

ФИЗИКА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Серия основана в 2003 году

Научные редакторы

д-р физ.-мат. наук, проф. Л.К. Мартинсон,

д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. Морозов

Москва

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

2007

К.В. Глаголев, А.Н. Морозов

Физическая термодинамика

*Допущено Министерством образования
Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по техническим направлениям и специальностям*

Издание второе, исправленное

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана
2007

УДК 536(075.8)
ББК 22.317
Г521

Федеральная целевая программа «Культура России»
(подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»)

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. К.В. Показеев;
кафедра физики Московского авиационного
института (государственного технического
университета)

Глаголев К.В., Морозов А.Н.

Г521 Физическая термодинамика: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. — 272 с.: ил. (Физика в техническом университете / Под ред. Л.К. Мартинсона, А.Н. Морозова).

ISBN 5-7038-2208-4

Учебное пособие содержит все разделы курса общей физики, посвященные изучению классической термодинамики и статистической физики равновесных систем. Кратко изложены основы термодинамики неравновесных систем и методы описания необратимых процессов. Теоретический материал дополнен описанием физических экспериментов, технических приложений физических эффектов и задачами с решениями.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемому авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов и вузов.

УДК 536(075.8)
ББК 22.317

ISBN 5-7038-2208-4

© Глаголев К.В., Морозов А.Н., 2003
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003
© Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физическая термодинамика является наиболее сложным для усвоения разделом курса общей физики в технических университетах и институтах. Прежде всего это связано с необходимостью сочетания достаточно строгого описания физических явлений с использованием простых примеров, позволяющих получить о них наглядное представление.

При написании учебного пособия авторы выбрали термодинамический подход к рассмотрению материала, который позволяет в наиболее доступной форме изложить основные законы классической термодинамики и статистической физики равновесных систем, а также описать необратимые процессы в системах, близких к равновесным.

Пособие написано на основе лекций, читаемых авторами в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Авторы выражают глубокую признательность проф. Л.К. Мартинсону, доцентам Ю.И. Беззубову и Е.В. Смирнову за внимательное прочтение рукописи и сделанные замечания, а также аспиранту М.В. Лелькову за большую помощь в оформлении рисунков.

Рукопись была подвергнута всестороннему рецензированию на кафедре физики Московского авиационного института (государственного технического университета), возглавляемой проф. Г.Г. Спириным. Большая работа по рецензированию рукописи выполнена проф. К.В. Показеевым. Авторы благодарны рецензентам за их критические замечания, которые способствовали улучшению данного издания.

ВВЕДЕНИЕ

В разделе физическая термодинамика курса общей физики рассматриваются методы описания физических систем, состоящих из очень большого числа частиц. Как правило (но не всегда), это макросистемы, состоящие из микрочастиц. *Макросистемой* называется система, имеющая массу, сравнимую с массой окружающих нас предметов и тел. *Микрочастица* — это частица, масса которой сравнима с массой атомов. Например, в 1 л воды содержится $3,3 \cdot 10^{25}$, а в 1 м^3 атмосферного воздуха — $2,5 \cdot 10^{25}$ молекул. Количество частиц в других окружающих нас макросистемах определяются числами того же порядка, поэтому для их описания необходимо применять методы, позволяющие учитывать очень большое число микрочастиц.

Методы описания макросистем основаны на применении *законов классической механики, статистической физики и начал термодинамики.*

При использовании законов классической механики для описания динамики большого числа взаимодействующих микрочастиц возникает несколько проблем. Во-первых, такое описание требует составления и решения большого числа дифференциальных уравнений (более 10^{26} для системы, состоящей из 1 л воды или 1 м^3 атмосферного воздуха), описывающих движение каждой микрочастицы. При этом необходимо точное знание характера взаимодействия частиц, что нередко достаточно сложно установить, так как это требует соответствующих экспериментальных измерений силы взаимодействия отдельных микрочастиц (например, молекул газа или жидкости). Во-вторых, даже при наличии указанных уравнений движение всех частиц можно описать только в том случае, если известны их начальные координаты и скорости.

В-третьих, как показывают недавние исследования, даже в системе, состоящей из трех частиц, при их нелинейном взаимодействии возникают так называемые *точки бифуркации*, при прохождении которых дальнейшие траектории движения частиц становятся непредсказуемыми. В частности, наличие точек бифуркации и неопределенности начального положения приводит к возникновению необратимости, характерной для макросистем, несмотря на полную обратимость уравнений механики. Дополнительные ограничения вводит неопределенность, связанная с запретом квантовой механики на одновременное точное определение координаты и импульса микрочастицы. Указанные обстоятельства делают использование первого метода описания достаточно затруднительным, поэтому его применение обычно ограничивается модельными задачами для ограниченного числа частиц.

Статистический метод описания основывается на применении *законов теории вероятностей*, а в качестве основной применяемой функции выступает *функция распределения*. При этом не требуется знания характера соударения микрочастиц, их начальных условий движения и точного решения уравнений динамики для всех микрочастиц. В этом случае обычно ограничиваются нахождением функции распределения одной микрочастицы и считают, что функции распределения всех микрочастиц идентичны. Все наблюдаемые параметры макросистемы определяют путем нахождения средних значений динамических переменных микрочастиц, например скорость течения газа вычисляют как среднюю скорость всех его молекул. Если функция распределения макросистемы не зависит от времени, то описанием такого состояния занимается *статистическая физика равновесных состояний*.

Статистический метод позволяет не только получить описание равновесных состояний макросистемы, но и найти характер ее изменения с течением времени. Для этого применяют кинетическое и гидродинамическое описания макросистемы. *Кинетическое описание* дает возможность на основе уравнений динамики микрочастиц получить *кинетические уравнения*, характеризующие эволюцию функции распределения. С помощью этих уравнений можно достаточно точно решать целый ряд практически важных задач при исследовании кинетических процессов в газе, плазме и различных конденсированных средах, а также описывать *необратимые процессы*.

При *гидродинамическом описании* составляют уравнения для средних значений динамических параметров среды (скорости течения, температуры, плотности и т. д.). В эти уравнения входят *кинетические коэффициенты* (*коэффициенты переноса*), такие, как коэффициенты вязкости, теплопроводности, диффузии и др. В отличие от динамических параметров среды, особенностью кинетических коэффициентов является отсутствие у них микроскопического аналога. Действительно, если для температуры микроскопическим аналогом является средняя кинетическая энергия микрочастицы, то коэффициент теплопроводности полностью теряет физический смысл при рассмотрении одной микрочастицы. По сравнению с кинетическим гидродинамическое описание является более грубым, однако его проведение существенно проще, что и определяет сферу применения *уравнений гидродинамики*.

Наиболее общим методом описания макросистем является *термодинамический метод*, который можно использовать для любых макросистем независимо от конкретной физической природы их микрочастиц. Термодинамический метод заключается в описании поведения систем с помощью основных постулатов (законов), которые называются *началами термодинамики*. Справедливость их подтверждается только опытным путем. В этом отношении в термодинамике используют тот же метод, что и в классической механике Ньютона: на основе теоретического обобщения экспериментальных данных вводят основные постулаты (законы Ньютона), из которых затем формулируют следствия. Причем справедливость этих следствий основана на справедливости основных постулатов.

В силу того что основные законы сформулированы на основе экспериментов, выполненных в условиях определенных ограничений (как по точности измерений, так и по перечню исследованных систем), область их применения также ограничена. Пока эта область удовлетворяет потребностям развития науки и техники, соответствующий раздел физики развивается в рамках основных законов. Когда это условие нарушается, появляются новые законы, применимые в этой области, но не противоречащие уже имеющимся.

Излагаемая ниже термодинамика описывает макросистемы, находящиеся в близких к равновесному состояниям, и переходы

между ними, протекающие почти равновесно. Это так называемая *равновесная термодинамика*, разработанная в XIX в. Однако в XX в. начали бурно развиваться методы *неравновесной термодинамики*, или *термодинамики необратимых процессов*, описывающей системы в состояниях, заметно отличающихся от равновесного. Аналогичный процесс наблюдался и в механике: когда область применения классической механики Ньютона (область малых скоростей и энергий) перестала удовлетворять потребностям развития науки и техники, появился новый раздел механики — релятивистская механика, которая описывает тела, движущиеся со скоростями, сравнимыми со скоростью света. Схема построения релятивистской механики аналогична схеме построения классической механики, изменяются только основные постулаты и их следствия. Подобным образом предпринимают попытки осуществить переход от равновесной к неравновесной термодинамике. Наибольшие достижения на этом пути получены при разработке *термодинамики линейных необратимых процессов*.

Классическая равновесная термодинамика достаточно точно описывает большинство окружающих нас термодинамических систем и созданных нами тепловых машин. Поэтому как классическую механику, так и равновесную термодинамику в обязательном порядке включают в курс общей физики в качестве базы для дальнейшего изучения механики и термодинамики. Однако современный курс общей физики должен быть обязательно дополнен основными положениями термодинамики необратимых процессов, что и сделано в этой книге.

1. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Возникновение термодинамики было связано с потребностью объяснения, предсказания и расчета макроскопических процессов, происходящих в газах и жидкостях при различных внешних воздействиях на них. Вызвано это было прежде всего попытками создания различных теплотехнических устройств, в частности тепловых машин. Работу тепловых машин как устройств, с помощью которых совершается механическая работа за счет тепловой энергии, нельзя описать в рамках макроскопической механики, ибо в таких машинах происходят тепловые процессы, связанные с микроскопическим движением частиц рабочего тела.

История возникновения термодинамики наложила отпечаток на используемую в ней терминологию, которая в большой степени была позаимствована из теплотехники. Такие понятия, как температура, количество теплоты, теплоемкость и другие, первоначально были введены для описания процессов в различных тепловых машинах и устройствах, но строгое количественное определение этих величин было дано только после создания термодинамики.

В период становления термодинамики молекулярная структура вещества являлась научной гипотезой, поэтому в основе термодинамики лежат постулаты, связанные с макроскопическими свойствами вещества. Этих постулатов три. Кроме того, нулевым постулатом можно считать утверждение о существовании равновесного состояния термодинамической системы и физической величины — температуры, необходимой для количественного описания такого состояния. Область применения термодинамики распространяется на те системы, для которых справедливы постулаты термодинамики.

2. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Состояние термодинамического равновесия описывается набором параметров термодинамической системы, которые однозначно ему соответствуют. Количество параметров может быть избыточным. В этом случае одни параметры системы полностью определяют другие, и поэтому при проведении термодинамического описания последние можно исключить. Зависимость между параметрами состояния термодинамической системы выражается уравнением состояния.

Параметры состояния термодинамической системы обладают свойствами функций состояния, т. е. их значения не зависят от того, каким образом система пришла в данное состояние, а определяются только самим термодинамическим состоянием. Параметрами состояния являются давление, объем, температура, количество вещества и др.

Уравнения состояния в термодинамике позволяют классифицировать термодинамические системы. Поскольку в термодинамике не рассматривают микроскопические процессы, эта классификация является единственно возможной. Примерами термодинамических систем являются идеальный газ, газ Ван-дер-Ваальса, фотонный газ; каждому из них соответствует свое уравнение состояния.

Термодинамические системы различаются между собой свойствами составляющих их микрообъектов и особенностями взаимодействий между ними. Поэтому для более углубленного изучения и описания свойств термодинамической системы необходимо помимо термодинамического рассмотрения использовать положения молекулярно-кинетической теории, основанной на представлении о молекулярной структуре вещества.

3. ВТОРОЕ И ТРЕТЬЕ НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамическое описание различных физических процессов с использованием только первого начала термодинамики является неполным, так как при этом не учитываются принципиальные особенности реально существующих в природе процессов и их отличие от идеализированных обратимых процессов. Для построения адекватной теории потребовалось введение дополнительного постулата, получившего название второго начала термодинамики и позволившего разделить описание равновесных (обратимых) и неравновесных (необратимых) процессов.

К категории обратимых относятся процессы, для которых допускается возвращение в исходное состояние без каких-либо изменений в окружающей среде, причем прямой и обратный процессы должны проходить через одну и ту же последовательность равновесных состояний. Реально в природе такие процессы не наблюдаются, но, как и модель идеального газа, они позволяют построить описание, применимое на практике. При этом используют модель квазистатического процесса, протекающего с бесконечно малой скоростью. В этом случае термодинамическая система проходит через последовательность равновесных состояний, так как все возмущения, возникающие при переходе из одного состояния в другое, успевают затухнуть из-за очень малой скорости перехода. Описанием обратимых термодинамических процессов занимается равновесная термодинамика, изложением основных положений которой мы в основном и ограничимся.

Второе начало термодинамики, используемое для описания необратимых процессов, позволяет сформулировать закон возрастания энтропии. Этот закон описывает самопроизвольное стремле-

4. ОПИСАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотренные в предыдущих главах начала термодинамики могут быть применены для описания различных термодинамических процессов, происходящих как в равновесных, так и в неравновесных системах. Для расчета равновесных систем наиболее предпочтительным является метод термодинамических потенциалов, который позволяет рассчитывать параметры состояния без детального анализа всех процессов, протекающих при переходе термодинамической системы из одного равновесного состояния в другое.

Теория неравновесных (необратимых) процессов на сегодняшний день еще полностью не завершена. Наибольшие трудности возникают при описании термодинамических систем, находящихся в сильно неравновесных состояниях, для которых наблюдается явление самоорганизации. Поэтому ниже будут кратко изложены только основные положения неравновесной термодинамики, которые позволяют рассчитывать системы в состояниях, близких к равновесному.

Принципиальное значение при описании состояний термодинамических систем имеет анализ их на устойчивость, т. е. на отсутствие в них макроскопических изменений при воздействии малых возмущений. Это связано с тем, что в термодинамических системах вблизи равновесия возможны только такие состояния и процессы, которые удовлетворяют требованию устойчивости. Сформулированные в этой главе условия позволяют отличать существующие в природе процессы от процессов, «запрещенных» законами термодинамики.

5. СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ

Статистический метод описания состояний макроскопических тел (термодинамических систем) основывается на определении статистических закономерностей случайного (теплового) движения отдельных микрочастиц тела. Известно, что переменные (координаты и скорости), описывающие движение отдельных, взаимодействующих между собой микрочастиц тела (атомов и молекул), изменяются случайным образом, и предсказать их значения в следующий момент времени не представляется возможным. Однако их средние значения, а также средние значения любых функций переменных, характеризующих движение, таких, например, как квадрат или модуль скорости поступательного движения молекулы, изменяются закономерно.

Наблюдаемые параметры термодинамической системы (температура, давление и др.) определяют как средние значения соответствующих функций переменных, описывающих движение микрочастиц. Нахождение среднего квадрата случайных изменений указанных функций позволяет описывать равновесные флуктуации параметров системы. Разработкой методов определения свойств макроскопических тел через переменные, описывающие движение и взаимодействие микрочастиц, из которых эти тела состоят, занимается статистическая физика.

В этой главе рассматривается один из разделов статистической физики, посвященный описанию равновесных состояний.

6. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Как показывает опыт, в макроскопической системе, находящейся в неравновесном состоянии, возникают термодинамические потоки, возвращающие ее в равновесное состояние. Для количественного описания происходящих при этом процессов применяют два основных метода: гидродинамический и кинетический.

При использовании первого метода определяют количество переносимого вещества, энергии или импульса через заданную поверхность за единицу времени. При этом интенсивность переноса зависит от степени неравновесности состояния и коэффициентов переноса (кинетических коэффициентов), характеризующих свойства среды, а уравнения, описывающие процесс переноса, содержат локальные значения термодинамических параметров среды.

Второй метод основан на нахождении зависимости от времени статистических характеристик, описывающих движение исследуемых частиц. При описании броуновского движения такой статистической характеристикой является средний квадрат перемещения броуновской частицы. Для более полного описания вместо статистических характеристик используют функцию распределения, зависимость которой от времени находят из соответствующих кинетических уравнений. Полученная при этом функция распределения позволяет путем нахождения соответствующих средних значений определять локальные значения параметров среды и термодинамических потоков.

Выбор того или иного метода описания зависит от характера исследуемой термодинамической системы и необходимой точности расчетов. Например, при описании необратимых процессов в газах применение кинетического метода позволяет получить бо-

7. РАВНОВЕСИЕ ФАЗ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Термодинамический метод применим для описания не только однородных по физико-химическому составу сред, но и систем, состоящих из нескольких пространственно разнесенных частей, между которыми существуют границы раздела. Проще всего описывать термодинамические системы, у которых составные части находятся в равновесных состояниях, а через границы раздела не происходит перенос вещества, энергии и импульса. Такая термодинамическая система является равновесной, и для нее применимы методы равновесной термодинамики.

Если составные части термодинамической системы не находятся между собой в равновесии, то возникают термодинамические потоки через границы их раздела. Считая происходящие в системе процессы квазистатическими, а потоки малыми, можно использовать методы равновесной термодинамики и для описания такой неравновесной системы. В этом случае предполагается бесконечно малое отличие термодинамических параметров в различных частях системы. Примером использования указанного подхода является проведенное в гл. 3 рассмотрение обратимой тепловой машины. Указанный подход применим и в случае, когда переход вещества через границу раздела приводит к изменению его агрегатного состояния.

Ниже будут рассмотрены явления, наблюдаемые на границах раздела составных частей термодинамической системы, а также квазистатические переходы вещества через эти границы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной книге физическая термодинамика представлена в рамках курса общей физики и ограничивается изучением макросистем, динамика микрочастиц которых подчиняется законам классической механики. Кроме того, рассмотрены системы, близкие к состоянию равновесия.

Описание макросистем, состоящих из квантовых микрочастиц, основывается на законах квантовой механики. Квантовые системы, например электронный газ в твердом теле или фотонный газ при тепловом излучении тел, имеют целый ряд особенностей, а их свойства существенно отличаются от свойств классических макросистем, поэтому для их описания требуется применение специально разработанных методик.

Кроме того, в этой книге не рассмотрены макросистемы, находящиеся в сильно неравновесных состояниях, для которых характерно протекание интенсивных необратимых процессов, возникновение значительных флуктуаций их параметров и неустойчивость состояния всей системы в целом. Такие макросистемы описывают нелинейная неравновесная термодинамика, теория диссипативных структур и синергетика. На сегодняшний день это направление развития физики, наряду с теориями гравитации и элементарных частиц, является приоритетным.

На основе достижений физической термодинамики получила развитие техническая термодинамика. Использование законов термодинамики для описания работы различных технических устройств оказалось очень плодотворным. Двигатели внутреннего сгорания, турбоагрегаты, авиационные и ракетные двигатели, криогенные и вакуумные машины и т. д. — это устройства, создание которых невозможно без знания термодинамики, а эффективность

их функционирования напрямую связана с применением при их разработке законов термодинамики.

Термодинамика продолжает оставаться развивающейся наукой. Она помогает не только изучать и описывать природные явления и процессы, но и создавать современные тепловые машины. Дальнейшее углубление знаний о природе и создание новой техники связано с развитием термодинамического и статистического методов описания макросистем.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Базаров И.П. Термодинамика: Учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991. 376 с.

Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н. Задачи по термодинамике и статистической физике: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1996. 353 с.

Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки: Справ. пособие. М.: Высш. шк., 1989. 576 с.

Иродов И.Е. Задачи по общей физике: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. М.: ЗАО «Издательство БИНОМ», 1998. 448 с.

Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы: Учеб. пособие для вузов. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 200 с.

Климонтович Ю.Л. Статистическая физика: Учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. 608 с.

Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика: Учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. 416 с.

Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн. 3: Молекулярная физика и термодинамика. 4-е изд., перераб. М.: Наука. Физматлит, 1998. 208 с.

Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике: Учеб. пособие для вузов. М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2001. 318 с.

Сивухин Д.В. Термодинамика и молекулярная физика: Учеб. пособие для вузов: В 5 т. Т. 2: Общий курс физики. 3-е изд., испр. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 592 с.

Терлецкий Я.П. Статистическая физика: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 1994. 350 с.

Физическая энциклопедия: В 5 т. / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия: Большая Российская энциклопедия, 1988—1998. Т. 1. 1988. 704 с.; Т. 2. 1990. 703 с.; Т. 3. 1992. 672 с.; Т. 4. 1994. 704 с.; Т. 5. 1998. 760 с.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ*

Авогадро Амедео (1776—1856) 35

Блэкетт Патрик Мейнард Стюарт (1897—1974) 246

Бойль Роберт (1627—1691) 37

Больцман Людвиг (1844—1906) 42, 119, 160, 191

Борн Макс (1882—1970) 50

Браун Карл Фердинанд (1850—1918) 146

Броун Роберт (1773—1858) 209

Ван-дер-Ваальс Иоханнес Дидерик (1837—1923) 74

Вильсон Чарлз Томсон Рис (1869—1959) 245

Галилей Галилео (1564—1642) 18

Гей-Люссак Жозеф Луи (1778—1850) 37, 54

Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (1821—1894) 133

Гиббс Джозайя Уиллард (1839—1903) 130, 134, 178

Дальтон Джон (1766—1844) 44

Джоуль Джеймс Прескотт (1818—1889) 21, 54, 81

Дьюар Джеймс (1842—1923) 22

Дюлонг Пьер Луи (1785—1838) 57

Камерлинг-Оннес Гейке (1853—1926) 82

Капица Петр Леонидович (1894—1984) 82, 254

Карно Никола́ Леонард Сади (1796—1832) 93

Клапейрон Бенуа Поль Эмиль (1799—1864) 33, 93

Клаузиус Рудольф Юлиус Эмануэль (1822—1888) 104, 113, 191

* Данные в именном указателе приведены в соответствии с биографическим справочником Ю.А. Храмова «Физики» (М.: Наука, 1983. 400 с.).

Ландау Лев Давыдович (1908—1968) 254
Лаплас Пьер Симон (1749—1827) 65
Ле-Шателье Анри Луи (1850—1936) 146
Линде Карл (1842—1934) 81

Майер Юлиус Роберт (1814—1878) 57
Максвелл Джеймс Клерк (1831—1879) 163, 166, 191
Мариотт Эдм (1620—1684) 37
Менделеев Дмитрий Иванович (1834—1907) 33, 247

Нернст Вальтер Фридрих Герман (1864—1941) 121
Ньюкомен Томас (1663—1729) 85

Онсагер Ларс (1903—1976) 150

Папин Дени (1647—1712) 85
Перрен Жан Батист (1870—1942) 161, 211
Планк Макс Карл Эрнест Людвиг (1858—1947) 189
Пригожин Илья Романович (1917—2003) 150
Пти Алексис Терез (1791—1820) 57
Пуассон Симеон Дени (1781—1840) 62

Реньо Анри Виктор (1810—1878) 65
Реомюр Рене Антуан Фершо (1683—1757) 16

Севери Томас (1650—1715) 85
Смолуховский Мариан (1872—1917) 211

Томсон Джозеф Джон (1856—1940) 245
Томсон (лорд Кельвин) Уильям (1824—1907) 16, 81, 104, 244

Уатт Джеймс (1736—1819) 85

Фаренгейт Габриэль Даниэль (1686—1736) 16

Цельсий Андерс (1701—1744) 16

Шарль Жак Александр Цезар (1746—1823) 37
Штерн Отто (1888—1969) 51, 174

Эйнштейн Альберт (1879—1955) 211
Эндрюс Томас (1813—1885) 79
Эренфест Пауль (1880—1933) 251
Эстерман Иммануэль (1900—1973) 174

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютный нуль**
температуры 34, 122
- Адиабата** 62
- Адиабатическая оболочка** 22
- Адиабатическое расширение**
необратимое 66, 138
– – обратимое 66, 137
- Аморфное тело** 219
- Ансамбль Гиббса**
канонический 179
- Атомная единица массы** 35
- Барометрическая формула** 159
- Броуновское движение** 180, 209
- Вакуум** 206
- Вечный двигатель второго**
рода 105
– – первого рода 30
- Вязкость** 196, 203
- Газ Ван-дер-Ваальса** 77
– идеальный 33
- Газовая постоянная**
универсальная 36
- Гипотеза локального**
равновесия 146
– тепловой смерти
Вселенной 119, 191
- Граница раздела фаз** 220
- Диаграмма состояния** 239
- Диффузия** 195, 200
- Длина свободного пробега** 47
- Закон Бойля — Мариотта** 36
– возрастания энтропии 118
– Гей-Люссака 37
– Дальтона 43
– постоянства молярной теплоемкости для твердых тел 57
– равномерного распределения энергии по степеням свободы 44
– Шарля 38
- Капиллярный эффект** 228
- Количество вещества** 34
– теплоты 26
– – приведенное 112
- Коэффициент диффузии** 201
– изотермической сжимаемости 248, 253
– поверхностного натяжения 224
– полезного действия 87
– – цикла Карно 96
- Коэффициенты кинетические** 150, 214

- Коэффициенты переноса 197, 204
- Кривая возгонки 240
- испарения 240
 - плавления 240
 - равновесия двух фаз 223
- Кристаллическая решетка 219
- Кристаллы жидкие 219
- Макросостояние** 189
- Масса молярная 35
- Метод статистических ансамблей 178
- термодинамических потенциалов 130
- Микросостояние 189
- Моль 35
- Начала термодинамики** 8
- Начало термодинамики второе 103
- – первое 24, 27
 - – третья 121
- Неравенство Клаузиуса 111
- термодинамики основное 125
- Несмачивание 226
- Параметры макроскопические** 11
- состояния 33
- Плотность термодинамических потоков 149, 196, 213
- Поверхностное натяжение 224
- Показатель адиабаты 61
- политропы 69
- Политропа 69
- Постоянная Авогадро 35
- Больцмана 42
- Постулат Клаузиуса 104
- Томсона 104
- Принцип детального равновесия 162
- Ле Шателье — Брауна 146
 - Пригожина 150
- Производство энтропии 149, 213
- Процесс адиабатический 22
- изобарический 37
 - изотермический 36
 - изохорический 38
 - квазиравновесный 12
 - квазистатический 12
 - круговой 13
 - необратимый 93, 117, 187
 - обратимый 12, 94
 - политропический 53, 68
 - равновесный 12
 - циклический 13, 93
- Равенство Клаузиуса** 113
- Равновесие механическое 220,
- термодинамическое 11
- Распределение Больцмана 160
- – для дискретных состояний 177
 - Гиббса каноническое 179
 - Максвелла 169
 - Максвелла — Больцмана 175
 - Максвелла по абсолютным значениям скоростей 170
 - по значениям кинетической энергии 171
- Силы поверхностного натяжения** 224
- термодинамические 149, 213
- Система термодинамическая адиабатически изолированная 22
- Скорость наиболее вероятная 170
- средний квадрат 43
 - средняя 171
 - средняя квадратичная 43, 171
- Смачивание 226
- Соотношение взаимности Онсагера 150
- Майера 57

- Состояние агрегатное 218
 - газообразное 218
 - жидкое 218
 - метастабильное 242
 - неравновесное 12
 - равновесное 11
 - твердое 218
- Среда двухфазная 220
 - многофазная 220
 - однофазная 220
- Статистический ансамбль 178
 - вес 189
- Степени свободы 44
- Степень пересыщения 244
- Структуры диссипативные 151

- Температура абсолютная** 18, 34
 - абсолютного кипения 247
 - инверсии 142
 - критическая 79, 247
- Теорема Карно** вторая 106
 - – первая 106
- Нернста 121
- Тепловая машина 85
 - – обратимая 93
 - эффузия 208
- Тепловое движение 38, 181
 - равновесие 220
- Тепловой двигатель 85
 - насос 88
- Теплоемкость 52
 - молярная 52
 - – при постоянном давлении 56
 - – – – объеме 53
 - удельная 52
- Теплопроводность 195, 202
- Теплота изотермического образования единицы поверхности 232
 - фазового перехода удельная 235
- Термодинамические потенциалы 131
- Термодинамический потенциал Гельмгольца 133, 231
 - – Гиббса 134, 221
 - – удельный 135, 221
- процесс 12
- Термометр идеально-газовый 18, 34
 - термодинамический 110
- Точка критическая 77
 - тройная 17, 240

- Уравнение адиабатического процесса** 62
 - Ван-дер-Ваальса 74
 - вязкости 203
 - Гиббса — Гельмгольца 134
 - диффузии 201
 - Клапейрона — Клаузиуса 236
 - Клапейрона — Менделеева 33
 - молекулярно-кинетической теории 42
 - обратимых термодинамических процессов 125
 - политропического процесса 69
 - Пуассона 62
 - состояния 33
 - теплопроводности 202
 - термодинамики равновесных процессов 125
 - Эрэнфеста 253
- Условие нормировки функции распределения 155
 - устойчивости состояния 145

- Фаза газообразная** 220
 - жидкая 220
 - твердая 220
- Фазовый переход** второго рода 223, 251
 - – первого рода 223, 234

Флуктуации равновесные 181
Флуктуация средняя
 квадратичная 181
Формула Больцмана 190
– Лапласа 230
– Эйнштейна 211
Фотонный газ 101
Функция распределения 154
– – молекул газа по скоростям 163
– состояния 21

Химический потенциал 135, 221
Холодильная машина 87

Цикл Карно 94

Частичное несмачивание 228
– смачивание 228

Шкала температур абсолютная 34
– – термодинамическая 16, 107
– – Цельсия 16

Энергия внутренняя 14, 54, 80
– Гиббса 134
– поверхностная 225
– свободная 133

Энтальпия 132

Энтропия статистическая 190
– термодинамическая 113

Эффект Джоуля — Томсона 81, 138

Эффективное сечение
 взаимодействия 48

Эффузия 206

Явления переноса 195, 198

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	6
1. Первое начало термодинамики	10
1.1. Термодинамические состояния и термодинамические процессы	11
1.2. Внутренняя энергия и температура термодинамической системы	13
1.3. Методы измерения температуры	15
1.4. Адиабатически изолированная термодинамическая система	21
1.5. Первое начало термодинамики	26
2. Уравнения состояния термодинамических систем	32
2.1. Уравнение состояния идеального газа	33
2.2. Основные положения молекулярно-кинетической теории	38
2.3. Экспериментальное подтверждение молекулярно-кинетической теории	49
2.4. Теплоемкость идеального газа	52
2.5. Адиабатический процесс	60
2.6. Политропические процессы	68
2.7. Газ Ван-дер-Ваальса	74
3. Второе и третье начала термодинамики	84
3.1. Тепловые машины	85
3.2. Термодинамический цикл Карно	93
3.3. Расчет термодинамического цикла Карно для реального газа	97
3.4. Второе начало термодинамики	103
3.5. Теоремы Карно	106
3.6. Термодинамическая шкала температур	107
3.7. Неравенство Клаузиуса	111
3.8. Термодинамическая энтропия	113
3.9. Закон возрастания энтропии	117
3.10. Третье начало термодинамики	121
4. Описание термодинамических процессов	124
4.1. Основное неравенство и основное уравнение термодинамики	125

4.2. Термодинамические потенциалы	130
4.3. Применение термодинамических потенциалов для описания эффекта Джоуля — Томсона	137
4.4. Принцип Ле Шателье — Брауна	145
4.5. Введение в термодинамику необратимых процессов	148
5. Статистическое описание равновесных состояний	152
5.1. Функция распределения	153
5.2. Распределение Больцмана	156
5.3. Принцип детального равновесия	162
5.4. Распределение Максвелла	166
5.5. Экспериментальная проверка распределения Максвелла	173
5.6. Распределение Максвелла — Больцмана	175
5.7. Каноническое распределение Гиббса	178
5.8. Равновесные флуктуации	180
5.9. Статистическое обоснование второго начала термодинамики	187
6. Явления переноса	194
6.1. Термодинамические потоки	195
6.2. Описание явлений переноса в газах	198
6.3. Эффузия в разреженном газе	205
6.4. Броуновское движение	209
6.5. Производство энтропии в необратимых процессах	213
7. Равновесие фаз и фазовые превращения	217
7.1. Агрегатные состояния вещества	218
7.2. Условия равновесия фаз	220
7.3. Явления на границе раздела газа, жидкости и твердого тела	224
7.4. Фазовые переходы первого рода	234
7.5. Диаграммы состояния	239
7.6. Фазовые переходы второго рода	251
7.7. Критические явления при фазовых переходах	255
Заключение	259
Список рекомендуемой литературы	261
Именной указатель	262
Предметный указатель	264

Учебное издание

Физика в техническом университете

Глаголев Константин Владимирович

Морозов Андрей Николаевич

ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Редактор *Е.Н. Ставицкая*

Художник *С.С. Водчиц*

Корректор *Е.В. Авалова*

Компьютерная верстка *Н.Ф. Бердавцевой*

Подписано в печать 11.07.03. Формат 60×90/16. Печать офсетная.

Бумага офсетная. Печ. л. 17,0. Уч.-изд. л. 16,68.

Тираж 3000 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Отпечатано с оригинал-макета в ГУП ППП «Типография «Наука».

121099, Москва, Шубинский пер., 6.

ISBN 5-7038-2208-4



9 785703 822081