1) «создание единой информационной системы, обеспечивающей эффективное взаимодействие всех участников в сфере ремонта автодорог; 2) «создание дорожной карты инициатив и мероприятий цифровой трансформации» [9]. Но по непонятной причине, дальнейшие упоминания про ремонт дорог и дорожную карту далее в Стратегии отсутствуют.

Якобы решению обозначенных задач способствует реализация проекта: Инициатива "Зеленый цифровой коридор пассажира" (далее Инициатива), при реализации которой у бенефициаров возникают следующие дивиденды: увеличивается средняя скорость городского общественного транспорта; сокращается время его ожидания, а также доля пользователей собственных автомобилей; в общем доступе появляется информация об автобусах, осуществляющих регулярные городские перевозки, что, по всей видимости, до этого было недоступным.

Также улучшится оснащение автобусов системами видеонаблюдения салонов (с функцией записи). К сожалению при этом, вероятно, под предлогом защиты персональных данных, видео из салонов подвижного состава не будет транслироваться в интернет для осуществления онлайн-мониторинга заполненности подвижного состава в интересах пассажиров.

Целью Инициативы является: «создание (внедрение) и обеспечения и функционирования единых цифровых сервисов для предоставления льгот и субсидий на транспорте, идентификации пассажиров, а также построения оптимальных маршрутов и информационно-навигационного построения пассажирских поездок». Что касается создания сервисов по предоставлению субсидий на транспорте и идентификации пассажиров, имеющих эти льготы, с этим все более менее понятно – необходимая вещь. Однако возникают вопросы о необходимости создания систем построения оптимальных маршрутов транспорта для пассажиров, которые и так уже имеются в мобильных телефонах большинства граждан.

Также не понятно каким образом, коррелирует проект "Зеленый цифровой коридор пассажира" с обозначенными задачами цифровизации: низкой пропускной способностью дорог, высокой стоимостью создания и обслуживания транспортной инфраструктуры, а также созданием дорожной карты цифровой трансформации и ремонтом автодорог.

Какие средства планируется привлечь для реализации инициативы не сообщается, тем более что в Стратегии РБ есть указание, что финансированием проект также не обеспечен как и общероссийский. Однако указано, что деньги будут как из федерального так и из регионального бюджетов. Все мероприятия планируется реализовать до 2030 года, то есть за пределами срока реализации самой Стратегии РБ. Однако при этом все целевые показатели указаны до 2024 г.

Обозначенные проблемы так или иначе сказались или скажутся на будущем цифровизации транспортной сферы Российской Федерации в целом и Республики Башкортостан в частности. В условиях отсутствия финансирования, острой нехватки кадров, недостатков существующей законодательной базы, низкой цифровой грамотности кадров и падающей покупательской способности населения быстро реализовать поставленные задачи вряд ли удастся.

Однако о назревшей необходимости цифровой трансформации логистических процессов в России говорят много и часто. Забывая при этом, что она уже идет более 20 лет.

Нельзя не отметить значительные успехи, достигнутые за последние годы в области дорожного строительства и складского хозяйства, внедрения электронного документооборота на предприятиях всех уровней, применение на предприятиях логистической сферы программно-аппаратных средств TMS, WMS, ERP, CRM и др. Все это позволило в значительной мере сократить время доставки, повысить ее качество и снизить стоимость для потребителя вопреки всему.

Именно времена обязывают сейчас всех причастных сконцентрировать все силы на выполнении намеченных задач и вопреки обозначенным выше трудностям обеспечить выполнение основной цели, сформулированной в Стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации – «повышение доступности, качества, безопасности и экологичности транспортно-логистических услуг для населения и бизнеса» [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путин назвал искусственный интеллект основой для нового рывка в развитии человечества [Электронный ресурс] // Информационное агентство ТАСС. 2020. 04 декабря. URL: <https://tass.ru/ekonomika/10172451> (дата обращения: 10.10.2022).
2. Зарплаты российских ИТ-специалистов пробили очередной потолок. Кто сколько получает. [Электронный ресурс] // ООО «Синьюс». 2022. 16 февраля. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2022-02-16_zarplaty_rossijskih_it-spetsialistov (дата обращения: 10.10.2022).
3. Никитская Е.Ф., Валишвили М.А., Афолина В.Е. Цифровизация в глобальном мире: международная практика и российский опыт [Электронный ресурс] // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021 URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=1881> (дата обращения: 10.10.2022).
4. <https://vc.ru/hr/410158-it-specialisty-uezzhayut-potomu-chno-u-nih-net-variantov-kompanii-nepotyat-rabotat-s-temi-kto-nahoditsya-v-rossii> (дата обращения: 10.10.2022).
5. «Я не вычеркиваю Россию из своей жизни»: как живут айтишники за рубежом и почему многие возвращаются. [Электронный ресурс] // Сетевое издание «НГС.НОВОСТИ». 2022. 23 июня. URL: <https://ngs.ru/text/job/2022/06/23/71426189> (дата обращения: 10.10.2022).
6. Дефицит ИТ-мозгов: как Россия решает проблему кадрового голода в отрасли [Электронный ресурс] // Агентство «РБК». 2022. 28 июля. URL: <https://www.rbc.ru/economics/28/07/2022/62e12c929a794747597da279> (дата обращения: 10.10.2022).
7. Ушел и не вернулся: какие ИТ-компании покинули Россию и кто сможет занять их место [Электронный ресурс] // Агентство «Generation». 2022. 26 мая. URL: <https://generation-startup.ru/media-center/smi/68551> (дата обращения: 10.10.2022).
8. Паспорт стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации [Электронный ресурс] // Минтранс РФ. 2021. 16 июля. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11374> (дата обращения: 10.10.2022).
9. Стратегия цифровой трансформации Республики Башкортостан [Электронный ресурс] // Издание TAdviser. 2021. 09 сентября. URL: https://www.tadviser.ru/images/0/0e/Std_45501204.pdf (дата обращения: 10.10.2022).
10. Объем ФНБ в сентябре сократился более чем на 1 трлн рублей [Электронный ресурс] // Издание Ведомости. 2022. 06 октября. URL: <https://www.vedomosti.ru/finance/news/2022/10/06/944241-obem-fnb-sokratilsya> (дата обращения: 10.10.2022).
11. Затраты России на войну с Украиной составили около 1 млрд руб. в час [Электронный ресурс] // Издание TRT на русском. 2022. 06 октября. URL: <https://www.trtrussian.com/novosti-rossiya/zatraty-rossii-na-vojnu-s-ukrainoj-sostavili-okolo-1-mlrd-rub-v-chas-8873869> (дата обращения: 10.10.2022).

Юлмухаметова Ю. В.^а, Хабиров С. В.^б
^а *yulmukhametova.yuv@ugatu.su*, ^б *habirov@anrb.ru*
 Институт механики им. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА С ЛИНЕЙНЫМ ПОЛЕМ СКОРОСТЕЙ В ЛАГРАНЖЕВЫХ КООРДИНАТАХ

Аннотация: Рассмотрена одна модель движения газа с линейным полем скоростей в симметричном случае в эйлеровых переменных. Данная модель переписана в лагранжевых переменных. Записаны известные интегралы данной модели и найден новый. Все преобразования эквивалентности, которые допускают уравнения газовой динамики записаны в лагранжевых переменных. С их помощью некоторые постоянные интегрирования упрощены. Для более простых видов матрицы линейности найдены решения модели.

Ключевые слова: газовая динамика, линейное поле скоростей, эйлеровы переменные, лагранжевые переменные.

Yulmukhametova Yu.V.^а, *Habirov S. V.*^б
^а *yulmukhametova.yuv@ugatu.su*, ^б *habirov@anrb.ru*
 Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa

EQUIVALENCE TRANSFORMATIONS FOR A MODEL OF GAS MOTION WITH A LINEAR VELOCITY FIELD IN LAGRANGIAN COORDINATES

Abstract: One model of gas motion with a linear velocity field in the symmetric case in Eulerian variables is considered. This model is rewritten in Lagrangian variables. The known integrals of this model are recorded and a new one is found. All equivalence transformations that allow gas dynamics equations are written in Lagrangian variables. With their help, some permanent integrations are simplified. Solutions of the model are found for simpler types of the linearity matrix.

Key words: gas dynamics, linear velocity field, Eulerian variables, Lagrangian variables.

Рассматривается модель движения газа с линейным полем скоростей [1]

$$\vec{u} = A(t) \vec{x} + \vec{u}_0(t),$$

где A, \vec{u}_0 – матрица 3×3 и вектор, зависящие от времени t . Матрица и вектор удовлетворяют системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$A' + A^2 = S, \quad S = S^T, \quad S' + 2SA = (1 - \gamma)S \operatorname{tr} A$$

$$\vec{u}'_0 + A \vec{u}_0 = \vec{v}, \quad \vec{v} + A^T \vec{v} + S \vec{u}_0 = (1 - \gamma) \vec{v} \operatorname{tr} A$$

Давление и плотность задаются равенствами

$$\rho = -2e^{-\int \operatorname{tr} A dt}, \quad p = e^{-\gamma \int \operatorname{tr} A dt} P(I) - P_0 / \gamma,$$

где $P' \leq 0$, $I = (\vec{x} \cdot S\vec{x} + 2\vec{v} \cdot \vec{x})e^{-(1-\gamma) \int \text{tr} A dt} - 2 \int \vec{u}_0 \cdot \vec{v} e^{-(1-\gamma) \int \text{tr} A dt} dt$, γ – постоянная. .

Переход к лагранжевым переменным осуществляется по формулам

$$A = M'M^{-1}, \quad \vec{u}_0 = \vec{x}_0 - M'M^{-1}\vec{x}_0.$$

Таким образом, исходная модель может быть записана в лагранжевых переменных в виде

$$M^T M'' = L|M|^{1-\gamma}, \quad M^T \dot{\vec{x}}_0'' = \vec{l}|M|^{1-\gamma},$$

где $|M|$ – определитель матрицы M , L, \vec{l} – постоянная матрица и вектор. Данная система имеет интеграл завихренности $K = M^T M' - M'^T M$ [2].

Как известно уравнения газовой динамики с общим уравнением состояния допускают 11 параметрическую группу преобразований. Следовательно рассматриваемая модель так же ее допускает. При этом функции, задающие эту модель так же, преобразуются. Переноса данные преобразования на модель в лагранжевых переменных, выясняется, что постоянные матрица L и вектор \vec{l} могут быть заданы в более простом виде. Так матрицу можно выбрать диагональной., а у вектора считать некоторые координаты единичными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юлмухаметова Ю.В. Подмодели газовой динамики с линейным полем скоростей// Сибирские электронные математические известия, Новосибирск: Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Т.9(2012), С. 208-226.
2. Dyson J. F. Dynamics of a spinning gas cloud // J.Math.Mech. 1968.vol. 18, №1. pp 91–101. 2017, 170с.

Юсупова Н. И.^а, Богданов М. Р.^б

^а *yusupova.ni@ugatu.su*, ^б *bogdanov_marat@mail.ru*

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

СНИЖЕНИЕ РИСКА ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ АРИТМИИ У ПЛОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В данном исследовании рассматривается задача обработки данных кардиограмм плода с использованием методов машинного обучения. Предложен подход оценки частоты сердечных сокращений у плода с целью определения риска развития аритмии. В отличие от известных подходов обучающая выборка содержит вейвлеты, полученные в результате анализа различных форм аритмии, в том числе таких предикторов внезапной сердечной смерти, как фибрилляция предсердий. Предложенный подход позволяет обнаруживать двухсекундные паттерны аритмии на фоне многочасовых записей ЭКГ.

Мониторинг ЭКГ плода жизненно важен для получения полезной информации о состоянии плода. Острая аритмия плода может привести к сердечной недостаточности. Раннее выявление аритмии плода имеет важное значение. В настоящее время единственной жизненно важной функцией плода, которую можно эффективно регистрировать является электрическая активность сердца. Ее измерение основано на обнаружении последовательных сердечных сокращений и определении временных интервалов между ними (так называемые интервалы RR, далее обозначаемые как T_{RR}). Одним из наиболее часто используемых методов измерения ЧСС является метод ультразвуковой импульсной доплерографии, который обнаруживает сердечные сокращения по движениям сердца плода. Сложная структура огибающей доплеровского сигнала очень затрудняет точное распознавание зубцов R. В зависимости от того, какой эпизод признан репрезентативным для данного сердечного сокращения, могут быть получены разные значения длительности цикла. Это влияет на точность измерения периода T_{RR} , что имеет решающее значение для анализа вариабельности ЧСС. При кратковременной изменчивости

(характеризующей колебания интервалов между сокращениями) даже незначительные искажения значений TRR вызывают значительные ошибки в расчете показателей, характеризующих эту изменчивость. Запись электрокардиограммы плода (ФЭКГ) может осуществляться двумя способами: прямым методом – возможным только во время родов, когда спиральный электрод прикрепляется непосредственно к головке плода, и непрямой – когда измерительные электроды располагаются на животе матери. Прямой метод обеспечивает «чистый» сигнал ЭКГ, в котором можно легко отфильтровать низкочастотные помехи. Однако наиболее перспективным с клинической точки зрения является непрямой метод, который имеет два принципиальных преимущества перед прямым: он неинвазивен и может применяться во время беременности. Основной проблемой его практической реализации является интерферирующая материнская электрокардиограмма (МЕСГ), во много раз превышающая интересующий сигнал по амплитуде.

Подавление доминирующего компонента абдоминальных сигналов материнской ЭКГ является решающим этапом абдоминальной электрокардиографии плода. Амплитуда МЕСГ составляет порядка 200 мкВ, что намного выше, чем амплитуда ЭКГ плода (FECG) (около 20 мкВ). Частотный диапазон комплекса QRS матери охватывает диапазон от 10 до 40 Гц, тогда как комплекс QRS плода — от 20 до 40 Гц. При анализе спектра плотности мощности абдоминального сигнала можно отметить, что в общей части материнский QRS по-прежнему является доминирующим компонентом, что делает невозможным подавление МЭКГ простой фильтрацией. Для подавления материнской ЭКГ вначале в общем кардиосигнале выделяют реперные точки материнской ЭКГ, после чего по ним формируется образ PQRST-комплексов материнской ЭКГ, который затем вычитается из абдоминальной ЭКГ вокруг реперных точек. Для обеспечения высокой точности при вычитании следует устранить ошибку неточной синхронизации шаблонов. Поскольку амплитуда материнских комплексов QRS изменяется от сокращения к сокращению, паттерн (представляющий собой среднее значение

по ряду комплексов) должен каждый раз масштабироваться, чтобы должным образом соответствовать последовательным комплексам. После вычитания материнской ЭКГ выделяются QRS-комплексы плода.

В качестве наборов данных для обучения использовались общедоступные базы оцифрованных фетальных ЭКГ. *Non-Invasive Fetal ECG Arrhythmia Database* (<https://physionet.org/content/nifeadb/1.0.0/>), *Abdominal and Direct Fetal ECG Database* (<https://physionet.org/content/adfecgdb/1.0.0/>)

База данных абдоминальной и прямой электрокардиограммы плода, содержит многоканальные записи электрокардиограммы плода (FECG), полученные от 5 разных рожениц в сроке от 38 до 41 недели беременности. Каждая запись включает четыре дифференциальных сигнала, полученных от живота матери, и эталонную прямую электрокардиограмму плода, зарегистрированную с головы плода. Формат данных: EDF/EDF+, частота дискретизации: 1 КГц, разрядность: 16 бит.

Вычислительный эксперимент включает в себя предварительную обработку абдоминальной ЭКГ, выделение паттернов материнской ЭКГ, вычитание паттернов материнской ЭКГ, выделение паттернов ЭКГ плода, определение аритмии. Целью предварительной обработки кардиосигнала является устранение шумов, снижение размерности анализируемых данных и выделение признаков, необходимых для классификации. Для борьбы с шумами обычно используются различные фильтры. Наилучшим решением для устранения шумов и снижения размерности исходных данных является применение фильтра Баттерворта с частотой среза 50 Гц. Для выделения признаков из кардиосигнала большинство авторов предлагает выделять кардиоциклы и синхронизировать их по R-пикам.

Выделение PQRST-комплексов обычно начинается с поиска R-пика. Решение этой задачи усложняется значительной вариабельностью электрокардиограмм разных испытуемых. Кроме того, нет единого мнения относительно того, что считать началом пика. Широкое распространение получили такие методы выделения PQRST-комплексов, как метод

математической морфологии и алгоритм Пана и Томкинса. Выбор алгоритма выделения PQRST-комплексов влияет на количество корректно распознанных кардиоциклов и минимальное время регистрации ЭКГ, достаточное для уверенного распознавания электрокардиограмм. Было установлено, что процент корректно распознанных кардиоциклов описанными методами варьирует от 87 до 92%, время распознавания примерно 10 секунд. Был разработан алгоритм выделения PQRST-комплексов на основе амплитудного порога с использованием метода бутстреп. Для удаления артефактов использовался 95%-й доверительный интервал. Доля корректно выделенных PQRST-комплексов составляла 95%, минимальное время регистрации сигнала сократилось до 5-7 секунд.

Для вычитания паттернов материнской ЭКГ использовалась автокорреляционная функция. Для выделения паттернов ЭКГ плода использовался оригинальный алгоритм – амплитудный порог вместе с бутстреп.

Для решения задачи выявления аритмии использовали цифровые биомаркеры. В качестве цифровых биомаркеров были использованы ортогональные вейвлеты, полученные из двухсекундных образцов ECG Fragment Database for the Exploration of Dangerous Arrhythmia. Решение задачи классификации выполняли с помощью метода Category boost разработано оригинальное программное обеспечение, написанное на языке Python.

Заключение

В результате проведенных исследований было выявлено 98% R-пиков на ЭКГ плода, удалось выявить различные формы аритмии с эффективностью 99% (метрика Accuracy).

Предложенный подход позволяет обнаруживать различные формы аритмии у плода, что при своевременном лечении позволит снизить риск развития тяжелых заболеваний сердечно-сосудистой системы у плода.