

*К 150-летию Научно-учебного комплекса
«Энергомашиностроение»*

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ



Редакционный совет

А. А. Александров (председатель), д-р техн. наук
А. А. Жердев (зам. председателя), д-р техн. наук
В. Л. Бондаренко, д-р техн. наук
А. Ю. Вараксин, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН
К. Е. Демихов, д-р техн. наук
Ю. Г. Драгунов, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН
Н. А. Иващенко, д-р техн. наук
В. И. Крылов, канд. техн. наук
М. К. Марахтанов, д-р техн. наук
С. Е. Семенов, канд. техн. наук
В. И. Хвесюк, д-р техн. наук
Д. А. Ягодников, д-р техн. наук

Р.З. Кавтарадзе

Локальный теплообмен в поршневых двигателях

*Допущено УМО вузов России по образованию
в области энергетики и электротехники
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
141100 «Энергетическое машиностроение»*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 6

УДК 621.434:536.24(075.8)

ББК 31.31:31.365

К13

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *С.З. Сапожников*
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ));
д-р техн. наук, профессор *М.Г. Шатров* (Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ))

Кавтарадзе, Р.З.

К13 Локальный теплообмен в поршневых двигателях: учебник для вузов / Р. З. Кавтарадзе. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 515, [5] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4118-1

Учебник посвящен исследованию локального теплообмена в поршневых двигателях. Значительная его часть написана на основе результатов, полученных в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ряд вопросов в теории поршневых двигателей рассматривается впервые. В данный учебник, написанный на основе учебного пособия с тем же названием (1-е изд. — 2001 г., 2-е изд. — 2007 г.), включены новые материалы, отражающие достижения последних лет в этой области науки. Содержание учебника соответствует курсу лекций, который автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для магистрантов, аспирантов, научных и инженерно-технических работников, занимающихся созданием перспективных двигателей, а также исследованием и доводкой существующих моделей.

УДК 621.434:536.24(075.8)
ББК 31.31:31.365

ISBN 978-5-7038-4118-1

© Кавтарадзе Р.З., 2016
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Предисловие председателя редакционного совета

Кафедра «Поршневые двигатели» является одной из старейших из специализированных кафедр не только факультета «Энергомашиностроение», но и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Формирование научной школы поршневых двигателей внутреннего сгорания Университета связано с именем выдающегося ученого В.И. Гриневецкого (1871–1919), по инициативе которого в 1906 г. в Императорском Московском техническом училище (ИМТУ) были созданы первые лабораторные установки с поршневыми двигателями внутреннего сгорания и заложены основы исследованиям рабочих процессов этих машин. В 1907 г. В.И. Гриневецкий начал читать курс лекций по ДВС и опубликовал фундаментальный труд «Тепловой расчет рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания», являющийся в течение многих лет основой теории поршневых двигателей.

Ученики В.И. Гриневецкого, воспитанники ИМТУ член-корреспондент АН СССР Н.Р. Брилинг и профессор Е.К. Мазинг положили начало школы двигателистов, воспитали многих талантливых учеников, ставших впоследствии выдающимися учеными и руководителями промышленности, среди которых академики В.Я. Климов, А.А. Микулин, Б.С. Стечкин, Е.А. Чудаков; генеральные конструкторы авиационных двигателей А.Д. Швецов, В.А. Добрынин, министры В.А. Малышев, С.А. Степанов и др. В МВТУ была создана мощная лабораторная база для исследования двигателей различного назначения, ставшая после реорганизации МВТУ в 1930-е гг. основой для создания таких самостоятельных научных учреждений, как Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ), Научный автомоторный институт (НАМИ), Научный автотракторный институт (НАТИ). В предвоенные, военные и послевоенные годы двигателестроение в стране развивалось благодаря первоклассным экспериментальным и теоретическим разработкам ученых-двигателистов из МВТУ им. Н.Э. Баумана профессоров Д.Н. Вырубова, И.Н. Иноземцева, Г.Г. Калиша, Б.Г. Либровича, А.С. Орлина, Ф.Ф. Симакова, В.И. Сороко-Новицкого, М.С. Ховаха, М.Г. Круглова, В.И. Крутова, Н.И. Нигматулина, С.Г. Роганова, М.М. Чурсина и др.

В настоящее время кафедра является ведущей в России. На ее базе созданы два научно-образовательных центра, оснащенных современным оборудованием для исследования поршневых двигателей. Здесь актуальными научными проблемами проектирования и создания перспективных двигателей под руководством опытных преподавателей кафедры активно занимаются студенты нашего университета. Усилиями коллектива кафедры подготовлены уникальные публикации, монографии и учебники, получившие заслуженное признание не только в России, но и за ее пределами.

Настоящее издание книги профессора Р.З. Кавтарадзе отражает достижения в исследованиях процесса теплообмена в поршневых двигателях и базируется на результатах, полученных автором и его учениками в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Учебник не имеет аналогов как по содержанию, так и по построению и изложению материала, он, безусловно, будет полезным в процессе подготовки высококвалифицированных специалистов не только в МГТУ им. Н.Э. Баумана, но и в других технических университетах страны.

Ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана,
доктор технических наук, профессор



А.А. Александров

Предисловие

Исследование теплообмена в поршневых двигателях, начатое еще в начале прошлого века В. Нуссельтом, а затем продолженное М. Якобом, Г. Эйхельбергом и другими выдающимися учеными, и в настоящее время остается наиболее актуальным в теории этих машин. Столь постоянный интерес к данному вопросу обусловлен не только тем, что поршневой двигатель — самый экономичный, и поэтому самый распространенный из всех тепловых двигателей, но и тем, что основу современного двигателестроения составляет производство высокофорсированных двигателей. Следует отметить, что форсирование двигателя, как правило, связано с увеличением тепловых нагрузок на его основные детали, возникающих в течение рабочего цикла. Это требует глубокого изучения процесса нестационарного теплообмена в цилиндре, во многом определяющего долговечность и надежность двигателя в целом.

Существует ряд факторов, которые осложняют процесс теплообмена в поршневых двигателях: многофазное рабочее тело, турбулентность, горение, необходимость учета всех видов теплообмена (теплопроводность, конвекция, радиация), а также взаимосвязи между ними. В то же время сложность процесса теплообмена в поршневых двигателях делает его исследование привлекательным не только для специалистов в области двигателестроения, но и для представителей других направлений теплофизики. В связи с этим не будет преувеличением сказать, что знакомство с расчетными и экспериментальными методами исследования локального теплообмена в поршневых двигателях может способствовать расширению кругозора современных инженеров-теплофизиков.

Предлагаемая читателям книга написана известным ученым, профессором МГТУ им. Н.Э. Баумана Р.З. Кавтарадзе, который взял на себя большой труд систематически изложить теоретические и экспериментальные методы исследования сложного теплообмена в поршневых двигателях. Большую часть книги занимают результаты, полученные непосредственно автором, а также его учениками в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эти материалы в разное время были представлены на международных симпозиумах, конференциях и семинарах по актуальным вопросам теплообмена в энергетических установках и всегда вызывали большой интерес. Созданный автором на их основе специальный курс лекций в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также краткие курсы лекций и научные доклады, прочитанные Р.З. Кавтарадзе в ряде зарубежных университетов, легли в основу учебного пособия с тем же названием.

Учебник автором переработан и дополнен материалами, опубликованными после выхода первого (2001) и второго (2007) изданий учебного пособия, которые были встречены научной общественностью с большим интересом (первое издание удостоено престижной премии МГТУ им. Н.Э. Баумана за 2002 г.). Достоинство книги — сочетание ясного изложения фундаментальных законов теплофизики (глава 1) на фоне

их исторического развития с описанием разработанных методов расчетно-теоретического (главы 2–5, 8) и экспериментального исследований (главы 6, 7) теплообмена в поршневых двигателях.

Символично, что учебник выходит накануне 150-летнего юбилея факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (ранее Императорское Московское техническое училище), где подготовка инженеров по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» ведется с 1907 г. Основоположник этой специальности, профессор В.И. Гриневецкий, а также его последователи — профессора Н.Р. Брилинг, Е.К. Мазинг, Д.Н. Вырубов, А.С. Орлин, М.Г. Круглов уделяли особое внимание исследованию теплофизических процессов в поршневых двигателях и оставили после себя ряд фундаментальных работ.

Предлагаемая книга вносит вклад в развитие славных научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана и, несомненно, с интересом будет встречена специалистами.

Академик РАН *А.И. Леонтьев*

От автора

Среди источников энергии XXI в. важнейшая роль отводится поршневым двигателям внутреннего сгорания. Обладая рядом преимуществ, в первую очередь высокой топливной экономичностью, поршневые двигатели в настоящее время занимают господствующее положение в транспортной энергетике, их общая мощность в несколько раз превышает установленную мощность всех электростанций.

Развитие современного двигателестроения связано с форсированием удельной мощности двигателей, улучшением экономических и экологических показателей. Оно сопровождается дальнейшим ростом теплонапряженности основных деталей, образующих камеру сгорания (КС), что обусловлено изменением условий теплообмена. Расширение температурных пределов цикла, приводящее к повышению КПД поршневого двигателя, одновременно увеличивает тепловые нагрузки на основные детали и способствует повышению концентрации оксидов азота в выпускных газах. Но если гипотетически еще допускается создание поршневого двигателя с абсолютно безвредными выпускными газами (неважно, каким путем это достигается), то форсированный двигатель без теплонапряженных деталей представить трудно. Поэтому в последние годы неуклонно возрастает интерес к вопросам локального теплообмена, определяющего жизнеспособность конструкции и эффективность двигателя в целом. Вполне закономерно также, что в учебных программах по теории двигателей раздел «Теплообмен в поршневых двигателях» занимает значительное место, а в ведущих технических университетах он преобразован в самостоятельную дисциплину.

Настоящая книга написана на основе лекций спецкурса и предназначена для магистрантов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». Она будет полезна аспирантам, научным работникам и инженерам, занимающимся исследованием, проектированием и доводкой поршневых двигателей. Следуя термину академика Л.И. Седова, книгу, посвященную решению одной конкретной проблемы локального теплообмена, можно назвать учебником монографического характера, основная цель которого — показать достижения в этой области науки и стимулировать интерес читателя к решению существующих проблем. Изложенный материал неоднократно обсуждался на научных семинарах, конференциях и симпозиумах, он послужил также основой для цикла докладов и кратких курсов лекций, прочитанных мною в Ростовском (1986–1987, 1994), Мюнхенском техническом (1990, 1995, 2000, 2011), Пекинском технологическом (1998, 2002) и Брайтонском (2008) университетах. В полном объеме он предназначен для магистрантов второго (завершающего) года обучения в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Из публикаций по вопросам теплообмена в первую очередь следует назвать монографии профессоров Н.Р. Брилинга (1931), М.К. Овсянникова (1975), Г.Б. Розенблита (1977), Б.С. Стефановского (1978), А.Ф. Шеховцова (1978), А.К. Костина (1979), Р.М. и М.Р. Петриченко (1975, 1979, 1983), а также изданную на немецком языке книгу В. Пфлаума и К.М. Моленхауера (1977). Несмотря на то что со времени

их выхода в свет прошло уже много лет, некоторые идеи и результаты, изложенные в этих книгах, не утратили своей актуальности. Они нашли отражение (правда, в разной степени) и в настоящей книге. Однако читатель легко найдет разницу и в подходах к конкретным задачам, и в изложении. В работе над книгой использованы прежде всего результаты исследований, полученные в МГТУ им. Н.Э. Баумана мною и моими учениками.

При написании книги я исходил из предположения, что читатель владеет основами теории теплообмена в объеме, излагаемом в учебниках для технических университетов, что освобождало меня от необходимости подробного изложения ряда вопросов. Однако в некоторых случаях избежать этого не удалось, поскольку преобладающая часть вопросов в теории двигателей обсуждается впервые.

Данный учебник значительно отличается от учебного пособия с тем же названием (1-е изд. — 2001 г., 2-е изд. — 2007 г.): добавлена новая глава 4, переработаны практически все главы, особенно это касается глав 1, 2 и 8, которые дополнены новыми материалами. При подготовке книги были использованы результаты ряда исследований, полученные совместно с докторами технических наук, профессорами Д.О. Онищенко и И.Е. Лобановым, кандидатами технических наук И. Чунь Ваном, А.С. Голосовым, В.А. Федоровым, А.А. Скрипником, З.Р. Кавтарадзе, А.В. Шибановым, А.А. Зеленцовым, С.С. Сергеевым.

В главе 1 изложена краткая история развития общей теории теплообмена, в таком аспекте рассмотрены фундаментальные определения этой теории. Причиной включения в учебник данных материалов послужило то обстоятельство, что в технических вузах уделяется мало внимания преподаванию истории науки и техники, в то время как студенты и аспиранты проявляют интерес к этим вопросам. Необходимость изучения материалов этой главы определяется подготовленностью читателя.

Глава 2 отводится традиционному для теории поршневых двигателей направлению, основанному В. Нуссельтом, — исследованию осредненного по поверхности КС коэффициента теплообмена. Проанализированы наиболее известные зависимости и указаны границы их применения.

Метод расчета локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме камеры сгорания, необходимых для оценки как тепловых нагрузок на основные детали, так и содержания оксидов азота в продуктах сгорания, описан в главе 3. Метод базируется на термодинамической концепции и многозонном представлении объема цилиндра. Он учитывает процессы испарения и сгорания топлива в отдельных зонах (контрольных объемах), а также тепло- и массообмен между контрольными объемами и теплообмен между рабочим телом и поверхностями камеры сгорания. Этот метод в том изложении, в каком он приведен в данном учебнике, предназначен прежде всего для дизелей с объемным смесеобразованием, но его можно модифицировать и для других типов КС. В конце главы проанализированы современные экспериментальные методы оценки локальных нестационарных температур рабочего тела.

В главе 4 изложены трехмерные модели рабочего процесса и теплообмена в поршневых двигателях, основанные на фундаментальных уравнениях количества движения (Навье — Стокса), энергии, диффузии и неразрывности. Кратко рассмотрены модели турбулентности, горения, а также течения и теплообмена в турбулентном пограничном слое, наиболее часто используемые в современных CFD-кодах, которые предназначены для исследования поршневых двигателей. Приведены примеры 3D-моделирования локальных нестационарных температур и локального теплообмена в камерах сгорания различных поршневых двигателей.

Глава 5 полностью посвящена разработке, реализации и экспериментальной проверке математической модели сложного (радиационно-конвективного) теплообмена, основанной на классической теории пограничного слоя. Предложена «струйная модель» течения рабочего тела как излучающего и поглощающего лучистую энергию турбулентной среды, обтекающей криволинейные поверхности КС. Расчет проводится на основе интегральных соотношений, представляющих собой обобщения известных интегральных условий Кармана (для динамического) и Польгаузена — Кружилина (для теплового пограничного слоя). При этом используются известные положения фундаментальной теории пограничного слоя («полумпирическая теория» Прандтля, консервативность профилей пограничного слоя в формулировке Кутателадзе — Леонтьева и др.). Приведены результаты расчета локального теплообмена в полуразделенных КС; показано, что многие известные из фундаментальной теплофизики задачи — это частный случай рассмотренных в книге задач. В конце главы описана экспериментальная установка, применяемая для проверки адекватности принятой модели, и проанализированы полученные результаты расчетно-экспериментального исследования локального теплообмена в быстроходных дизелях.

В главе 6 изложены современные экспериментальные методы определения локальных нестационарных тепловых нагрузок на поверхностях КС. Рассмотрены различные типы датчиков (поверхностные термодпары, пленочные термометры сопротивления), предназначенные для регистрации колебаний температур поверхности КС поршневых двигателей. Основное внимание уделено теплофизической части эксперимента, а также точности измерений.

В главе 7 исследованы вопросы уменьшения тепловых потерь в поршневых двигателях посредством как искусственной, так и естественной теплоизоляции. Проанализирована концепция «адиабатного двигателя», изложен эффективный метод оценки толщины слоя нагара, описан известный эффект Вошни, приводящий вопреки ожиданиям к повышенному удельному расходу топлива в случае применения искусственной теплоизоляции. Рассмотрен также ряд особенностей, присущих рабочему процессу поршневого двигателя при повышенных температурах поверхности КС.

Глава 8 является заключительной, в ней приведены численные решения краевых задач теплопроводности. Материалы предыдущих глав, касающиеся расчетного и экспериментального определения граничных условий теплообмена со стороны рабочего тела, нашли в этой главе практическое применение для оценки теплового состояния основных деталей двигателя. При этом используются методы контрольных объемов и конечных элементов, проведен сравнительный анализ этих методов. В заключение приведены результаты решения ряда стационарных и нестационарных задач теплопроводности для основных деталей поршневого двигателя.

Список основных обозначений и условных сокращений дан в начале книги. Стараюсь не нарушать традиционные для теории тепломассообмена и теории поршневых двигателей обозначения, мне не удалось избежать повторения некоторых символов при введении различных физических величин, поэтому зачастую они поясняются в тексте независимо от их наличия в перечне основных обозначений.

Считаю своим долгом выразить глубокую признательность всем, кто в той или иной мере способствовал выходу в свет этого учебника. В первую очередь, это мой учитель, профессор М.Г. Круглов, которому я благодарен за постоянное внимание к моим исследованиям, активное участие в обсуждении содержания рукописи и поддержку при подготовке первого издания учебного пособия.

Необходимо вспомнить безвременно ушедших из жизни профессора Е.А. Максимова (Институт технической теплофизики АН Украины), который непосредственно участвовал в ряде экспериментов; профессора К. Штипера — директора Институ-

та термодинамики при Ростокском университете, обсуждавшего многие из освещенных в данной книге вопросов и давшего полезные советы; профессора Г. Вошни — заведующего кафедрой Мюнхенского технического университета, передавшего мне материалы собственного исследования, которые с его разрешения практически без изменения включены в § 7.4; рецензентов первого и второго изданий учебного пособия — члена-корреспондента РАН В.Н. Луканина (МАДИ) и профессора Ю.Н. Исакова (СПбГТУ), а также доцента, кандидата технических наук И.А. Кожина, высказавших ценные замечания по содержанию рукописи.

Искренне благодарен академику РАН, профессору А.И. Леонтьеву за плодотворное обсуждение отдельных вопросов и особенно за дискуссии на его знаменитой школе-семинаре, собравшей многих крупных ученых мира.

Профессор П. Людвиг из Высшей школы мореходства (Варнемюнде—Росток) любезно предоставил мне возможность при написании главы 3 пользоваться разработанным им программным комплексом.

Академическому директору Института двигателей при Мюнхенском техническом университете доктору К. Цайлингеру я признателен за оказанную поддержку во время моей работы в Мюнхене, за плодотворное сотрудничество и дружеское отношение.

Совместно с профессором М.Р. Петриченко (СПбГТУ) — известным специалистом в области теплообмена и гидравлики написан § 2.1.

Особую благодарность заслуживают рецензенты данного учебника — профессор С.З. Сапожников (СПбГПУ) и профессор М.Г. Шатров (МАДИ), а также мои коллеги из МГТУ им. Н.Э. Баумана — профессора Н.А. Иващенко, Н.Д. Чайнов, доценты, кандидаты физико-математических наук П.Н. Антонюк и Г.Р. Алавидзе (МИЭМ), которые прочитали отдельные части рукописи двух изданий моего учебного пособия, посвященного локальному теплообмену в поршневых двигателях, и высказали замечания, которые я постарался учесть. Профессору Н.А. Иващенко я признателен также за инициативу включения этого курса в учебную программу МГТУ им. Н.Э. Баумана.

При проведении экспериментальных работ большую помощь оказал В.В. Арапов, а также кандидат технических наук Д.Ш. Бенидзе. Г-жа О.И. Кикинская потратила немало усилий при выполнении оформительской работы, г-жа Е.О. Егорова провела сложную работу редактора, за что я искренне им благодарен.

Я признателен всем слушателям данного курса, принявшим активное участие в обсуждении проанализированных в книге проблем и указавшим на ряд опечаток и неточностей в предыдущих изданиях.

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

Список основных сокращений и условных обозначений

ВМТ	— верхняя мертвая точка	
ДВС	— двигатель внутреннего сгорания	
КО	— контрольный объем	
КС	— камера сгорания	
МКО	— метод контрольных объемов	
МКЭ	— метод конечных элементов	
МКР	— метод конечных разностей	
НМТ	— нижняя мертвая точка	
ЦПГ	— цилиндро-поршневая группа	
a	— коэффициент температуропроводности (температуропроводность)	$\text{м}^2/\text{с}$
c	— скорость света	$\text{м}/\text{с}$
c_m	— средняя скорость поршня	$\text{м}/\text{с}$
c_p	— удельная теплоемкость при постоянном давлении $p = \text{const}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
c_v	— удельная теплоемкость при постоянном объеме $V = \text{const}$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
D	— диаметр цилиндра	м
D	— коэффициент диффузии	$\text{м}^2/\text{с}$
d_0	— диаметр горловины камеры в поршне	м
E	— энергия активации	$\text{Дж}/\text{моль}$
E_0	— плотность потока излучения абсолютно черного тела	$\text{Вт}/\text{м}^2$
E_+, E_-	— плотности потока излучения вдоль оси y и в противоположном направлении соответственно	$\text{Вт}/\text{м}^2$
E_+^Σ	— плотность потока полного излучения (собственное плюс отраженное)	$\text{Вт}/\text{м}^2$
f^{turb}	— степень турбулентности (относительная интенсивность)	
g_i	— доля массы топлива, попавшего в i -й КО	
h	— удельная энтальпия	$\text{Дж}/\text{кг}$
h_0	— расстояние между поверхностями крышки и поршня, когда поршень находится в ВМТ	м
h_0	— расстояние от оси симметрии до центра радиуса кривизны	м
H_i	— коэффициенты Ламе ($i = 1, 2, 3$)	
H_u	— низшая теплота сгорания	$\text{Дж}/\text{кг}$
$K_{\text{исп}}$	— коэффициент испарения	с^{-1}
K_0	— предэкспоненциальный множитель	$\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$
$K_{\text{сг}}$	— константа скорости сгорания	$1/(\text{кг} \cdot \text{с})$
k	— показатель адиабаты	
L	— механическая работа	Дж
$l_{\text{эф}}$	— эффективный путь луча	м

m	— масса	кг
$m_{\text{цикл}}$	— цикловая подача топлива	кг
M	— число Маха	
n	— частота вращения коленчатого вала	мин ⁻¹
n_V	— число КО, примыкающих к i -му КО	
n_w	— число участков поверхности, примыкающих к i -му КО	
n_{VV}	— число КО в объеме цилиндра	
n_{ww}	— число участков поверхности КС	
N_a	— число капель диаметром a	
N_A	— число Авогадро ($N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$)	моль ⁻¹
N_e	— эффективная мощность двигателя	кВт
Nu	— число Нуссельта	
p	— давление	МПа (бар)
p_i	— парциальное давление i -го компонента	МПа (бар)
Pr	— число Прандтля	
q	— плотность теплового потока	Вт/м ²
q_i	— произвольные ортогональные криволинейные координаты ($i = 1, 2, 3$)	м
q_K	— плотность конвективного теплового потока	Вт/м ²
q_R	— плотность лучистого (радиационного) теплового потока	Вт/м ²
q_Σ	— суммарная плотность теплового потока	Вт/м ²
q_v	— мощность внутреннего источника теплоты	Вт/м ³
q_w	— плотность теплового потока на поверхности	Вт/м ²
Q	— количество теплоты	Дж
Q_w	— количество теплоты, передаваемой стенкам	Дж
$\dot{Q}$	— тепловой поток	Вт
R	— газовая постоянная	Дж/(кг·К)
$\tilde{R}$	— универсальная газовая постоянная	Дж/(моль·К)
Re	— число Рейнольдса	
r	— радиус продольной кривизны поверхности в произвольной точке	м
r_0	— радиус горловины камеры в поршне	м
S	— ход поршня	м
Sh	— число Шервуда (диффузионное число Нуссельта)	
St	— число Стантона	
S_x	— текущее расстояние поршня от ВМТ	м
t	— температура	°С
T	— температура	К
T_∞	— температура рабочего тела за пограничным слоем	К
U	— внутренняя энергия	Дж
u	— удельная внутренняя энергия	Дж/кг
u_0	— скорость u на кромке поршня (при $r = r_0$)	м/с
V	— объем	м ³
v	— удельный объем	м ³ /кг
x	— доля сгоревшего топлива в КС	
α	— коэффициент теплоотдачи	Вт/(м ² ·К)
α_v	— коэффициент избытка воздуха	
β	— коэффициент массообмена	м/с
β	— коэффициент, учитывающий диффузность излучения	

δ_m	— толщина динамического пограничного слоя	м
δ_T	— толщина теплового пограничного слоя	м
δ^*	— толщина вытеснения	м
δ^{**}	— толщина потери импульса	м
δ_T^{**}	— толщина потери энтальпии	м
ε	— степень черноты газа (рабочего тела)	
ε	— степень сжатия двигателя	
ε	— коэффициент сужения струи	
ε_w	— степень черноты поверхности стенки	
θ	— плоский угол	град
$\aleph$	— интегральный коэффициент ослабления луча	м^{-1}
$\aleph$	— стехиометрический коэффициент	
$\aleph_\lambda$	— спектральный коэффициент ослабления среды	м^{-1}
λ	— коэффициент теплопроводности	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
λ	— длина волны теплового излучения	мкм
μ	— молярная масса	кг/моль
ρ	— отражательная способность (коэффициент отражения)	
ρ	— плотность	$\text{кг}/\text{м}^3$
σ_0	— постоянная Стефана—Больцмана ($\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$)	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
τ	— время	с
$\tau_{\text{тр}}$	— касательное напряжение трения	МПа
τ_w	— то же самое в пристенной области	МПа
φ	— угловой коэффициент (УК)	
φ	— угол поворота коленчатого вала	град
Φ	— взаимная поверхность обмена излучением	м^2
Ψ	— обобщенная взаимная поверхность обмена излучением (ОВПОИ)	м^2
ω	— угловая скорость	рад/с
Ω	— функция Розина—Рамлера	

Индексы

i, j, k — текущие индексы; W — значение параметра на поверхности стенки КС; ∞ — значение параметра в ядре потока (на внешней границе пограничного слоя); гт — газообразное топливо; жт — жидкое топливо; исп — испарение; сг — сгорание; г — газ; т — топливо; впр — впрыскивание топлива; п — пламя.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие председателя редакционного совета	5
Предисловие	6
От автора	8
Список основных сокращений и условных обозначений	12
Глава 1. Краткий очерк истории развития теории теплообмена	15
1.1. Механистический детерминизм и появление закона Фурье	15
1.2. Закон Фурье и дифференциальное уравнение Фурье	18
1.3. Постановка краевой задачи теплопроводности	27
1.4. Некоторые математические аспекты физической теории теплопроводности	32
1.5. Некоторые обобщения уравнения Фурье	38
1.6. Фундаментальные уравнения трехмерного нестационарного переноса	42
1.7. Конвективный теплообмен. Закон теплоотдачи Ньютона	64
1.8. Ультрафиолетовая катастрофа. Закон Планка	69
1.9. Законы излучения	76
1.10. Геометрические инварианты излучения	86
1.11. Развитие теории пограничного слоя. Понятие о сложном теплообмене	92
Глава 2. Полуэмпирические α-формулы для расчета теплоотдачи, усредненной по поверхности камеры сгорания	111
2.1. Эволюция учения о теплообмене в ДВС от Нуссельта до наших дней	111
2.2. Формула Вошни	119
2.3. Вывод α -формулы с учетом нестационарности и тепловыделения	127
Глава 3. Моделирование локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме камеры сгорания	138
3.1. Классификация задач локального теплообмена	138
3.2. Расчет процессов испарения и сгорания топлива в отдельных КО	151
3.3. Приближенный учет турбулентного массообмена и сложного теплообмена при использовании МКО	162
3.4. Численное определение локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме камеры сгорания	169
3.5. Расчет взаимных поверхностей обмена излучением в камере сгорания дизеля	171
3.6. Локальные температуры рабочего тела и локальный теплообмен в камере сгорания дизеля	175
3.7. Экспериментальные методы определения локальных температур рабочего тела в цилиндре ДВС	182

Глава 4. 3D-моделирование рабочего процесса и локального теплообмена в поршневых двигателях с применением CRFD-кодов	189
4.1. Моделирование процессов трехмерного турбулентного переноса в цилиндре двигателя	189
4.2. Модели турбулентности для исследования рабочего процесса в поршневых двигателях	198
4.3. Модели течения и теплообмена в турбулентном пограничном слое	204
4.4. Примеры 3D-моделирования локальных нестационарных температур и локального нестационарного теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей	216
Глава 5. Исследование радиационно-конвективного теплообмена на основе теории пограничного слоя	227
5.1. Методы определения граничных условий теплообмена	227
5.2. Рабочее тело в цилиндре дизеля как движущаяся, излучающая и поглощающая энергию серая среда	249
5.3. Математическая модель течения рабочего тела в пограничном слое	252
5.4. Математическая модель переноса энергии в пограничном слое рабочего тела	257
5.5. Математическая модель сложного теплообмена в турбулентном пограничном слое излучающего и поглощающего энергию рабочего тела	263
5.6. Обобщенная зависимость для расчета скорости перетекания газа в полуразделенных камерах сгорания	267
5.7. Обобщенное интегральное соотношение гидродинамического пограничного слоя	280
5.8. Обобщенное интегральное соотношение теплового пограничного слоя в случае сложного теплообмена	294
5.9. Расчет теплового пограничного слоя при радиационно-конвективном теплообмене	301
5.10. Практические рекомендации для расчета локального сложного теплообмена в КС дизеля	318
5.11. Некоторые частные случаи сложного теплообмена в дизелях	324
5.12. Экспериментальная установка для исследования локального нестационарного теплообмена в ДВС	328
5.13. Некоторые результаты расчетно-экспериментального исследования локального сложного теплообмена в КС дизелей	331
Глава 6. Экспериментальные методы определения локальных нестационарных тепловых нагрузок на поверхностях камеры сгорания	345
6.1. Определение нестационарных тепловых нагрузок по экспериментальным данным колебаний температуры поверхности камеры сгорания	345
6.2. Некоторые особенности нестационарного теплообмена в камерах сгорания	353
6.3. Датчики для исследования нестационарного теплообмена в камере сгорания	359
6.4. Влияние заделки датчика на температурное поле в зоне измерения	370
6.5. Коэффициент проникновения теплоты для термопары	374
6.6. Оценка точности измерений методом математического моделирования	379

Глава 7. Теплоизоляция деталей и ее влияние на рабочий процесс поршневого двигателя	382
7.1. Теплоизоляция камеры сгорания. «Адиабатный» двигатель. Двигатель с низкими тепловыми потерями	382
7.2. Естественная теплоизоляция камеры сгорания	387
7.3. Нестационарная температура и тепловой поток на поверхности слоя нагара. Определение локальной толщины слоя нагара	397
7.4. Искусственная теплоизоляция камеры сгорания и ее влияние на расход топлива. Эффект Вошни	404
7.5. Об особенностях рабочего процесса при высоких температурах поверхности камеры сгорания	417
7.6. Усовершенствование рабочего процесса дизеля с искусственной теплоизоляцией камеры сгорания	422
 Глава 8. Решение краевых задач теплопроводности для деталей поршневого двигателя	434
8.1. Методы решения краевых задач теплопроводности	434
8.2. Построение разностных схем для расчета температурных полей при ортогональной и конечно-элементной сетках	437
8.3. Сравнительный анализ МКО и МКЭ	445
8.4. Расчет стационарных температурных полей деталей двигателя	450
8.5. Расчет нестационарных температурных полей	472
 Литература	478
Предметный указатель	502
Именной указатель	505

Учебное издание

Кавтарадзе Реваз Зурабович

ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Редактор *Е.О. Егорова*
Технический редактор *Э.А. Кулакова*
Художник *Я.М. Ильина*
Корректор *Н.В. Савельева*
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*
Компьютерная верстка *А.Ю. Ураловой*

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

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

Подписано в печать 24.03.2016. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 42,25. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.
e-mail: press@bmstu.ru
<http://www.baumanpress.ru>

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
e-mail: baumanprint@gmail.com

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
М. В. Добровольского
«Жидкостные ракетные двигатели»



Год издания: 2015
Тип издания: Учебник
Объем: 488 стр. / 31 п.л.
Формат: 70x100/16
ISBN: 978-5-7038-4145-7

Изложены основы проектирования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Даются основные положения теории, методы расчета и описание узлов и агрегатов двигательных установок с ЖРД. Рассмотрены процессы расширения газов в соплах, смесеобразования и теплообмена, а также методы профилирования сопел, расчета форсунок, определения форм и объема камер сгорания. Приведены системы подачи с турбонасосными агрегатами и вытеснительные системы подачи с газовым, пороховым и жидкостным аккумуляторами давления. Изложены методики и примеры расчетов элементов конструкции и ЖРД в целом.

Во втором издании (первое — 1968 г.) была заменена устаревшая терминология жидкостного ракетного двигателестроения, физические величины переведены в Международную систему единиц, некоторые схемы двигательных установок, не использующиеся на время выхода второго издания, заменены на более современные.

Третье издание практически повторяет второе за исключением устранения неточностей, замеченных при его подготовке.

Книга является учебником для студентов и магистрантов вузов и может быть полезна также инженерам и аспирантам, специализирующимся в области ракетной техники.

Информацию о других новых книгах можно получить
на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:
телефон: 8 499 263-60-45;
факс: 8 499 261-45-97
e-mail: press@bmstu.ru

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание учебника
Р.З. Кавтарадзе
«Теория поршневых двигателей»**



Год издания: 2016
Тип издания: Учебник
Объем: 590 стр. / 48 п.л.
Формат: 70х100/16
ISBN: 978-5-7038-4117-4

Изложены основы создания высокоэффективных и высокоэкологических 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 магистрантов, 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.

Информацию о других новых книгах можно получить
на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:
телефон: 8 499 263-60-45;
факс: 8 499 261-45-97
e-mail: press@bmstu.ru

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 4-е издание учебника **«Теплотехника»**
под общей редакцией А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева



Год издания: 2016
Тип издания: Учебник
Объем: 875 стр. / 71,5 пл.
Формат: 70x100/16
ISBN: 978-5-7038-4346-8

В четвертом издании учебника рассмотрены основы термодинамики и теории теплообмена, топливо и его горение, схемы и элементы расчета котлов, промышленных печей, паро- и газотурбинных, когенерационных и микрогазотурбинных установок, газоперекачивающих станций магистральных газопроводов, поршневых двигателей внутреннего и внешнего сгорания, ракетных, ракетно-прямоточных и авиационных двигателей, холодильных установок, компрессоров и вакуумных насосов, атомных и плазменных энергоустановок. Приведены расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Включены разделы, касающиеся космических энергоустановок, теплообменных аппаратов, гидромашин, фотонных энергосистем, криогенных систем для ожижения газов, разделения воздуха, получения неона, криптона и ксенона, а также систем регулирования. Большое внимание в книге уделено вопросам экологии, защиты окружающей среды и возобновляемым источникам энергии.

Содержание учебника соответствует курсам лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других крупных российских и зарубежных университетах.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Энергомашиностроение».

Информацию о других новых книгах можно получить
на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: press@bmstu.ru

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
Ю. В. Пешти
«Наземные системы обеспечения
комфортной жизнедеятельности»



Год издания: 2015
Тип издания: Учебник
Объем: 475 стр. / 30 п.л.
Формат: 60х90/16
ISBN: 978-5-7038-4066-5

Учебник посвящен описанию технических средств для обеспечения комфортных условий жизнедеятельности человека в помещениях, обслуживающих ракетно-космическую отрасль. В зависимости от характера выполняемой человеком работы (отдыха) или условий протекания производственных и технологических процессов рассмотрены системы кондиционирования воздуха с различными источниками энергии, вентиляции, а также системы обеспечения жизнедеятельности человека в агрессивной окружающей среде. Приведены системы кондиционирования воздуха с воздушными холодильными машинами — высокооборотными детандерами с газовой смазкой узлов трения, — используемые в авиации, специальном наземном транспорте и др. Все приведенные системы, машины и аппараты сопровождаются примерами расчета в энергосберегающем режиме работы.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Холодильная, криогенная техника и системы обеспечения жизнедеятельности». Может быть полезен аспирантам и специалистам в области проектирования, производства и эксплуатации ракет и ракетно-космических комплексов.

Информацию о других новых книгах можно получить
на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:
телефон: 8 499 263-60-45;
факс: 8 499 261-45-97
e-mail: press@bmstu.ru