

№ 2926

И.А. Прибытков

Теплофизика

Учебное пособие

№ 2926

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Кафедра энергоэффективных и ресурсосберегающих
промышленных технологий

И.А. Прибытков

Теплофизика

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2016

УДК 536+621.1.016
П75

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. *Б.С. Мاستрюков*;
канд. техн. наук, доц. *С.И. Герцык*

Прибытков И.А.

П75 Теплофизика : учеб. пособие / И.А. Прибытков. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2016. – 87 с.
ISBN 978-5-87623-984-6

Рассмотрен физический смысл терминов, определений и размерность основных теплофизических величин. Приведены краткие биографические очерки ученых, внесших существенный вклад в развитие теории рассматриваемого направления науки.

Учебное пособие предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры направления «Металлургия», изучающих теплофизические и теплотехнические курсы. Может быть полезным для студентов других направлений бакалавриата и магистратуры.

УДК 536+621.1.016

ISBN 978-5-87623-984-6

© И.А. Прибытков, 2016
© НИТУ «МИСиС», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1. Очерк об истории развития учения о теплоте.....	5
2. Основные понятия и термины.....	13
2.1. Энергия, теплота, температура, энтропия.....	13
2.2. Перенос теплоты молекулярной теплопроводностью.....	18
2.3. Конвективный теплообмен.....	33
2.4. Теплообмен излучением.....	50
3. Критерии подобия.....	62
4. Выдающиеся ученые, внесшие значительный вклад в развитие теории гидрогазодинамики и теплофизики.....	67
Литература.....	84
Приложение.....	85

Предисловие

В процессе обучения студенты бакалавриата и магистратуры направления «Металлургия» изучают различные учебные дисциплины теплофизической и теплотехнической направленности. По своему научному и техническому содержанию эти дисциплины являются сложными, требуют хорошей базовой подготовки по математике, физике и другим дисциплинам общетехнического цикла. В них используется большое количество терминов и определений, в которых заложен определенный физический смысл. Зачастую в учебниках, учебно-методических и других изданиях не всегда акцентируется внимание на содержательной части терминов и определений, что может приводить к непониманию учебного материала, различному его толкованию, а в дальнейшем – к невозможности общаться специалистам в их профессиональной деятельности.

В учебном пособии приведено обобщение и излагается установленное толкование терминов, определений и различных теплофизических величин с указанием размерностей, соответствующих Международной системе единиц. Для облегчения пользования англоязычной литературой приводится англоязычная версия. Кроме того, рассматривается перечень наиболее часто используемых величин с соответствующей размерностью и методики перевода их значений из ранее действующих систем. В заключительной части приводится краткий биографический обзор, хотя и неполный, ученых, внесших большой вклад в становление и развитие тех научных положений, в которых используются рассматриваемые в учебном пособии термины и определения. Автор полагает, что включение вышеуказанного материала позволит расширить кругозор студентов и в определенной степени вызовет дополнительную мотивацию к изучению учебного материала.

В учебном пособии сознательно не приведены формулы и справочные данные, используемые при расчетах, поскольку это выходит за рамки целевого назначения данного издания. Оно может быть использовано студентами бакалавриата и магистратуры других направлений, в которых предусмотрена теплотехническая подготовка.

1. ОЧЕРК ОБ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ УЧЕНИЯ О ТЕПЛОТЕ

В древние времена люди использовали понятие теплоты на качественном уровне «холодно, тепло» без каких-либо количественных измерений и понятие «температура» носило качественный характер. Значительно позже с появлением научных исследований возникла необходимость количественной оценки температуры, т.е. необходимость связать это понятие с мерой и числом. Для этого необходимо было разрабатывать температурные шкалы и термометры – приборы для измерения температуры. Считается, что это был первый шаг в развитии учения о теплоте. Большой вклад внесли Галилео Галилей (1564–1642), Еванжелиста Торричелли (1608–1674), Отто Герике (1602–1686) и другие выдающиеся ученые того времени. Однако основателем термометрии считается Габриэль Даниэль Фаренгейт (1686–1736), построивший термометр, практически используемый до сих пор.

Исторически в научном сообществе сначала господствовало представление о теплоте как о некой калорической жидкости (от лат. calor – теплота). Считалось, что эта жидкость есть во всех телах, и от того, сколько ее содержится в теле, зависит его температура. В том, что температура тел, находящихся в тепловом контакте, выравнивается, усматривали аналогию с установлением общего уровня жидкости в сообщающихся сосудах.

Очередной шаг в развитии учения о теплоте сделал Джозеф Блэк (1728–1799). Блэк и его современники считали теплоту неразрушимым несоздаваемым веществом. Сначала никто не признавал, что даже в случае созданной Джеймсом Уаттом (1736–1819) паровой машины, совершившей в 1770 г. переворот в экономике, подведенная теплота частично превращается в механическую работу и как теплота, следовательно, теряется. Только лишь после открытия Ю. Майером (1814–1878) в 1842 г. эквивалентности теплоты и энергии Рудольф Клаузиус (1822–1888) вывел второе начало термодинамики, основываясь на гениальной интуиции Сади Карно (1796–1832) о том, что работа паровой машины определяется всеобщим законом переноса теплоты от высоких к более низким температурам. Теория калорической жидкости в том виде, как ее сформулировал Дж. Блэк, могла объяснить широкий круг явлений. Однако встречались затруднения при объяснении многих физических процессов. Например, хо-

рошо известно, что если нагревать лед, то его температура не повышается до тех пор, пока весь лед не растает. Такое тепло Блэк назвал «скрытым» (термин «скрытая теплота плавления» используется и в настоящее время), имея в виду, что при таянии льда теплота как-то переходит в частицы воды. Вода вмещает большое количество скрытой теплоты, и когда американский ученый Бенджамен Томсон (граф Румфорд, 1753–1814) показал, что вес льда при таянии остается неизменным, было решено, что калорическая жидкость невесома.

В другом опыте, проведенном в Мюнхенском арсенале на станке, на котором рассверливали стволы пушек, Румфорду удалось добиться выделения большого количества теплоты при небольшом количестве металлической стружки: для этого он в течение двух с половиной часов сверлил болванку тупым сверлом. Румфорд счел, что его опыт убедительно доказал несостоятельность теории калорической жидкости, но ее сторонники возразили, что в материи очень много этой жидкости и даже при сверлении тупым сверлом высвобождается только малая ее часть.

Используя понятие температуры и представление о неразрушимости количества теплоты, Жан Батист Био (1774–1862) в 1804 г. и в более законченной форме Жан Батист Джозеф Фурье (1768–1830) в 1807 и в 1811 гг. основали математическую теорию теплопроводности.

Ученые-химики считали, что теплота – это особая материя, названная теплородом. Эта жидкость обладает особым сродством к свету и, соединяясь с ним, сообщает свету особую «согревательную силу».

Решительным противником гипотезы теплорода выступил Гемфри Дэви (1778–1829). Своими опытами по плавлению кусков льда при трении их друг о друга он окончательно опроверг гипотезу теплорода и высказался за колебательную (волновую) теорию теплоты. Волновую теорию теплоты поддерживал Томас Юнг (1773–1829), утверждавший, что теплота заключается в колебании частиц тел и что эти колебания распространяются волнообразно в пустоте. Позже (1807 г.) он окончательно пришел к выводу о том, что свет и теплота состоят из совершенно одинаковых колебаний, отличающихся тем, что тепловые колебания медленнее световых. Калорическая теория просуществовала примерно до 1850 г. Однако еще Демокрит более чем за 2000 лет до этого выдвигал другую гипотезу (известен как создатель атомистической теории). Если материя состоит из крохотных частиц, то отличие твердого тела от жидкости определяется разной силой их сцепления. Если принять, что вначале при нагревании ча-

стицы твердого тела начинают просто сильнее колебаться, оставаясь на своих местах, то разумно предположить, что при нагревании выше определенной температуры частицы будут срывать со своих мест, образуя жидкость, а при дальнейшем нагревании произойдет следующее превращение – жидкость станет газом. Галилей высказал аналогичную идею в 1623 г, а Декарт писал в 1644 г., что «под теплом и холодом следует понимать не что иное, как ускорение и замедление материальных частиц». Ньютон, расхопившийся с теорией Декарта почти по всем вопросам, в этом пункте был с ней согласен.

Хорошо известно, что движение тел при наличии трения порождает теплоту и, наоборот, теплота может порождать движение, как это происходит, например, в паровой машине и двигателе внутреннего сгорания. Возникает вопрос: сколько работы может совершить тепловая машина, если подвести к ней заданное количество теплоты? Ответить на этот вопрос весьма трудно, и в его рассмотрении необходимо выделить одно наиболее важное обстоятельство – совершение тепловой машиной некоторой работы сопровождается исчезновением определенного количества теплоты.

Говоря о механической работе, совершаемой машиной, пионер в этой области французский физик С. Карно употреблял термин «движущая сила». В записной книжке, обнаруженной в 1878 г. после смерти Карно, говорилось: «Тепло может быть колебательным движением частиц. Если это так, то количество тепла есть не что иное, как механическая энергия, затраченная на приведение частиц в колебательное движение... Таким образом, можно сформулировать общий принцип, согласно которому количество движущей силы в природе неизменно; точнее говоря, она не создается и не исчезает». Этот принцип имеет для физики огромное значение. Он называется **законом сохранения энергии**, а в контексте данного раздела – **первым началом термодинамики**.

Слово «энергия», введенное в научный оборот Т. Юнгом в 1807 г., имеет смысл «полного количества энергии», которое остается постоянным и включает в себя тепловую, кинетическую и все прочие формы энергии, упоминаемые в научно-технической литературе. Не стремясь к особой строгости, можно определить энергию как способность совершать работу, а ее мерой, какую бы форму ни принимала энергия, считать количество механической работы, которой энергия эквивалентна. Карно удалось найти численное выражение эквивалентности теплоты и работы. В современных единицах полу-