

*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

ТЕПЛОТЕХНИКА

*Под общей редакцией
доктора технических наук профессора А.М. Архарова,
доктора технических наук профессора В.Н. Афанасьева*

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

4-е изд., переработанное и дополненное



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2016

УДК 621.1.016(075.8)
ББК 31.3
Т34

Авторы:

А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Н. Афанасьев,
В.Л. Бондаренко, Б.П. Борисов, К.Е. Демихов, А.А. Жердев,
Н.А. Иващенко, С.И. Исаев, И.А. Кожин, Н.П. Козлов, В.В. Красников,
М.Г. Круглов, В.И. Крутов, В.М. Кудрявцев, А.Г. Кузнецов, А.М. Кутепов,
А.И. Леонтьев, Б.И. Леончик, Э.А. Манушин, Н.К. Никулин, М.И. Осипов,
Г.П. Павлихин, И.Б. Павлова, Г.Б. Петражицкий, П.И. Пластинин,
А.М. Пылаев, М.Ю. Савинов, В.И. Солонин, И.Г. Суровцев, В.И. Хвесюк,
В.И. Шатров, В.В. Шишов, Ю.А. Шевич, И.С. Шумилов, Д.А. Ягодников

Рецензенты:

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф. Е.В. Аметистов;
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф. Б.Г. Покусаев;
д-р техн. наук, проф. В.В. Сычѳв;
д-р техн. наук, проф. Р.З. Кавтарадзе

Теплотехника : учебник для вузов / [А. А. Александров, А. М. Архаров
Т34 и др.] ; под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 876, [4] с. : ил.

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 подготовки «Энергомашиностроение».

УДК 621.1.016(075.8)
ББК 31.3

ISBN 978-5-7038-4346-8

© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Предисловие председателя редакционного совета

В 1846 г. в Московском ремесленном учебном заведении было начато производство паровых двигателей, предназначенных для различных отраслей промышленности, чему способствовали интенсивные научно-теоретические работы. На первом этапе научные работы и преподавание дисциплин, связанных с тепловыми явлениями, происходили на кафедре физики (раздел «Теплота»), где был организован физический практикум, включавший ряд разделов теплотехники. Однако с развитием различных машин потребовалось более полное изложение предмета. Впервые это было осуществлено профессором Ф.Е. Орловым («Механическая теория теплоты»), который читал этот курс с 1872 по 1892 г. Так возникшая в Московском ремесленном учебном заведении школа теплотехники получила развитие в Императорском Московском Техническом Училище.

Во второй половине XIX в. на факультете формируется школа ученых-теплотехников, в которую в разные годы входили такие выдающиеся ученые и педагоги, как Ф.Е. Орлов, Д.С. Зернов, Н.И. Мерцалов, В.И. Гриневецкий, Н.Р. Бриллинг, А.П. Гавриленко, С.Я. Герш, Г.С. Жирицкий, И.И. Куколевский, Г.Ф. Кнорре, Е.К. Мазинг, Б.М. Ошурков, Л.К. Рамзин, Л.П. Смирнов, П.К. Худяков, В.Е. Цыдзик, А.Н. Шелест, Г.И. Воронин, А.С. Орлин, В.В. Уваров, М.Г. Круглов, В.И. Крутов и др.

Организация учебного процесса в Училище и на факультете предусматривала неразрывную связь теоретической и практической подготовки будущего инженера. Это стало традицией МВТУ и МГТУ и получило признание не только в нашей стране, но и за рубежом. В настоящее время эта научная школа успешно развивается в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Достоинным преемником достижений ИМТУ в области теплотехники стал Научно-учебный комплекс «Энергомашиностроение», включающий десять кафедр и научно-исследовательский институт.

В Университете постоянно проводятся многочисленные и разнообразные экспериментальные исследования, результаты которых во многом способствуют развитию новых разделов науки и техники. Вопросы теплотехники, хладотехники, термодинамики, теплопередачи, аэромеханики, машиностроения, широкое практическое приложение этих наук к изучению и проектированию тепловых машин – вот основные направления деятельности ученых факультета.

История развития кафедр и соответствующих областей энергетических наук в МГТУ им. Н.Э. Баумана – это история развития отечественного

энергомашиностроения. На всех этапах этого развития ученые факультета всегда в авангарде отечественной науки. Среди воспитанников факультета такие известные ученые, как академики А.А. Архангельский, В.П. Бармин, С.П. Королёв, В.Я. Климов, Б.С. Стечкин, А.Н. Туполев, В.Г. Шухов, Н.А. Доллежалъ и др.

В основу настоящего издания учебника «Теплотехника» положен обобщенный опыт большого коллектива авторов, являющихся ведущими специалистами в разных областях современной теплотехники, разработавших различные специальные курсы, составляющие основы общей теплотехники. В книге дан большой объем теоретических основ теплотехники – технической термодинамики и теории теплообмена, что позволило изложить материал на высоком теоретическом уровне, необходимом для понимания процессов, которые происходят в теплоэнергетических установках, описанных в книге.

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



Предисловие к четвертому изданию

Характерной особенностью XX и начала XXI вв. является бурный рост потребления энергии. За последнее столетие в мире потребление энергоресурсов увеличилось более чем на порядок; их основная часть идет на производство электроэнергии, на нужды централизованного теплоснабжения и промышленности. В нашей стране на долю энергетики и промышленности приходится более 60 % всего расходуемого топлива. Проблема рационального и эффективного использования топливно-энергетических ресурсов является одной из важнейших. Кроме того, с ростом энергетических мощностей и объема производства значительно увеличиваются габариты создаваемых энергосистем, что повышает требования к эффективности и надежности их работы, необходимые в связи с общей экологической и экономической ситуацией в мире. Поэтому все большее значение приобретает уровень теоретических и практических знаний специалистов, призванных дальше развивать, а также эффективно эксплуатировать отечественную энергетику на основе последних достижений науки и техники.

В четвертом издании учебника «Теплотехника» авторы сохранили основную идею, которая была заложена инициатором издания книги профессором Виталием Ивановичем Крутовым, осуществившим ее общее редактирование. Она заключается в том, что большинство разделов теплотехники являются в настоящее время глубоко развитыми, а в подавляющем большинстве случаев самостоятельными дисциплинами. Поэтому создание курса, отвечающего современному уровню знаний, – непосильный труд для одного человека. В связи с этим в основу настоящего издания положен обобщенный опыт большого коллектива авторов, являющихся ведущими специалистами в разных областях науки и техники, которые в течение длительного времени читают студентам различные специальные курсы, составляющие основу общей теплотехники. В учебнике представлены теоретические основы теплотехники – техническая термодинамика и теория теплообмена в объеме, необходимом для понимания процессов, происходящих в теплоэнергетических установках, описания которых также включены в книгу. На современном научном уровне с использованием опыта отечественного и зарубежного машиностроения изложены основные принципы создания энергосистем различного назначения и проанализированы пути их совершенствования. Поскольку курс общей теплотехники не ставит целью исчерпывающее ознакомление с разными видами теплоэнергетического оборудования, в учебнике в первую очередь рассматриваются типовые конструкции и схемы в объеме, достаточном для понимания принципов их работы и совершенствования.

В предлагаемом исправленном издании учтены замечания и пожелания, высказанные в процессе обсуждения третьего издания, а также новые требования учебных программ и последние достижения отечественной и зарубежной науки. Учтены также изменения, которые произошли в промышленности и системе высшего образования, в частности учебные планы для подготовки бакалавров и магистров в области энергомашиностроения. Все это важно, поскольку изучение теплотехники по праву занимает одно из центральных мест в теоретической подготовке современных специалистов высокой квалификации.

Четвертое издание дополнено рядом важных разделов, касающихся, например, когенерационных и микрогазотурбинных установок, газоперекачивающих станций магистральных газопроводов, ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе, наиболее распространенных в настоящее время прямоточных воздушно-реактивных двигателей, особенностей работы гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей и др. Особое внимание уделено возобновляемым источникам энергии, вторичным энергетическим ресурсам, охране окружающей среды.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, доктору технических наук, профессору Е.В. Аметистову, чл.-корр. РАН, доктору технических наук, профессору Б.Г. Покусаеву, доктору технических наук, профессору В.В. Сычёву и доктору технических наук, профессору Р.З. Кавтарадзе, просмотревшим рукопись и сделавшим ряд ценных замечаний.

Все критические замечания читателей будут с благодарностью приняты авторами по адресу crio@power.bmstu.ru

Вступительная статья профессора В.И. Крутова*

Энергетические ресурсы. Основные генераторы энергии – это электрические станции: тепловые (ТЭС), гидравлические (ГЭС), атомные (АЭС), а также транспортные агрегаты (автомобили, тепловозы, теплоходы, тракторы и т. п.). Энергоносителями служат различные виды топлива: нефть, мазут, природный газ, уголь, бензин, дизельное топливо, уран, плутоний, а также гидроресурсы. Расширяется применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ): ветряных, солнечных и приливных энергоустройств. Однако основным источником энергии пока остается органическое топливо. В разных странах выработанная на АЭС энергия составляет 10...20 %, на ГЭС – 4...20 %. За счет ВИЭ получают всего 1...2 % вырабатываемой энергии. Весьма существенно, что на долю транспортных машин и механизмов приходится более 60 % суммарного количества вырабатываемой энергии.

При оценке развития энергетики и формировании энергетической программы следует исходить не только из задачи выработки требуемого количества энергии, необходимо учитывать имеющиеся ресурсы, экономические, экологические и социальные факторы.

За редким исключением большинство широко распространенных способов получения больших количеств энергии экологически не идеальны, в том числе и термоядерный синтез. Сегодня обозначена на дальних горизонтах энергетики принципиальная возможность получения энергии путем индуцированного распада протонов водорода, содержащихся в воде, которая становится энергоносителем. В этом случае процесс генерирования энергии свободен от выброса вредных веществ, так как сопровождается только выделением кислорода.

Для получения целостного представления о перспективах и проблемах развития энергетики на ближайшее время целесообразно оценить возможности каждого из направлений ее развития, определяемых видом первичного источника.

Нефть. Установлено, что в недрах планеты имеется примерно 2000 млрд т нефти. При этом надежно разведанные запасы составляют 410 млрд т. Ежегодно мировое потребление нефти приближается к 3 млрд т при естественном ее воспроизводстве не более 1 %. При планировании развития энергетики на перспективу приходится учитывать с одной стороны ограниченность природных запасов нефти, а с другой – тот факт, что добыча нефти со временем усложняется. Уже сейчас примерно треть всей получаемой нефти добывается

* Написана к учебнику «Теплотехника» в 1994 г. Приведена с минимальными коррективами цифр и прогнозов.