

С. Б. Бобошина, Г. Н. Измайлов

# ФИЗИКА

## ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

2-е издание, исправленное и дополненное

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

*Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета)*

**Книга доступна в электронной библиотеке [biblio-online.ru](http://biblio-online.ru),  
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

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.

**Рецензенты:**

*Морозов А. Н.* — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики факультета фундаментальных наук Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана;

*Шугаев Ф. В.* — доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой статистики и теории поля отделения экспериментальной и теоретической физики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

**Бобошина, С. Б.**

Б72 Физика. Тепловые процессы : учеб. пособие для академического бакалавриата / С. Б. Бобошина, Г. Н. Измайлов. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 118 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс).

ISBN 978-5-534-08814-4

В учебном пособии рассмотрены статистический и динамический методы изучения тепловых процессов, распределение по Максвеллу и Больцману, основные характеристики процессов столкновения молекул. Представлены главные положения и законы термодинамики. Включено приложение с вычислением интегралов методом дифференцирования по параметру.

Во второе издание вошла новая глава, посвященная нестационарной теплопроводности.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

*Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по естественнонаучным направлениям, аспирантов, преподавателей и всех интересующихся.*

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. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Измайлов Г. Н., Бобошина С. Б., 2016  
© Измайлов Г. Н., Бобошина С. Б., 2019,  
с изменениями  
© ООО «Издательство Юрайт», 2019

ISBN 978-5-534-08814-4

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Статистический и термодинамический методы изучения тепловых процессов</b> .....	<b>8</b>
Основные положения МКТ .....	9
Вероятность .....	10
Давление газа на стенку сосуда .....	15
Температура газа .....	17
<b>2. Распределение Максвелла</b> .....	<b>19</b>
Функция распределения Максвелла .....	21
Характерные скорости движения молекул .....	31
Распределение Максвелла по энергиям .....	36
<b>3. Распределение Больцмана</b> .....	<b>37</b>
Барометрическая формула .....	37
Распределение частиц в силовом поле .....	42
Распределение Максвелла—Больцмана .....	44
<b>4. Процессы переноса</b> .....	<b>45</b>
Основные характеристики процессов столкновений молекул .....	46
Вязкость .....	48
Теплопроводность .....	52
Дрейф и диффузия .....	54
<b>5. Термодинамика. Основные положения</b> .....	<b>58</b>
Законы термодинамики .....	59
Уравнение состояния .....	60
Равновесные состояния и равновесные процессы .....	62
Циклы .....	63
<b>6. Первый закон термодинамики</b> .....	<b>64</b>
Теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы .....	65
Теплоёмкость .....	66
Адиабатический процесс .....	70
Работа газа в изопроцессах .....	71

<b>7. Второй закон термодинамики .....</b>	<b>74</b>
Цикл Карно.....	75
Энтропия .....	80
Статистический смысл энтропии .....	83
<b>8. Неидеальные газы .....</b>	<b>88</b>
Уравнение Ван-дер-Ваальса .....	89
Критические параметры .....	91
Внутренняя энергия неидеальных газов .....	92
Эффект Джоуля—Томсона .....	93
Фазовые переходы.....	95
<b>9. Нестационарная теплопроводность .....</b>	<b>97</b>
<b>Новые издания по дисциплине «Общая физика» и смежным дисциплинам .....</b>	<b>109</b>

## Предисловие

Согласно современным представлениям, уровень цивилизации и развития общества определяется количеством произведённой на душу населения энергии, её потреблением и эффективным использованием. Для научно-технического развития необходимо изучать возможности преобразования энергии в различные виды, а также осуществления с её помощью преобразований окружающей человека среды. Научные представления 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 века 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 два основных положения позднее были сформулированы в виде основных законов для тепловых процессов — первого и второго 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» под-

хода. В работах Дж. К. Максвелла, Л. Больцмана, Дж. В. Гиббса отражался альтернативный — корпускулярно-атомистический подход к изучению тепловых процессов. Такой подход опирался на вероятностный, случайный характер тепловых процессов. Экспериментальные измерения подтверждали огромность числа частиц в единице объёма вещества ( $\sim 10^{23}$  в  $1 \text{ см}^3$ ). Эти измерения показывали, что возможно заменить детальную корпускулярную картину процесса усреднёнными по объёму величинами параметров, используемых в уравнениях термодинамических теорий. Кроме того, появились контринтуитивные утверждения, которые, тем не менее, были логическим следствиями 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. В термодинамике энтропия вводилась как степень реализуемости выбираемого процесса, ведущего к тепловому равновесию. Термодинамическая трактовка второго закона (придерживающаяся детерминистического подхода) утверждала, что, несмотря на сохранения полной энергии в системе, доля разнообразных её видов уменьшается (энергия деградирует), и остаётся лишь теплота. Такое определение приводило к выводу о довольно печальном исходе любых физических процессов во Вселенной — всеобщему тепловому равновесию с нулевой температурой (по Кельвину) и максимальной энтропией. Напротив, возникновение систем со структурами (в частности, биологических молекул) требовало отклонений от состояния 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 понятие энергии является универсальным (энергия имеет много взаимно превращающихся видов), то удаётся 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 её 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 похожие на Землю планеты?

Исследование такого практически важного явления как сверхпроводимость связано с пониманием физики проводимости при низких температурах ( $\sim 77$  К). Достижение таких и более низких температур связано не только технологии, но и знанию законов тепловых процессов. С другой стороны, как чисто практические задачи — получение принципиально новых источников энергии за счёт её выделения при слиянии ядер (термоядерный синтез), создание инновационных двигателей для ракет, так и проблемы изучения процессов, происходящих на Солнце, возникновении и взрыва звёзд, эволюции Вселенной — привели к определению новых свойств материи и условий их существования при высоких температурах (свыше 2000 К). Это понима-

ние 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 делает возможным сделать источники малогабаритными и с малыми массами.

Среди многочисленных приложений укажем на космологическое следствие второго начала термодинамики — изменение энтропии в процессе эволюции чёрной дыры. Чёрная дыра — астрофизический объект, не имеющий физической границы, как наблюдаемые звёзды, 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 звёзды, что увеличивает её температуру и энтропию. С. Хокингу удалось доказать, исходя из термодинамических законов, что разогрев чёрной дыры приводит к потере её полной энергии не только за счёт излучения, как у горячих звёзд, но и из-за излучения частиц вблизи чёрной дыры. Этот процесс ускоряет её исчезновение и длится до тех пор, пока чёрная дыра полностью не испарится, причём скорость испарения увеличивается с уменьшением массы. Таким образом, только супермассивные чёрные дыры доступны наблюдениям сегодня, более мелкие уже испарились, наполнив Вселенную частицами и излучением.



Часто согласно второму закону термодинамики под энтропией понимают меру отсутствия упорядоченности (структуры) и возникающей из-за этого неопределённости состояния некоторой системы, например, исхода какого-либо опыта (испытания). Если определять количество информации как меру структуры (формы), сообщённой 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 энтропии в теории информации, установили между понятиями связь, которую упрощённо можно понимать как потерю информации о системе при увеличении её энтропии. Однако эта связь указывает на возможность различными способами связать конкретное состояние системы (микросостояние) с усреднённым 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 Стирлинга.

В результате изучения курса студент должен:

**знать**

- основные термодинамические понятия и законы;
- основные закономерности и особенности передачи тепла;
- теплотехнические параметры, разновидности и характеристики топлива;
- виды теплоносителей, область их применения;
- основные термодинамические процессы;
- разновидности и типы промышленных печей, сушилок, пропарочных камер, аппаратов обработки строительных материалов;
- характеристика аэродинамических трактов, тягодутьевых устройств;

**уметь**

- определять параметры состояния вещества;
- подбирать и эффективно эксплуатировать теплотехническое оборудование;

- проводить необходимые термодинамические расчеты;
- осуществлять выбор оптимальных вариантов при решении практических задач, связанных с совершенствованием и работой теплотехнического оборудования;
- руководствоваться строительными нормами и правилами, государственными стандартами;
- контролировать и анализировать эффективность рабочего времени;

***владеть***

- навыками вычисления изменения внутренней энергии и работы газа в термодинамическом процессе, методами расчета термодинамических процессов идеальных газов и паров.

## 1. СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Объектами изучения механики являются физически малые тела — частицы, системы из конечного числа частиц, абсолютно твёрдое 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 ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 10^5 \text{ Па}$ ) 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 наблюдаются в опыте (давление, температура, теплоёмкость), рассматриваются как результат суммарного действия составляющих тело частиц. Используется статистический метод, т. е. 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 фундаментальных законов, установленных на основании обобщения большой совокупности опытных данных. Термодинамика оперирует в основном понятием энергии, заключённой в телах, количествами совершаемой ими ра-

боты и теплоты, которой они обмениваются. Однако термодинамика не пытается вникать в детальное описание элементарных процессов, а интересуется лишь общими характеристиками. Поэтому термодинамика устанавливает только общие закономерности, которым должны удовлетворять описания элементарных процессов, и служит для отбора гипотез, рассматриваемых в МКТ.

### Основные положения МКТ

Основные положения МКТ можно разбить на две группы. Причём 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 ещё более мелких частиц, то её 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 расчёта наблюдаемых эффектов и распределения частиц по интересующим нас параметрам (скорости, импульсам, энергиям).

Количество частиц в единице объёма 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<sup>-1</sup>. Поэтому количество частиц вещества, содержащихся в массе  $m$ , равно

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

где  $\mu$  — молярная масса вещества.

В МКТ используется также базовое положение: точные значения величин ускользают от наблюдения и доступны только усреднённые значения — средние по времени, по объёму, 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 вероятностей и статистики.

## Вероятность

Физические процессы можно разделить на два вида:

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

**Случайные процессы** характеризуются величинами, значения которых в будущем могут лежать в некотором диапазоне: расход воды в реках, число аварий на дорогах, эффективность действия какого-либо лекарственного препарата, число шагов от остановки до аудитории, частота использования цифр (например, 9, 4, 1) в числовых константах.

Поскольку мы не знаем будущего значения характеристики случайного процесса, то для предсказания её возможного значения используется понятие вероятности. Ещё П.С. Лаплас понял, что вероятность не есть свойство самого предмета или события, а оно связано с отношением между событиями типа «больше», «равно»,

«меньше» и определяется отсутствием правила выбора между одинаковыми событиями или объектами.

Числовой оценкой вероятности для дискретной и конечной совокупности случаев (событий, результатов измерений) служит частота появления данного случая среди множества других равновероятных событий. Если общее число возможных событий  $n$  и каждое из них может быть осуществлено только одним способом, то вероятность этого события равна отношению числа способов его осуществления (один) к общему числу событий  $n$ :

$$w = \frac{1}{n}.$$

Если каждое событие может быть осуществлено не одним способом, а  $m$  способами, то вероятность осуществления такого события равна

$$w = \frac{m}{n}. \quad (1.1)$$

Очевидно, что  $0 \leq w \leq 1$ .

В простейшей ситуации, когда есть два независимых события —  $A$  и не  $A$  ( $\bar{A}$ ) (например, орёл —  $A$ , решка —  $\bar{A}$ ), то

$$w(A) + w(\bar{A}) = w_{\Sigma},$$

но

$$w_{\Sigma} = \frac{m}{n} + \frac{n-m}{n} = 1$$

или

$$w(\bar{A}) = 1 - w(A).$$

В общем случае

$$w(A) + w(B) + w(C) + \dots = 1, \quad (1.2)$$

но при этом события  $A, B, C \dots$  несовместимы (независимы), т. е. одновременно эти события не происходят.

В математике для обозначения всей совокупности значений случайной величины используют символ  $X$ , а для конкретного значения символ —  $x$ . Теперь равенство (1.1) запишется так:

$$w(X = x) = w(x) = \frac{m}{n}.$$

Можно построить диаграмму зависимости вероятности  $w$  от значений  $x$  (рис. 1.1).

Среднее значение случайной величины определяется как сумма произведений получаемых значений  $x_i$  на количество  $n_i$  появлений этой величины, отнесённая к общему количеству событий:

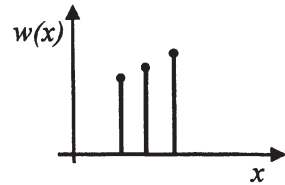


Рис. 1.1. Распределение вероятности

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 n_1 + x_2 n_2 + \dots + x_i n_i}{n_1 + n_2 + \dots + n_i} = \frac{\sum_i x_i n_i}{\sum_i n_i} = \sum_i x_i w(x_i), \quad (1.3)$$

где  $w(x_i) = \frac{n_i}{\sum_i n_i}$  согласно определению (1.1).

Среднее значение, которое обозначим угловыми скобками, обладает свойствами:

1.  $\langle ax + b \rangle = a \langle x \rangle + b$ , где  $a$  и  $b$  — числа.
2.  $\langle x - \langle x \rangle \rangle = 0$ .

Среднее значение «говорит» нам, где расположен центр значений случайной величины. Разброс случайной величины относительно среднего характеризуется дисперсией:

$$D_x = \frac{1}{\sum_i n_i} \sum_i (x_i - \langle x \rangle)^2 n_i. \quad (1.4)$$

После алгебраических преобразований получим:

$$D_x = \frac{1}{\sum_i n_i} \sum_i x_i^2 n_i - \langle x \rangle^2$$