

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

А. А. ЧЕРНОУСОВ

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ДВС

(конспект лекций)

Уфа 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	<b>4</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>6</b>
<b>1. ПРОЦЕССЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ГАЗООБМЕНА</b>	<b>12</b>
1.1. Показатели ДВС на установившемся режиме .....	12
1.2. Безразмерные показатели газообмена ДВС .....	14
1.3. Процессы газообмена в 4-тактных ДВС .....	17
1.4. Процессы газообмена в 2-тактных ДВС .....	18
1.5. Факторы и эффекты, ограничивающие наполнение .....	19
1.6. Теоретический предел наполнения без волновых эффектов .	20
Вопросы для самоконтроля .....	21
<b>2. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО НАПОЛНЕНИЮ СХЕМЫ ТРАКТОВ</b>	<b>22</b>
2.1. Оптимальная схема настроенного ГВТ 4-тактного ДВС ...	22
2.2. Оптимальные схемы настроенных ГВТ 2-тактных ДВС ....	22
Вопросы для самоконтроля .....	24
<b>3. МОДЕЛИ И ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ</b> ..	<b>25</b>
3.1. Модели пространственного течения рабочего тела .....	25
3.2. Модели одномерного течения рабочего тела .....	27
3.3. Связь КН с параметрами настроенного ГВТ 4-тактного ДВС	29
3.4. Оптимизация 4-тактного ДВС оптимальной схемы по КН ..	30
3.5. Связь КН с параметрами настроенного ГВТ 2-тактного ДВС	30
3.6. Оптимизация 2-тактного ДВС оптимальной схемы по КН ..	30
Вопросы для самоконтроля .....	31
<b>4. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ</b>	<b>32</b>
4.1. Волны конечной амплитуды .....	32
4.2. Взаимодействие волн с элементами трубопроводов .....	34
Вопросы для самоконтроля .....	37
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>39</b>

<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ</b> .....	<b>40</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>41</b>

# СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

## Основные обозначения

$p$  — давление, Па;

$T$  — температура, К;

$u$  — скорость потока, м/с;

$c$  — скорость звука, м/с;

$s$  — уд. энтропия, Дж/(кг · К);

$p_0$  — давление в атмосфере, Па;

$T_0$  — температура в атмосфере, К;

$n$  — частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>;

$G_{\text{топл}}$  — расход топлива через двигатель, кг/с;

$G_{\text{в}}$  — расход воздуха через двигатель, кг/с;

$\alpha_c = G_{\text{в}}/(G_{\text{топл}} l_0)$  — суммарный коэфф. избытка воздуха;

$\alpha$  — коэфф. избытка воздуха в РК (для двигателей с внешним смесеобразованием — совпадает с  $\alpha_c$ );

$l_0$  — стехиометрическое отношение (воздуха к топливу);

$H_u$  — низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;

$\varphi_a, p_a, T_a, (Y_1)_a = (m_1)_a/m_a$  — угол ПКВ и параметры состояния рабочей смеси в цилиндре в момент окончания процессов газообмена (для 4-тактных двигателей — к моменту закрытия впускного клапана);

$[(m_1)_a \times \varphi], (m_1)_a$  — масса свежего заряда, поступившего к рабочей камере за цикл, и ее часть, оставшаяся там к моменту окончания процесса газообмена;

$\eta_v$  — коэффициент наполнения;

$\varphi$  — (1) коэффициент продувки; (2) угол ПКВ, °;

$\eta_{\text{и}} = 1/\varphi$  — коэффициент использования продувочного воздуха;

$\gamma_r$  — коэффициент остаточных газов;

$N_i$  — индикаторная мощность, Вт;

$N_e$  — эффективная мощность, Вт;

$\eta_i$  — индикаторный КПД;

$\eta_e$  — эффективный КПД;

$\eta_{\text{м}}$  — механический КПД.

## Основные аббревиатуры

- ВКА — волна конечной амплитуды;  
ВМТ — верхняя мертвая точка;  
ГВТ — газовоздушный тракт;  
ГДФ — газодинамические функции;  
ГРМ — газораспределительный механизм;  
ЗС — закон (законы) сохранения;  
КК — кривошипная камера;  
КН — коэффициент наполнения  $\eta_v$ ;  
КП — коэффициент продувки  $\varphi$ ;  
КПД — коэффициент полезного действия;  
НГДЭ — нестационарные газодинамические эффекты;  
НМТ — нижняя мертвая точка;  
ПС — продукты сгорания;  
ПЧ — проточная часть (здесь: ПЧ ГВТ);  
РК — рабочая камера;  
СЗ — свежий заряд;  
С/О — смесеобразование;  
ТНВД — топливный насос высокого давления;  
УВКА — уединенная ВКА;  
УС — уравнение состояния;  
 $0-D$ ,  $1-D$  и  $3-D$  — нуль-, одно- и трехмерный (по числу координат).

## ВВЕДЕНИЕ

Данный конспект предназначен для изучения теоретического материала дисциплины «Нестационарные газодинамические эффекты в ДВС» студентами УГАТУ, обучающимися по направлению подготовки бакалавров 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» (профиль подготовки «Двигатели внутреннего сгорания»).

**Основные сведения.** *Нестационарные газодинамические эффекты* (НГДЭ) в значительной степени определяют мощностные, экономические, экологические и др. показатели поршневых ДВС [1]. Важно прогнозировать воздействие НГДЭ на процессы газообмена, чтобы на этой основе оптимально использовать потенциал НГДЭ в рабочем процессе двигателя [3]. Современные мат. модели и численные методы позволяют выполнять соответствующие расчеты на ЭВМ [8, 9, 10].

Классическое описание НГДЭ основано на модели движения рабочего тела в проточной части газоздушного тракта в одномерном приближении. Такое описание раскрывает сущность НГДЭ как процессов переноса массы, импульса и энергии продольными волнами в потоке сжимаемого рабочего тела в протяженном канале. Модели, на основе допущения об одномерности нестационарного потока, достаточно адекватны для решения ряда задач; на них же сделан акцент в теоретическом материале дисциплины.

Итак, действие НГДЭ объясняется переносом энергии и расходом ее на перемещение и сжатие масс («частиц») рабочего тела в основном *волнами конечной амплитуды* (ВКА). Уединенная волна конечной амплитуды (УВКА) — идеализированный процесс, более простой и удобный для теоретического анализа и объяснения отдельных НГДЭ и их проявлений.

Такая волна может задаваться в начальных (и граничных) условиях как возмущение одного из *инвариантов Римана* [5, 11]. На практике волна генерируется при перемещении перегородки, разделяющей две полости (применительно к газодинамике ДВС перегородка — либо клапан, либо поршень). Генерируется волна и при удалении перегородки, разделяющей полости с разным давлением газа. В полости с большим давлением газа генерируется волна разрежения, а в полости с меньшим давлением — волна сжатия. Исходная форма волны зависит от законов движения или открытия перегородки.

Движение УВКА по трубопроводу постоянного сечения — простейший процесс, в котором проявляются НГДЭ. Так, при движении непрерывно изменяется форма («профиль») волны — с разными скоростями движутся точки профиля волны с разными значениями параметров состояния, скорости потока и *инварианта Римана*. А именно, скорости движения точек профиля УВКА с большой точностью равны  $(u + c)$  для движущейся вправо и  $(u - c)$  для движущейся влево УВКА, где  $u$  — местная *скорость потока* (частиц вещества),  $c$  — местная *скорость звука*. Поэтому точки профиля УВКА с большими значениями  $|u \pm c|$  (и др. параметров состояния) движутся быстрее. Со временем «голова» УВКА сжатия преобразуется в скачок уплотнения, движущийся по газу со сверхзвуковой скоростью [5, 11]. «Хвост» УВКА сжатия начинает отставать, и волна растягивается по трубопроводу. В случае УВКА разрежения, наоборот, скачок уплотнения формируется в «хвосте» волны. В этом случае сверхзвуковой будет скорость скачка относительно набегающих на него частиц газа в волне разрежения; как следствие, «хвост» в виде скачка отстает от «головы», и УВКА также растягивается.

Теоретически (если не учитывать трение и теплообмен со стенкой, а также скачки уплотнения) переносимая волной энергия может оставаться неизменной. Практически же трение и теплообмен уменьшают интенсивность УВКА и переносимую волной энергию.

Трение в трубопроводе (т. к., в сущности, это *внутреннее* трение в потоке) — процесс, при котором часть энергии потока переходит в тепловую энергию частиц среды, а в стенки отводится часть импульса потока. Таким образом, трение (если не учитывать теплоотдачу) ведет к возрастанию уд. энтропии  $s$  частиц среды (и к уменьшению их уд. работоспособности и амплитуды волн).

Теплоотдача от потока к стенкам имеет место, например, в *выпускных* каналах ДВС где, очевидно, она снижает работоспособность частиц рабочего тела, энергию в волнах и интенсивность НГДЭ. Теплоотдача от стенок *впускных* каналов, как минимум, снижает плотность *свежего заряда*.

Пересечение скачков уплотнения частицами газа увеличивает их энтропию, что также приводит к потерям работоспособности и к уменьшению энергии, заключенной между «головой» и «хвостом» УВКА.

Взаимодействие волн с открытым концом канала (трубопровода) сопряжено с истечением или втеканием в него среды. В случае уединенных *волн сжатия* имеет место истечение, и если истечение дозвуковое, то давление на срезе трубопровода примерно равно окружающему давлению, а величины др. параметров и *скорости потока* соответствуют расширению частиц до этого давления. При взаимодействии с открытым концом трубопровода уединенных *волн разрежения* в канал втекает газ из окружающей среды. В том и в другом случае формируется *отраженная волна*, знак которой («+» — сжатие, «-» — разрежение) противоположен знаку *исходной волны*. Если же сечение среза частично перекрыто (например, запорным органом), расход при истечении или втекании ограничивается, что сказывается на амплитуде и даже знаке отраженной волны.

Таким образом, независимо знака исходной волны, при ее взаимодействии с открытым концом трубопровода формируется отраженная волна противоположного знака. От закрытого конца трубопровода волны отражаются с тем же знаком.

Прохождение плавного изменения сечения трубопровода волной, независимо от ее знака, формирует отраженную волну. Соотношение амплитуд и энергий в *прошедшей волне* и в *отраженной волне* определяется соотношением площадей сечений трубопровода. Сумма полных энергий *прошедшей* и *отраженной* волн равна полной энергии *исходной* волны (если не учитывать путевые потери). По аналогии с отражением волны от открытого и закрытого концов трубопровода, прохождение волной плавного *расширения* трубопровода формирует отраженную волну противоположного знака, а плавного *сужения* трубопровода — волну того же знака.

Воздействие НГДЭ на процессы газообмена 4-тактных ДВС можно представить так. В конце такта расширения открывается выпускной клапан, в результате чего в выпускной системе генерируется *волна сжатия* (т. к. давление в цилиндре к моменту открытия клапана больше давления в выпускном трубопроводе). Волна движется к открытому концу выпускного трубопровода и отражается от него в виде *волны разрежения*, которая движется в сторону цилиндра и, достигнув его, обеспечивает дополнительную *очистку* цилиндра от отработавших газов и понижение давления в нем ниже атмосферного. На данном этапе необходимо согласование длины выпускных трубопроводов и длительности открытия



выпускного клапана — для обеспечения качественной очистки и закрытия выпускного клапана сразу после прихода *волны разрежения*.

В конце такта выпуска или в начале такта впуска 4-тактного ДВС открывается впускной клапан, и во впускном трубопроводе генерируется *волна разрежения* (т. к. давление в цилиндре в момент открытия клапана меньше давления в трубопроводе). Волна движется к открытому концу впускного трубопровода и отражается от него в виде *волны сжатия*, которая движется к цилиндру и, достигнув его, обеспечивает дополнительное нагнетание свежего заряда в цилиндр — *дозарядку*, повышая давление в нем выше атмосферного. На данном этапе также необходимо согласование длины впускных трубопроводов и длительности открытия впускного клапана — для обеспечения качественной дозарядки и закрытия выпускного клапана сразу после прихода *волны сжатия*.

(Схема ГВТ, в котором действие НГДЭ происходит описанным образом, показана на рис. 2.1.)

Воздействие НГДЭ на процессы газообмена 2-тактных ДВС можно представить так. При движении поршня к НМТ открывается выпускное окно и генерируется волна сжатия. Прохождение волной плавного расширения выпускного трубопровода (рис. 2.2) формирует отраженную волну разрежения, которая достигает цилиндра и способствует *очистке* его от *продуктов сгорания* и *продувке* его *свежим зарядом*. Далее исходная волна, проходя через плавное сужение трубопровода, формирует отраженную волну сжатия, которая возвращает в цилиндр часть свежего заряда, попавшего в выпускной трубопровод при продувке. На данном этапе необходимо согласование длины и диаметра каждого из участков выпускного трубопровода и длительности открытия выпускного окна — для обеспечения качественной очистки цилиндра волной разрежения, возврата большей части потерянного свежего заряда и закрытия выпускного окна сразу после прихода волны сжатия. Если используется тупиковая выпускная труба с боковой щелью, волна сжатия, возвращающая свежий заряд в цилиндр, образуется при отражении исходной волны от закрытого конца выпускного трубопровода.

Впускной трубопровод двухтактного ДВС мало интересен с т. зр. использования НГДЭ. Впускное окно, как правило, закрывается раньше выпускного. Свежий заряд, который возможно дополнительно поместить в цилиндр используя прошедшую по впускному трубопроводу волну сжатия, выйдет из цилиндра через открытое выпускное окно.

Для всех случаев верны следующие закономерности — чем больше перепад диаметров между цилиндром и трубопроводом, т. е. чем меньше относительный диаметр трубопровода, тем больше амплитуда исходной и соответственно отраженной волн, и тем мощнее проявят себя описанные выше эффекты. С др. стороны, диаметры трубопроводов и сечения клапанов должны обеспечить необходимый расход воздуха. Отсюда следует задача подбора оптимальных как длин, так и диаметров впускного и выпускного трубопроводов, пропускающих необходимый расход воздуха при оптимальных амплитудах ВКА.

Слишком большие амплитуды исходных (и, соответственно, отраженных волн) сопряжены с дополнительными потерями — неполнотой использования работы газов при расширении, дополнительными насосными потерями, а также местными и путевыми потерями на клапанах и в каналах соответственно. В связи с этим оптимизация ГВТ только по одному показателю — *коэффициенту наполнения*, может привести к нерациональным результатам из-за чрезмерного снижения индикаторного КПД (в частности, из-за слишком раннего открытия выпускного клапана).

Согласование конструктивных размеров каналов тракта с фазами газообмена для той или иной частоты вращения вала носит название «настройки» ГВТ. Основная особенность двигателя с «настроенным» ГВТ — резкое увеличение наполнения по скоростной характеристике вблизи частоты вращения, на которую произведена настройка, и наоборот. Это вызвано тем, что даже при небольшом отклонении частоты вращения коленчатого вала от частоты настройки происходит рас-согласование между движением волн и законами открытия газообменных клапанов и окон, и НГДЭ перестают существенно увеличивать массовое наполнение.

Такой вид скоростной характеристики является приемлемым для многих применений ДВС, работающих преимущественно на одном режиме. В случаях, когда требуется высокий крутящий момент в широком диапазоне частот вращения вала, используют различные системы, позволяющие изменять геометрические размеры трубопроводов и/или углы открытия и закрытия клапанов. Тщательная настройка подобных систем позволяет обеспечить практически неизменно высокое массовое наполнение в относительно широком диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя.

**Структура конспекта.** Основной текст конспекта поделен на разделы — в соответствии с целью изучения дисциплины и темами из ее рабочей программы.

**Рекомендуемая литература.** При изучении дисциплины рекомендуется использовать книги из [списка литературы](#) на с. 41.

В конце данного конспекта имеется [предметный указатель](#), которым также рекомендуется пользоваться при изучении дисциплины.

В данном *PDF*-файле работают гиперссылки<sup>1</sup> на разделы текста, формулы, рисунки и пункты [списка литературы](#). Из гиперссылок на главы и разделы состоит Оглавление, продублированное также в закладках Содержания *PDF*-файла.

Обновленный [файл](#) данного конспекта можно загрузить с [сайта](#) кафедры ДВС УГАТУ.

---

<sup>1</sup>Вернуться в исходное место документа после «посещения» элемента текста по гиперссылке позволяет комбинация клавиш [Alt] + [←] или др. навигационные средства программы, используемой для его просмотра.

# 1. ПРОЦЕССЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ГАЗООБМЕНА

В гл. изложены теоретические положения и соображения о влиянии НГДЭ в ДВС на их характеристики. Подчеркнуты ограничения — так, рассмотрение НГДЭ в ДВС ограничено *установившимися режимами*, а для объяснения их воздействия на процессы в ПЧ ДВС и (тем самым — на характеристики) привлекаются мат. модели процессов разной размерности, однако описывающие *рабочее тело* ДВС как 2-компонентную смесь *свежего заряда* (СЗ) и *продуктов сгорания* (ПС).

Вводятся обозначения и уравнения теории ДВС, раскрывающие связь показателей газообмена ДВС с их характеристиками. Протекание газообмена в ДВС рассмотрено с т. зр. использования НГДЭ для повышения наполнения — динамический («волновой») наддув ДВС — с учетом особенностей 2-тактного и 4-тактного циклов.

## 1.1. Показатели ДВС на установившемся режиме

На установившемся режиме [1, с. 230] работа ДВС характеризуется постоянными средними за цикл показателями — расходами воздуха  $G_B$  и топлива  $G_{\text{топл}}$ , суммарным коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_c = G_B / (G_{\text{топл}} l_0)$ , эфф. мощностью  $N_e$  и др. (рис. 1.1).

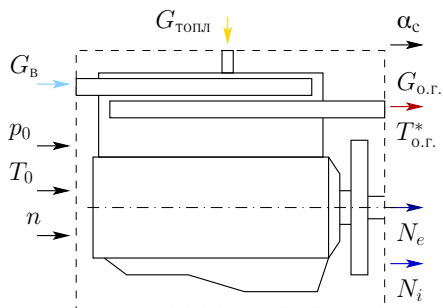


Рис. 1.1. Параметры режима и показатели ДВС

Характеристики ДВС — зависимости его показателей от параметров, однозначно задающих установившийся режим его работы [1]. Для ДВС с любым числом тактов и типом *смесеобразования* (С/О) параметр, характеризующий скоростной режим работы — частота вращения коленчатого вала  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$  (рис. 1.1). Мощность  $N_e$  (от нулевой до мак-

симальной для заданной частоты  $n$ ) получают, воздействуя на орган (органы) управления, изменяющие подачу воздуха и/или топлива.

Так, в дизелях (внутреннее С/О) такой орган управления традиционно изменял положение рейки ТНВД, что весьма однозначно определяло цикловую подачу топлива  $m_{\text{топл ц}}$  и (при  $n = \text{idem}$ )  $G_{\text{топл}}$ , и  $\alpha_c = G_{\text{в}}/(G_{\text{топл}}l_0)$ . И в других системах с изменением мощности непосредственным воздействием на топливopодачу (т. е., на  $m_{\text{топл ц}}$  и  $G_{\text{топл}}$ ) можно считать  $n$  и  $G_{\text{топл}}$  параметрами, определяющими режим работы, а прочие средние за цикл величины — показателями работы ДВС при заданных условиях и режиме:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{в}}(n, G_{\text{топл}}), \alpha_c = \alpha_c(n, G_{\text{топл}}), N_e = N_e(n, G_{\text{топл}}) \text{ и т. д.}$$

В двигателях же с внешним С/О — с управлением располагаемыми  $N_e$  (или  $M_e$ ) двигателя изменением *количества* (т. е. расхода), а не «качества» (т. е. состава) смеси — орган управления воздействует на дроссельную заслонку во вп. системе (угол ее поворота  $\varphi_{\text{др}}$  и т. п.).

Постоянство показателей работы двигателей (установившийся режим: как по  $n$ , так и по нагрузке) при снятии характеристик поддерживается автоматикой моторного стенда. При этом давление  $p_0$  и температура  $T_0$  в атмосфере бокса фиксируются в протоколе измерений, и можно считать  $p_0$  и  $T_0$  также параметрами режима<sup>1</sup> (рис. 1.1).

Используя для краткости «векторное» обозначение для набора показателей, можем записать:

$$[G_{\text{в}}, G_{\text{топл}}, \alpha_c, N_e, \dots N_i, \dots]^T = \mathbf{f}(p_0, T_0, n, \dots).$$

Расход воздуха через двигатель с внутренним С/О, где *свежий заряд* (СЗ) — воздух:

$$G_{\text{в}} = G_1 = (m_1)_a \cdot \varphi \cdot i \cdot f,$$

где  $i$  — число идентичных *рабочих камер* (РК),  $f = n/(30\tau)$  — частота рабочих циклов в каждой из них (определяемая частотой вращения  $n$  и числом тактов  $\tau = 2$  или  $\tau = 4$ ),  $(m_1)_a$  — масса СЗ, поданного в цикле к каждой из (гипотетически работающих в идентичных условиях) РК

<sup>1</sup>Альтернатива — оперировать стандартными параметрами состояния воздуха  $p_{0\text{ пр}}$  и  $T_{0\text{ пр}}$  и приведенными (к стандартным атмосферным условиям) величинами  $n_{\text{пр}}$ , ...,  $G_{\text{в пр}}$ ,  $N_{e\text{ пр}}$  и др.

и оставшегося там к моменту окончания газообмена;  $\varphi$  — коэффициент продувки, учитывающий потери СЗ в выпускную систему.

Расход воздуха через двигатель с внешним С/О (в котором СЗ — горючая смесь):

$$G_B = \left( \frac{G_B}{G_1} \right) \cdot G_1 = \left( \frac{\alpha l_0}{\alpha l_0 + 1} \right) \cdot (m_1)_a \cdot \varphi \cdot i \cdot f,$$

(Здесь и далее всегда имеем в виду установившийся режим; также пренебрегаем утечками через неплотности деталей ЦПГ.)

Массу СЗ  $(m_1)_a$ , участвующую в процессе внутри РК при закрытых органах газообмена, выражают, перемножая характерную плотность СЗ  $\rho_K^*$ , рабочий объем РК  $V_h$  и коэффициент наполнения  $\eta_v$ , (определением которого выступает, например, выражение (1.1)):

$$(m_1)_a = \rho_K^* V_h \eta_v.$$

Эффективная (рис. 1.1) и индикаторная мощности:

$$N_e = (G_{\text{топл}} H_u) \cdot \eta_e = N_i \cdot \eta_m, \quad N_i = (G_{\text{топл}} H_u) \cdot \eta_i,$$

где  $\eta_e$ ,  $\eta_m$  и  $\eta_i = \eta_e/\eta_m$  — безразмерные показатели совершенства процессов в ДВС, вместе и по отдельности характеризующие такие аспекты, как потери топлива (в составе СЗ) при продувке РК, потери энергии на осуществление газообмена, на неполное преобразование химической энергии топлива в инд. работу, и мех. потери (на трение в механизмах ДВС и на привод его агрегатов).

Величины же  $\eta_v$ ,  $\varphi$  (и др. безразмерные показатели совершенства процессов газообмена) обсуждаются далее в п. 1.2.

## 1.2. Безразмерные показатели газообмена ДВС

Степень совершенства процессов газообмена в ДВС оценивается (в разных аспектах) перечисленными ниже безразмерными показателями. Эти величины в теории ДВС служат для выражения «цикловой» массы СЗ  $(m_1)_a$  и количества *остаточных газов* (т. е. ПС) —  $M_r = (M_2)_a$  в РК по результатам газообмена. Как и «размерные» показатели газообмена  $G_B$  и  $G_1$ , безразмерные показатели газообмена ДВС определяют конструкция и параметры режима его работы.

Коэффициент наполнения (КН) определим как

$$\eta_v = \frac{(m_1)_a}{\rho_k^* V_h}, \quad (1.1)$$

где  $(m_1)_a = m_1(\varphi_a)$  — часть подаваемой за один рабочий цикл к РК массы СЗ, остающаяся в РК к моменту завершения газообмена;  $\rho_k^* V_h$  — характерная масса СЗ, определяемая как произведение *рабочего объема* РК  $V_h$  и характерной плотности СЗ, определяемой из УС СЗ по полным давлению и температуре в оговоренном сечением («перед впускными органами газообмена»):

$$\rho_k^* = \rho_1(p_k^*, T_k^*).$$

Величина КН  $\eta_v$ , таким образом, — относительная («обезразмеренная») масса СЗ в РК в процессе при закрытых органах газообмена.

Такое определение делает КН «интегральным» показателем совершенства процессов газообмена, определяемых, помимо режима работы, конструктивным исполнением.

Для ДВС без волновой «настройки» (т. е. без НГДЭ) — исполнением, в первую очередь, впускных каналов и клапанов (окон). Для таких двигателей (в частности, многоцилиндровых двигателей с наддувом) за характерное сечение («перед впускными органами») принимают сечение входа во вп. коллектор — сечение «к» площадью  $F_k$  (в котором измеряют ср. параметры потока  $p_k$ ,  $T_k^*$  и по ним находят  $p_k^*$ ). Т. е. определение (1.1) позволяет для таких ДВС оценивать совершенство процессов очистки и наполнения РК отдельно от процессов в др. агрегатах и элементах ПЧ (компрессор, воздушный фильтр и т. п.).

Нужно отметить, что на  $\eta_v$  соответствующим образом влияют также и законы подъема вып. клапанов, и вып. каналы, и противодавление на выпуске. А также и волновые явления во вп. и вып. системах.

Нужно отметить также, что в литературе (напр., [1, с. 60]) КН определяется обычно по статическим параметрам — как  $\rho_k = \rho_1(p_k, T_k)$ . Представляется все же более обоснованным делать это через полные параметры; это позволяет адекватно учесть площадь  $F_k$ , а величинам  $p_k^*$  и  $T_k^*$  придать смысл параметров состояния СЗ в условном резервуаре перед входом во впускной коллектор.

Для случая «атмосферного» ДВС гоночного типа, впускная система которого не содержит агрегатов, кроме индивидуальных «настроен-

ных» вп. каналов, разумно это сечение брать в окружающей атмосфере:  $p_k^* = p_0$  и  $T_k^* = T_0$ . В этом случае

$$\rho_k^* = \rho_v(p_0, T_0) = \frac{p_0}{RT_0},$$

и часто  $R$  берут как для сухого воздуха:  $R = R_{с.в.} = 287,054$  Дж/(кг · К).

Коэффициент продувки (КП). Этот коэффициент равен отношению массы СЗ или воздуха, подаваемой к РК, к той части этой массы, которая остается в РК к моменту завершения газообмена:

$$\varphi = \frac{[(m_1)_a \cdot \varphi]}{(m_1)_a}. \quad (1.2)$$

Таким образом, КП (или обратная ему величина — *к-т использования продувочного воздуха*:  $\eta_{и} = 1/\varphi$  [1, с. 62]) характеризует отдельно такой аспект процессов газообмена, как потери СЗ или воздуха при продувке РК.

Коэффициент подачи (англ. *delivery ratio*) представляет собой «обезразмеренную» массу СЗ, подаваемого к одной РК за один рабочий цикл; этот  $k\text{-}t^2$ , очевидно, есть произведение КП (1.2) и КН (1.1).

$$\varphi\eta_v = \frac{[(m_1)_a \cdot \varphi]}{\rho_k^* V_h}.$$

Коэффициент остаточных газов выражается [1, с. 61] отношением количества *остаточных газов* (англ. *residual gases*)  $M_r$ , т. е. числа молей ПС  $M_2$ , к числу молей СЗ  $M_1$  в РК в момент завершения газообмена ( $\varphi = \varphi_a$ ):

$$\gamma_r = \left( \frac{M_2}{M_1} \right)_a = \frac{m_r = m_2(\varphi_a)}{m_1(\varphi_a)} \cdot \frac{W_1 = W_{СЗ}}{W_2 = W_{ПС}}.$$

Данный показатель характеризует газообмен ДВС в плане полноты очистки РК от ПС в предыдущем цикле.

---

<sup>2</sup>В [1, с. 62] назван *к-том избытка продувочного воздуха* и обозначен  $\varphi_k$  или  $\varphi_0$ .



### 1.3. Процессы газообмена в 4-тактных ДВС

В процессах *газообмена* ПС в РК сменяются *рабочей смесью*, состоящей из СЗ с примесью ПС в предыдущем цикле (циклах).

Этапы газообмена, их роль в едином РП и влияние на показатели вначале рассмотрим для случая рабочего цикла из  $\tau = 4$  тактов (рис. 1.2). Будем анализировать отличия в протекании процесса в (а) ДВС с «настроенным» ГВТ (где существенна дозарядка РК свежим зарядом под действием волны сжатия на впуске), и в (б) ДВС того же типоразмера, но с предельно короткими вп. и вып. каналами (т.е. с ГВТ, в котором действие НГДЭ отсутствует). Кривая давления в РК для (б) показана на рис. 1.2 штрихпунктирной линией.

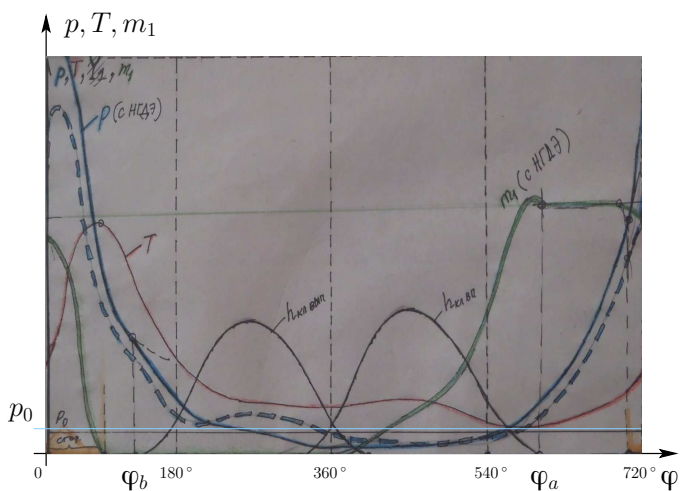


Рис. 1.2. Диаграмма рабочего цикла 4-тактного ДВС; этапы газообмена: *свободный выпуск, принудительный выпуск, продувка, впуск, дозарядка, обратный выброс*

Основная особенность процессов газообмена 4-тактных ДВС — выполнение в течение 2 из 4 тактов рабочей камерой функции продувочного насоса. Соответственно, период газообмена «растянут» существенно более чем на  $360^\circ$  ПКВ).

Связанные с этим резкие отличия в организации газообмена (как без использования, так и с использованием НГДЭ для *дозарядки*) отмечены в конце следующего п. 1.4.

## 1.4. Процессы газообмена в 2-тактных ДВС

Основная особенность процессов газообмена 2-тактных ДВС — нужда в устройстве, которое бы выполняло функцию продувочного насоса. Такими устройствами служат *центробежный компрессор* или *объемный нагнетатель*, а в мало- и микролитражных 2-тактных ДВС — подпоршневая полость, т. е. *кривошипная камера* (КК).

Сравним и проанализируем газообмен в вариантах: (а) с «настройкой» вып. системы и (б) без «настройки» (с коротким или отсутствующим вып. каналом: график  $p(\varphi)$  — штрихпунктирная линия на рис. 1.3).

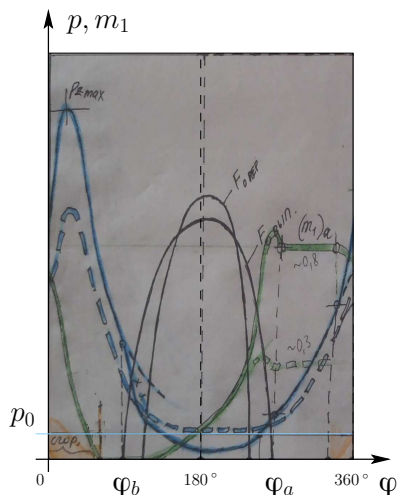


Рис. 1.3. Диаграмма рабочего цикла 2-тактного ДВС; этапы газообмена: *свободный выпуск, продувка, дозарядка, прямой выброс*

Особенности газообмена 2-тактных ДВС (сравн. с 4-тактными):

- отсутствие тактов выпуска и впуска (в 4-тактном ДВС за эти такты РК работает как продувочный насос);
- относительно малое время, отводимое на процесс газообмена и его периоды (выпуск, продувка и возможная дозарядка);
- относительно «широкие» фазы выпуска, т. е. большие «потерянные» ход поршня и объем РК;
- продувка свежим зарядом происходит при большом объеме РК (при положении поршня вблизи НМТ);

- дозарядка (в «настроенном» ГВТ) РК — из вып. (а не вп.) системы, т. е. *располагаемую работу* ПС, истекающих из РК в ходе свободного выпуска, при  $\tau = 2$  можно использовать для дозарядки более непосредственно (т. е. потенциально более эффективно).

### 1.5. Факторы и эффекты, ограничивающие наполнение

Очевидный геометрический фактор, ограничивающий массовое наполнение РК ДВС свежим зарядом — располагаемые объемы в РК: рабочий  $V_h$  и объем камеры сгорания  $V_c$ . Также массовое наполнение во многом определяют работа агрегатов наддува (при их наличии) и действие НГДЭ («волновых» эффектов) — если существенно проявляются.

Но, в любом случае, фундаментальные физ. эффекты в потоке рабочего тела (динамика жидкости и газа, действие молекулярного и турбулентного переноса), неизбежно приводят к известным непроизводительным *потерям* энергии (*эксергии*, максимальной работы). Потери эти выступают факторами, существенно ограничивающими массовое *наполнение*.

Предлагается следующая классификация потерь:

- потери на местных сопротивлениях: отрывные и др.;
- потери «путевые»: на трение и теплоотдачу;
- потери от перемешивания:
  - свежего заряда (СЗ) с продуктами сгорания (ПС);
  - воздуха с топливом: (а) газообразным; (б) жидким.

Действительно, *эффекты диссипации* в потоке рабочего тела энергии приводят к непроизводительным потерям, которые и ограничивают массовое наполнение рабочих камер ДВС свежим зарядом.

Если бы (гипотетически) не действовали эффекты, приводящие (в реальности) к потерям в процессе, то для «*атмосферных*» *двигателей* с любым числом тактов, с внутренним С/О и без НГДЭ достигался бы теоретический предельный КН  $\eta_v$ , равный 1 (п. 1.6).

А для ДВС с интенсивным использованием НГДЭ для дозарядки теоретический предел не определен; на практике же, интенсивность волновых («резонансных») эффектов, как и достижимое за их счет значение КН  $\eta_v > 1$ , ограничивается потерями, а точнее, — тем, насколько удалось уменьшить потери обработкой элементов «настроенного» ГВТ.

## 1.6. Теоретический предел наполнения без волновых эффектов

Нетрудно показать, что предельные значения массы свежего заряда в РК двигателей с предельно короткими вп. и вып. каналами соответствуют величины КН, равные: единице ( $\eta_v = 1$ ) для 4-тактных ( $\tau = 4$ ) и  $\eta_v = \frac{\varepsilon+1}{\varepsilon} > 1$  — для 2-тактных ( $\tau = 2$ ) ДВС.

Действительно, если бы процессы в ГВТ были обратимыми, т. е., не было бы (см. п. 1.5):

- отрывных потерь<sup>3</sup> на вп. (для  $\tau = 4$ ), и на вп. и переп. (для  $\tau = 2$ ) органах газообмена;
- трения и теплоотдачи (от потока к стенкам и от стенок к потоку);
- перемешивания СЗ и ПС,

то параметры состояния в объеме СЗ при  $\varphi = \varphi_a$  (по кр. мере, при внутреннем С/О) соответствовали бы параметрам в окружающей среде, а газообмен мог бы завершаться в НМТ, т. е. масса СЗ в цикле составляла бы:

- для ( $\tau = 4$ )-тактного ДВС:  $(m_1)_a = \rho_0 V_h$ ;
- для ( $\tau = 2$ )-тактного ДВС:  $(m_1)_a = \rho_0 V_{\max}$  (продувочный насос!);

т. е. КН был бы, соответственно,  $\eta_v = 1$  и  $\eta_v = \frac{V_{\max}}{V_h} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}$  (и  $\eta_v = 1$  — при продувке из КК), при таком *гипотетическом* протекании процессов газообмена (рис. 1.4).

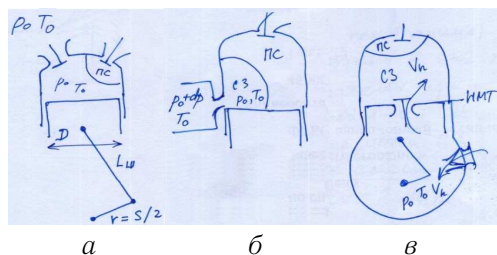


Рис. 1.4. Газообмен без НГДЭ при: (а)  $\tau = 4$ ; (б и в)  $\tau = 2$

<sup>3</sup>Представим себе предельно медленный темп газообмена: при  $n \rightarrow 0$ .

## Вопросы для самоконтроля

1. Параметры установившегося режима работы и интегральные показатели ДВС.
2. Связь показателей ДВС с показателями качества газообмена.
3. Безразмерные показатели качества газообмена: коэффициент наполнения  $\eta_v$ ; коэффициент продувки  $\varphi$ ; коэффициент подачи ( $\eta_v\varphi$ ); коэффициент остаточных газов  $\gamma_r$ .
4. Процессы газообмена в 4-тактных ДВС (и их особенности).
5. Процессы газообмена в 2-тактных ДВС (и их особенности).
6. Эффекты и потери, ограничивающие массовое наполнение рабочих камер ДВС свежим зарядом (потери на местных сопротивлениях: отрывные и др., потери на трение и теплоотдачу, потери при перемешивании: а) воздуха с топливом; б) свежего заряда с продуктами сгорания).
7. Теоретический предельный коэффициент наполнения 4-тактного ДВС (в отсутствие волновых эффектов и необратимых процессов).
8. Теоретический предельный коэффициент наполнения 2-тактного ДВС (в отсутствие волновых эффектов и необратимых процессов).

## 2. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО НАПОЛНЕНИЮ СХЕМЫ ТРАКТОВ

### 2.1. Оптимальная схема настроенного ГВТ 4-тактного ДВС

Схема ГВТ 4-тактного ДВС, оптимальная в смысле использования НГДЭ для дозарядки, т. е. для получения максимальной массы СЗ в РК ( $(m_1)_a \rightarrow \max$ ) без спец. агрегатов наддува, показана на рис. 2.1.

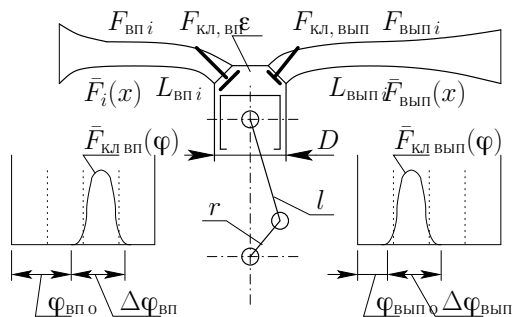


Рис. 2.1. Параметризованный «настроенный» ГВТ 4-тактного ДВС

Процессы, приводящие к дозарядке в этой схеме, описаны на с. 8.

Задача об оптимальных условиях и величине показателя массового наполнения  $(m_1)_a$  — при оптимальной «настройке» (т. е. оптимальном согласовании длин и профилей «настроенных» каналов с фазами и законами открытия клапанов, для данного режима, а точнее — при подборе также оптимального скоростного режима) описана в п. 3.3 на с. 29.

### 2.2. Оптимальные схемы настроенных ГВТ 2-тактных ДВС

Схема ГВТ 2-тактного ДВС, предлагаемая в качестве оптимальной для получения максимальной массы СЗ в РК ( $(m_1)_a \rightarrow \max$ ) при использовании НГДЭ для дозарядки, показана на рис. 2.2.

Показанный ГВТ (см. рис. 2.2) содержит профилированный выпускной трубопровод (который оптимально «настраивают» на скоростной режим работы, выбирая и фазы газообмена). Показана схема двигателя с *противоположно движущимися поршнями* (ПДП), чем подчеркнута, что при хорошей реализации прямоточной продувки РК (а не петлевой) очистка РК и наполнение ее свежим зарядом с применением НГДЭ могут обеспечить наибольшее удельное массовое наполнение (оцениваемое величиной  $\eta_v$ ).

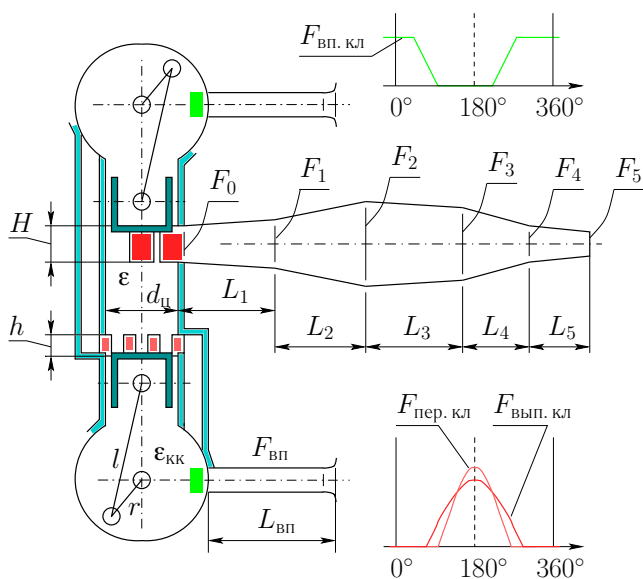


Рис. 2.2. Параметризованный «настроенный» ГВТ 2-тактного ДВС

На впуске в кривошипные камеры показаны «настроенные» впускные каналы, открываемые некоторыми золотниками (с оптимально подбираемыми параметрами); есть основания считать, что применение вместо золотникового распределения здесь оптимально спроектированных обратных пластинчатых клапанов существенно увеличивает располагаемую подачу воздуха в двигатель.

Процессы, приводящие к дозарядке в этой схеме, описаны на с. 9.

Задача об оптимальных условиях и величинах показателей массового наполнения при оптимальной «настройке» такого ГВТ (см. рис. 2.2) описана в п. 3.5 на с. 30.

Альтернатива показанной на рис. 2.2 выпускной трубе — аналогичный, но тупиковый, выпускной трубопровод. В некотором среднем сечении последнего выполняют боковое отверстие («щель») для отвода газов, которое, как предполагают, обеспечивает более выгодное профилирование отраженных волн (рис. **НЕТ**). А тупиковый (не проточный) участок за щелью, поскольку он заполнен газами с невысокой температурой, получается более коротким.

### Вопросы для самоконтроля

9. Оптимальная схема ГВТ 4-тактного ДВС для макс. использования НГДЭ для наполнения. Модификация схемы для многоцилиндровых ДВС.
10. Оптимальные схемы ГВТ 2-тактных ДВС для макс. использования НГДЭ для наполнения: *а)* с прямым и обратным конусами; *б)* с тупиковым трубопроводом и «щелью».
11. Схемы продувки рабочей камеры двухтактного двигателя. Понятие КН при статической продувке.
12. Схемы наполнения кривошипных камер двухтактных ДВС с кривошипно-камерной продувкой.



### 3. МОДЕЛИ И ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

#### 3.1. Модели пространственного течения рабочего тела

Процесс во всем ГВТ ДВС как в единой области может быть достаточно детально описан лишь как пространственно трехмерное ( $3-D$ , от англ. *three-dimensional*) течение смеси многих компонентов с учетом действительно протекающих между компонентами многочисленных химических реакций.

Существенная особенность столь детальных (фундаментальных)  $3-D$  моделей процессов — то, что невозможно их непосредственное применение к расчетам процессов (из-за разномасштабности эффектов в потоке, адекватно описываемых детальными  $3-D$  моделями: турбулентность, мультифазность и др.).

Применяются же в расчетах *прикладные*  $3-D$  модели несколько «огрубленного» вида, для которых детальные  $3-D$  модели служат фундаментальной основой.

Для иллюстрации вида детальных («фундаментальных») моделей приведем лишь исходные уравнения  $3-D$  модели, способной описать процесс в ГВТ как газофазное течение с химическими реакциями. И далее —  $3-D$  модель частного вида на ее основе, способную описать процесс в ГВТ как течение смеси из двух химически инертных компонентов (свежего заряда и продуктов сгорания).

Исходные уравнения детальной модели газофазного «реагирующего» течения:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_k dV = - \int_F [\rho_k \mathbf{v}_k] \cdot \mathbf{n} dF + \int_V W_k \omega_{k\Sigma} dV, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV = - \int_F [\rho u_i u_j + \delta_{ij} p - \Pi''_{ij}] \cdot \mathbf{n} dF + \int_V \sum_{k=1}^K (\rho_k \mathbf{a}_k) dV, \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho E dV = & - \int_F \left[ \rho \mathbf{v} \left( h + \frac{|\mathbf{v}|^2}{2} \right) + \sum_{k=1}^K \rho_k \mathbf{v}_{k\perp} h_k^* + \mathbf{q} - \mathbf{v} \cdot \Pi''_{ij} \right] \times \\ & \times \mathbf{n} dF + \int_V \sum_{k=1}^K [\rho_k (\mathbf{v}_k \cdot \mathbf{a}_k) + Q_r] dV. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Уравнения (3.1)–(3.3) 3-D модели показаны в балансовой («интегральной») форме.

Покажем также следующие из них (в отсутствие разрывов ЗП) УЧП; для краткости — в тензорных обозначениях (в развернутом виде — см. в [12, пп. 2.1.4]):

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_{kj} Y_k}{\partial x_j} = W_k \omega_{k\Sigma}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i + \delta_{ij} p - \Pi''_{ji}) = \rho g_i, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j h^* + \sum_{k=1}^K \rho_k u_{kj} h_k^* + q_j - u_i \Pi''_{ij} \right) = \rho u_i g_i + Q_r. \quad (3.6)$$

Далее, если пренебречь (как допущение) массовыми силами и излучением, а также химическими реакциями, да и вообще рассматривая РТ как состоящее только из  $K = 2$  «суррогатных» компонентов: *свежего заряда* ( $k = 1$ ) и *продуктов сгорания* ( $k = 2 = K$ ), получаем из (3.4)–(3.6) — как специальный случай:

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_{kj} Y_k}{\partial x_j} = 0, \quad k = 1, 2,$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i + \delta_{ij} p - \Pi''_{ji}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j h^* + \sum_{k=1}^2 \rho_k u_{kj} h_k^* + q_j - u_i \Pi''_{ij} \right) = 0.$$

т. е. модель, полезную для решения частных задач теории газообмена, т. к. она не способна адекватно описать происходящее в РК в периоды топливоподачи и сгорания.

Анализ размерностей величин в УЧП при  $K = 2$  — см. в [4, с. 14].

### 3.2. Модели одномерного течения рабочего тела

Течение во всем ГВТ ДВС может быть приближенно описано как «одномерное», т. е. такое, в котором все характеристики среды (параметры состояния и скорость) зависят, гипотетически, от двух *независимых переменных* (НП) —  $x$  и  $t$ , т. е. продольной координаты и времени.

Существенная особенность  $1-D$  моделей процессов — то, что такая модель процесса переходит в  $0-D$  модель для отдельных элементов ГВТ, описываемых как емкости, и даже в квазистатическую — для границ между элементами; замыкают уравнения (единой)  $1-D$  модели процесса в ГВТ (как для подобластей, соответствующих  $1-D$  и  $0-D$  моделям элементов, так и на их границах) полуэмпирическими «подмоделями», предполагающими (локально) квазистационарный характер проявлений отдельных сторон процесса.

Другая особенность — нетребовательность к ресурсам ЭВМ, что позволяет проводить по  $1-D$  моделям проектировочные расчеты; однако, «огрубленный» характер и, как следствие, — неуниверсальность  $1-D$  моделей для разных объектов и режимов, делает желательной предварительную ее «калибровку» по экспериментальным данным.

Модели течения рабочих тел в одномерном приближении строятся на тех же двух исх. гипотезах [11], что и  $3-D$  модель. Дополнительно принимается гипотеза об одномерности, т. е. что *зависимые переменные* (ЗП) — функции НП вида  $[p, T, Y_1, \dots, u]^T = \mathbf{p}(x, t)$ . Модель  $1-D$  течения в ГВТ, обсуждаемая ниже, и ее следствия, основаны (в качестве доп. исх. гипотезы) еще и на допущении, что молекулярный (и, что важнее, — турбулентный) перенос по  $x$  можно не учитывать.

**Интегральная форма** исх. уравнений модели ([11], [12, пп. 2.1.3]):

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} \rho Y_k F dx = - [(\rho u Y_k) F]_{x_1}^{x_1+\Delta x}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} \rho u F dx = - [(\rho u^2 + p) F]_{x_1}^{x_1+\Delta x} + \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} \left( p \frac{dF}{dx} + \tau_w \Pi \right) dx, \quad (3.8)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} \rho E F dx = - [(\rho u E + p u) F]_{x_1}^{x_1+\Delta x} + \int_{x_1}^{x_1+\Delta x} q_w \Pi dx. \quad (3.9)$$

**Дифференциальная форма.** Уравнениям  $1-D$  модели в форме (3.7)–(3.9) эквивалентна (при отсутствии разрывов ЗП) запись тех же ЗС в форме УЧП:

$$\frac{\partial \rho_k F}{\partial t} + \frac{\partial \rho_k u F}{\partial x} = 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \rho u F}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) F}{\partial x} = p \frac{dF}{dx} + \tau_w \Pi, \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \rho E F}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E + p u) F}{\partial x} = q_w \Pi. \quad (3.12)$$

Присутствующие в уравнениях  $1-D$  модели локальные (средние по периметру  $\Pi$  сечения) и мгновенные же значения касательного напряжения  $\tau_w(x, t)$  и плотности потока теплоты  $q_w(x, t)$  на стенке должны быть выражены уравнениями «подмодели» путевых потерь.

Для анализа и применения в прикладных моделях и алгоритмах численных расчетов полезны и «недивергентные» формы УЧП; важнейшая — характеристическая форма уравнений  $1-D$  модели, показанная ниже для случая однокомпонентной смеси и далее, с привлечением ряда упрощений, — простейшая система УЧП для *инвариантов Римана*.

**Характеристическая форма** уравнений  $1-D$  модели, полученная из (3.10)–(3.12) для частного случая однокомпонентной ( $K = 1$ ) смеси, имеет вид [11, п. 4.1] набора из трех УЧП:

$$\frac{d^\pm u}{dt} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{d^\pm p}{dt} = b^\pm, \quad \frac{d^0 p}{dt} - c^2 \frac{d^0 \rho}{dt} = \frac{\partial p}{\partial s} \cdot b_3 = b^0,$$

где  $b^\pm = \pm \frac{c}{\rho} \cdot b_1 + b_2 \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial s} \cdot b_3$ ,  $b_1 = -\frac{\rho u}{F} \frac{dF}{dx}$ ,  $b_2 = \frac{\tau_w \Pi}{\rho F}$ ,  $b_3 = \frac{1}{T} \frac{dq}{dt}$ .

Для получения замкнутой системы на основе этих УЧП могут привлекаться достаточно произвольное УС и подмодель путевых потерь.

**Характеристическая форма (простейший частный случай).**

Системы УЧП в характеристической форме связывают между собой бесконечно малые приращения зависимых переменных в «характеристических» (характерных?) направлениях в  $(x, t)$ . Комплексные независимые переменные (*инварианты Римана* и уд. *энтропия*  $s$ ) — неизменны в этих направлениях, но только при выполнении 3 дополнительных условий: постоянства сечения  $F$ , отсутствия путевых потерь ( $\tau_w = 0$  и  $q_w = 0$ ), а также неизменности уд. энтропии:  $s = s(x, t) = s_0$ .

Ограничиваясь еще и моделью совершенного газа (в качестве дополнительного упрощающего предположения) получают, как весьма частный случай, модель *изоэнтропического*<sup>1</sup> 1-D течения такого газа:

$$\frac{d^\pm I_\pm}{dt} = 0, \quad s(x, t) = s_0. \quad (3.13)$$

где  $I_\pm = \frac{2}{\gamma-1}c \pm u$  — *инварианты Римана* в соверш. газе [11, п. 4.3].

Модель (3.13) применима для анализа НГДЭ в трубопроводных системах с газообразным рабочим телом.

### 3.3. Связь КН с параметрами настроенного ГВТ 4-тактного ДВС

Функциональную связь массового наполнения с параметрами (конструкторскими и режимными) 4-тактного ДВС с ГВТ оптимальной для «настройки» схемы, получим, «параметризуя» ГВТ, показанный на рис. 2.1; связь в размерных величинах:

$$\begin{aligned} (m_1)_a = (m_1)_a (p_0, T_0, n, \\ D, S = 2r, l, V_c, \\ \varphi_{\text{вп } 0}, \Delta\varphi_{\text{вп}}, h_{\text{кл вп max}}, \\ \varphi_{\text{вып } 0}, \Delta\varphi_{\text{вып}}, h_{\text{кл вып max}}, \\ d_{\text{вп } 0}, d_{\text{вп } 1}, L_{\text{вп } 1}, \dots, d_{\text{вп } 3}, L_{\text{вп } 3}, \\ d_{\text{вып } 0}, d_{\text{вып } 1}, L_{\text{вып } 1}, \dots, d_{\text{вып } 3}, L_{\text{вып } 3} ). \end{aligned} \quad (3.14)$$

После *анализа размерностей*, т. е., приведения к общему виду связи для безразмерных величин:

$$\begin{aligned} \eta_v = \frac{(m_1)_a}{\rho_0 V_h} = \eta_v (M_\Pi = \frac{Sn/30}{\sqrt{\gamma RT_0}}, S/D, \lambda = \frac{r}{l}, \varepsilon' = V_h/V_c = \varepsilon - 1, \\ \varphi_{\text{вп } 0}, \Delta\varphi_{\text{вп}}, \bar{h}_{\text{кл вп max}} = h_{\text{кл вп max}}/D, \\ \varphi_{\text{вып } 0}, \Delta\varphi_{\text{вып}}, \bar{h}_{\text{кл вып max}} = h_{\text{кл вып max}}/D, \\ \bar{d}_{\text{вп } 0} = d_{\text{вп } 0}/D, \bar{d}_{\text{вп } 1}, \bar{L}_{\text{вп } 1}, \dots, \bar{d}_{\text{вп } 3}, \bar{L}_{\text{вп } 3}, \\ \bar{d}_{\text{вып } 0} = d_{\text{вып } 0}/D, \bar{d}_{\text{вып } 1}, \bar{L}_{\text{вып } 1}, \dots, \bar{d}_{\text{вып } 3}, \bar{L}_{\text{вып } 3} ), \end{aligned} \quad (3.15)$$

где  $\rho_0 = p_0/(RT_0)$  — плотность в окружающей среде,  $V_h = \pi D^2 S/4$  — рабочий объем.

<sup>1</sup>Строго говоря, течения *гомоэнтропического*: с однородным полем  $s(x, t) = s_0$ .

### 3.4. Оптимизация 4-тактного ДВС оптимальной схемы по КН

Рассмотрим задачу поиска экстремума (максимума) ЦФ (3.15).

При решении задачи как задачи безусловной оптимизации, ряд «оптимизируемых» величин:  $\varepsilon'_{\min}$ ,  $(S/D)_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$ , примут неприемлемые для практики значения (подумайте: малые или большие? почему?). Поэтому разумнее исключить их из величин для оптимизационного подбора, присвоив им некоторые допустимые значения. Также нужно принять соответствующее режиму полной мощности конкретное значение  $\kappa$ -та избытка воздуха  $\alpha$  в РК, а лучше — задать связь  $\alpha = \alpha(n)$ .

Задача может быть решена по достаточно быстросчетной,  $I-D$  модели процессов в ГВТ. Решение, естественно, будет зависеть также и от калибровок подмоделей сгорания, характеристик органов газообмена и т. д.

Такая задача решалась, например, в [9] (при  $\varepsilon = 8,5$ ;  $\lambda = 0,32$ ;  $S/D = 0,80$  и  $\alpha = 1,05$ ) подобрано оптимальное сочетание др. параметров (3.15), включая «режимный» ( $M_{\text{п}} = 0,0362$ ), для которого получено:

$$\eta_v = 1,426 \quad (\text{при } \varphi = 1,196).$$

### 3.5. Связь КН с параметрами настроенного ГВТ 2-тактного ДВС

Функциональную связь КН с (конструктивными и режимными) параметрами 2-тактного ДВС с ГВТ оптимальной для «настройки» схемы; «параметризуя» ГВТ, показанный на рис. 2.2, получим (сразу в общем виде связи  $\eta_v$  с определяющими величинами):

$$\eta_v = \eta_v (M_{\text{п}}, \bar{S} = \frac{S}{D}, \lambda = \frac{r}{l}, \varepsilon', \bar{L}_{\text{вп}}, \bar{F}_{\text{вп}}, \Phi_{\text{вп0}}, \Phi_{\text{вп3}}, \varepsilon'_{\text{кк}}, \bar{h}, \bar{b}, \bar{H}, \bar{B}, \bar{L}_1, \dots, \bar{L}_5, \bar{d}_0, \dots, \bar{d}_5), \quad (3.16)$$

где  $V_h = \pi D^2 S / 2$  — рабочий объем секции ДВС с ПДП.

### 3.6. Оптимизация 2-тактного ДВС оптимальной схемы по КН

Рассмотрим задачу поиска экстремума (максимума) ЦФ (3.16).

Такая задача решалась, например, в [8]; подобрано оптимальное сочетание параметров (3.16); включая «режимный» ( $M_{\text{п}} = 0,0198$ ), для которого (при  $\varepsilon = 15$ ;  $\lambda = 0,285$ ;  $S/D = 0,86$  и  $\alpha = 1,2$ ) получено:

$$\eta_v = 1,100 \quad (\text{при } \eta_{\text{и}} = 0,848).$$

## Вопросы для самоконтроля

13. Модель пространственного течения рабочего тела в ГВТ ДВС. Двухкомпонентное приближение (свежая смесь/воздух + продукты сгорания).
14. Модели течения рабочего тела в ГВТ ДВС в одномерном приближении: *а)* в интегральной форме; *б)* в дифференциальной форме; *в)* в характеристической форме (общего вида); и *г)* в характеристической форме (через инварианты Римана: для частного случая течения совершенного газа с  $s = s_0$ ).
15. Двухзонная модель продувки *рабочей камеры* (РК) двухтактного ДВС. Эмпирическая характеристика продувки РК.
16. Функц. связи (в параметрах подобия; общий вид; упрощение) показателей наполнения ДВС с геометрически подобными ГВТ.
17. Общий вид функциональной связи показателей газообмена с конструктивными и режимными параметрами 4-тактного ДВС с ГВТ оптимальной схемы.
18. Общий вид функциональной связи показателей газообмена с конструктивными и режимными параметрами 2-тактного ДВС с ГВТ оптимальной схемы.
19. Задача о предельном коэффициенте наполнения 4-тактного ДВС с ГВТ оптимальной схемы. Решение: оценка (по *I-D* модели) предельного значения коэффициента наполнения  $\eta_v$ .
20. Задача о предельном коэффициенте наполнения 2-тактного ДВС с ГВТ оптимальной схемы. Решение: оценка (по *I-D* модели) предельного значения коэффициента наполнения  $\eta_v$ .

## 4. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

В данном разделе обсуждаются собственно НГДЭ, в «чистом» виде, т. е. для случая и на примере движения уединенной («изолированной»?) *волны конечной амплитуды* (ВКА), включая движение по трубопроводу переменного сечения и по трубопроводу, содержащему местные сопротивления, разветвления и ступени лопаточных машин.

Рассмотрение (анализ и объяснение каждого НГДЭ) ограничено рамками  $I$ - $D$  приближения. При этом, для простоты и наглядности анализа эффектов, рассмотрение ограничено идеализированным гипотетическим объектом — *уединенной* ВКА. Такая ВКА по существу характеризуется как гомоэнтропическое течение газа (между «головой» и «хвостом» волны). Факторы же и эффекты, приводящие при движении действительных волн к потерям (т. е. *диссипации*) энергии в волне, предлагается (с той же целью) считать в анализе второстепенными (учитывая, что они уже обсуждались в п. 1.5).

### 4.1. Волны конечной амплитуды

Начнем с того, что в реальных трубопроводах (например, в «настроенных» впускных и выпускных каналах ДВС) имеет место реальный процесс, который (в рамках  $I$ - $D$  приближения) характеризуют как нелинейные продольные колебания столба газовой смеси, для которого существенны генерация, движение (с наложением), прохождение и отражение волн конечной амплитуды от любых элементов ПЧ ГВТ (в частности, концов труб), нарушающих плавность сечения  $F(x)$ .

Словосочетание «конечная амплитуда» подчеркивает существенные, т. е. далеко за пределами акустического диапазона (а именно: на десятки процентов), отклонения параметров состояния РТ от средних [11, п. 4.4]. При таких интенсивностях волновых процессов скорость движения РТ по трубе составляет заметную долю от местной скорости звука (т. е. число  $M$  не близко к 0).

**Уединенные волны конечной амплитуды.** В строгом смысле *уединенной* (изолированной) ВКА может быть, если состояние среды, по которой она распространяется, однородно, а *эффекты диссипации* в потоке (гипотетически) не действуют. Тогда УВКА — гомоэнтропическое (с однородным полем уд. энтропии  $s$ ) течение газа или капельной жидкости.



Примем при анализе НГДЭ за основу волны такого (гипотетического) вида [11, п. 4.5]. Для количественных оценок используем модель (3.13) такого течения в приближении совершенного газа, а также (полученные из этой модели) *газодинамические функции* (ГДФ) нестационарного торможения [11, п. 4.7].

Можно показать, что УВКА характеризуется (и может быть теоретически задана в НУ или ГУ) возмущением того или иного знака одного из инвариантов Римана:  $I_+$  или  $I_-$ ; это дает 4 комбинации; случай волны сжатия, движущейся вправо ( $\Delta I_+ > 0$ ), показан на рис. 4.1.

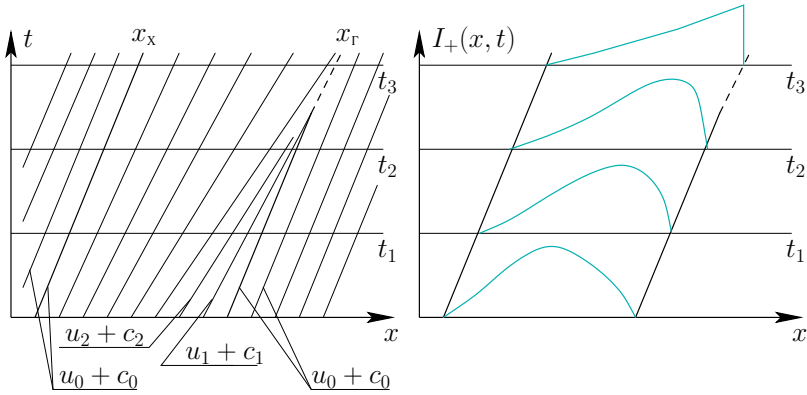


Рис. 4.1. Схема движущейся вправо волны (исходно: УВКА) сжатия

Др. особенности движения УВКА также описаны в [11, п. 4.5].  
Здесь приведем краткий перечень НГДЭ при движении УВКА:

- длина УВКА  $|x_r - x_x|$  (т. к.  $dx_r/dt = dx_x/dt = c_0$ ), ее амплитуда (в терминах  $\Delta I_{\pm \max} = I_{\pm \max} - I_{\pm 0}$  или  $\Delta I_{\pm \min}$ , а также  $\Delta p_{\max}$  или  $\Delta p_{\min}$  и т. д.), а также заключенная в ней избыточная энергия (всех видов) — постоянны, в силу (3.13) и отсутствия эффектов *диссипации*;
- профиль УВКА изменяется, соответственно ее «знаку», в направлении образования скачка уплотнения — в «голове» волны сжатия ( $\Delta p_{\max} > 0$ ) или же в «хвосте» волны разрежения ( $\Delta p_{\min} < 0$ );
- после образования скачка уплотнения:

- волна, строго говоря, перестает быть УВКА; частицы за скачком получают приращение энтропии, соответствующее «потерям на удар» при прохождении скачка;
- амплитуда волны ( $\Delta I_{\pm \max}$  или  $\Delta I_{\pm \min}$ , а также  $\Delta p_{\max}$  или  $\Delta p_{\min}$  и т. д.) начинает снижаться и, ввиду сверхзвуковой скорости скачка (относительно частиц перед скачком), волна удлиняется (см. рис. 4.1);
- энергия в волне, в связи с потерями на скачке, также начинает снижаться.

Потери при движении реальных изолированных волн, как и потери в сложных волновых течениях (рассматриваемые в  $1-D$  приближении как *путевые* и *местные* потери), приводят к ослаблению НГДЭ в связи с ослаблением интенсивности волн. В этой связи следует говорить о КПД передачи энергии волнами — от устройств, где волны генерируются, до устройств, где они отражаются и/или поглощаются. При этом предпочтительно «полезную» энергию в волне вычислять не по уд. полной энергии  $E = e + u^2/2$ , а по *эксергии* — уд. максимальной работе:

$$ex^* = l_{\max}^* = (e - e_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + p_0 \cdot (v - v_0) + \frac{u^2}{2},$$

где разности уд. вн. энергий и энтропий<sup>1</sup>, а также уд. объемов, — равны:

$$e - e_0 = c_v \cdot (T - T_0), \quad s - s_0 = -R \ln \left[ \frac{p}{p_0} \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right], \quad v - v_0 = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}.$$

Генерирование ВКА (для УВКА — возможное теоретически: путем задания возмущения соответствующего инварианта Римана в НУ и/или ГУ газодинамических задач), на практике имеет место вследствие срабатывания запорных органов и при движении поршней (в каналах и емкостях). (Проанализируйте процессы, приводящие к образованию исходных волн сжатия и разрежения в выпускных и впускных каналах ДВС с числом тактов  $\tau = 2, 4$  в рабочем цикле.)

## 4.2. Взаимодействие волн с элементами трубопроводов

Соответствующие эффекты разберем на примере взаимодействия исходных УВКА с плавными переходами профиля  $F(x)$  трубопровода,

---

<sup>1</sup>Для совершенного газа.

а также с элементами трубопроводных систем, которые (в  $I$ - $D$  приближении) рассматривают как скачки площади сечения  $F(x)$ .

Во всех таких случаях результатом взаимодействия будут прошедшая и отраженная волны конечной амплитуды (и сопровождающие такое взаимодействие вторичные эффекты).

**Взаимодействие УВКА с плавным изменением сечения.** При взаимодействии исходной УВКА с плавным переходом с увеличением площади сечения канала («прямым» конусом) образуется *прошедшая* и *отраженная* волны; при этом знак прошедшей волны соответствует знаку исходной волны, а знак отраженной — изменяется на противоположный. При взаимодействии УВКА с плавным уменьшением площади («обратным» конусом) знаки и прошедшей, и отраженной волн соответствует знаку исходной. Профиль перехода оказывает влияние на процесс, и на профиль двух образующихся волн и, в частности, на длину отраженной. *Диссипативные эффекты* (в идеале) отсутствуют. Тогда суммарная избыточная энергия (всех видов) в образованных волнах равняется энергии в исходной волне.

**Взаимодействие УВКА со скачком сечения.** В пределе, при внезапном (скачкообразном) уменьшении или увеличении  $F(x)$  (на скачке сечения канала) образуются также *прошедшая* и *отраженная* волны соответствующих знаков. Но, в отличие от плавных переходов, в данном случае взаимодействие волны со скачком площади сечения  $F(x)$ , (описываемое, в  $I$ - $D$  приближении, моделями местных потерь), приводит к ослаблению *прошедшей* и *отраженной* волн, и к образованию за скачком сечения зоны неподвижного газа с повышенной *энтропией* частиц<sup>2</sup>.

**Взаимодействие УВКА с закрытым и открытым концами трубы.** Случай, когда за граничным сечением расположена емкость (где в  $I$ - $D$  формально  $F(x) \rightarrow \infty$ ), был рассмотрен еще в курсе МЖГ. Там на основе модели (3.13) показано, что от открытого конца простые и УВКА отражаются волнами противоположного знака, от закрытого конца — волнами, знак которых совпадает со знаком исходной волны.

Открытый конец трубы (где отражается УВКА разрежения и среда перетекает из емкости в канал) оформляют в виде плавного входа.

---

<sup>2</sup>В этой зоне расположены частицы (микрообъемы) среды, которые прошли (с той или иной скоростью) местное сопротивление;  $I$ - $D$  модель описывает такое перетекание как адиабатное с приростом энтропии.

При отражении УВКА сжатия его оформляют в виде простого среза, т. к. здесь (при течения в емкость) неизбежен отрыв потока и (формально) потери полного давления, т. е.  $\sigma = p_0/p_T^* = \pi(M, \gamma) < 1$  (при  $|M| \leq 1$ ).

В общем случае (например, когда местное сопротивление — орган газообмена) характеристика местного сопротивления существенно определяет знак и профиль отраженной волны, а местные потери (особенно на режимах с большими расходами и перепадами давлений) существенно ограничивают интенсивность волн и действие НГДЭ в системе.

**Взаимодействие УВКА со ступенями лопаточных машин.** Модели ступени компрессора или турбины (в  $I-D$ ) позволяют описать прохождение нестационарного потока через ступень [5, с. 93] (см. также [11, п. 4.11]) с учетом (а) подвода в поток или отвода из него энергии в форме работы; (б) *диссипации* (необратимых потерь) энергии в процессе — с учетом универсальных характеристик лопаточных машин. В результате взаимодействия УВКА со ступенью лопаточной машины также образуются прошедшая и отраженная волны, но знаки (и профили в целом) этих волн определяются *линией режимов* в поле характеристики ступени, т. е. грубо говоря, насколько относительно малым оказывалось эффективное проходное сечение машины для того или иного элемента исх. волны. Энергетические аспекты взаимодействия волны с лопаточными машинами следует рассматривать с учетом подвода или отвода работы, а также потерь при сжатии или расширении в ступенях.

Не следует пренебрегать НГДЭ-ми в системах с агрегатами наддува. В частности, нужно рассматривать турбины как работающие (в общем случае) в «импульсном» режиме, а преобразование импульсов — учитывать как в элементах выпускного тракта, так и в самой турбине, включая «двухзаходные» турбины.

Далее рассмотрено взаимодействие УВКА с элементами трубопроводных систем, на которых имеет место разделение и/или слияние потоков.

**Взаимодействие с разветвлением канала («тройником»).** После взаимодействия УВКА с тройником [5, с. 112] (см. также [11, пп. 4.12.1]) образуются две прошедшие и одна отраженная волны. Знак и профиль отраженной волны обусловлен соотношением сечений на тройнике и его конструктивным оформлением. Местные потери энергии приводят к тому, что суммарная энергия всех волн после отражения не превышает энергии исходной волны.

Волновые процессы определяют, например, особенности рабочего процесса *нестационарного эжектора*.

**Взаимодействие с боковым отверстием («щелью»).** Вид разветвления, в котором вместо одного из трех каналов имеется емкость. Возможны случаи втекания из емкости и истечения в нее, с разделением или же слиянием потоков [5, с. 104] (см. также [11, пп. 4.12.2]).

Особенностями отражения волн от такого отверстия определяется, например, *«диодный» эффект*; проявляется данный эффект в том, что (при определенном отношении  $F_{\text{щ}}$  к  $F_{\text{T}}$ ) профиль и амплитуда прошедшей волны определяется профилем и *знаком(!)* исходной. Так, если исходная — волна сжатия, то профиль прошедшей волны практически повторяет (с учетом потерь) профиль исходной, в противном же случае (т. е. при исходной волне разрежения) «щель» практически «не пропускает» волну в канал, являющийся продолжением канала с исх. волной.

### Вопросы для самоконтроля

21. Волны конечной амплитуды (ВКА). Уединенные ВКА.
22. Генерирование уединенных волн конечной амплитуды: *а)* при срабатывании запорного органа на конце трубопровода и *б)* подвижным поршнем.
23. Движение уединенной волны конечной амплитуды в канале с постоянным сечением (сохранение энергии; путевые потери при движении).
24. Взаимодействие уединенных волн конечной амплитуды с плавным изменением сечения канала — «прямым» и «обратным» конусами (отражение, прохождение).
25. Взаимодействие (отражение, прохождение) уединенной волны конечной амплитуды с местом сопряжения двух трубопроводов (скачком сечения).
26. Взаимодействие (отражение) уединенной волны конечной амплитуды от *а)* закрытого конца трубопровода; *б)* местного сопротивления на конце трубопровода; *в)* открытого конца трубопровода.
27. Взаимодействие уединенной волны конечной амплитуды со ступенями лопаточных машин (отражение, прохождение).

28. Взаимодействие уединенной волны конечной амплитуды с разветвлением канала (сохранение превращение энергии, потери полного давления при прохождении и отражении волн от разветвления).
29. Взаимодействие уединенной волны конечной амплитуды с боковым отверстием («щелью»). Объяснение «диодного» эффекта (с графиками давления в исходной волне, прошедшей и отраженной волнах).
30. Подход к оценке эффективности НГДЭ для сжатия и перемещения свежего заряда в ДВС (см. с. [34](#)).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конспекте лекций по дисциплине «Нестационарные газодинамические эффекты (НГДЭ) в ДВС» освещена проблематика волновых явлений в проточных частях *газовоздушных трактов* (ГВТ) поршневых двигателей.

Происходящее в ГВТ рассматривается как единый процесс, существенная особенность которого — движение нелинейных волн сжатия и разрежения по ГВТ, их взаимодействие с его элементами. Действие НГДЭ дает существенную *дозарядку* рабочих камер двигателей (с «настроенными» ГВТ) — волной сжатия, интенсифицирующей перемещение свежего заряда и сжатие его в каналах ГВТ и в рабочей камере.

Рассмотрены как теоретические, так и практически аспекты организации указанного вида («волнового»; *динамического*) *наддува*.

Наддуву же с применением специальных агрегатов, а также проблематике использования НГДЭ в ДВС с «агрегатным» (механическим, газотурбинным) наддувом уделено мало внимания.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- анализ размерностей, 29
- волна исходная, 8
- волна отраженная, 8, 35
- волна прошедшая, 8, 35
- волна разрежения, 8, 9
- волна сжатия, 8, 9
- волны конечной амплитуды, 6, 32
- впуск, 17
- выброс обратный, 17
- выброс прямой, 18
- выпуск принудительный, 17
- выпуск свободный, 17, 18
- газообмен, 17
- газы остаточные, 14, 16
- двигатель «атмосферный», 19
- диссипация, 32, 33, 36
- дозарядка, 9, 17, 18, 39
- заряд свежий, 7, 9, 12, 13
- инварианты Римана, 6, 7, 28
- камера кривошипная, 18
- камера рабочая, 13
- компрессор центробежный, 18
- коэффициент наполнения, 14, 15
- коэффициент остаточных газов, 16
- коэффициент подачи, 16
- коэффициент продувки, 14, 16
- нагнетатель объемный, 18
- наддув, 39
- наддув динамический, 39
- объем рабочий, 15
- очистка, 8, 9
- потери, 19
- продувка, 9, 17, 18
- продукты сгорания, 9, 12
- работа располагаемая, 19
- режим установившийся, 12
- скорость звука, 7
- скорость потока, 7, 8
- смесеобразование, 12
- смесь рабочая, 17
- тракт газоздушный, 39
- функции газодинамические, 33
- эксергия, 19, 34
- энтропия, 28, 35
- эффект «диодный», 37
- эффекты диссипации, 19, 32, 33, 35, 36



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / под. ред. А. С. Орлина и М. Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.

2. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.

3. Рудой Б. П. Теория газообмена ДВС: учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1978. 109 с.

4. Рудой Б. П., Березин С. Р. Расчет на ЭВМ показателей газообмена ДВС: учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1979. 101 с.

5. Рудой Б. П. Прикладная нестационарная гидрогазодинамика: учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1988. 184 с.

6. Ноздрин Г. А., Черноусов А. А. Нестационарные газодинамические эффекты в ДВС: лабораторный практикум по дисциплине «Нестационарные газодинамические эффекты в ДВС». Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 21 с.

7. Ноздрин Г. А., Черноусов А. А. Моделирование на ЭВМ нестационарных газодинамических эффектов: лабораторный практикум по дисциплине «Нестационарные газодинамические эффекты в ДВС». Уфа: РИК УГАТУ, 2017. 42 с.

8. Черноусов А. А. Оптимальные параметры газовоздушного тракта и предельный коэффициент наполнения двухтактного ДВС с ПДП // Известия вузов. Машиностроение. 2007. № 9. С. 28–40.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/optimalnye-parametry-gazovozd...>

(дата обращения: 06.02.2021).

9. Черноусов А. А. Оптимальные по наполнению параметры газовоздушного тракта четырехтактного ДВС // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 3. С. 239–245.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/optimalnye-po-napolneniyu-param...>

(дата обращения: 06.02.2021).

10. Черноусов А. А. Основы численного моделирования рабочих процессов тепловых двигателей: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 265 с.

URL: [http://dvs.ugatu.ac.ru/images/files/mrpm/modeling\\_2008.pdf](http://dvs.ugatu.ac.ru/images/files/mrpm/modeling_2008.pdf)

(дата обращения: 06.02.2021).

11. Черноусов А. А. Основы механики жидкости и газа. Исходные гипотезы и уравнения: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2013. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

URL: [http://dvs.ugatu.ac.ru/images/files/mjg/fluidmech\\_basic.pdf](http://dvs.ugatu.ac.ru/images/files/mjg/fluidmech_basic.pdf)

(дата обращения: 06.02.2021).

12. Черноусов А. А. Основы моделирования процессов в двигателях и энергоустановках: учеб. пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2018. 140 с.

URL: [http://dvs.ugatu.ac.ru/images/files/ompde/modeling\\_basic.pdf](http://dvs.ugatu.ac.ru/images/files/ompde/modeling_basic.pdf)

(дата обращения: 06.02.2021).