

С. Б. Бобошина, Г. Н. Измайлов

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ

3-е издание, исправленное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом
высшего образования в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по естественнонаучным направлениям*



Курс с практическими заданиями и дополнительными материалами доступен на образовательной платформе «Юрайт», а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Москва ■ Юрайт ■ 2025

УДК 536(075.8)
ББК 22.317я73
Б72

Авторы:

Бобошина Светлана Борисовна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики факультета информационных технологий и прикладной математики Московского авиационного института.

Измайлов Георгий Николаевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики факультета информационных технологий прикладной математики Московского авиационного института.

Бобошина, С. Б.

Б72 Тепловые процессы : учебное пособие для вузов / С. Б. Бобошина, Г. Н. Измайлов. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 125 с. — (Высшее образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-21285-3

В учебном пособии рассмотрены статистический и термодинамический методы изучения тепловых процессов, главные положения и законы термодинамики, нестационарная теплопроводность.

Приложения содержат материал для углубленного, исторического и дискуссионного освещения предмета и предназначены для работающих в уже освоенной области, включая аспирантов, научных сотрудников и инженеров.

УДК 536(075.8)
ББК 22.317я73

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-21285-3

© Измайлов Г. Н., Бобошина С. Б., 2025,
с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2025

Оглавление

Предисловие	5
Тема 1. Статистический и термодинамический методы изучения тепловых процессов	10
1.1. Основные положения МКТ	11
1.2. Вероятность	12
1.3. Давление газа на стенку сосуда	18
1.4. Температура газа	21
Тема 2. Термодинамика. Основные положения	23
2.1. Законы термодинамики	24
2.2. Уравнение состояния	25
2.3. Равновесные состояния и равновесные процессы	27
2.4. Циклы	29
Тема 3. Первый закон термодинамики	30
3.1. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы	31
3.2. Теплоемкость	33
3.3. Адиабатический (изоэнтропный) процесс	37
3.4. Работа газа в изопроцессах	40
Тема 4. Второй закон термодинамики	43
4.1. Цикл Карно	44
4.2. Энтропия	50
4.3. Статистический смысл энтропии	52
Тема 5. Нестационарная теплопроводность	59
Приложение 1. Нулевой закон термодинамики	68
Приложение 2. Теплота и первый закон термодинамики (закон сохранения энергии)	70
Приложение 3. Второй закон термодинамики	88
Приложение 4. Третий закон термодинамики	119
Библиографический список	125

Предисловие

Согласно современным представлениям, уровень цивилизации и развития общества определяется количеством произведенной на душу населения энергии, ее потреблением и эффективным использованием. Для научно-технического развития необходимо изучать возможности преобразования энергии в различные виды, а также осуществления с ее помощью преобразований окружающей человека среды. Ряд научных представлений о преобразованиях энергии были сформулированы в виде законов термодинамики и статистической физики.

Идея создания устройств, называемых двигателями, которые используют потоки теплоты, а не мускульную силу животных, для совершения механической работы была реализована в начале XIX в. в работах С. Карно, Дж. П. Джоуля, Б. П. Э. Клапейрона, Р. Ю. Э. Клаузиуса, Кельвина и Г. Л. Ф. Гельмгольца.

В них было установлено, что теплота — это вид энергии, энергия не может быть создана или уничтожена; механическая работа может полностью перейти в тепловую энергию, но обратный процесс осуществляется лишь частично. Эти три основных положения позднее были сформулированы в виде основных законов для тепловых процессов — первого и второго, а затем нулевого и третьего законов термодинамики. Инженеры применяли открытые законы для создания новых машин — преобразователей энергии, увеличения их эффективности, для получения новых продуктов и изменения условий жизни людей. Практическое освоение преобразований потоков разных видов энергии привело к первой промышленной революции — веку машин, имевшей огромные научные, технические, военные, социальные и экологические последствия.

Первоначально учение о тепловых процессах опиралось на представление о теплоте как «жидкости», перетекающей от тела в одном термодинамическом состоянии к другому телу в ином термодинамическом состоянии. Так появились определения теплового равновесия, параметров, его характеризующих,

обратимости процесса. Однако вскоре исследователи обнаружили ограниченность и противоречивость «жидкостного» подхода. В работах Дж. К. Максвелла, Л. Больцмана, Дж. В. Гиббса отражался альтернативный — корпускулярно-атомистический подход к изучению тепловых процессов. Обоснование такого подхода опиралось на вероятностный, случайный характер тепловых процессов. Экспериментальные измерения подтверждали огромность числа частиц в единице объема вещества ($\sim 10^{23}$ в 1 см^3). Эти факты показывали, что возможно заменить детальную корпускулярную картину процесса усредненными по объему величинами параметров, используемых в уравнениях термодинамических теорий и тем самым упростить вычисления.

Однако появились контринтуитивные утверждения, которые, тем не менее, были логическим следствием нового молекулярно-кинетического подхода. Ярким примером служит вывод Л. Больцмана и Дж. У. Гиббса о статистической природе энтропии как о мере беспорядка в системе огромного числа частиц. Первоначально в термодинамике термин «энтропия» вводят для определения степени реализуемости выбираемого процесса, ведущего к тепловому равновесию. Термодинамическая трактовка второго закона (придерживающаяся детерминистического подхода) утверждает, что несмотря на сохранение полной энергии в системе доля разнообразных ее видов уменьшается (энергия деградирует) и остается лишь теплота. Такое определение приводит к выводу о довольно печальном исходе любых физических процессов во Вселенной — всеобщему тепловому равновесию с нулевой температурой (по Кельвину) и максимальной энтропией. Напротив, корпускулярно-атомистический подход к определению энтропии делает возможным совсем другой исход. Возникновение систем со структурами (в частности, биологических молекул) требовало отклонений от состояния термодинамического равновесия. И если классическая физика не давала оснований для подтверждения статистического вывода, то теоретические положения другой теории (квантовой механики) подтверждают предположения о случайных изменениях в системах частиц и возникновении процессов, противоречащих классическим представлениям термодинамики.

Поскольку другой термин, «энергия», является универсальным (энергия имеет много взаимно превращающихся видов),

то удастся с единых позиций описать, рассмотреть и дать числовую оценку результатам различных природных (включая биологические) и технических процессов.

Поэтому полученные научные представления о характере энергетических процессов могли быть перенесены на другие разделы знаний. Первоначально принципы термодинамики, закон сохранения массы и атомистический способ описания процессов помогли объяснить течение химических реакций и их энергетический результат. Современные положения биологии также включают в себя принципы энергообмена.

Если в биологии законы теплообмена позволяют понять процессы перераспределения энергии между клетками и внутри них, то и экология, даже понимаемая как «Охрана окружающей биосферы», основывается на термодинамике открытых систем. В них определяющими являются круговые процессы (круговорот воды, азота, углеводов, фосфора; биологические и геологический круговороты). Поэтому экосистемы характеризуются постоянными потоками массы и энергии и их преобразованиями. Потребление солнечной энергии и ее преобразование в химическую энергию (реакция фотосинтеза при образовании сахара), преобразование накопленной химической энергии в теплоту (при окислении и сгорании) и (или) в электрическую энергию (при преобразовании энергии в клетках), определение потоков электрической энергии (при образовании химических соединений в клетке) — описываются с помощью первого и второго законов термодинамики. Эти законы позволяют ставить вопрос при поиске жизни в космосе — насколько распространены в Галактике планеты с похожими на Землю количественными соотношениями между природными факторами в среде обитания?

Исследования таких практически важных явлений как сверхпроводимость и сверхтекучесть, а также сверхсопротивление, связаны с пониманием физики материалов при низких температурах (~ 77 K), знанием законов тепловых процессов. В то же время достижение таких и более низких температур возможно благодаря созданию соответствующих криогенных технологий, а также разработке и конструированию приборов и машин для обеспечения и контроля необходимых тепловых процессов.

С другой стороны, как чисто практические задачи — получение принципиально новых источников энергии за счет

ее выделения при слиянии ядер (термоядерный синтез), создание инновационных двигателей для ракет, так и проблемы изучения процессов, происходящих на Солнце, возникновения и взрыва звезд, их коллапса в черные дыры, эволюции Вселенной — привели к определению новых свойств материи и условий их существования при высоких температурах (свыше 2000 K). Это понимание базируется на тех же знаниях о трансформации, накоплении и расходе энергии.

Создание источников питания с большим сроком действия, например для длительных космических путешествий или для медицинских целей (кардиостимуляторов) — важная задача, решаемая при участии базовых законов термодинамики. В этих источниках энергия распада ядер с высокой эффективностью преобразуется в электрическую, что обеспечивает высокий КПД устройств. В то же время выбор изотопа с нужной ядерной реакцией и видом продуктов распада может реализовать источник теплоты, необходимой для поддержания требуемой температуры среды жизнедеятельности. Высокая эффективность преобразования позволяет сделать источники малогабаритными с малыми массами.

Среди многочисленных приложений укажем на космологическое следствие второго начала термодинамики — изменение энтропии в процессе эволюции черной дыры. Черная дыра — астрофизический объект, не имеющий физической границы, как наблюдаемые звезды, пусть даже огромных размеров и массы в миллионы масс Солнца. Такое определение, очевидно, противоречит пониманию объекта с привычной точки зрения евклидовой геометрии. Но в теории гравитации А. Эйнштейна существование такого объекта возможно. Наличие огромной массы приводит к интересному следствию. Притяжение звезды становится настолько большим, что звезда захватывает близлежащие массы — будь то пыль, малые массы или другие звезды, что увеличивает ее температуру и энтропию. С. Хокингу удалось доказать, исходя из термодинамических законов, что разогрев черной дыры приводит к потере ее полной энергии не только за счет излучения, как у горячих звезд, но и из-за излучения частиц вблизи черной дыры. Этот процесс ускоряет ее исчезновение и длится до тех пор, пока черная дыра полностью не испарится, причем скорость испарения увеличивается с уменьшением массы. Таким образом, только супермассивные черные дыры доступны наблюдениям сегодня, более мелкие

уже испарились, наполнив Вселенную частицами и излучением. Современное изучение физики черных дыр, включая наблюдательную астрономию, указывает на возможную роль гравитационной энергии черных дыр в усилении кинетической энергии потоков частиц (джетов). Это делает физику черных дыр не только интригующей, но и способной открыть новые пути создания высокоэнергетических устройств.

Часто согласно второму закону термодинамики под энтропией понимают меру отсутствия упорядоченности (структуры) и возникающей из-за этого неопределенности состояния некоторой системы, например, исхода какого-либо опыта (испытания). Если определять количество информации как меру структуры (формы), сообщенной системе, то возникает возможность связать эти два понятия — энтропию и информацию. К. Шеннон и Р. Хартли, используя сходство математических выражений для энтропии физической системы в статистической термодинамике и энтропией в теории информации, установили между понятиями связь, которую упрощенно можно понимать как потерю информации о системе при увеличении ее энтропии. Однако эта связь указывает на возможность различными способами связать конкретное состояние системы (микросостояние) с усредненным состоянием системы (макросостояние) — например, с равновесным. Поскольку информация не переносит энергию, то возникает вопрос о реализации устройства, создающего неравновесное состояние, исходя из равновесного. Таким устройством может быть двигатель Силарда.

Текст книги можно разбить на две части. В первой излагаются термины и связи между ними в рамках устоявшихся представлений (традиционной нормальной науки).

Вторая часть (приложения) содержит материал для углубленного, исторического и дискуссионного освещения предмета и предназначена для работающих в уже освоенной области, включая аспирантов, научных сотрудников и инженеров. Приложения написаны профессором Г. Н. Измайловым.

Тема 1

СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Объектами изучения механики являются физически малые тела — частицы, системы из конечного числа частиц, абсолютно твердое тело, которое является системой очень большого числа неподвижных друг относительно друга частиц. При изучении строения вещества предстоит рассматривать системы, состоящие из очень большого числа частиц, которые движутся друг относительно друга. При нормальных условиях ($t = 0^\circ\text{C}$, $p = 10^5$ Па) в одном кубическом сантиметре газа содержится примерно $3 \cdot 10^{19}$ молекул. Очевидно, что следить за каждой молекулой в отдельности достаточно сложно. Поэтому для изучения тепловых процессов и свойств тел в физике используют специальные методы: *статистический* (молекулярно-кинетический) и *термодинамический*.

В *молекулярно-кинетической теории* (МКТ) свойства тел, которые непосредственно измеряются в опыте (давление, температура, теплоемкость), рассматриваются как результат суммарного действия и движения составляющих тело частиц. Для установления связей между наблюдаемыми величинами используется статистический метод, то есть рассматриваются свойства молекул и взаимодействия между ними, далее с помощью теории вероятностей определяют средние по огромной совокупности частиц величины, характеризующие движение молекул (например, средняя скорость молекулы, средняя энергия молекулы). Поэтому часто МКТ называют статистической физикой.

Термодинамика изучает макроскопические свойства тел и процессы, происходящие в них, не вдаваясь в микроскопическое рассмотрение процессов, а опираясь на ряд фундамен-

тальных законов, установленных на основании обобщения большой совокупности опытных данных. Термодинамика оперирует в основном термином энергии, заключенной в телах, количествами совершаемой ими работы и теплоты, которой они обмениваются. Однако термодинамика не пытается вникать в детальное описание элементарных процессов, а интересуется лишь их общими характеристиками. Поэтому термодинамика устанавливает только общие закономерности, которым должны удовлетворять описания элементарных процессов и служит для отбора гипотез, рассматриваемых в МКТ.

1.1. Основные положения МКТ

Основные положения МКТ можно разбить на две группы. При этом положения теории не всегда очевидны с макроскопической точки зрения, и только недавно положения, относящиеся к первой группе, стали явно подтверждаться наблюдениями и измерениями. Это связано с тем, что частицы вещества имеют размеры порядка 10^{-10} м.

Положения, относящиеся к первой группе:

- 1) все тела состоят из частиц (атомов, молекул);
- 2) молекулы движутся;
- 3) движение частиц хаотично. Иначе говоря, все направления скоростей движения молекул равновероятны. То есть отсутствует направление преимущественного движения частиц (ведь тело в целом покоится!).

Вторую группу положений составляют те, которые способствуют созданию математической теории:

- 4) к молекулам применимы законы классической механики, то есть частицы обладают массой, а их динамика определяется из закона Ньютона. Если частица не обладает структурой, то она движется поступательно, если частица составная, состоит из еще более мелких частиц, то ее движение можно разбить на поступательное, вращательное и колебательное;

- 5) для объяснения хаотичности движения вводят принцип молекулярного беспорядка. В результате принятия принципа становится возможным использование теории вероятностей для расчета наблюдаемых эффектов и распределения частиц по интересующим нас параметрам (скорости, импульсам, энергиям).

Количество частиц в единице объема называется концентрацией

$$n = \frac{N}{V}.$$

Согласно открытому в 1811 г. закону А. Авогадро, в одном моле любого вещества содержится число частиц, равное числу Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Поэтому количество частиц вещества, содержащихся в массе m , равно

$$N = \frac{m}{\mu} N_A,$$

где μ — молярная масса вещества.

Надо учесть, что множество частиц будет обладать новыми свойствами, присущими коллективным состояниям, «*more is different*», как заметил нобелевский лауреат Ф. Андерсон. На новых масштабах проявляются новые эффекты. Группа свободных атомов, движущаяся как единое целое, воспринимается как звуковая волна. Согласованные движения атомов в твердом теле — коллективное возбуждение — это фононы. Капля воды ведет себя иначе, чем молекула H₂O.

В МКТ используется также базовое положение, что точные значения величин ускользают от наблюдения и доступны только усредненные значения — средние по времени, по объему, по всем направлениям. Подытоживая, можно сказать, что статистическая физика и ТД представляют собой набор лежащих в основе физики идей и методов, с помощью которых изучаются свойства физических систем со многими взаимодействующими частицами и полями.

Чтобы посчитать средние величины, воспользуемся основными положениями теории вероятности и статистики.

1.2. Вероятность

Физические процессы можно разделить на два вида.

1. Детерминированные процессы описываются величинами, значения которых можно предсказать точно во времени: положение частицы, ее скорость, ускорение, время восхода Солнца, период колебаний, величины, характеризующие преобразование электрического поля в магнитное и наоборот.