

Р.З. Кавтарадзе

# Теория поршневых двигателей

*Специальные  
главы*

Допущено УМО по образованию  
в области энергетики и электротехники  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»  
направления подготовки «Энергомашиностроение»



Москва 2008

УДК 621.43(075.8)

ББК 31.365

К13

Издано при финансовой поддержке  
Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям  
в рамках Федеральной целевой программы «Культура России»

Р е ц е н з е н т ы:

зав. кафедрой СПбГПУ, канд. техн. наук, проф. Ю.В. Галышев;  
д-р техн. наук, проф. Р.М. Петриченко (СПбГПУ);  
д-р техн. наук, проф. Н.Н. Патрахальцев (РУДН)

**Кавтарадзе Р.З.**

К13 Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учеб-  
ник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. —  
720 с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3086-4

Изложены основы создания высокоэффективных и высокоэкологичных двигателей, проанализированы термодинамические циклы поршневых и комбинированных двигателей, особенности и теплофизические свойства используемых топлив и рабочего тела. Описаны нульмерные и трехмерные модели рабочего процесса и способы его организации в двигателях с внешним и внутренним смесеобразованием, а также формы камеры сгорания. Значительное внимание уделено процессам впрыскивания, распыливания, испарения топлива, задержки воспламенения и тепловыделения в бензиновых двигателях и в дизелях. Рассмотрены процессы сгорания топлива, образования вредных выбросов, проанализированы методы снижения их концентрации, а также проблемы усовершенствования и перспективы развития двигателей с непосредственным впрыскиванием бензина и дизельного топлива. Приведены математические модели основных внутрицилиндровых процессов и методы их экспериментального исследования.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». Может быть полезен аспирантам, научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся созданием перспективных двигателей, а также исследованием и доводкой уже существующих.

УДК 621.43(075.8)

ББК 31.365

ISBN 978-5-7038-3086-4

© Кавтарадзе Р.З., 2008

© Оформление. Издательство МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, 2008

## От автора

Поршневые двигатели — чрезвычайно экономичные и удобные источники энергии — используют практически во всех областях человеческой деятельности.

Теория поршневых двигателей как научная дисциплина сформировалась в конце XIX в., т. е. практически одновременно с их появлением. Блестящая работа С. Карно и базирующаяся на ее основе классическая термодинамика стали тем прочным фундаментом, на котором построена теория поршневых двигателей. Современная теория поршневых двигателей помимо термодинамики требует глубокого знания теории тепло- и массообмена, гидро- и газодинамики, теории горения и др. Очевидно, что для создания конкурентоспособного поршневого двигателя в жестких условиях рынка наряду с хорошими теоретическими и экспериментальными базами нужен специалист, обладающий превосходной интуицией и способный синтезировать результаты исследований и принимать верные решения. Формирование такого специалиста начинается в технических университетах и продолжается в условиях исследовательской и производственной работы.

Настоящий учебник предназначен как для студентов, обучающихся в магистратуре, так и для аспирантов, инженеров-исследователей и научных работников. При его написании преследовались следующие цели.

Сформировать у читателя представление об основных концепциях и о фундаментальной теории, базирующейся на них; теоретически обосновать взаимосвязанные физические явления, имеющие место в поршневых двигателях и, что особенно важно, показать их роль в формировании экологических и эффективных характеристик двигателя; проанализировать и сравнить современные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования внутрицилиндровых процессов; ознакомить читателя с историческими аспектами развития поршневых двигателей, их создателями и исследователями.

Неоценимый вклад в развитие теории поршневых двигателей внесли представители различных научных школ и прежде всего МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана, где еще в 1907 г. началась подготовка специалистов по двигателям внутреннего сгорания. Так, метод теплового расчета двигателя, предложенный В.И. Гриневецким и развитый в дальнейшем его учениками Е.К. Мазингом и Н.Р. Брилингом, в течение почти всего прошлого столетия был основой практически для всех учебников по теории поршневых двигателей, на которых воспитывались целые поколения инженеров, конструкторов и исследователей. Большая роль в создании этого направления отводится и работам Г.Г. Калиша (динамические явления в топливоподающей системе), Д.Н. Вырубова (процессы испарения и смесеобразования), Б.Г. Либровича (рабочий процесс в разделенных камерах), А.С. Орлина (метод расчета процессов газообмена), М.Г. Круглова (нестационарные газодинамические процессы), С.Г. Роганова и Г.Н. Мизернюка (газовый анализ), О.Б. Леонова (неуставившиеся режимы работы двигателя), В.П. Алексеева (тепловыделение в дизелях), С.И. Ефимова (рабочий процесс в двигателях с внешним подводом теплоты) и др. Огромны заслуги в развитии теории поршневых двигателей и представителей других научных школ, в первую очередь следует назвать ученых — авторов известных учебников и монографий: В.А. Ваншейдт, Г.А. Варшавский, И.И. Вибе, А.Н. Воинов, Н.М. Глаголев, Б.М. Гончар, Н.Х. Дьяченко, Н.Н. Иванченко, В.Н. Луканин, А.С. Лышевский, М.М. Масленников, В.В. Махалдиани, Р.М. Петриченко, Д.А. Портнов, Н.Ф. Разлейцев, Ю.Б. Свиридов, А.С. Соколик, Б.С. Стечкин, А.И. Толстов, М.С. Ховах и других. Из современных зарубежных изданий наибольшей популярностью пользуются книги Дж. Хейвуда, Х. Хироясу, Г. Меркера, Р. Пишингера, А. Урлауба, Г. Вошни. Безусловно, отдельные вопросы из их работ нашли отражение и в этом учебнике, в котором основное внимание уделено новейшим методам и результатам теории поршневых двигателей. В связи с этим он принципиально отличается от существующих сегодня учебников и монографий по теории поршневых двигателей как по форме, так и по глубине изложения рассмотренных в ней вопросов. Это обусловлено тем, что специальные главы теории поршневых двигателей студенты изучают после курса «Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей», предусмотренного учебной программой для подготовки

бакалавров. Сравнительный анализ методов и зависимостей на основе различных подходов и гипотез придает учебнику характер справочного пособия, что должно заинтересовать читателя, у которого появляется возможность выбора того или иного метода, подхода или формулы для расчета.

Книга состоит из 11 глав.

Термодинамические циклы практически всех известных типов поршневых и комбинированных двигателей описаны в гл. 1, которую следует рассматривать как связующее звено между общей теорией поршневых двигателей, предусмотренной программой подготовки бакалавров, и специальными главами.

В гл. 2 изложены особенности рабочего тела и характер изменения его теплофизических параметров. Моделирование рабочего процесса рассмотрено в гл. 3, основанной на материалах учебного пособия, которое ранее было опубликовано автором совместно с профессором Н.А. Иващенко по результатам исследований, полученным в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Гл. 4–8 посвящены организации рабочего процесса в цилиндре двигателя (гл. 4); описанию процессов впрыскивания и распыливания топлива как в бензиновых двигателях, так и в дизелях (гл. 5); основ нестационарных процессов испарения жидкого топлива и диффузии паров в воздухе (гл. 6); фундаментальным положениям теории горения (гл. 7) и задержки воспламенения в двигателях (гл. 8). В гл. 9 проанализированы практически все существующие методы расчета тепловыделения, даны их сравнительные характеристики, указаны существующие проблемы при прогнозировании тепловыделения.

Гл. 10 посвящена исследованию многомерных моделей рабочего процесса с учетом основ химической кинетики и использованию современных моделей турбулентности в теории поршневых двигателей.

В гл. 11 проанализированы проблемы усовершенствования и перспективы развития поршневых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива легковых автомобилей, поскольку именно в этой области происходит жесткая конкуренция между бензиновыми двигателями и дизелями.

В книге использованы результаты исследований, проведенных непосредственно автором, а также полученные совместно с профессором Н.А. Иващенко (многозонные модели рабочего процес-

са), и с коллегами из Мюнхенского технического университета: профессором Г. Вошни и доктором К. Цайлингером (вихревое движение в цилиндре), докторами К. Цайлингером и Г. Цитцлером (задержка воспламенения). Ряд расчетов выполнен кандидатами технических наук Д.О. Онищенко, А.С. Голосовым, а также З.Р. Кавтарадзе на кафедре поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С большим вниманием к работе над книгой относился профессор М.Г. Круглов, не доживший, к сожалению, до выхода книги в свет. Он успел ознакомиться с частью рукописи и дал ряд ценных замечаний, способствующих, прежде всего, повышению практической значимости изложенного материала.

Автор выражает искреннюю благодарность академику РАН А.И. Леонтьеву за ценные замечания и полезные советы по фундаментальным вопросам теплофизики, затронутым в книге, зав. кафедрой профессору Н.А. Иващенко, без поддержки которого был невозможен выход в свет этого учебника, а также доктору К. Цайлингеру за поддержку и плодотворное сотрудничество.

Автор признателен рецензентам в лице кафедр Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (зав. кафедрой профессор Ю.В. Гальшев, профессор М.Р. Петриченко) и Московского университета Дружбы народов (профессор Н.Н. Патрахальцев) за ценные замечания по рукописи книги, которые были учтены при подготовке окончательного варианта.

Все замечания можно присылать по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Поршневые двигатели» или по e-mail: kavtar@power.bmstu.ru. Они будут приняты с благодарностью.

Доктор технических наук,  
профессор  
*Р.З. Кавтарадзе*

## ВВЕДЕНИЕ

Основная роль в учебнике отводится изучению и исследованию физических процессов в цилиндре поршневого двигателя в целях усовершенствования рабочего процесса, которое связано с повышением эффективности и экологичности реального цикла.

Эффективным принято называть цикл с оптимальным тепловыделением и минимальными потерями, обеспечивающими максимальный эффективный КПД цикла. Под понятием оптимального тепловыделения подразумевают не только тепловую энергию, полученную в результате реакции горения топлива (она должна быть максимально возможной), но и момент начала и продолжительность выделения этой энергии.

Экологичным называют цикл по возможности с минимальными выбросами токсичных веществ в окружающую среду и минимальным излучением шума, обеспечивающими соблюдение норм, предусматриваемых действующим законодательством. Уровень экологичности цикла оценивается количеством токсичных веществ в отработавших газах двигателя, определенных непосредственно в выпускной системе двигателя без применения каких-либо систем их нейтрализации. Эталон экологичного цикла является цикл двигателя с нулевыми выбросами токсичных веществ в окружающую среду. Следует подчеркнуть, что экологичность цикла характеризуется также уровнем шума, источником которого является рабочий процесс, и прежде всего это обусловлено скоростью повышения давления в цилиндре двигателя.

Очевидно, что разработка эффективного и экологичного цикла — первостепенная задача теории поршневых двигателей и одновременно основной путь создания экономичного и безвредного для здоровья человека и окружающей среды двигателя, а следовательно, автомобилей, судов, самолетов и пр.

Современная теория поршневых двигателей — это техническая дисциплина, которая достигла значительного прогресса и высокого уровня развития, что обусловлено достижениями, накопленными за

почти полуторавековую историю развития поршневых двигателей, а в развитых странах — еще и вложениями огромных средств и использованием последних достижений науки и техники.

Особенность теории поршневых двигателей заключается в том, что ее проблематика тесно связана не только с практическими задачами человеческого бытия или военной мощи любого государства, но и с такими глобальными проблемами современного человечества, как энергетическая и экологическая.

Современные поршневые двигатели характеризуются высокой топливной экономичностью и в этом отношении среди других тепловых машин, работающих на природном топливе, у них нет равных. В связи с этим в обозримом будущем практически исключена их замена принципиально другими, альтернативными источниками энергии, и по многочисленным прогнозам они останутся самыми перспективными в транспортной энергетике XXI в. Однако неуклонный рост мирового парка этих двигателей, а также их удельной мощности и частоты вращения коленчатого вала делают их основными «растратчиками» природных топливных ресурсов, запасы которых ограничены. С этой точки зрения очевидно, что осуществление высокоэффективных циклов (т. е. циклов с высоким КПД или низким удельным расходом топлива) — архиважная задача в теории поршневых двигателей, непосредственно связанная с глобальной энергетической проблемой. Другая задача теории двигателей — осуществление цикла с минимальным количеством токсичных веществ в отработавших газах — по своей актуальности становится даже более важной, чем первая задача, и непосредственно связана с глобальной экологической проблемой.

Эти две задачи, решению которых в теории рабочих процессов двигателя отводится решающая роль, нельзя рассматривать раздельно, тем более, что часто они «конфликтуют» между собой. Действительно, известно, что расширение температурных пределов цикла приводит к повышению его КПД. В реальных циклах расширение температурных пределов можно осуществить практически только за счет верхнего предела, т. е. за счет увеличения максимальной температуры цикла, так как нижний предел (температура заряда при впуске) не может быть значительно изменен. Однако с ростом максимальной температуры цикла создаются благоприятные условия для образования оксидов азота и их содержание в отработавших газах увеличивается. Налицо явный «кон-



фликт» между топливной экономичностью и экологичностью, т. е. между эффективностью и качеством цикла. В понятии эффективного цикла топливная экономичность количественно отражается в виде его эффективного КПД. Экологичность цикла в отличие от топливной экономичности, конечно, с его КПД не связана, если не учитывать выбросы диоксидов углерода, способствующие образованию «парникового эффекта» вокруг Земного шара (очевидно, что чем выше КПД цикла, тем меньше расход топлива и меньше количество выбросов  $\text{CO}_2$ ). Для оценки экологичности цикла используют, как указывалось выше, такие показатели, как, например, концентрация вредных выбросов и шум. В связи с этим основную задачу теории поршневых двигателей можно сформулировать также следующим образом: разработка и осуществление высокоэффективного (с точки зрения топливной экономичности) и высокоэкологичного (с точки зрения выбросов токсичных веществ и шума) цикла. Очевидно, что при решении этой задачи следует искать пути и способы разрешения вышеуказанного «конфликта».

Именно непосредственная связь с энергетическими и экологическими проблемами обуславливает приоритеты развития двигателестроения как актуального научно-технического направления. Трудно назвать другую область промышленности, где так интенсивно проводятся исследования и развивается производство продукции, как поршневое двигателестроение, а также область, в которой к творческому мышлению предъявляются столь высокие требования.

Современная теория поршневых двигателей базируется на фундаментальных закономерностях теплофизики, механики жидкости и газа, что определяет ее основную особенность как научно-технического направления, закономерности которого в большинстве случаев для своего обоснования требуют проведения экспериментальных исследований.

На протяжении развития поршневых двигателей теоретические и экспериментальные исследования всегда успешно дополняли друг друга. Однако в силу своей специфики (относительно небольшие габариты, доступность и удобство при проведении эксперимента) быстроходные автомобильные и авиационные двигатели в большей степени способствуют развитию экспериментальных методов исследования, чем, например, тихоходные судовые двига-

тели, на долю которых приходится больше теоретических разработок. Правда, такое отличие по внесенным вкладам в развитие теоретических или экспериментальных направлений было более заметным на ранних этапах развития двигателестроения, а в последнее время эта разница постепенно стирается.

Все методы исследования физических процессов, протекающих в цилиндре поршневого двигателя, условно можно подразделить на три группы: 1 — экспериментальные; 2 — расчетно-теоретические; 3 — комбинированные (расчетно-экспериментальные).

С развитием вычислительной техники затраты на численный эксперимент в отличие от затрат на натурный эксперимент постепенно уменьшаются (по некоторым данным за каждые 8 лет в примерно в 10 раз). Математическое моделирование как инструмент исследования в современной теории поршневых двигателей занимает значительное место и, безусловно, способствует их быстрому развитию. Современные модели рабочего процесса (нульмерные, одно-, двух- и многозонные многомерные) являются мощным средством уменьшения материальных и временных затрат в процессе проектирования, создания и доводки двигателей. Несмотря на возрастающую стоимость, эксперимент был и остается главным критерием для оценки практической пригодности методов теории поршневых двигателей.

# 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

## 1.1. Рабочий процесс в поршневых двигателях

### 1.1.1. Виды поршневых двигателей

Двигатели, в которых теплота, выделяющаяся при сгорании топлива, преобразуется в механическую энергию, называют *тепловыми двигателями*. Тепловые двигатели подразделяют на две основные группы: *двигатели внутреннего сгорания* (поршневой, роторный и комбинированный двигатели, газовая турбина, реактивный двигатель и др.), т. е. все двигатели, в которых процессы сгорания и тепловыделения происходят внутри самого двигателя; *двигатели внешнего сгорания* (паровые машины, паровые турбины, двигатель Стирлинга), т. е. двигатели, которые вырабатывают механическую энергию за счет теплоты, подводимой извне.

Основной элемент конструкции поршневого двигателя — цилиндр с поршнем. Топливо сгорает внутри цилиндра в среде воздуха (окислителя). При этом процесс образования горючей смеси может осуществляться как внутри цилиндра, так и вне цилиндра. Исторически сложилось так, что первым был создан поршневой двигатель с внешним смесеобразованием немецким инженером Н. Отто (1876). Конечно, еще до Отто предпринимались попытки создания двигателей, наиболее удачным из которых можно считать газовый двигатель внутреннего сгорания (1860) французского механика Ж. Ленуара. Однако именно Отто принадлежит приоритет создания прообраза современного поршневого двигателя с внешним смесеобразованием, который в настоящее время известен как *двигатель Отто*. В таком двигателе основная часть воздуха и паров топлива смешиваются еще до поступления в цилиндр. Образование топливовоздушной смеси завершается после ее поступле-

## 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА

### 2.1. Особенности изменения параметров рабочего тела. Локальные параметры

Основные термодинамические параметры рабочего тела, наиболее часто используемые в теории поршневых двигателей: давление  $p$ , температура  $T$  и плотность  $\rho$ , а также скорость  $u$  его движения. В ходе рабочего цикла они изменяются в широком диапазоне значений и их изменение носит сугубо нестационарный характер. Строго говоря, эти параметры представляют собой функции времени  $\tau$  (угла поворота коленчатого вала  $\varphi = \omega\tau$ , где  $\omega$  — угловая скорость вращения) и трех пространственных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Однако изменение каждого из них характеризуется своими особенностями. Отметим, что в дальнейшем величины  $\tau$  или  $\varphi$  будут использованы в качестве аргументов функции совершенно произвольно, поскольку, согласно соотношению  $\varphi = \omega\tau$ , одну из них всегда можно заменить другой.

**Давление.** В цилиндре двигателя давление принято рассматривать как функцию времени  $p = p(\tau)$  или угла поворота коленчатого вала  $p = p(\varphi)$ . Действительно, в случае использования экспериментальной индикаторной диаграммы обычно не уточняется, в какой точке КС был установлен датчик давления при индицировании. Тем самым заведомо принимается, что давление — функция только аргумента  $\varphi$ , но не трех пространственных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Однако это можно обосновать: причина быстрого выравнивания давления в объеме цилиндра двигателя — распространение слабых возмущений со скоростью звука  $a = \sqrt{kRT}$ . Если в качестве характерного размера принять один из основных размеров двигателя (ход поршня  $S$  или диаметра цилиндра  $D$ ), то при  $S = D = 12$  см,  $n = 2100$  мин<sup>-1</sup> и  $\varepsilon = 16$  в случае использования в качестве рабочего тела воздуха ( $R = 287$  Дж/(кг·К) и  $k = 1,4$ ), температура которо-

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

#### 3.1. Понятие модели

Одна из основных задач технических наук — описание нестационарных физических и химических процессов, протекающих в сложных технических системах, для изучения их динамических свойств, установления закономерностей и возможности получения достоверного прогнозирования характеристик с помощью математических моделей.

По определению *математическая модель* (франц. *modele*, от лат. *modulus* — мера, образец) — приближенное описание какого-либо объекта, процесса или класса явлений внешнего мира с помощью математической символики. Исследование объекта, процесса или явления с помощью математической модели называют математическим моделированием — мощным методом познания внешнего мира, а также прогнозирования и управления. Как видно, математическое моделирование базируется как на теоретических, так и на экспериментальных методах научного исследования. Полный цикл математического моделирования включает в себя четыре основных этапа: 1 — сбор информации, составление уравнений, постановка математической задачи; 2 — исследование и анализ поставленной задачи, получение результатов расчета; 3 — сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными и оценка адекватности принятой математической модели (этот процесс часто называют также верификацией, или валидацией, математической модели [13]); 4 — накопление дополнительных фактов, модернизация модели или построение новой модели.

В качестве классического примера, иллюстрирующего характерные этапы развития математической модели, часто рассматривают модель Солнечной системы. Древнегреческий астроном К. Птолемей — создатель геоцентрической модели мира — разработал математическую модель движения планет вокруг неподвижной Земли. В XVI в. польский

## **4. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

### **4.1. Генерация вихревого движения заряда**

Поле скоростей в цилиндре двигателя — важнейший фактор, определяющий скорости процессов смесеобразования и сгорания, интенсивность теплообмена между рабочим телом и стенками КС. Чтобы процессы смесеобразования и сгорания протекали эффективно, необходимо создать вихревое движение с высокой степенью турбулентности. Это особенно важно для быстроходных и, прежде всего, автомобильных дизелей, в которых интервалы времени на организацию процессов смесеобразования и сгорания очень малы, и они могут затянуться. Принудительное завихрение заряда в КС — эффективное средство для ускорения этих процессов.

Газодинамическая картина течения (векторное поле скоростей) в цилиндре двигателя образуется в начале процесса впуска-наполнения и далее меняется в течение всего цикла. Истечение свежего заряда через впускные клапаны (в цилиндре четырехтактного двигателя) или через впускные окна (в цилиндре двухтактного двигателя) носит струйный характер. Взаимодействие струи со стенками цилиндра и движущимся поршнем порождает крупномасштабное вихревое движение внутри цилиндра. Организованное вращательное движение заряда в цилиндре двигателя часто называют закруткой. Интенсивность закрутки существенно зависит не только от геометрии впускных клапанов или впускных окон, но и от конфигурации впускного канала. При этом не следует забывать о том, что основная задача впускной системы в целом и впускного канала в частности — обеспечение (по возможности) максимального наполнения цилиндра свежим зарядом. В зависимости от этого различают два вида впускного канала — однофункциональный канал, обеспечивающий требуемое наполнение цилиндра (максимальный коэффициент наполнения), и двухфункциональ-

## **5. ВПРЫСКИВАНИЕ И РАСПЫЛИВАНИЕ ТОПЛИВА В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

### **5.1. Впрыскивание топлива**

#### **5.1.1. Бензиновые двигатели**

В современных поршневых двигателях жидкое топливо обычно впрыскивается либо во впускную систему (бензиновые двигатели), либо непосредственно в цилиндр (дизели и бензиновые двигатели). В некоторых случаях часть цикловой подачи топлива впрыскивается во впускную систему, а другая часть — в дополнительную или основную КС (см. гл. 4). Как отмечалось ранее, для качественного смесеобразования параметры впрыскиваемого топлива должны быть согласованы с параметрами движущегося потока воздуха.

Образование горючей смеси из жидкого топлива и воздуха практически во всех двигателях происходит в результате подачи топлива в высокоскоростной поток воздуха. Этот способ распыливания жидкого топлива, известный также как «парфюмерный», лежит в основе процесса карбюрации, используемого в карбюраторных двигателях, практически вытесненных в настоящее время из серийного производства двигателями с впрыскиванием бензина во впускную систему или непосредственно в цилиндр. Действительно, скорость движения воздуха в диффузорах карбюратора достигает около 200 м/с, а скорость истечения топлива из распылителя не превышает 10 м/с. Разность этих скоростей и обуславливает распыливание топлива: в интервале значений 4..6 м/с начинается распад струи топлива, а при значении 30 м/с и выше происходит практически полное распыливание топлива [3].

Процесс впрыскивания топлива в поршневых двигателях осуществляется системой питания (топливоподачи), выполняющей такие важные для рабочего процесса функции, как обеспечение нужной цикловой подачи (дозирование) топлива в соответствии с режимом работы двигателя, равномерное распределение топлива

## **6. ИСПАРЕНИЕ ТОПЛИВА В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

### **6.1. Некоторые особенности испарения топлива**

В поршневых двигателях в качестве горючего преимущественно используют жидкие топлива, при этом для осуществления процессов воспламенения и сгорания их сначала переводят в газообразное состояние, а затем преобразуют в топливовоздушную смесь, состав которой находится в пределах воспламеняемости, т. е. в горючую смесь. Процесс образования горючей смеси, согласно модели, предложенной профессором Д.Н. Вырубовым [1, 6, 7], можно представить в виде трех последовательных стадий.

1. Введение жидкого топлива в нагретый от сжатия воздух (в двигателях с внутренним смесеобразованием) или в воздушный поток с относительно низкой температурой (в двигателях с внешним смесеобразованием). На этой стадии определяющими факторами являются гидродинамические условия топливоподачи.

2. Распад струи жидкого топлива на отдельные капли. Мелкость и распределение капель в объеме КС, как уже отмечалось в гл. 5, зависят как от условий, определяемых первой стадией (давление впрыскивания, скорость истечения струи топлива из соплового отверстия форсунки, физические свойства топлива и т. д.), так и от газодинамического состояния воздушного заряда (скорость, интенсивность вихревого движения, степень турбулентности), определяемого конструктивными особенностями двигателя.

3. Испарение и диффузия паров жидкого топлива, сопровождающиеся теплообменом между топливом и воздухом. Эта стадия в отличие от предыдущих проходит на молекулярном уровне, однако в процессе смешивания паров топлива и воздуха турбулентная диффузия играет решающую роль. Первые две стадии были довольно подробно рассмотрены ранее, в данной главе кратко изложены физические основы процессов, протекающих на завершающей стадии образования горючей смеси.



## 7. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

### 7.1. Понятие горения. Скорость химической реакции. Закон действующих масс

Горением обычно называют сложные, быстропротекающие химические реакции, сопровождаемые свечением и тепловыделением. В большинстве случаев такие химические реакции являются окислительными и вещество, которое окисляется кислородом (или воздухом, содержащим кислород), называют *горючим*. От агрегатных состояний окислителя и горючего зависит характер самого горения, которое может быть *гомогенным* или *гетерогенным*. *Гомогенным* является, например, горение газообразного топлива в среде газообразного окислителя (воздуха), а *гетерогенным* — горение жидкого горючего в среде газообразного окислителя. Окислительные реакции, протекающие медленно (например, коррозия металлов при их контакте с воздухом), практически не сопровождающиеся тепловыделением и проходящие в отсутствие свечения, не относятся к горению. В связи с этим горением считают сложное быстропротекающее химическое превращение, сопровождающееся выделением теплоты, когда скорость химической реакции сильно зависит от температуры.

В теплоэнергетических установках под горением понимают процессы, обусловленные наличием пламени. Термин «пламя» в теплотехнике связывают с окислительными реакциями, сопровождающимися тепловыделением и свечением. Если температура реакции снижается до такой степени, что свечение не наблюдается, то говорят, что отсутствует и пламя. При весьма слабых свечении и тепловыделении, когда высвобождается только небольшая часть энергии реагентов, пламя называют *холодным*. Большая часть теплоты выделяется в тот момент, когда появляется *горячее пламя*. В поршневых двигателях, где горение используют для осуществления механической работы, в основном рассматривают горячее

## 8. ЗАДЕРЖКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

### 8.1. Высоко- и низкотемпературное воспламенение. Химическая задержка воспламенения

#### 8.1.1. Воспламенение

*Воспламенение* — процесс ускорения химической реакции, скорость которой возрастает практически от нулевого значения до конечного. В зависимости от причины ускорения реакции различают:

*тепловое воспламенение*, при котором скорость реакции увеличивается вследствие роста температуры реагирующей системы;

*цепное воспламенение*, при котором скорость реакции увеличивается вследствие роста числа активных центров.

Процесс воспламенения называют *гомогенным*, если он происходит в гомогенной термодинамической системе, и *гетерогенным*, если он происходит на границе раздела сред гетерогенной термодинамической системы.

В поршневых двигателях используется два вида воспламенения:

*самовоспламенение* — автоускорение химической реакции, обусловленное нагревом окислителя (воздуха) за счет сжатия. Очаги пламени возникают во всем объеме и градиенты температуры внутри реагирующей системы невелики. Вся масса реагента воспламеняется практически одновременно без внешнего воздействия, т. е. имеет место так называемый *тепловой взрыв*;

*вынужденное воспламенение*, или *принудительное зажигание*, — воспламенение рабочей смеси инициируется вводом энергии (активных центров) в реагирующую систему извне с помощью, например, электрической искры. В этом случае воспламеняется только незначительная часть массы реагирующей системы, после чего горение распространяется по всему объему системы, соответ-

## 9. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

### 9.1. Основные виды тепловыделения

#### 9.1.1. Однократное тепловыделение.

##### Кинетическая и диффузионная фазы процесса сгорания

Метод расчета тепловыделения на основе экспериментальной индикаторной диаграммы (решение так называемой обратной задачи расчета рабочего процесса) с применением первого закона термодинамики изложен в гл. 3. Отметим, что при анализе процесса сгорания зависимость скорости тепловыделения от времени (см.

(3.26))  $\frac{dQ_x}{d\tau} = f(\tau)$  — дифференциальный закон тепловыделения —

часто является более наглядной и удобной, чем зависимость  $Q_x = Q_x(\tau)$  — интегральный закон тепловыделения.

Наиболее общий случай однократного тепловыделения в дизеле, когда скорость тепловыделения имеет два ярко выраженных максимума, показан на рис. 9.1. Первый максимум обусловлен быстрым сгоранием паров топлива, образовавшихся в период задержки воспламенения. Как известно, предпламенные реакции, протекающие в период задержки воспламенения, готовят смесь к тепловому взрыву. При тепловом взрыве весь объем КС быстро охватывается пламенем, скорость тепловыделения за короткий промежуток времени стремительно увеличивается и, достигая определенного максимума, также быстро уменьшается. В гетерогенной топливовоздушной смеси в локальных зонах, богатых кислородом, полностью выгорают пары топлива, а в локальных зонах, где имеется избыток паров топлива, полностью расходуется окислитель, что приводит к резкому снижению скорости тепловыделения после достижения первого максимума. В

## 10. ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

### 10.1. Модель нестационарного турбулентного движения и горения рабочего тела

Исследование особенностей нестационарного турбулентного движения рабочего тела в цилиндре двигателя одновременно с процессом горения представляет одну из наиболее интересных проблем современной теории поршневых двигателей, поскольку они непосредственно обуславливают эффективность и экологичность рабочего цикла и двигателя в целом.

В настоящее время ведущие производители поршневых двигателей широко используют так называемые 3D-программы и CFD-коды (Computational Fluid Dynamics), основанные на дифференциальных уравнениях в частных производных (уравнения неразрывности, количества движения Навье — Стокса, энергии и диффузии), к которым добавлены уравнения химической кинетики. Трехмерные модели служат для решения специфичных задач, связанных с поршневыми двигателями, их применяют в таких программных продуктах, как FIRE (AVL, Австрия), KIVA (Лаборатория центра энергетических исследований, США, Лос-Аламос), VECTIS (Ricardo, Англия). Для численного решения отдельных задач теории рабочего процесса двигателя используют известные универсальные программные продукты, например, FLUENT, ANSYS/Flotran, Star CD, PHOENICS и др.

Дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие физические процессы переноса массы, количества движения и энергии, можно представить в виде закона сохранения, выраженного обобщенным дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \operatorname{div}(\rho\vec{W}\Phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\Phi} \operatorname{grad} \Phi) + S_{\Phi}, \quad (10.1)$$

## **11. ПРОБЛЕМЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА**

### **11.1. Бензиновые двигатели**

#### **11.1.1. Особенности рабочего процесса**

Уровень экологических и эффективных показателей — основной фактор, определяющий перспективы развития и дальнейшего использования поршневых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива. В настоящее время здесь выделяют три основных направления: 1 — двигатели традиционных схем, работающие на традиционных топливах; 2 — двигатели традиционных схем, работающие на альтернативных топливах; 3 — двигатели альтернативных схем, работающие на альтернативных топливах. Подробный анализ этих направлений не является целью настоящей книги, в связи с чем рассмотрены только особенности рабочего процесса перспективных двигателей первого направления, используемых в качестве силовых агрегатов легковых автомобилей.

По долгосрочным научным прогнозам в обозримом будущем бензиновые двигатели и дизели по-прежнему будут составлять основу транспортной энергетики. Более чем вековая история развития двигателестроения убеждает, что эти два основных типа поршневого двигателя усовершенствуются в условиях жесткой конкуренции. При этом каждый из них имеет области применения, где они являются практически монополистами, например, дизели — морской транспорт, бензиновые двигатели — авиация общего назначения. В настоящее время конкуренция между бензиновыми двигателями и дизелями наиболее ощутима в автомобильном транспорте, в частности на рынке легковых автомобилей. В связи с этим наибольший интерес представляют анализ рабочего процесса и оценка перспектив развития двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива.

## Список литературы

### Глава 1

1. *Алымов И.П.* Научные выводы относительно водяного пара // Морской сборник. 1865. Т. 77. № 3. С. 105.
2. *Базаров И.П.* Термодинамика. М.: Высш. шк., 1991.
3. *Гельфер Я.М.* История и методология термодинамики и статистической физики. М.: Высш. шк., 1981.
4. *Гюльднер Г.* Двигатели внутреннего сгорания. Том 2. М., 1928.
5. *Менделеев Д.И.* Сочинения. М.-Л., 1939. Т. 6. С. 211.
6. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002.
7. *Тринклер Г.В.* Двигателестроение за полу столетие. Л.: Речной транспорт, 1958.
8. *Diesel R.* Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschine und der heute bekannten Wärmemotoren. Berlin. Springer-Verlag, 1893. 96 S. Reprintaufgabe, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1986. 96 S.
9. *Carnot S.* Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines a developper cette puissance (Suivi d'une lettre adresse a M. le President et a MM. les membres de l'Academie des sciences et d'une Notice biographique sur Sadi Carnot). Paris, 1878.
10. *Sass F.* Geschichte des deutschen Verbrennungsmotorenbaues. Springer-Verlag. Berlin, Göttingen, Heidelberg. 1962.

### Глава 2

1. *Двигатели* внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов / Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. М.: Высш. шк., 2005.
2. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.

3. *Карман Т.* Аэродинамика. Ижевск, НИЦ «РХД», 2001.
4. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979.
5. *Милликен Р.К.* Размеры, оптические свойства и температура частиц сажи // Измерения температуры в объектах новой техники (Сб. науч. работ). М.: Мир, 1965. С. 152–172.
6. *Страдомский М.В., Максимов Е.А.* Оптимизация температурного состояния деталей дизельных двигателей. Киев, Наукова думка, 1987.
7. *Теория поршневых и комбинированных двигателей* / Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983.
8. *Элементы САПР ДВС* / Под ред. Р.М. Петриченко. Л.: Машиностроение, 1990.
9. *Дейч М.Е., Филиппов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981.
10. *Grill M., Chiodi M., Berner H., Bargende M.* Berechnung von Rauchgas und Kraftstoffdampf beliebiger Kraftstoffe // MTZ. № 5. 2007. S. 398–406.
11. *Herzog P.L.* Möglichkeiten, Grenzen und Vorausberechnung der einspritzspezifischen Gemischbildung bei schnellaufenden Dieselmotoren mit direkter luftverteilter Kraftstoffeinspritzung. Habilitationsschrift / VDI-Forschungsberichte. Reihe 12. N 127. 1989.
12. *Hohenberg G., Killmann I.* Basic findings obtained from measurement of the combustion process. FISITA-paper 82126. Melbourne, 1982.
13. *Huber E.W., Schaffitz W.* Experimentelle und theoretische Arbeiten zur Berechnung von Einspritzanlagen von Dieselmotoren // Teil 1. MTZ. N 2. 1966. S. 35–42; Teil 2. MTZ. N 4. 1966. S. 146–155.
14. *Schindler K.P.* Schallgeschwindigkeit in Dieselmotoren und ihre Auswirkung in Einspritzanlagen // Forschungsbericht FAG. N 8305, V. 5. 1983.
15. *Sitkei G.* Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren. Springer-Verlag. Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1964. 224 S.
16. *Urlaub A.* Verbrennungsmotoren. Band 2, Verfahrenstheorie. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo. 1989. 228 S.
17. *Zacharias F.* Mollier-I,S-Diagramme für Verbrennungsgase in Datenverarbeitung // MTZ. N 7. 1970. S. 296–303.

## Глава 3

1. *Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Голосов А.С., Кавтарадзе З.Р., Скрипник А.А.* Метод расчета локальных концентраций оксидов азота в поршневых двигателях с внутренним смесеобразованием на основе многозонной модели // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Мехиностроение. № 1. 2004. С. 34–59.
2. *Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З.* Многозонные модели рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.
3. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
4. *Кавтарадзе Р.З.* Моделирование локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме камеры сгорания дизеля // Двигателестроение. № 1. 1995. С. 14–17.
5. *Кавтарадзе Р.З., Петриченко М.Р.* Эволюция учения о теплообмене в дизелях от Нуссельта до наших дней // Двигателестроение. 1993. № 1–2. С. 33–35.
6. *Разлейцев Н.Ф.* Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков: Вища школа, 1980.
7. *Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных ДВС* / Под ред. Орлина А.С. и Круглова М.Г. М.: Машиностроение, 1983.
8. *Gal-or B., Yaron I.* Convective mass or heat transfer from size-distributed ensembles of drops, bubbles, or solid particules // Progress in heat and mass transfer, selected Papers of the 1970 International Seminar. V. 5. Pergamon Press. 1972. S. 309–326.
9. *Gosman A.D., Harvey P.S.* Computer Analysis of Fuel-Air Mixing and Combustion in an Axisymmetric D.I. Diesel // SAE Paper. 1982. № 820036. 21 p.
10. *Heider G., Woschni G., Zeilinger K.* 2-Zonen Rechenmodell zur Vorausrechnung der NO-Emission von Dieselmotoren // MTZ. № 11. 1998. S. 770–775.
11. *Kawtaradze R.* Mathematisches Modell des komplexen Wärmeaustausches-Konvektion und Strahlung-im Brennraum des Dieselmotors // Technische Mechanik. 1989. B. 10. Heft 3. S. 175–177.
12. *Ludwig P.* Die Untersuchung der örtlichen Wärmübertragung in grossen Dieselmotoren unter besonderer Berücksichtigung der



- Strahlung mit Hilfe der Zonenmethode // Schiffbauforschung. 1981. № 1. S. 3–11.
13. *Merker G., Schwarz Ch., Stiesch G., Otto F.* Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. 3 Auflage. Teubner-Verlag Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 2006. 410 S.
  14. *Neidel W., Paul G.* Mathematische Modellierung der Wärmeübertragungsverhältnisse in strahlungsbeheizten Brennkammern // Chemische Technik. 1973. № 9, № 11. S. 543–545, S. 654–657.
  15. *Pischenger R., Klell M., Sams Th.* Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Wien–New York. Springer-Verlag. 2002. 475 S.
  16. *Prescher K.* Zwei-Zonen-Rechenmodell für die Verbrennung im Ottomotor unter Berücksichtigung der Gasdissociation // MTZ. 1983. № 2. S. 85–89.
  17. *Rehwinkel H.* Berechnung und Messung der örtlichen mittleren Wärmeübertragung in zylindrischen Brennkammern: Dissertation. TU Hanover. 1973. 123 S.
  18. *Trifunović R.* Ein Beitrag zur Erforschung des M-Verbrennungsverfahrens // MTZ. 1983. № 1. S. 31–32.
  19. *Wannemacher H., Müller W.* Numerische Modelle zur Berechnung des Brennverlaufs in Vorkammer-Dieselmotoren // MTZ. № 6. 1987. S. 239–245.
  20. *Woschni G.* Verbrennungsmotoren. TU München: 1988. 303 S.

#### Глава 4

1. *Валишвили Н.В., Петриченко М.Р., Кавтарадзе Р.З.* Теплообмен при вращательном движении жидкости над неподвижной плоскостью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. № 2. 2002. С. 94–114.
2. *Вихерт М.М., Грудский Ю.Г.* Конструирование впускных систем быстроходных дизелей. М.: Машиностроение, 1982.
3. *Воинов А.Н.* Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977.
4. *Вошни Г., Цайлингер К., Кавтарадзе Р.З.* Вихревое движение воздуха в быстроходном дизеле с четырьмя клапанами на цилиндр // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. № 1. 1997. С. 74–83.

5. *Двигатели* внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983.
6. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
7. *Лебедев О.Н., Сомов В.А., Калашиников С.А.* Двигатели внутреннего сгорания речных судов. М.: Транспорт, 1990.
8. *Лиханов В.А., Сайкин А.М.* Снижение токсичности автотракторных дизелей. М.: Колос, 1994.
9. *Манджгаладзе А.А., Кавтарадзе Р.З., Анциаури А.З., Мгеладзе Р.А.* Исследования процессов газообмена и теплообмена в дизелях методами математического и физического моделирования. Тбилиси: Мецниереба, 1986.
10. *Петриченко М.Р., Валишвили Н.В., Кавтарадзе Р.З.* Пограничный слой в вихревом потоке на неподвижной плоскости // РАН. Теплофизика и аэромеханика. Т. 9. № 3. 2002. С. 411–421.
11. *Процессы* в перспективных дизелях / Под ред. А.Ф. Шеховцова. Харьков: Изд-во «Основа» при Харьковском университете, 1992.
12. *Сон Дж.Х., Ли Д.Х.* Экспериментальное исследование процесса зажигания бензиновоздушной смеси в цилиндрической камере сгорания // Физика горения и взрыва. Т. 39. № 5. 2003. С. 32–44.
13. *Хейвуд Дж.* Гидродинамика рабочих цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Фримановская лекция 1986 г. // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. М.: 1987. С. 171–229.
14. *Чернышев Г.Д., Хачиян А.С., Пикус В.И.* Рабочий процесс и теплонапряженность автомобильных дизелей. М.: Машиностроение, 1986.
15. *Arcoumanis C., Bicen A.F., Whitelaw J.H.* Squish and Swirl-Squish Interaction in Motored Model Engines // ASME Journal of Fluids Engineering. 1983. V. 105. P. 105–112.
16. *Barthelmä L.* Einfluss der Luftbewegung im Brennraum auf die Abgasemission eines direkt einspritzenden Dieselmotors: Dissertation. TU München. 1982. 135 S.
17. *Basshuesen R., Schäfer F.* Handbuch. Verbrennungsmotor. 4. Auflage. Vieweg und Sohn Verlag. Wiesbaden, 2007. 1032 S.

18. *Bartsch Ch.* Auf dem Weg zum homogenen Verbrennung // MTZ. N 5. 2001. S. 386–389.
19. *Beale N.R., Hodgetts D.* The Cranfield-Kushul Engine // Combustion Engines. London–New York, 1976. P. 87–95.
20. *Berger H., Eichlseder H., Steinmayr T.* Das EU-3 Abgaskonzept für den neuen Vierzylinder-Dieselmotor von BMW // MTZ. N 5. 1998. S. 344–348.
21. *Elsbett K., Elsbett L., Elsbett G., Behrens M.* The Duothermic Combustion for D.I. Diesel Engine. SAE Paper. N 860310, 1986. 13 p.
22. *Gosman A.D., Harvey P.S.* Computer Analysis of Fuel-Air Mixing and Combustion in an Axysimetric D.I. Diesel. SAE paper. N 820036, 1982. 21 p.
23. *Hohenberg G., Grebe U., Krausgrill Ch.* Die Bestimmung von Drall und Tumble und deren Auswirkung auf den Arbeitsprozess des Ottomotors. 5. Tagung «Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors» // TU Graz. 1995. S. 279–305.
24. *Johnston S.C., Robinson C.W.* Application of laser diagnostics to an injected engine. SAE Paper. N 790092, 1979. 19 p.
25. *Kawtaradse R., Woschni G., Zeilinger K.* Dralluntersuchung im Vierventil – Dieselmotor mit Hilfe stationäre Durchströmung: LVK. TU München, 1995. 49 S.
26. *Merker G., Schwarz Ch., Stiesch G., Otto F.* Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. 3. Auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. Teubner-Verlag. 2006. 410 S.
27. *Stieper K., Polej A.* Thermische Randbedingungen II. Abschlussbericht FVV. Heft 641. 1997. S. 54.
28. *Stieper K., Polej A.* Brennraumseitige örtliche thermische Randbedingungen für Verbrennungsmotoren // MTZ. N 7/8. 1998. S. 500–505.
29. *Tippelmann G.* New Method of Investigation of Swirl Ports. SAE Paper. N 770404, 1977. 13 p.
30. *Tippelmann G.* Räumlicher Drallmesser für Drall- und Tumblemessung // MTZ. N 6. 1997. S. 327–363.
31. *Urlaub A.* Verbrennungsmotoren. Band 2. Verfahrenstheorie. Berlin, Heidelberg, New-York, London, Paris, Tokyo. Springer Verlag. 1989. 228 S.
32. *Woschni G.* Verbrennungsmotoren. 2. Auflage. TU München. 1988. 303 S.

## Глава 5

1. Балакин В.И., Еремеев А.Ф., Семенов Б.Н. Топливная аппаратура быстроходных дизелей. Л.: Машиностроение. 1967.
2. Влияние интенсивности вихря впускного воздуха на локальные температуры рабочего тела в цилиндре двигателя / Р.З. Кавтарадзе, В.В. Арапов, А.А. Скрипник, Ичунь Ван // Тр. XII школы-семинара «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». М.: Изд-во МЭИ. 1999. С. 155–158.
3. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1985.
4. Кутовой В.А. Впрыск топлива в дизелях. М.: Машиностроение, 1981.
5. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977.
6. Лышевский А.С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. М.: Машгиз, 1963.
7. Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
8. Метод расчета локальных концентраций оксидов азота в двигателях с внутренним смесеобразованием на основе многозонной модели / Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе, А.С. Голосов и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, № 1. 2004. С. 43–59.
9. Петриченко М.Р. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания. Л.: Изд-во ЛГУ. 1983.
10. Портнов Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. М.: Машгиз, 1963.
11. Семенов Б.Н., Павлов Е.П., Коцев В.П. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности. Л.: Машиностроение, 1990.
12. Система управления двигателем Motronic. Руководство по техническому обучению (русское издание) / У. Штайнбрер, Х. Бархо, К. Бетхер и др. Штутгарт, Изд-во «R. Bosch GmbH», 1996.
13. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников и др. М.: Наука, 1984.

14. *Топливные системы и экономичность дизелей* / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, В.И. Трусов и др. М.: Машиностроение, 1990.
15. *Ульянов И.Е.* О внутриканальном распаде при распыливании топлива // Изв. АН СССР. ОТН. № 8, 1954. С. 27–31.
16. *Уменьшение содержания вредных примесей в выбросах дизельных двигателей* // Т. Моримацу, Т. Окасаки, Т. Фуруа, Х. Фурукава // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. А. Современное машиностроение. № 5. 1989. С. 1–7.
17. *Файнлейб Б.Н.* Топливная аппаратура автотракторных дизелей. Л.: Машиностроение, 1990.
18. *Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей* / Б.В. Раушенбах, А.С. Белый, И.В. Беспалов и др. М.: Машиностроение. 1964.
19. *Augustin U.* Experimentelle Untersuchung zur Voreinspritzung von Dieselmotoren. Dissertation // TU München. 1990. 151 S.
20. *Basshuysen R., Schäfer F.* (Hrsg.) Handbuch Verbrennungsmotor. 4. Auflage. Vieweg und Sohn Verlag. Wiesbaden, 2007. 1032 S.
21. *Chiu W.S., Shached S.M., Lin W.T.* A Transiet Spray Mixing Model for Diesel Combustion. SAE Paper 760128. 1976. 24 pp.
22. *Chmela F.G., Jager P., Herzog P., Wirbeleit F.* Emissionsverbesserung mit Direkteinspritzung mittels Einspritzverlaufsformung // MTZ. N 9. 1999. S. 552–558.
23. *Common Rail 2000 mit Mehrfacheinspritzung* // MTZ. N 10. 1999. S. 639.
24. *Constien M.* Bestimmung von Einspritz- und Brennferlauf eines direkteinspritzenden Dieselmotors: Dissertation. TU München. 1991. 142 S.
25. *Dent J.C.* Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Study Spray Penetration. SAE Paper. 710571. 1971. 18 pp.
26. *Elkothb M.M.* Fuel Atomization for Spray Modeling // Prog. Energy Comb. Sci. N 8. 1982. 61 p.
27. *Hiroysu H., Arai M.* Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines. SAE paper. 900475. 1990. 14 pp.
28. *Hiroyasu Y., Kadota T.* Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber. SAE-Paper. 740715. 1974. 12 p.
29. *Hiroyasu Y., Kadota T., Arai M.* Development and Use of a Spray Combustion modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pol-

- lutant Emissions. Part 1. JSME. V. 26. N 214, 1983. S. 569–575.  
Part 2. JSME. V. 26. N 214, 1983. S. 576–583.
30. *Hochdruckeinspritzung* und Abgasrezirkulation im kleinen, schnelllaufenden Dieselmotor mit direkter Einspritzung / W. Schneider, M. Stöckli, T. Lutz, M. Eberle // MTZ. N 11. 1993. S. 588–599.
  31. *Jerzembek M.* Diesel direkt // KFZ-Betr. Automarkt. N 1. 2000. S. 42–44.
  32. *Klingmann V.R., Brugemann H.* Der neue Vierzylinder – Dieselmotor OM611 mit CR-Einspritzung. Teil 2 // MTZ. N 12. 1997. S. 760–767.
  33. *Knight B.E.* Communications on the Performance of a Type of Swirl Atomizer // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. V. 169. 1955. P. 104–109.
  34. *Kuo T.W., Bracco F.V.* Computations of Drop Sizes in Pulsating Sprays and of Liquid-Core Length in Vaporizing Sprays. SAE-Paper. N 820133. 1982. S. 528–547.
  35. *Lusgarten G.* Modelluntersuchungen zur Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor // MTZ. N 9. 1974. S. 273–281.
  36. *Maiorana G., Rossi G., Ugaglia C.* Die Common-Rail – Motoren von Fiat // MTZ. N 9. 1998. S. 582–588.
  37. *Ohnesorge W.* Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen. ZAMM. B. 16, Heft 6. 1936. S. 212–218.
  38. *Schmidt P., Walzel P.* Zerstäuben von Flüssigkeiten // Physik in unserer Zeit. N 4, 1984. S. 113–120.
  39. *Shipinski J., Myers P.S., Uehara O.A.* A Spray-Droplet Model for Diesel Combustion. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. V. 184. 1969–70. P. 28–35.
  40. *Sitkei G.* Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren. Berlin–Göttingen–Heidelberg. Springer-Verlag. 1964. 222 S.
  41. *Technischer Fortschritt durch Evolution – Neue Vierzylinder-Ottomotoren von Mercedes-Benz auf Basis des Erfolgreichen M111 / M. Fortnagel, B. Heil, J. Giese u.a.* // MTZ. N 7/8. 2000. S.458–464.
  42. *Varde K.S., Popa D.M., Varde L.K.* Spray Angle and Atomisation in Diesel Sprays. SAE-Paper. 841055. 1984. P. 779–786.
  43. *Wakuri Y., Takasaki K., Yang Y.* Studies on the Fuel-Spray Combustion Characteristics in a Diesel Engine by the Aid of Photographic Visualisation // ASME ICE. V. 10. Fuel Injection and Combustion. Book. N G00505. 1990.

## Глава 6

1. *Алексеев В.П., Вырубов Д.Н.* Физические основы процессов в камерах сгорания в поршневых ДВС. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977.
2. *Балакин В.И., Еремеев А.Ф., Семенов Б.Н.* Топливная аппаратура быстроходных дизелей. Л.: Машиностроение, 1967.
3. *Бам-Зеликович Г.Н.* Расчет пограничного слоя в потоке смеси газа и капель жидкости // Труды института им. Баранова. М.: 1958. Вып. 334. 16 с.
4. *Двигатели* внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей / Под общ. ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1990.
5. *Домбровский Л.А.* Спектральная модель поглощения и рассеяния теплового излучения каплями дизельного топлива // Теплофизика высоких температур. № 2. Т. 40. 2002. С. 270–376.
6. *Дубовкин Н.Ф.* Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М–Л.: Госэнергоиздат, 1962.
7. *Ирисов А.С.* Испаряемость топлив для поршневых двигателей и методы ее исследования. М.: Гостехиздат, 1955.
8. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
9. *Камзолов Е.П.* Исследование воспламенения и сгорания топлива при испарении его с нагретой поверхности // Изв. вузов СССР. Машиностроение. № 4, 1961. С. 27–32.
10. *Кафаров В.В.* Основы массопередачи. М.: Высш. шк., 1979.
11. *Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.* Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985.
12. *Леонов О.Б., Камзолов Е.П.* Исследование пленочного смешения // Изв. вузов СССР. Машиностроение. № 1, 1961. С. 18–23.
13. *Петриченко М.Р.* Элементы САПР ДВС. Л.: Машиностроение, 1990.
14. *Процессы* в перспективных дизелях / Под ред. А.Ф. Шеховцова. Харьков. Изд-во «Основа» при Харьковском государственном университете. 1992.
15. *Свиридов Ю.Б.* Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.: Машиностроение, 1972.

16. Семенов Б.Н., Павлов Е.П., Концев В.П. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности. Л.: Машиностроение, 1990.
17. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости. Т. 2 / Под ред. С. Гольдштейна. М.: Изд-во иностранной литературы. 1948. 408 с.
18. Торквато С., Смит П. Скрытая теплота парообразования широкого класса жидкостей // Тр. Американского общества инженеров-механиков. № 1. 1984. С. 215–221.
19. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
20. Элькотб М.М., Рафат Н.М. Траектория струи топлива в дизелях // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Энергетические машины и установки. № 2. Т. 100. 1978. С. 144–150.
21. Bardon M.F., Rao V.K., Gardiner D.P. Intake manifold fuel film transient dynamics. SAE Paper. N 870569, 1987. S. 1–8.
22. Fettes Ch., Schulze T., Leipertz A., Zellbeck H., Potz D. Einfluss der Muldenwand auf Verdampfung, Gemischbildung und Verbrennung bei kleinvolumigen DI-Dieselmotoren. Teil 1: Grundlagenuntersuchungen an der Einspritzkammer // MTZ. N 7/8. 2002. S. 622–630; Teil 2: Motorische Untersuchungen: MTZ. N 9. 2002. S. 728–737.
23. Ihme H. Kompensation des Wandfilmeffekts beim Viertakt-Ottomotor // MTZ. N 7/8. 2001. S. 584–589.
24. Neugebauer S. Das Instationäre Betriebsverhalten von Ottomotoren – experimentelle Erfassung und rechnerische Simulation: Dissertation. TU München. 1996.
25. Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation From Drops // Journal Chem. Eng. Prog., V. 48, 1952. S. 141–150.
26. Sitkei G. Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren. Springer-Verlag. Berlin–Göttingen–Heidelberg. 1964. 222 S.
27. Temple-Pediani R.W. Fuel drop vaporization under pressure on a hot surface // Proc. Inst. Mech. Eng. Part 1, 184. N 38. 1969–70. S. 677–696.

## Глава 7

1. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высш. шк., 1985.



2. *Бартльме Ф.* Газодинамика горения. Энергоатомиздат. М.: 1981.
3. *Бочков М.В., Ловачев Л.А., Четверушкин Б.А.* Химическая кинетика образования  $\text{NO}_x$  при горении метана в воздухе. М.: Всесоюзный центр математического моделирования АН СССР. № 25. 1992. 24 с.
4. *Зельдович Я.Б., Воеводский В.В.* Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. М.: Изд-во ММИ, 1947.
5. *Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.* Окисление азота при горении. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1947.
6. *Звонов В.А.* Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1981.
7. *Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Голосов А.С., Кавтарадзе З.Р., Скрипник А.А.* Метод расчета локальных концентраций оксидов азота в поршневых двигателях с внутренним смесеобразованием на основе многозонной модели // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. № 1. 2004. С. 43–59.
8. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2-е изд. испр. и доп. 2007.
9. *Кондратьев В.Н.* Константы скорости газозофазных реакций: Справочник. М.: Наука, 1971.
10. *Кульчицкий А.Р.* Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. М.: Академический проект, 2004.
11. *Лушпа А.И.* Основы химической термодинамики кинетики химических реакций. М.: Машиностроение. 1981.
12. *Семенов Н.Н.* Цепные реакции. Госхимтехиздат. Л.: 1934.
13. *Ферми Э.* Термодинамика. Харьков: Изд-во Харьковского университета. 1969.
14. *Франк-Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 3-е изд. М.: Наука, 1987.
15. *Чесноков С.А., Демидов М.И.* Химический турбулентный теплообмен в ДВС. Тула, Изд-во ТулГУ, 2005.
16. *Baulch D.L., Cobos C.I., Cox A.M., Frank P., Haymann G., Just T., Kerr J.A., Murrels T., Pilling M.J., Tve J., Wallker R.W., Warnatz J.* Compilation of rate data for combustion modeling. Supplement I.J. Phys. Chem. Ref. Data 22847. 1991.

17. *Baulch D.L., Drysdale D.D., Horne D.D., Lloyd A.C.* High Temperature Reaction Rate Data // Report N 4. University of Leeds. 1969.
18. *Bockhorn H., Hentschel J., Peters N., Weber J., Pittermann R.* Simulation der Partikelemission aus Dieselmotoren. 5. Dresdener Motorenkolloquium. 2003. S. 152–160.
19. *Borrmeister J., Hübner W.* Einfluss der Brennraumform auf die HC-Emission und den Verbrennungsablauf // MTZ. № 6. 1997. S. 408–414.
20. *Bracco F.V.* Nitric Oxide Formation in Droplet Diffusion Flames / Proceedings of Fourteenth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1973. P. 831–838.
21. *Dodge L.G., Kubesh J.T., Naegeli D.W., Campbelle P.F.* Modeling NO<sub>x</sub> Emissions from Lean-Burn Natural Gas Engines. SAE Paper. № 981389, 1998. 9 p.
22. *Bowman C.T.* Kinetics of Nitric Oxide Formation in Combustion Processes. The 16. Symposium of Combustion.
23. *Campbell I.M.* Reactivity of Hydrogen to Atomic Nitrogen and Atomic Oxygen // Trans. Faraday Soc, V. 64, 1968. S. 265–272.
24. *Fenimore C.P.* Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases. 17 th symp. Comb., 661. The Combustion Institute. Pittsburgh. 1979.
25. *Heider G., Woshni G., Zeilinger K.* 2-Zonen Rechenmodell zur Vorausberechnung der NO-Emission von Dieselmotoren // MTZ. № 11, 1998.
26. *Lange J.* Bestimmung der Carbonylverbindungen im abgas vonschwerölbetriebenen Dieselmotoren. Fortschritt – Berichte der VDI. Düsseldorf, Reihe 15. № 161. 1996. 70 S.
27. *Merker G., Schwarz Ch., Stiesch G., Otto F.* Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. 3. Auflage. Teubner – Verlag. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 2006. 412 S.
28. *Nishida K., Hiroyasu H.* Simplified Three-Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a D.I. Diesel Engine. SAE Paper. № 890269. 1989. 18 p.
29. *Pattas K., Häfner G.* Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung // MTZ. N 12. 1973.
30. *Pischinger R., Krassnig G., Taučar G., Sams Th.* Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Wien, New-York. Springer-Verlag, 1989. 524 S.
31. *Schubiger R.A., Boulouchos K., Eberle M.K.* Russbildung und Oxidation bei der dieselmotorischen Verbrennung // MTZ. № 5. 2002. S. 342–351.

32. *Urlaub A.* Verbrennungsmotoren. Band 2. Verfahrenstheorie, 1989. 226 S.
33. *Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.* Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente Schadstoffentstehung. 3.Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2001.
34. *Wray K.L., Teare J.D.* Shock-Tube Study of the Kinetics of Nitric Oxide at High Temperatures. Journal of Chemical Physics 36, V. 10, 1962. S. 2582–2596.

## Глава 8

1. *Алексеев В.П.* Уравнение для определения периода задержки воспламенения в камере сгорания дизеля / Изв. вузов. Машиностроение. 1974. С. 106–109.
2. *Алексеев В.П., Вырубов Д.Н.* Физические основы процессов в камерах сгорания поршневых двигателей внутреннего сгорания. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977.
3. *Воинов А.Н.* Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977.
4. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
5. *Кудряш А.П., Паиш В.В., Маринин В.С., Москаленко Д.А.* Природный газ в двигателях. Киев: Наукова думка, 1990.
6. *Лебедев О.Н., Сомов В.А., Калашиников С.А.* Двигатели внутреннего сгорания речных судов. М.: Транспорт, 1990.
7. *Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С.* Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000.
8. *Мержанов А.Г., Аверсон А.Э.* Современное состояние тепловой теории зажигания. Препринт Института химической физики АН СССР. М.: 1970. 64 с.
9. *Мержанов А.Г., Дубовицкий Ф.И.* Современное состояние теории теплового взрыва // Успехи химии. Т. 35. Вып. 4. 1966. С. 656–682.
10. *Свиридов Ю.Б.* Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.: Машиностроение, 1972.

11. *Сгорание и смесеобразование в дизелях* // Тр. научно-технической конференции. М.: Изд-во АН СССР. 1960. 242 с.
12. *Сербинов А.И.* Роль физических и химических процессов при самовоспламенении распыленных жидких топлив / В кн.: Двигатели с воспламенением от сжатия. М.: Машгиз, 1951. С. 99–136.
13. *Скрипник А.А., Фролов С.М., Кавтарадзе Р.З., Эфрос В.В.* Моделирование воспламенения в струе жидкого топлива // РАН. Химическая физика. Т. 23. № 1. 2004. С. 54–61.
14. *Соколик А.С.* Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
15. *Тодес О.М.* Теория теплового взрыва // Журнал физической химии. Т. 13. 1939. С. 868–874.
16. *Толстов А.И.* Индикаторный период запаздывания воспламенения и динамика цикла быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия // Тр. НИЛД «Исследование рабочего процесса и подачи топлива в быстроходных дизелях». № 1. М.: Машгиз, 1955. С. 5–55.
17. *Франк-Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
18. *Barba Ch., Burkhardt Ch., Boulouchos K., Bargende M.* Empirisches Modell zur Vorausberechnung des Brennverlaufes bei Common-Rail-Dieselmotoren // MTZ. N 4. 1999. S. 262–270.
19. *Binder K.* Einfluss des Einspritzdruckes auf Strahlausbreitung, Gemischbildung und Motorkennwerte eines direkt einspritzenden Dieselmotors: Dissertation. TU München. 1992. 158 S.
20. *Fujimoto H. et.al.* Illumination Delay in Diesel Spray. JASE Paper. N 800–13. 1980. 149 p.
21. *Groth K., Hesse A., Krause D., Spitzmüller K.* Brennstoffe für Dieselmotoren heute und morgen. Express Verlag, Ehningen. 1989. 358 S.
22. *Hardenberg H.O., Hase F.W.* An Empirical Formular for Computing the Pressure Rise Delay of a Fuel from its Cetane Number and From the Relevant Parameter of Direct- Injection Diesel Engine. SAE-Paper 7900493, 1973.
23. *Hardenberg H., Wagner W.* Der Zündverzug in direkteinspritzenden Dieselmotoren // MTZ. N 7. 1971. S. 240–248.
24. *Henain N.A., Bolt J.* Ignation Delay in Diesel Engines. SAE Paper. N 670007, 1967.

25. *Heywood J.B.* Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill. New York, 1988.
26. *Hiroyasu H., Kadota T., Arai M.* Supplementary Comments: Fuel Spray Characterisation in Diesel Engines, in *Mattavi J.N. and Amann* (eds). Combustion Modeling in Reciprocating Engines. Plenum Press. 1980. S. 369–408.
27. *Knight B.E.* Communications on the Performance of a Type of SwirlAtomizer. Proceedings of the Inst. Of Mechanical Engineers. Vol. 169, 1955. S. 104–109.
28. *Krause D.* Untersuchungen des Zünd- und Durchbrennverhaltens von Rückstandbrennstoffen // MTZ. N 11. 1988. S. 457–460.
29. *Neugebauer S.* Das instationäre Betriebsverhalten von Ottomotoren – experimentelle Erfassung und rechnerische Simulation: Dissertation. TU München, 1996. 121 S.
30. *Oberg H.J.* Die Darstellung des Brennverlaufes eines schnellaufenden Dieselmotors durch zwei überlagerte Vibe-Funktionen: Dissertation. TU Braunschweig, 1976.
31. *Sadowski S., Nocke J.* Zur Bestimmung des Zündverhaltens von Schwerölen // MTZ. N 11. 1991. S. 556–561.
32. *Schmidt F.A.F.* Verbrennungskraftmaschinen. Springer Verlag. 4. Auflage. Berlin–Heidelberg–New York. 1967. 640 S.
33. *Schneider W., Stöckli M., Lutz T., Eberle M.* Hochdruckeispritzung und Abgasrezirkulation im kleinen, schnellaufenden Dieselmotor mit direkter Einspritzung // MTZ/ N 11. 1993. S. 588–599.
34. *Shipinski J., Myers P.S., Uehara O.* A Spray-Droplet Model for Diesel Combustion. Proc. Inst. Mech. Engrs. V. 184. Pt. 3J. 1969–70. S. 28–35.
35. *Sitkei G.* Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren. Springer-Verlag. Berlin. 1964. 224 S.
36. *Spadaccini L.J., Te Velde J.A.* Autoignition Characteristics of Aircraft-Type Fuels. Combustion and Flame. V. 46, 1982, S. 283–300.
37. *Sprogis W.A.* Abgasverhalten von Dieselmotoren mit niedrigem Verdichtungsverhältnis // MTZ. N 7/8, 1983. S. 251–257.
38. *Stieper K., Groth K., Nocke J., Wichmann V., Wachtler K.* Die Anpassung von Schiffsdieselmotoren an die Zünd- und Verbrennungseigenschaften von Brennstoffen // MTZ. N 11. 1997. S. 684–689.
39. *Stringer F.W., Clarke A.E., Clarke J.S.* The Spontaneous Ignition of Hydrocarbon Fuels in a Flowing System. Proc. I. Mech. E. 184, pt. 3J. 1969–70. 212 p.

40. *Tuge M.* Ignation Delay in Diesel Combustion. JSME Paper 670007, 1967. 16 p.
41. *Vogel Ch.* Wasserstoff-Dieselmotor mit Direkteinspritzung, hoher Leistungsdichte und geringer Abgasemission. Teil 1: Konzept // MTZ. N 10. 1999. S. 704–708.
42. *Wolfer H.* Der Zündverzug im Dieselmotor // VDI-Forschungsheft N 392. 1938. S. 15–24.
43. *Woschni G., Anisits F.* Eine Methode zur Vorausberechnung der Änderung des Brenverlaufs mittelschnellaufender Dieselmotoren bei geänderten Betriebsbedingungen // MTZ. N 4. 1973. S. 106–110.

## Глава 9

1. *Алексеев В.П., Вырубов Д.Н.* Физические основы процессов в камерах сгорания поршневых двигателей внутреннего сгорания. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1977.
2. *Вибе И.И.* Новое о рабочем цикле двигателей. Москва–Свердловск: Машгиз, 1962.
3. *Вырубов Д.Н., Добров Н.В.* Уравнение скорости тепловыделения при диффузионном горении с учетом мелкости распыливания топлива // Двигателестроение, № 5. 1980. С. 12–14.
4. *Гончар Б.М.* Уточненный способ расчета и построения индикаторной диаграммы двигателя // Сб. статей ЦНИДИ «Исследование рабочих процессов в дизелях». № 25. «Машгиз», 1954.
5. *Гончар Б.М.* Численное моделирование рабочего процесса дизелей // Энергомашиностроение, № 7. 1968. С. 34–35.
6. *Дьяченко Н.Х., Магидович Л.Е., Пугачев Б.П.* Об аппроксимации характеристик тепловыделения в цилиндрах дизелей // Тр. ЛПИ. Энергомашиностроение. № 310. 1963. С. 73–76.
7. *Звонов В.А.* Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение. 1981.
8. *Лазарев Е.А.* Совершенствование моделирования закономерностей выгорания топлива в дизеле // Двигателестроение. № 12. 1985. С. 11–12.
9. *Махов В.З.* Процессы сгорания в двигателях с воспламенением от сжатия. М.: Изд-во МАДИ, 1980.

10. Математическая энциклопедия. Изд-во «Советская энциклопедия». Т. 1, с. 614, 864. Т. 5, с. 1014. 1977–1985.
11. *Разлейцев Р.Ф.* Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков, Изд-во «Вища школа», 1980.
12. *Разлейцев Н.Ф.* Анализ и моделирование смесеобразования и сгорания в форсированных дизелях на основе кинетического подхода // В кн. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Под ред. А.Ф. Шеховцова. Киев: Изд-во «Тэхника», 1992. С. 92–153.
13. *Разлейцев Н.Ф., Филипповский А.И.* Математическая модель процесса сгорания в дизеле со струйным смесеобразованием // Двигателестроение. № 7. 1990. С. 52–56.
14. *Самсонов Е.П.* Расчет индикаторной диаграммы двигателя с камерой в поршне // Тр. ЦНИДИ. Вып. 43. М.-Л.: Изд-во «Машгиз», 1962.
15. *Теория двигателей внутреннего сгорания. Рабочие процессы* // Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Б.П. Пугачев и др. / Под ред. Н.Х. Дьяченко. Ленинград, Машиностроение, 1974.
16. *Barba Ch., Burkhardt Ch., Boulouchos K., Bargende M.* Empirisches Modell zur Vorausberechnung des Brennverlaufes bei Common-Rail-Dieselmotoren // MTZ. N 4, 1999. S. 262–270.
17. *Blumberg P., Kummer I.T.* Prediction of NO Formation in Spark-Ignited Engines-An Analysis of Methods of Control // Combustion Science and Technology. V. 4, 1971. S. 73–95.
18. *Neumann K.* Kinetische Analyse des Verbrennungsvorgang in der Dieselmachine. Forschung a. d. Gebiete des Ingenieurwesens. N 2, 1936. (Перевод на русск. — Нейман К. Кинетический анализ процесса сгорания в дизеле. Сб. из иностр. лит-ры «Двигатели внутреннего сгорания». М.: Машгиз, т. IV, 1938).
19. *Schreiner K.* Untersuchungen zum Ersatzbrennverlauf und Wärmeübergang bei schellaufenden Hochleistungsdieselmotoren // MTZ. N 11. 1993. S. 554–563.
20. *Stas M., Wajand J.* Bestimmung der Vibe – Parameter für der zweiphasigen Brennverlauf in Direkteinspritz-Dieselmotoren // MTZ. N 7/8, 1988. S. 289–293.
21. *Wiebe I.I.* Brennverlauf und Kreisprozesse von Verbrennungsmotoren. Berlin, VEB Verlag Technik, 1970. 280 S.

## Глава 10

1. *Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2 т. М.: Мир. Т. 1, 1990. Т. 2, 1990.
2. *Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.* Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. Санкт-Петербург, «Судостроение». 2005.
3. *Волчков Э.П., Лебедев В.П.* Тепломассообмен в пристенных течениях. Новосибирск, Изд-во НГТУ. 2003.
4. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
5. *Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Шибанов А.В., Онищенко Д.О., Федоров В.А.* Численный анализ влияния формы камеры сгорания на турбулентное движение и сгорание газа в цилиндре дизеля // Тр. четвертой Российской национальной конференция по теплообмену. Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. С. 246–249.
6. *Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Федоров В.А., Онищенко Д.О., Шибанов А.В.* Расчет радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания дизеля // РАН. Теплофизика высоких температур. Т. 45, № 5, 2007. С. 741–748.
7. *Кавтарадзе Р.З., Кавтарадзе З.Р., Шибанов А.В.* Моделирование трехмерных процессов переноса и турбулентного сгорания в поршневом двигателе // Тр. Международной конференции «Неклассические задачи механики». Т. 2. Изд-во Кутаисского госуниверситета. Кутаиси, 2007. С. 47–52.
8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая Физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 2006.
9. *Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З.* Выдающийся гидромеханик (о жизни и научном вкладе И. Никурадзе в развитии гидромеханики и теории пограничного слоя) // РАН, ИИЕТ им. С.И. Вавилова. Исследования по истории физики и механики 2001. М.: Наука. 2002. С. 153–179.
10. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987.
11. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.



12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
13. *Byun D., Baek S.W.* Numerical investigation of combustion with non-gray thermal radiation and soot formation effect in a liquid rocket engine // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. № 50, 2007. 412–422 pp.
14. *Chmela F., Dimitrov D., Pirker G., Wimmer A.* Konsistente Methodik Vorausrechnung der Verbrennung in Kolbenkraftmaschinen // *MTZ*. N 6, 2006. S. 468–475.
15. *Favre A.* Equations des Gaz Turbulents Compressibles: 1. Formes Generales. *J. Mecanique*. V. 4. 1965. S. 361–390.
16. *FIRE*. Users Manual Version 8. 5. AVL LIST GmbH Graz, Austria, 2007. (Лицензионное соглашение DKNR: BMSTU101107 между МГТУ им. Н.Э. Баумана и APS Consulting).
17. *Han Z., Reitz R.D.* A Temperature Wall Function Formulation for Variable-Density Turbulent Flows with Application to Engine Convective Heat Transfer Modeling. *Int. J. Heat Mass Transfer*, V. 40, 1995. S. 613–625.
18. *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* Ten Years of Industrial Experience With the SST turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*. Ed. K. Hajalic, Y. Nogano, M. Tummers. Begell House, Inc. 2003. 8 p.
19. *Merker G., Schwarz Ch., Stiesch G., Otto F.* *Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*. 3 Auflage. Teubner-Verlag. Stuttgart, Leipzig – Wiesbaden. 2004. 410 S.
20. *Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J.A.* A new  $k-\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation. *Computers Fluids*. V. 24, N 3. 1995. S. 227–238.
21. *Tatschl R., Schneider J., Basara D., Brohmer A., Mehring A., Hanzjalic K.* Fortschritte in der 3D-CFD Berechnung des gas- und wasserseitigen Wärmeübergangs in Motoren. 10. Tagung der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, 23–25 September, Graz, Austria. 2005. 18 S.
22. *Yakhot V., Orszag S.A.* Renormalization group analysis of turbulence: 1. Basic theory. *J. Scientific Computing*. V. 1, N. 1. 1986. S. 1–51.

## Глава 11

1. *Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З.* Многозонные модели расчета рабочего процесса. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.
2. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
3. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный радиационно-конвективный теплообмен в камере сгорания быстроходного дизеля// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. № 1. 1996. С. 21–36.
4. *Трусов В.И.* Непосредственный впрыск топлива в дополнительную камеру двигателя с низкой степенью сжатия и электрическим зажиганием. Дисс. ... к.т.н. МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1949.
5. *Ando H., Noma K., Iida K., Nakayama O., Yamauchi T.* Mitsubishi GDI Engine Strategies to meet European Requirements. Proceedings AVL «Engine and Environment», Graz. 1997. V. II. P. 55–70.
6. *Bargende M., Burkhardt Ch., Frommelt A.* Besonderheiten der thermodynamische Analyse von DE-Ottomotoren // MTZ. N 1. 2001. S. 56–68.
7. *DI-Ottomotor von PSA* // MTZ. N 7/8, 2000. S. 456.
8. *Eichlseder H., Baumann E., Müller P., Neugebauer S.* Chancen und Risiken von Ottomotoren mit Direkteinspritzung // MTZ. N 3. 2000. S. 144–152.
9. *Erdmann H.D., Eiser A., Geiger U., Heiduk T.* Das neu V6 – Biturbo Aggregat für den Audi RS4 // MTZ. N 7/8. 2000. S. 444–450.
10. *Fraidl G.K.* Über den letzten Entwicklungsstand der Otto-Direkteinspritzung // ATZ—MTZ. Supplement. 1998. S. 14–15.
11. *Fraidl G.K., Piock W., Wirth M., Schöggel P.* Direkteinspritzung bei Ottomotoren: Aktuelle Trends und zukünftige Strategien // MTZ. N 2. 1997. S. 82–85.
12. *Hoppe N., Weberbauer F., Woschni G., Zeilinger K.* Experimentelle Erfassung und Simulation des Betriebsverhaltens von Ottomotoren mit Direkteinspritzung // MTZ. N 7/8. 2003. S. 628–635.
13. *Houston R., Cathcart G.* Combustion and Emission Characteristics of Orbitals Combustion Process Applied to Multi-Cylinder Automotive DI 4-Stroke Engines. SAE Paper 980153 (1998).

14. *List H., Cartellieri W.P.* Dieseltechnik. Grundlagen, Stand der Technik und Ausblick. ATZ/MTZ Sonderausgabe 9, 1999. S. 10–18.
15. *Meurer J.S., Urlaub A.* Development and operational results of the MAN FM combustion system. SAE Paper. 690255 (1969).
16. *Mitchell E., Cobb J.M., Frost R.A.* Design and evaluation of a stratified charge multifuel military engine. SAE Paper. 680042 (1968).
17. *Preussner Ch., Kampmann S.* Benzin-Direkteinspritzung, eine neue Herausforderung für künftige Motorsteuerungssysteme. Teil 2: Einspritzventil und Gemischbildung // MTZ. N 10. 1997. S. 592-598.
18. *Scherenberg H.* Rückblick über 25 Jahre Benzin-Einspritzung in Deutschland // MTZ. N 9. 1955. S. 245–254.
19. *Simko A., Choma M.A., Repko L.L.* Exhaust emission control by the Ford Programmed Combustion Process – PROCO. SAE Paper. 720052 (1972).
20. *Tschöke H., Kreye H.* Diesel-Direkteinspritzung – Benzin- Direkteinspritzung // Dieselmotortechnik. Expert-Verlag. Renningen-Malsheim. 1996. S. 166–186.
21. *Voit W., Stoll H.* Benzineinspritzung am Fahrzeug-Ottomotor // MTZ. N 9. 1952. S. 292–298.
22. *Witzky I.E.* Schichtbarmischung und Verbrennung in einem Motor mit geschichtete Ladung // MTZ. N 1. 1967. S. 21–25.
23. *Winterkorn M., Spiegel L., Bohne P., Söhlke G.* Der Lupo FSI von Volkswagen – so sparsam ist sportlich // ATZ. N 10. Teil 1. 2000. S. 832–841.
24. *Zweitakt-Benzineinspritzung* bei Gutbrod und Goliath // MTZ. N 10. 1952. S. 352–359.

## Предметный указатель

### А

- Абсолютный нуль 29, 390
- Активные молекулы 389
- центры 398

### Б

- Бимолекулярная реакция 386

### В

- Вихревая камера 203
- Воспламенение 427
- вынужденное 427
- гомогенное 427
- гетерогенное 427
- одностадийное высокотемпературное 429, 431
- многостадийное низкотемпературное 429, 431
- преждевременное 428
- тепловое 427
- цепное 427
- Впускной канал спиральный 159–161, 164, 166
- тангенциальный 159–161, 164, 166
- Вязкость паров топлива динамическая 80
- – – кинематическая 288
- Выпрямитель Типпельмана 154
- сферический 156

### Г

- Гипотеза Ландау 272
- Рэля 272

- Горение гетерогенное 367
- гомогенное 367
- Горючее вещество 367

### Д

- Давление рабочего тела 30
- Дальнейность топливного факела 300, 632
- Двигатель бензиновый 236, 240, 616
- – с самовоспламенением 620
- внешнего сгорания 11
- внутреннего сгорания 11
- – роторный 68
- гибридный 235, 237
- двухтактный 12
- Дизеля 39
- комбинированный с газовой связью 55
- – с механической связью 55
- – с наддувом 54, 56
- Кушуля 216
- Ленуара 33, 34
- Отто 11
- – четырехтактный 12
- Ролласона — Бека шеститактный 35
- с внешним смесеобразованием 12, 110, 126, 211
- с внутренним смесеобразованием 12, 105, 108, 122
- с непосредственным впрыскиванием 240, 644
- с непосредственным впрыскиванием бензина 12, 636, 649

- Двигатель с принудительным  
 зажиганием 12, 620  
 – тепловой 11  
 – Тринклера 45  
 Диаграмма индикаторная 15  
 – рабочая 15  
 – тепловая (энтропийная) 15  
 Диаметр капли Заутера 287, 539  
 Дизель 236, 246  
 – с внутренним смесеобразова-  
 нием и самовоспламенением  
 12  
 – с непосредственным впрыски-  
 ванием 644  
 Длина пути перемешивания 573
- З**
- Задержка воспламенения 262,  
 430, 444, 496  
 – физическая 534, 452  
 – химическая 433, 452  
 Зажигание 33, 474, 478  
 – искровое 480  
 – калильное 234, 482  
 – накалиной поверхностью 480  
 – принудительное 189, 236  
 – факельное 483  
 – форкамерно-факельное 214  
 Закон Авогадро 377  
 – Аррениуса 395, 397, 418, 470,  
 484  
 – Вибе 524, 530, 536  
 – впрыскивания топлива 250  
 – Гесса 375, 376  
 – Дальтона 326  
 – действующих масс 370  
 – Кирхгофа 384  
 – нормального распределения  
 (гауссов) 282  
 – Ньютона теплоотдачи 447, 468  
 – распределения Нукиямы —  
 Танасавы 284
- Закон распределения Розина —  
 Рамлера 279  
 – Срезневского 333  
 – Фика 322, 323  
 – Фурье теплопроводности 487,  
 568
- И**
- Интенсивность вихревого дви-  
 жения 149–150  
 Источник теплоты горячий 13  
 – холодный 13
- К**
- Камера сгорания 18, 169  
 – Гессельмана 220  
 – неразделенная 169, 172, 218,  
 219, 228  
 – — открытого типа (однополос-  
 ная) 169  
 – полуразделенная 169, 170, 193  
 – разделенная 169, 201–203, 210,  
 217  
 Квазистатический процесс 28  
 Кинетическая энергия турбу-  
 лентности 579  
 Коэффициент диффузии 79  
 – избытка воздуха 114, 404  
 – — — локальный 116  
 – — — мгновенный 116  
 – лобового сопротивления 86–88  
 – массообмена 326  
 – молекулярного изменения 377,  
 379–383  
 – теплоотдачи 326  
 КПД цикла индикаторный 20  
 – термический 14, 60  
 – эффективный 667
- М**
- Махе-эффект 234  
 Мертвая точка верхняя 16

- Мертвая точка нижняя 16  
Метод лазерно-лоплеровской анемометрии 171, 345  
Механизм Зельдовича 417  
– Фенимора 425, 414  
Модель двухзонная 114, 119, 120, 126, 128–132  
– горения 591–593  
– математическая 37  
– многозонная 132, 135, 137, 138  
– нестационарного турбулентного движения и горения 565  
– нульмерная 142  
– однозонная 100, 128–132  
– основанная на гипотезе Буссинеска 571  
– рейнольдсовых напряжений 571, 589  
– трехмерная топливного факела 307  
– турбулентности 570  
*k*– $\epsilon$ -модель турбулентности 578  
– для высоких чисел Рейнольдса 579  
– для низких чисел Рейнольдса 581  
– – Прандтля 573  
Молекулярность реакции 385  
Мономолекулярная реакция 385
- Н**  
Наддув 54  
– газотурбинный 55  
– двухступенчатый 57  
– динамический (резонансный) 55  
– механический 55  
– одноступенчатый 57  
– с промежуточным охлаждением 57
- О**  
Отопительный коэффициент 26
- Отработавшие газы 403
- П**  
Перетекание (течение вытеснения) 171  
Период индукции (время или период задержки воспламенения) 401  
Пламя горячее 367  
– холодное 367  
Плотность рабочего тела 73  
– топлива 78  
Пограничный слой 574  
Показатель адиабаты 13  
– политропы 13  
– характера сгорания 528  
Порядок реакции 385  
Предкамера 203, 208, 210, 211  
Принцип Вант-Гоффа 385  
– Ле Шателье 373  
Продувка динамическая 158  
– статическая 158  
Продувка–наполнение 19  
Процесс Нилова 196, 201  
– *Baudry* 201  
– *Deutz-AD* 190  
– *Duotherm* 193  
– *FM* 187, 189  
– *Ford-PROCO* 196  
– *Honda CVCC* 212  
– *M* 186  
– *MH* 190  
– *Porsche SKS* 213  
– *Texaco* 196  
– *VW PCI* 212  
– *Wytzki* 196
- Р**  
Работа механическая 14  
– насосных ходов 17  
Рабочее тело 12, 14, 76, 77  
Рабочий объем 17

- Рабочий процесс 628, 635  
– ход поршня 12  
– цикл 12  
Расслоение заряда 196  
Релаксация скорости 86  
Релаксация температуры 92  
Рециркуляция отработавших газов 266, 449
- С**  
Самовоспламенение 427  
CFD-коды  
Скорость движения рабочего тела 74  
– диссипации 579  
– перетекания 176, 217  
– тепловыделения 260, 520, 543, 642  
– химической реакции 393  
Смесеобразование объемное 169, 232  
– объемно-пленочное 169, 170, 189  
– объемно-струйное 169  
– пленочное 169  
Смесь гетерогенная 236  
– гомогенная 213, 236  
Способ расслоения заряда  
– воздушным потоком 625, 626  
– поверхностью стенки 625, 627  
– топливным факелом 625, 626  
Степень сжатия 18, 446  
Стефанов поток 326
- Т**  
Температура критическая первая (Лейденфроста) 337  
– – вторая (Лейденфроста) 337  
– рабочего тела 71  
– самовоспламенения 403  
Теорема Карно 23  
Теория Максвелла — Больцмана 391, 394, 395
- Тепловой взрыв 402, 427, 452, 474  
– насос 26  
Тепловыделение 511, 639  
Теплоемкость паров топлива 80  
– топлива 80  
Теплопроводность паров топлива 80  
– топлива 80  
Теплород 22  
Термодинамический процесс 12  
– – обратный 14  
– – прямой 13  
Токсичные вещества 403  
Топливная пленка 169  
Тримолекулярная реакция 386  
Турбина импульсная 62  
– постоянного давления 60  
Турбулентное пламя 593  
– пристеночное течение 605
- У**  
Угол опережения впрыскивания 251  
Удельный объем 14  
– работа 14  
Уравнение Аррениуса 141, 388, 391  
– состояния Клапейрона 20, 28  
– Фика 321  
– Клапейрона — Клаузиуса 317  
– Навье — Стокса 565, 566  
– неразрывности 567  
– переноса обобщенное 565–567  
– Рейнольдса 566, 567  
– Фурье дифференциальное 483, 485, 487
- Ф**  
Фаза процесса сгорания диффузионная 262, 512  
– – – кинетическая 262, 512

Фактор Больцмана (частотный)  
392  
Формула Вошни 508, 644  
Формулы для расчета  
— — — времени задержки воспла-  
менения 460–468  
— — — дальнотойности факела  
300, 303  
— — — среднего диаметра капель  
285, 288, 291  
Фугитивность (летучесть) 372  
Функция Ван Дриста 576  
— ошибок (интеграл вероятности  
Гаусса) 187, 189

**Х**

Холодильный коэффициент 14, 26

**Ц**

Цепная реакция 397  
— — неразветвленная 398  
— — разветвленная 398  
Цикл термодинамический 12  
— Брайтона 59  
— Дизеля 39, 43  
— Карно 21, 22  
— — холодильный 25  
— комбинированного двигателя с  
импульсной турбиной 57  
— — — с турбиной постоянного  
давления 60, 61  
— — — с промежуточным охлаж-  
дением 62, 63

Цикл обобщенный 32  
— Отто 33, 38, 620  
— рабочий 12  
— роторного двигателя 68  
— Стирлинга 64  
— Тринклера 44, 45, 620

**Ч**

Число Авогадро 392  
— Вебера 270, 275, 291  
— Лапласа 274  
— Нуссельта 93, 488  
— Онезорге 274, 291  
— Пекле 407  
— Прандтля 93  
— Рейнольдса 86, 291, 488  
— Шервуда 136  
— Шмидта 580, 598

**Э**

Экологическая проблема 616  
Экологичность рабочего цикла  
565, 675  
Энергия активации 141, 389  
— — прямой реакции 390  
— — обратной реакции 390  
Энтальпия рабочего тела 82  
Энтропия 15  
— рабочего тела 84  
Эффективность рабочего цикла  
20



## Именной указатель

### А

Абрамович Г.Н. 685  
Аверсон А.Э. 692  
Айзер А. (Eiser A.) 700  
Айхлседер Х. (Eichlseder H.) 700  
Алексеев Б.В. 689  
Алексеев В.П. 4, 473, 688, 692, 695  
Алымов И.П. 29, 679  
Андерсон Д. (Anderson D.) 697  
Андо Х. (Ando H.) 699  
Аниситс Ф. (Anisits F.) 502, 508  
Апциаури А.З. 683  
Араи М. (Arai M.) 310, 463, 506, 687, 692  
Арапов В.В. 685  
Аррениус С. (Arrhenius S.) 368, 388, 391, 395, 397, 470, 471, 472  
Аркоманис С. (Arcoumanis C.) 683  
Аугустин У. (Augustin U.) 686

### Б

Баек С. (Baek S.) 698  
Базаров И.П. 679  
Балакин В.И. 685, 688  
Бам-Зеликович Г.М. 688  
Барба Х. (Barba Ch.) 508, 693, 696  
Баргенде М. (Bargende M.) 508, 644, 645, 680, 693, 698, 699  
Бардон М. (Bardon M.) 689  
Бартельме Л. (Barthelmä L.) 683  
Бартьелме Ф. (Bartlmä F.) 690  
Бархо Х. (Barcho Ch.) 685

Барч Х. (Bartsch Ch.) 684  
Басара Д. (Basara D.) 698  
Басхузен Р. (Basshuesen R.) 683, 686  
Баулх Д. (Baulch D.) 417, 690  
Бауман Н. (Baumann N.) 132, 302, 335, 473  
Бейл Н. (Beale N.) 684  
Белый А.С. 686  
Бенц К. (Benz K.) 37  
Бергер Х. (Berger H.) 684  
Бернулли Д. 278  
Беспалов И.В. 686  
Бетхер К. (Betcher K.) 685  
Бикен А. (Bicen A.) 683  
Биндер К. (Binder K.) 693  
Биун Д. (Byun D.) 698  
Блумберг П. (Blumberg P.) 697  
Бо де Роша А. (Beau de Rochas A.) 35, 39  
Бойль Р. (Boyle R.) 28  
Бокхорн Х. (Bockhorn H.) 691  
Болт Дж. (Bolt J.) 465, 693  
Боне П. (Bohne P.) 700  
Бормайстер И. (Bormeister J.) 691  
Боулоухос К. (Boulouchos K.) 508, 691, 693, 696  
Боуман С. (Bowman C.) 691  
Бочков М.В. 690  
Брайтон Дж. (Brighton J.) 39, 40, 59, 61  
Бракко Ф. (Bracco F.) 294, 295, 687, 691  
Браун К. (Braun K.) 373

- Брилинг Н.Р. 4  
Бромер А. (Brohmer A.) 698  
Бругенман Х. (Brugenmann H.) 687  
Буркхардт Х. (Burkhardt Ch.) 508, 693, 696, 699  
Буссинеск Г. (Bossinesq G.) 571  
Быстров Ю.А. 697  
Бюхи А. (Büchi A.) 55
- В**  
Вааге П. (Waage P.) 367  
Вагнер В. (Wagner W.) 693  
Вант-Гофф Я. (Vant-Hoff J.) 368, 385, 387  
Вайанд И. (Wajand J.) 697  
Вайтлоу Дж. (Whitelaw J.) 683  
Вакури И. (Wakuri Y.) 310, 687  
Валишвили Н.В. 682, 683  
Валлкер Р. (Wallker R.) 690  
Валцел П. (Walzel P.) 294, 296, 687  
Ван Дриест Е. (Van Driest E.) 576  
Ван Ичунь 685  
Ванкель Ф. (Wankel F.) 68  
Ваннемахер Х. (Wannemacher H.) 682  
Ваншейдт В.А. 4  
Варде К. (Varde K.) 294, 295, 687  
Варде Л. (Varde L.) 687  
Варнатц И. (Warnatz J.) 690, 692  
Варшавский Г.А. 4  
Вахтлер К. (Wachtler K.) 694  
Вебер Дж. (Weber J.) 267, 691  
Вебербауер Ф. (Weberbauer F.) 699  
Вибе И.И. (Wiebe I., Viebe I.) 4, 524, 525, 536, 695, 696  
Виммер А. (Wimmer A.) 698  
Винтеркorn М. (Winterkorn M.) 700  
Вирбелайт Ф. (Wirbeleit F.) 686  
Вирт М. (Wirth M.) 699
- Вихерт М.М. 682  
Вихман В. (Wichmann V.) 694  
Вицки И. (Witzky I.) 196, 700  
Воеводский В.В. 690  
Воинов А.Н. 4, 201, 457, 488, 682, 692  
Войт В. (Voit W.) 700  
Волчков Э.П. 697  
Вольфер Г. (Wolfer H.) 452, 460, 501, 502, 505, 695  
Вошни Г. (Woschni G.) 4, 6, 139, 488, 644–646, 681–684, 691, 695  
Врай К. (Wray K.) 692  
Вырубов Д.Н. 4, 93, 94, 313, 324, 688, 692, 695
- Г**  
Гайворонский А.И. 697  
Гал-Ор Б. (Gal-or B.) 681  
Гальшев Ю.В. 6  
Гардинер Д.П. (Gardiner D.P.) 689  
Гаук Ф. (Hauk F.) 160  
Гаусс К. (Gauss K.) 283  
Гейгер У. (Geiger U.) 699  
Гей-Люссак Дж. (Gay-Lussak J.) 28  
Гельфер Я.М. 679  
Гесс Г.И. 375  
Гизе И. (Giese J.) 687  
Гиршович Т.А. 685  
Глаголев Н.М. 4  
Голосов А.С. 6, 681, 685, 690  
Голубков Л.Н. 686  
Гольдштейн С. (Goldstein S.) 689  
Гончар Б.М. 4, 521, 522, 544, 695  
Госман А. (Gosman A.) 681, 684  
Гребе У. (Grebe U.) 684  
Григорьев Ю.М. 477  
Гриневецкий В.И. 4, 72  
Гришин А.М. 690  
Грот К. (Groth K.) 693, 694  
Грудский Ю.Г. 682

Гульдберг К. (Guldberg K.) 368  
Гуссак Л.А. 201  
Гюльднер Г. (Guldner G.) 34, 679

**Д**

Даймлер Г. (Daimler G.) 37, 55  
Деянин С.Н. 685  
Дейч М.Е. 680  
Демидов М.И. 690  
Дент Дж. (Dent J.) 309, 686  
Депп Г.Ф. 42  
Джонстон С. (Jonston S.) 684  
Дибле Р. (Dibble R.) 692  
Дизель Р. (Diesel R.) 12, 39–50,  
55, 59, 61–63, 69, 247, 627,  
665, 679  
Димитров Д. (Dimitrov D.) 698  
Добров Н.В. 695  
Додж Л. (Dodge L.) 691  
Домбровский Л.А. 688  
Дрисдал Д. (Drysdale D.) 691  
Дубовицкий Ф.И. 692  
Дубовкин Н.Ф. 688  
Дьяченко Н.Х. 4, 695, 696

**Е**

Еберле М. (Eberle M.) 687, 691,  
694  
Ельзбетт К. (Elsbett K.) 684  
Ельзбетт Л. (Elsbett L.) 684  
Ердман Х. (Erdmann H.) 699  
Еремеев А.Ф. 685, 688  
Ерзембек М. (Jerzembek M.) 687  
Ефимов С.И. 4

**З**

Замс Т. (Sams Th.) 692  
Захариас Ф. (Zacharias F.) 680  
Звонов В.А. 417, 690, 695  
Зейлигер М. (Seiliger M.) 46  
Зейлигер К. (Zeilinger K.) 681,  
684, 691, 699

Зельдович Я.Б. 416, 690  
Золке Г. (Söhlke G.) 701

**И**

Иагер П. (Jager P.) 686  
Иарон И. (Yaron I.) 681  
Иванченко Н.Н. 4  
Иващенко Н.А. 5, 6, 681, 685,  
690, 699  
Иида К. (Iida K.) 699  
Име Х. (Ihme H.) 689  
Ирисов А.С. 688  
Исаев С.А. 697  
Иуст Т. (Just T.) 690

**К**

Кавтарадзе З.Р. 6, 679, 681, 690,  
698  
Кавтарадзе Р.З. (Kavtaradse R.S.,  
Kavtaradze R.Z.) 6, 294, 509,  
680–686, 688–690, 692, 697,  
699  
Кадота Т. (Kadota T.) 293, 463,  
506, 686, 692  
Калашников С.А. 683, 692  
Калиш Г.Г. 4  
Камзолов Е.П. 688  
Кампманн С. (Kampmann S.) 700  
Канцельсон Б.Д. 93, 94  
Карман Т. (Karman T.) 680  
Карно С. (Carnot S.) 3, 14, 21, 22,  
24–31, 41, 42, 67, 679  
Картеллиери В. (Cartellieri W.) 700  
Кафаров В.В. 688  
Качкарт Дж. (Cathcart G.) 699  
Кек Дж. (Keck J.) 600  
Кемпбелл И. (Campbell I.) 691  
Кемпбелл П. (Campbelle P.) 691  
Керр И. (Kerr J.) 690  
Киллман И. (Killmann I.) 680  
Клапейрон Б. (Klapreyron B.) 20,  
27–29, 317, 371

- Кларк А. (Clarce A.) 694  
Кларк Дж. (Clarec J.) 694  
Клаузиус Р. (Clausius R.) 15, 29, 278, 317  
Клингман В. (Klingmann V.) 687  
Книхт Б. (Knight B.) 293, 295, 296, 463, 506, 687, 694  
Кобос С. (Cobos C.) 690  
Кокс А. (Cox A.) 690  
Колмогоров А.Н. 578  
Кондепуди Д. 578, 679  
Кондратьев В.Н. 690  
Копцев В.П. 686, 689  
Костин А.К. 696  
Крайе Х. (Kreye H.) 700  
Крассинг Г. (Krassing G.) 691  
Краузе Д. (Krause D.) 694  
Краусгрилл Х. (Krausgrill Ch.) 684  
Крашенинников С.Ю. 685  
Круглов М.Г. 4, 6, 680, 681, 683, 685, 688  
Кубеш Дж. (Kubesh J.) 691  
Кудрявцев Н.А. 697  
Кудряш А.П. 692  
Кульчицкий А.Р. 690  
Куммер И. (Kummer I.) 696  
Кунтц М. (Kuntz M.) 698  
Куо Т. (Kuo T.) 294, 295, 687  
Кутовой В.А. 292, 295  
Кутателадзе С.С. 680, 685, 688  
Кушкуль В.М. 215, 216
- Л**  
Лаврентьев М.А. 685  
Лазарев Е.А. 695  
Лайпертц А. (Leipertz A.) 689  
Ланге И. (Lange J.) 691  
Ланген Е. (Langen E.) 37  
Лангтри Р. (Langtry R.) 698  
Ландау Л.Д. 268, 269, 270, 697  
Лаундер Б. (Lauder B.) 583, 590  
Лебедев В.П. 697  
Лебедев О.Н. 683, 692  
Лебон Ф. (Lebon F.) 36  
Ленгмюр И. (Langmuir I.) 316  
Ленуар Ж. (Lenoir J.) 11, 33, 34, 37, 39  
Леонов О.Б. 4, 335, 688  
Леонтьев А.И. 6, 688, 697  
Ле Шателье А. (Le Chatelier A.) 373  
Ли Д.Х. 683  
Либрвич Б.Г. 4  
Линде К. (Linde K.) 40  
Лиоу В. (Liou W.) 698  
Лист Х. (List H.) 700  
Лифшиц Е.М. 275, 697  
Лиханов В.А. 683  
Лойд А. (Lloyd A.) 691  
Лойцянский Л.Г. 94, 697  
Луканин В.Н. 4, 679, 692  
Лутц Т. (Lutz T.) 687, 694  
Луцкий Б. 36  
Лушпа А.И. 690  
Лышевский А.С. 4, 292, 295, 309, 685  
Льотко В. 692  
Людвиг П. (Ludwig P.) 681  
Люстгартен Г. (Lustgarten G.) 310, 687
- М**  
Маас У. (Maas U.) 692  
Магидович Л.Е. 695  
Маерс П. (Myers P.) 687, 694  
Мазинг Е.К. 4, 72  
Майбах В. (Maybach W.) 37  
Майер Р. (Meier R.) 31, 376  
Майорана Г. (Maiorana G.) 687  
Максвелл Дж. (Maxwell J.) 278, 316  
Мальчук В.И. 685  
Манджгаладзе А.А. 683  
Маринин В.С. 693

Марков В.А. 685  
Мариотт Е. (Marriot E.) 28  
Маршалл В. (Marshall W.) 328, 689  
Масленников М.М. 4  
Махалдиани В.В. 4  
Махе Х. (Mache H.) 234  
Махов В.З. 546, 695  
Мгеладзе Р.А. 683  
Мееринг А. (Mehring A.) 698  
Мейер Е. (Meyer E.) 47  
Менделеев Д.И. 29, 371, 679  
Ментер Ф. (Menter F.) 589, 698  
Мержанов А.Г. 477, 692  
Меркер Г. (Merker G.) 4, 682, 684, 691, 698  
Метхалчи М. (Metghalchi M.) 600  
Мизернюк Г.Н. 4  
Милликен Р. (Milliken R.) 680  
Митчелл Е. (Mitchell E.) 700  
Мойрер И. (Meurer J.) 700  
Моримацу Т. (Morimatzu T.) 686  
Москаленко Д.А. 693  
Мюллер В. (Müller W.) 682  
Мюллер П. (Müller P.) 699  
Мюрелс Т. (Murrels T.) 690

**Н**

Навьё Л. (Navier L.) 565  
Наегели Д. (Naegeli D.) 691  
Найдель В. (Neidel W.) 682  
Накаяма О. (Nakayama O.) 699  
Нейман К. (Neuman K.) 520, 696  
Нернст В. (Nernst W.) 31  
Никурадзе И. (Nikuradse J.) 577, 584  
Нилов Н.А. 201  
Нишида К. (Nishida K.) 691  
Нобель Э. (Nobel E.) 46  
Нойгебауер С. (Neugebauer S.) 464, 506, 689, 694, 699  
Ноке И. (Nocke J.) 694  
Нома К. (Noma K.) 699

**О**

Оберг Х. (Oberg H.) 507, 694  
Окасаки Т. (Okasaki T.) 686  
Онезорге В. (Ohnesorge W.) 687  
Онищенко Д.О. 6, 697  
Орлин А.С. 4, 680, 681, 683, 685, 688  
Орсцаг С. (Orszag S.) 698  
Отто Н. (Otto N.) 11, 12, 16, 18, 19, 33, 34, 36–41, 43, 44, 46–53, 56, 61, 63, 69  
Отто Ф. (Otto F.) 682, 684, 691, 698

**П**

Павлов Е.П. 686, 689  
Патанкар С. (Patankar S.) 602, 604, 697  
Патрахальцев Н.Н. 6  
Патгас К. (Pattas K.) 691  
Пауль П. (Paul G.) 682  
Пашков В.В. 693  
Петерс Н. (Peters N.) 691  
Петриченко М.Р. 681–683, 685, 688  
Петриченко Р.М. 4, 6, 680, 685  
Пиллинг М. (Pilling M.) 690  
Пиок В. (Piock W.) 699  
Пиркер Г. (Pirker G.) 698  
Пишингер Р. (Pischinger R.) 4, 682, 691  
Планк М. (Plank M.) 30  
Плетчер Р. (Pletcher R.H.) 697  
Полай А. (Poley A.) 684  
Портнов Д.А. 4, 685  
Потц Д. (Pötz D.) 689  
Поупа Д. (Popa D.) 687  
Прандтль Л. (Prandtl L.) 94, 357, 573, 578  
Прешер К. (Prescher K.) 682  
Пригожин И. 679  
Происнер Х. (Preussner Ch.) 700  
Пуассон С. 27  
Пугачев Б.П. 522, 545, 695, 697

**Р**

Разлейцев Н.Ф. 4, 547, 554, 556,  
557, 560, 563, 681, 696  
Разлейцев Р.Ф. 696  
Райтман Х. 35  
Ранц В. (Ranz W.) 328, 689  
Рао В. (Rao V.) 689  
Раушенбах Б.В. 686  
Ревинкель Х. (Rehwinkel H.) 682  
Рейнольдс О. (Reynolds O.) 87, 89,  
91, 93, 94  
Рейсс Х. (Reiss H.) 316  
Рейтц Р. (Reitz R.) 607, 698  
Репко Л.Л. (Repko L.L.) 700  
Риваз И. (De Rivas I.) 33  
Рикардо Г. (Ricardo H.) 149  
Робинсон С. (Robinson C.) 684  
Росси Г. (Rossi G.) 687  
Рэлей Дж. У. (Lord Rayleigh J.U.)  
267, 271, 272

**С**

Сабатье П. (Sabatier P.) 46  
Садовников П.Я. 690  
Садовски С. (Sadowski S.) 694  
Сайкин А.М. 683  
Самсонов Е.П. 696  
Сасс Ф. (Sass F.) 679  
Свиридов Ю.Б. 4, 335, 457, 688,  
692  
Семенов В.С. 507  
Семенов Б.Н. 685, 688, 689  
Семенов Н.Н. 368, 428, 444, 452,  
474, 478, 690  
Сербинов А.И. 452, 693  
Симко А. (Simko A.) 700  
Ситкей Г. (Sitkei G.) 292, 295, 309,  
461, 502, 505, 680, 687, 689,  
693  
Скрипник А.А. 681, 685, 690, 693  
Смит П. (Smit P.) 689  
Соколик А.С. 4, 693

Сомов В.А. 683, 692  
Сон Дж.Х. 683  
Спадачини Л. (Spadaccini L.) 502,  
508, 694  
Сполдинг Д. (Spalding D.) 583,  
602  
Срезневский В. 316, 333, 335  
Стефан Й. (Stefan J.) 326, 328–330  
Стечкин Б.С. 4  
Стирлинг Р. (Stirling R.) 11, 64–67  
Стокс Г. (Stokes G.) 87, 88, 90, 348  
Страдомский М.В. 680  
Стрингер Ф. (Stringer F.) 509, 694  
Стрит Р. (Strit R.) 36

**Т**

Такасаки К. (Takasaki K.) 310, 687  
Таннехил Дж. (Tannehill J.) 697  
Таучар Г. (Taučar G.) 691  
Тачл Р. (Tatschl R.) 698  
Тве И. (Twe J.) 690  
Те Велде Дж. (Te Velde J.) 508, 694  
Тear Дж. (Teare J.) 692  
Темпле-Педиани Р. (Temple-Pe-  
diani R.) 689  
Тимофеева Ф.А. 93, 94  
Типпельман Г. (Tippelmann G.)  
154, 684  
Тодес О.М. 473, 693  
Толстов А.И. 4, 460, 501–503, 505,  
693  
Томсон У. Thomson W. (барон  
Кельвин (Kelvin)) 26, 29  
Торквато С. (Torkvato S.) 689  
Тринклер Г.В. 35, 44–47, 49, 50,  
53, 58, 61, 63, 69  
Трифуневич Р. (Trifunović R.) 682  
Трусов В.И. 686, 699  
Туге М. (Tuge M.) 508, 695

**У**

Угаглия С. (Ugaglia C.) 687

Уехара О. (Uehara O.) 687, 694  
 Ульянов И.Е. 686  
 Урлауб А. (Urlaub A.) 4, 417, 684,  
 692, 700

**Ф**

Фавр А. (Favre A.) 569, 698  
 Файнлейб Б.Н. 686  
 Федоров В.А. 697  
 Фенимор С. (Fenimore C.) 414,  
 425, 691  
 Ферми Э. (Fermi E.) 371, 690  
 Феттес Х. (Fettes Ch.) 689  
 Фик А. (Fick A.) 322, 329  
 Филиппов Г.А. 680  
 Фогел Х. (Vogel Ch.) 695  
 Фортнагел М. (Fortnagel M.) 687  
 Фрайдл Г. (Fraidl G.) 699  
 Франк П. (Frank P.) 690  
 Франк-Каменецкий Д.А. 417, 478,  
 690, 693  
 Фресслинг Н. (Frössling N.) 94,  
 316  
 Фролов С.М. 693  
 Фроммелт А. (Frommelt A.) 699  
 Фрост Р. (Frost R.) 700  
 Фуджимото Х. (Fujimoto H.) 503,  
 504, 507, 693  
 Фуруа Т. (Furua T.) 686  
 Фурукава Х. (Furukava H.) 686  
 Фурье Ж. (Fouquier J.) 322, 329

**Х**

Хазе Ф. (Hase F.) 462, 501, 693  
 Хайдер Г. (Heider G.) 417, 681, 691  
 Хайдук Т. (Heiduk T.) 699  
 Хайман Г. (Haumann G.) 690  
 Хан З. (Han Z.) 607, 698  
 Ханиалич К. (Hanjalić K.) 590, 698  
 Харвей П. (Harvey P.) 681, 684  
 Харденберг Х. (Hardenberg H.)  
 462, 501, 693

Хачиян А.С. 683, 692  
 Хедгайтс Д. (Hodgetts D.) 684  
 Хейвуд Дж. (Heywood J.) 4, 462,  
 683, 694  
 Хенайн Н. (Henain N.) 465, 507,  
 693  
 Хенчел И. (Hentschel J.) 691  
 Херцог П. (Herzog P.) 680, 686  
 Хессе А. (Hesse A.) 508, 694  
 Хеффнер Г. (Häffner G.) 692  
 Хиншелвуд С. (Hinshelwood S.)  
 368, 385  
 Хироясу Х. (Hiroyasu H.) 4, 293,  
 295, 296, 463, 502, 503, 504,  
 506, 687, 691, 692  
 Хмела Ф. (Chmela F.) 686, 698  
 Ховах М.С. 4  
 Хоппе Н. (Hoppe N.) 699  
 Хорн Д. (Horne D.) 691  
 Хохенберг Г. (Hohenberg G.) 646,  
 680, 684  
 Хубер Е. (Huber E.) 645, 646, 680  
 Хюбнер В. (Hübner W.) 691  
 Хюстон Р. (Houston R.) 699

**Ц**

Цайлингер К. (Zeilinger K.) 6, 489,  
 682  
 Цитцлер Г. (Zitzler G.) 6, 489

**Ч**

Чернышев Г.Д. 683  
 Чесноков С.А. 690  
 Четверушкин Б.А. 690  
 Чоке Х. (Tschöke H.) 700  
 Чома М.А. (Choma M.A.) 700  
 Чу В.С. (Chiu W.S.) 686  
 Чу Дж.А. (Zhu J.A.) 699

**Ш**

Шабат Б.В. 685  
 Шаббир А. (Shabbir A.) 698

- Шаффиц В. (Schaffiz W.) 680  
Шатров М.Г. 679  
Шахед С. (Shached C.) 686  
Шварц Х. (Schwarz Ch.) 682, 684, 691, 698  
Шеренберг Х. (Scherenberg H.) 700  
Шефер Ф. (Schäfer F.) 683, 686  
Шеффер К. (Schäffer K.) 316  
Шеховцов А.Ф. 683, 688  
Ши Т.Х. (Shih T.H.) 698  
Шибанов А. В. 697  
Шиндлер К. (Schindler K.) 80, 680  
Шипински Дж. (Shipinski J.) 293, 295, 296, 687, 694, 698  
Шлихтинг Г. (Schlichting G.) 689  
Шмидт П. (Schmidt P.) 294, 296, 687  
Шмидт Ф. (Schmidt F.) 502, 508, 694  
Шнайдер В. (Schneider W.) 687, 694  
Шнайдер И. (Schneider J.) 699  
Шогл П. (Schöggel P.) 699  
Шпигел Л. (Spiegel L.) 700  
Шпитцмюлер К. (Spitzmüller K.) 694
- Шпрогис В. (Sprogis W.) 695  
Шрайнер К. (Schreiner K.) 696  
Шрөтер М. (Schröter M.) 42  
Штаз М. (Stas M.) 697  
Штайнбрөнер У. (Steinbrenner U.) 685  
Штайнмайер Т. (Steinmayr T.) 684  
Штиш Г. (Stiesch G.) 682, 684, 691, 698  
Штипер К. (Stieper K.) 684, 695  
Штолл Х. (Stoll H.) 700  
Штуокли М. (Stöckli M.) 694  
Шубигер Р. (Schubiger R.) 691  
Шульце Т. (Schulze T.) 689
- Э**  
Эйнштейн А. (Einstein A.) 31  
Элькотб М. (Elkotb M.) 294, 295, 689  
Эфрос В.В. 693
- Я**  
Ямаучи Т. (Yamauchi T.) 699  
Янг З. (Yang Z.) 698  
Янг И. (Yang Y.) 310, 687  
Яхот В. (Yakhot V.) 698



## Оглавление

От автора.....	3
Введение.....	7
<b>1. Термодинамические циклы поршневых и комбинированных двигателей.....</b>	<b>11</b>
1.1. Рабочий процесс в поршневых двигателях.....	11
1.1.1. Виды поршневых двигателей.....	11
1.1.2. Основные термодинамические понятия.....	12
1.1.3. Работа, совершаемая в цилиндре поршневого двигателя.....	14
1.1.4. Четырехтактный двигатель.....	15
1.1.5. Двухтактный двигатель.....	18
1.1.6. Реальный и термодинамический циклы. Их эффективность.....	20
1.2. Цикл Карно.....	21
1.2.1. Краткая историческая справка.....	21
1.2.2. Прямой цикл Карно. Термический КПД. Теорема Карно.....	22
1.2.3. Обратный цикл Карно. Холодильный и отопительный коэффициенты.....	25
1.2.4. Роль Карно в развитии термодинамики.....	27
1.3. Обобщенный термодинамический цикл поршневых и комбинированных двигателей.....	32
1.4. Цикл Отто.....	33
1.4.1. Прообразы современных двигателей Отто.....	33
1.4.2. Термодинамический цикл Отто.....	38
1.5. Цикл Дизеля.....	39
1.5.1. Прообразы современных двигателей Дизеля.....	39
1.5.2. Термодинамический цикл Дизеля.....	43
1.6. Цикл Тринклера.....	44
1.6.1. Краткая историческая справка. Термодинамический цикл Тринклера.....	44
1.6.2. Сравнительный анализ термодинамических циклов поршневых двигателей.....	48
1.7. Термодинамические циклы комбинированных двигателей.....	54
1.7.1. Основные схемы.....	54
1.7.2. Термодинамический цикл комбинированного двигателя с импульсной турбиной.....	57
1.7.3. Термодинамический цикл комбинированного двигателя с турбиной постоянного давления.....	60

---

1.7.4. Термодинамический цикл комбинированного двигателя с промежуточным охлаждением рабочего тела .....	62
1.8. Термодинамический цикл Стирлинга .....	64
1.9. О термодинамических циклах роторных двигателей внутреннего сгорания.....	68
<b>2. Термодинамические параметры рабочего тела .....</b>	<b>70</b>
2.1. Особенности изменения параметров рабочего тела. Локальные параметры.....	70
2.2. Рабочее тело как многофазная среда .....	74
2.3. Теплофизические свойства компонентов рабочего тела .....	77
2.4. Релаксация скорости .....	86
2.5. Релаксация температуры .....	92
<b>3. Моделирование рабочего процесса в поршневых двигателях ....</b>	<b>97</b>
3.1. Понятие модели .....	97
3.2. Однозонная модель .....	100
3.2.1. Основные предпосылки создания. Коэффициент избытка воздуха.....	100
3.2.2. Основные уравнения. Задачи расчета рабочего процесса .....	103
3.2.3. Расчет изменения температуры и давления в рабочем процессе двигателя с внутренним смесеобразованием .....	105
3.2.4. Расчет скорости тепловыделения в рабочем процессе двигателя с внутренним смесеобразованием.....	108
3.2.5. Особенности однозонной модели двигателя с внешним смесеобразованием .....	110
3.3. Двухзонная модель .....	114
3.3.1. Основные предпосылки создания. Коэффициент избытка воздуха .....	114
3.3.2. Определение мгновенных значений массы рабочего тела в отдельных зонах .....	117
3.3.3. Основные уравнения двухзонной модели .....	119
3.3.4. Особенности расчета теплообмена в рабочем процессе двигателя с внутренним смесеобразованием .....	122
3.3.5. Определение мгновенных значений объема рабочего тела в отдельных зонах .....	125
3.3.6. Особенности двухзонной модели рабочего процесса двигателя с внешним смесеобразованием .....	126
3.3.7. Сравнительный анализ одно- и двухзонных моделей.....	128
3.4. Многозонная модель .....	132
3.4.1. Основная система уравнений.....	133
3.4.2. Расчет скоростей испарения и сгорания в отдельных зонах .....	135
3.4.3. Массообмен между зонами.....	137
3.4.4. Теплообмен со стенками КС и отдельными зонами.....	138
3.4.5. Анализ результатов расчета.....	140

<b>4. Организация рабочего процесса в поршневых двигателях</b> .....	143
4.1. Генерация вихревого движения заряда .....	143
4.2. Интенсивность вихревого движения заряда и методы ее определения .....	148
4.3. Интенсивность вихревого движения воздушного заряда в быстроходном двигателе с тангенциальным и спиральным впускными каналами .....	159
4.4. Камеры сгорания и способы смесеобразования в поршневых двигателях .....	168
4.4.1. Особенности рабочего процесса в полуразделенных КС .....	170
4.4.3. Особенности рабочего процесса в неразделенной КС .....	218
4.5. О рабочих процессах гибридных двигателей .....	235
<b>5. Впрыскивание и распыливание топлива в поршневых двигателях</b> .....	240
5.1. Впрыскивание топлива .....	240
5.1.1. Бензиновые двигатели .....	240
5.1.2. Дизели .....	246
5.1.3. Характеристики впрыскивания топлива .....	250
5.1.4. Влияние многократного впрыскивания на эффективные и экологические показатели рабочего процесса .....	256
5.2. Теория распада струи жидкого топлива .....	267
5.3. Вторичное дробление и оптимальные размеры капель .....	275
5.4. Топливный факел как статистический ансамбль капель различных размеров .....	278
5.5. Средний диаметр капель топлива .....	285
5.6. Вывод формулы среднего диаметра капель на основе теории подобия и размерности .....	288
5.7. Полуэмпирические формулы для расчета среднего диаметра капель .....	291
5.8. Динамика топливного факела .....	298
5.9. Полуэмпирические формулы для расчета динамики топливного факела .....	308
<b>6. Испарение топлива в поршневых двигателях</b> .....	313
6.1. Некоторые особенности испарения топлива .....	313
6.2. Нестационарная диффузия паров топлива .....	321
6.3. Подобие процессов тепло- и массообмена. Стефанов поток .....	326
6.4. Испарение капель топлива в объеме камеры сгорания .....	330
6.5. Испарение капель топлива на нагретой поверхности стенки камеры сгорания .....	335
6.6. Расчет пограничного слоя при наличии топливной пленки .....	347
6.6.1. Основные предпосылки .....	348

---

6.6.2. Расчет динамического пограничного слоя в смеси воздуха и капель топлива .....	350
6.6.3. Расчет тепловых потоков в турбулентном пограничном слое в смеси воздуха и капель топлива.....	362
<b>7. Основы теории горения в поршневых двигателях .....</b>	<b>367</b>
7.1. Понятие горения. Скорость химической реакции. Закон действующих масс.....	367
7.2. Тепловой эффект химической реакции. Закон Гесса .....	373
7.3. Коэффициент молекулярного изменения и его зависимость от способа смесеобразования .....	376
7.4. Влияние температуры на тепловой эффект реакции. Молекулярность и порядок реакции.....	384
7.5. Определение константы скорости реакции на основе теории Максвелла — Больцмана.....	391
7.6. Влияние давления на скорость химической реакции.....	395
7.7. Механизм и кинетика цепных химических реакций.....	397
7.8. Образование токсичных веществ.....	403
7.8.1. Состав отработавших газов.....	403
7.8.2. Оксид углерода.....	405
7.8.3. Несгоревшие углеводороды.....	407
7.8.4. Твердые частицы.....	410
7.8.5. Оксиды азота .....	413
<b>8. Задержка воспламенения .....</b>	<b>427</b>
8.1. Высоко- и низкотемпературное воспламенение. Химическая задержка воспламенения.....	427
8.1.1. Воспламенение.....	427
8.1.2. Высокотемпературное одностадийное воспламенение .....	428
8.1.3. Низкотемпературное многостадийное воспламенение.....	429
8.1.4. Характеристика воспламенения углеводородного топлива. Кинетическая природа воспламенения .....	431
8.2. Время задержки воспламенения .....	433
8.2.1. Физическая задержка воспламенения.....	433
8.2.2. Определение момента времени начала воспламенения.....	436
8.3. Основные факторы, влияющие на задержку воспламенения....	444
8.4. Роль химических и физических процессов в задержке воспламенения .....	452
8.4.1. Экспериментальный метод определения энергии активации и порядка реакции.....	452
8.4.2. Оценка лимитирующей роли химических и физических процессов по экспериментальным значениям энергии активации.....	454
8.5. Полуэмпирические формулы для расчета времени задержки воспламенения .....	459

8.6. Определение времени задержки воспламенения на основе уравнения сохранения энергии.....	467
8.7. Теория теплового взрыва. Теория зажигания .....	474
8.7.1. Теория теплового взрыва. Число Семенова .....	474
8.7.2. Теория зажигания.....	478
8.7.3. Граничные условия зажигания накаливаемой поверхностью.....	483
8.8. Экспериментальное исследование задержки воспламенения для различных топлив .....	489
8.8.1. Краткое описание экспериментальной установки.....	489
8.8.2. Задержка воспламенения при работе двигателя на газообразных топливах .....	496
8.8.3. Задержка воспламенения при работе двигателя на дизельном топливе.....	501
<b>9. Методы расчета тепловыделения в поршневых двигателях .....</b>	<b>511</b>
9.1. Основные виды тепловыделения .....	511
9.1.1. Однократное тепловыделение. Кинетическая и диффузионная фазы процесса сгорания.....	511
9.1.2. Двухкратное тепловыделение.....	515
9.2. Расчет тепловыделения на основе бимолекулярной реакции ...	516
9.3. Полуэмпирические зависимости для расчета скорости тепловыделения .....	520
9.4. Расчет тепловыделения на основе теории цепных реакций. Закон Вибе.....	524
9.4.1. Вывод уравнения (закона) Вибе .....	524
9.4.2. Показатель характера сгорания .....	528
9.4.3. Распространение закона Вибе на двухфазный процесс сгорания .....	530
9.4.4. Модификация закона Вибе с учетом переменного показателя характера сгорания .....	536
9.5. Скорость тепловыделения как плотность распределения вероятности .....	543
9.6. Моделирование процесса сгорания с учетом процессов испарения, диффузии и химического преобразования .....	545
9.6.1. Физико-химические факторы .....	545
9.6.2. Тепловыделение в период задержки воспламенения .....	548
9.6.3. Сгорание в процессе топливоподачи .....	549
9.6.4. Сгорание после окончания топливоподачи.....	556
9.6.5. Эмпирические коэффициенты в расчетных формулах тепловыделения .....	560
<b>10. Трехмерное моделирование процессов переноса и турбулентного горения в поршневых двигателях .....</b>	<b>565</b>
10.1. Модель нестационарного турбулентного движения и горения рабочего тела .....	565
10.2. Модели турбулентности .....	570

---

10.2.1. Классификация моделей турбулентности .....	570
10.2.2. Полуэмпирическая модель турбулентности Прандтля .....	573
10.2.3. $k$ — $\epsilon$ -модель турбулентности .....	578
10.2.4. Другие двухпараметрические модели турбулентности .....	586
10.2.5. Модели рейнольдсовых напряжений .....	589
10.3. Моделирование турбулентного течения с горением. Модели горения .....	591
10.3.1. Модель турбулентного горения Магнуссена—Хартагера.....	593
10.3.2. Модель горения с учетом скорости турбулентного пламени....	594
10.3.3. Модель когерентного пламени (CFM-модель) .....	597
10.4. Метод численного интегрирования уравнений переноса .....	601
10.4.1. Пристеночное турбулентное течение в КС .....	605
10.4.2. Дискретизация расчетной области (объема цилиндра двигателя) .....	608
10.5. Результаты численных экспериментов по влиянию формы КС на изменение локальных параметров рабочего тела и концентраций оксидов азота.....	610
<b>11. Проблемы усовершенствования и перспективы развития поршневых двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива .....</b>	<b>616</b>
11.1. Бензиновые двигатели .....	616
11.1.1. Особенности рабочего процесса .....	616
11.1.2. Процесс смесеобразования .....	619
11.1.3. Способы расслоения заряда .....	625
11.1.4. Организация рабочего процесса .....	628
11.1.5. Расчет рабочего процесса.....	635
11.1.6. Топливная экономичность и экологические показатели .....	646
11.1.7. Проблемы усовершенствования и перспективы развития бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием ...	649
11.2. Дизели с непосредственным впрыскиванием топлива .....	664
11.2.1. Перспективы развития.....	664
11.2.2. Особенности организации рабочего процесса .....	667
11.2.3. Анализ топливной экономичности и экологических показателей.....	675
<b>Список литературы .....</b>	<b>679</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>701</b>
<b>Именной указатель .....</b>	<b>706</b>

*Учебное издание*

**Кавтарадзе Реваз Зурабович**

# **Теория поршневых двигателей**

## **Специальные главы**

Редактор *Г.А. Нилова*  
Технический редактор *Э.А. Кулакова*  
Художники *С.С. Водчиц, Н.Г. Столярова*  
Корректор *Л.Н. Петрова*  
Компьютерная графика *Т.Н. Аверчивой*  
Компьютерная верстка *С.Ч. Соколовского*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

Санитарно-эпидемиологическое заключение  
№ 77.99.60.953.Д.003961.04.08 от 22.04.2008 г.

Подписано в печать 06.11.08. Формат 60×90/16. Печать офсетная  
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 45  
Уч.-изд. л. 44,5. Тираж 2000 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5  
*E-mail*: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)

Отпечатано с готовых диапозитивов в ГУП ППП «Типография «Наука»  
121099, Москва, Шубинский пер., 6