

**А.И. Вейник**

# **Термодинамика**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
А11

А11 **А.И. Вейник**  
Термодинамика / А.И. Вейник – М.: Книга по Требованию, 2023. – 368 с.

**ISBN 978-5-458-59024-2**

В книге в доступной форме излагаются основы общей термодинамики, которая впервые органически объединяет в себе классическую термодинамику, термодинамику необратимых процессов, теорию теплопроводности, тепло- и массообмен и т. д. По сути дела эта объединенная термодинамика представляет собой единую теорию переноса. Автором открыты и описаны новые законы и эффекты переноса, которые обнаруживаются при общем макрофизическом рассмотрении явлений различного рода — термических, механических, химических, фильтрационных, электрических, магнитных и др. Классическая термодинамика и термодинамика необратимых процессов существенно переработаны. В классическую термодинамику с самого начала введены идеи переноса. На основе идей термостатики устранены элементы формализма, характерные для аппарата современной термодинамики необратимых процессов. Книга рассчитана на студентов, аспирантов, преподавателей и научных работников.

**ISBN 978-5-458-59024-2**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2023  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Классическую термодинамику издавна называют королевой наук. Это замечательная научная система, детали которой ни по красоте, ни по блестящей законченности не уступают всей системе в целом.

Но классическая термодинамика не знакома со временем и пространством: она признает только такие понятия, как покой (равновесие), для которого не существует времени, и однородность, для которой безразлична протяженность в пространстве. Поэтому инженеру, сильно стесненному рамками пространства и времени, пришлось из уважения к «королевскому сану» классической термодинамики «придумать» много дополнительных дисциплин (теорию теплопроводности, теорию теплообмена, термодинамику необратимых процессов, тепло- и массообмен и т. д.), которые призваны выполнять практические функции. Эти дисциплины по праву должны находиться на одном пьедестале с классической термодинамикой, но, к сожалению, все они существуют отдельно, и всякому, начинающему их изучать, приходится проделывать огромную умственную работу, чтобы отсеять второстепенное, выделить общее и мысленно связать разрозненные части в одно целое.

Побуждаемый единственным желанием облегчить труд начинающего, автор решил красоту отдельной части принести в жертву красоте целого и попытался в книге органически объединить упомянутые дисциплины. Автор добросовестно проделал всю ту работу, которую, по его мнению, проделывает каждый начинающий, чтобы систематизировать в своей голове имеющиеся разрозненные сведения.

Автор поставил себе целью недоступные для понимания вопросы изложить предельно просто и ясно. Поэтому, если ему приходилось выбирать между строгостью и наглядностью изложения, он всегда отдавал предпочтение наглядности. В тех случаях, когда возникала потребность сделать дополнительные пояснения и комментарии, они были сделаны и набраны в книге петитом.

Автор заранее благодарит всех, кто пришлет свои отзывы и критические замечания для улучшения книги (Минск, 30, Кирова, 51, кв. 26).

---

## ВВЕДЕНИЕ

*Термодинамика* изучает процессы взаимного превращения различных форм движения материи (слово термодинамика происходит от двух греческих слов: *thermé* — теплота, жар и *dynamikos* — относящийся к силе, силовой). В основе термодинамики лежит небольшое число весьма общих фундаментальных опытных фактов и понятий, из которых вытекают все остальные знания о свойствах тел природы.

Термодинамику можно подразделить на *термостатику*, *термокинетику* и *собственно термодинамику*.

В *термостатике* (по-гречески *statos* — стоящий) рассматриваются *равновесные состояния* (*состояния покоя*) термодинамической системы (тела). Такие состояния возникают при покое определенного субстрата обмена, который называется обобщенным зарядом (электрический заряд, масса, объем и т. п.).

*Термокинетика* (по гречески *kinetikos* — относящийся к движению) изучает *стационарные* (не зависящие от времени) процессы переноса обобщенного заряда. Эти процессы в известных условиях сопровождаются взаимными превращениями различных форм движения материи.

В *собственно термодинамике* исследуются *нестационарные* (изменяющиеся со временем) процессы переноса обобщенного заряда. Сюда же относится теория теплового двигателя, в котором происходят превращения термической формы движения материи в механическую. Именно поэтому в названии науки были объединены два греческих слова, одно из которых относится к тепловым взаимодействиям (теплота), а второе — к механическим (относящийся к силе, силовой).

Различают термодинамику *феноменологическую* и *статистическую*. Феноменологическая термодинамика оперирует понятиями макрофизической природы (такими, как температура, давление и т. п., которые могут быть непосредственно измерены или вычислены с помощью измеренных величин) и не рассматривает внутреннего молекулярного строения тел. Ста-

тистическая термодинамика, наоборот, оперирует понятиями микрофизической природы (число молекул, их масса и кинетическая энергия и т. п.), основанными на известных представлениях о молекулярном или атомном строении тела.

В настоящей книге излагается феноменологическая термодинамика. Рассмотрение лишь макрофизических понятий, характеризующих суммарные эффекты, безотносительно к микрофизическим процессам, которые лежат в их основе, закономерно всегда, если только изучаемые объемы вещества еще достаточно велики по сравнению с размерами элементарных частиц и расстояниями между ними. В этих условиях тело допустимо рассматривать не как совокупность отдельных элементарных частиц, а как непрерывную среду. Знания, полученные при таком рассмотрении явлений, оказываются не зависящими от наших представлений о микрофизической структуре материи. Это является важным преимуществом макрофизического метода.

---

## ***РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ***

### **ТЕРМОСТАТИКА**

В данном разделе рассматриваются покой обобщенного заряда и свойства, которые придает телам покоящийся заряд. Для определения состояния покоя не требуется знания координат и времени.

. Основу раздела составляют следующие фундаментальные опытные факты.

Закон сохранения энергии при взаимных превращениях различных форм движения материи. На него в той или иной степени опирается все современное естествознание, поэтому он не является специфическим для термодинамики.

Существование единой формы выражения обобщенной работы для различных явлений (в виде произведения обобщенной силы на изменение обобщенного заряда). Уравнение закона сохранения записывается через обобщенные работы. Это характерная черта термодинамики.

Обобщенные заряды в совокупности однозначно определяют состояние системы (и в том числе обобщенные силы). Использование связей между параметрами и функциями состояния, выраженных с помощью уравнений состояния, является самой важной и самой характерной чертой всей термодинамики.

Кроме того, устанавливаются понятия равновесной системы, однородной системы, емкости системы и т. д. В заключение изучаются свойства цепи, состоящей из нескольких систем. Этот вопрос перекликается с содержанием второго раздела.

Понятия термостатики органически увязаны с идеями переноса обобщенного заряда.

## ГЛАВА I

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

#### § 1. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

##### 1. Формы движения материи

Всем телам природы присущи определенные *формы движения материи*. Различают термическую, механическую, электрическую, магнитную, химическую, биологическую и многие другие формы движения материи.

В зависимости от размеров материальных тел, участвующих в движении, можно различать *макродвижение* (связанное с движением макрочастиц) и *микродвижение* (связанное с движением микрочастиц). Самой распространенной (универсальной) формой макродвижения является перемещение тел в пространстве, одной из самых универсальных форм микродвижения является термическая форма.

Методами термодинамики изучаются те свойства тел природы, которые раскрываются в процессах преобразования всех различных форм движения. При этом особенностью феноменологической термодинамики, как уже отмечалось, является то, что она совершенно не интересуется микрофизической природой этих форм движения, точно так же, как и микрофизической структурой изучаемых тел. Иными словами, для феноменологической термодинамики безразлично, какие элементарные частицы (молекулы, атомы, электроны, протоны и т. д.) участвуют в рассматриваемых формах движения, обуславливающих появление соответствующих свойств материи. Для нее важно лишь то, что все эти формы движения существуют и могут быть оценены с количественной стороны с помощью понятий макрофизической природы.

##### 2. Энергия

Количественной мерой выражения различных форм движения материи является *энергия*. Это понятие в равной мере

применимо для количественной оценки любой формы движения.

Существует только изложенное здесь понимание термина энергия. В соответствии с этим неправильно говорить «тепловая энергия», «электрическая энергия», «механическая энергия» и т. п., так как в действительности есть только одна энергия, являющаяся количественной мерой выражения всех различных форм движения материи.

Равным образом следует говорить не о превращении энергии, а о превращении форм движения материи. При взаимных преобразованиях различных форм движения материи постоянной остается энергия. Отсюда ясно, что соответствующий закон правильно называть не законом сохранения и превращения энергии, а *законом сохранения энергии при взаимных превращениях различных форм движения материи* (коротко — *закон сохранения энергии*).

### 3. Формулировка основного закона

Закон сохранения энергии формулируется следующим образом:

*Любая форма движения способна и вынуждена при определенных для каждого случая условиях превращаться, прямо или косвенно, в любую другую форму движения.*

Это наиболее полное и глубокое определение сущности закона сохранения энергии. В нем непосредственно выражено то, что всего важнее в законе сохранения энергии, — *неограниченная возможность* (и необходимость) взаимных превращений различных форм движения материи, а следовательно, и *сохраняемость* энергии (движения) при всех превращениях. Сохраняемость движения в формулировке закона непосредственно не оговаривается. Однако совершенно ясно, что при отсутствии сохраняемости рано или поздно была бы утрачена и способность к превращениям, а это запрещается формулировкой закона.

В дальнейшем абсолютный закон природы — закон сохранения энергии при взаимных превращениях различных форм движения материи — будет именоваться также *основным законом термодинамики*, или просто *основным законом*.

### 4. Система

В любом явлении природы участвует множество различных тел; принципиально говоря, явления надо мыслить вообще как неограниченные в пространстве, ибо все они взаимно обусловлены и так или иначе между собой связаны. Из всего множества тел, участвующих в явлении, при термодинамическом изучении в качестве объекта исследования выделяется (в со-

ответствии с конкретной задачей исследования) та или иная группа тел, или единичное тело, или даже отдельные части тела. Область, выделенная в качестве объекта исследования, называется *термодинамической системой*, или просто *системой*. Иногда термодинамическую систему называют *термодинамическим телом*, или просто *телом*.

Примером термодинамической системы может служить газ, находящийся в цилиндре с поршнем.

## 5. Окружающая среда

Особенность термодинамического исследования заключается в том, что подробному анализу подвергается только поведение системы. Все остальные тела объединяются в понятие *окружающей среды* и рассматриваются в такой мере, в какой они взаимодействуют с системой и влияют на ее свойства.

В предыдущем примере (цилиндр с поршнем) к окружающей среде следует отнести стенки цилиндра и поршня, окружающий их воздух, стены помещения, в котором находится цилиндр с поршнем, и т. д.

## 6. Контрольная поверхность

Поверхность, которая отделяет систему от окружающей среды и на которой совершается взаимодействие системы с окружающей средой, называется *контрольной поверхностью*.

В случае газа в качестве контрольной поверхности следует рассматривать внутренние поверхности цилиндра и поршня, соприкасающиеся с газом.

## 7. Внутренняя энергия

Все тела природы, которые отделены от окружающей среды контрольной поверхностью и составляют систему, располагают определенными формами движения материи и, следовательно, имеют определенную энергию. Эту энергию системы в термодинамике принято называть *внутренней*.

Окружающая среда также обладает определенной энергией. Энергия окружающей среды по отношению к системе является внешней. Вместе с тем по отношению к самой окружающей среде ее по аналогии можно назвать внутренней энергией окружающей среды. Однако в термодинамике используется в основном только термин внутренняя энергия системы.

Внутренняя энергия системы обычно измеряется в больших калориях (килокалориях, сокращенно — *ккал*) или (ре-

же) в килограммометрах ( $\text{кгМ}$ )<sup>1</sup> и обозначается буквой  $U$ . Экспериментально установлено, что

$$1 \text{ ккал} = 427 \text{ кгМ.}$$

Для термодинамики принципиальное значение имеет проблема количественного определения величины  $U$  внутренней энергии системы. Весьма существенно, что эта проблема может быть решена без изучения микрофизической сущности различных форм движения материи, которыми обусловлена энергия системы, т. е. без привлечения различных гипотез о микрофизическом строении вещества.

Поставленная проблема распадается на две части, из которых первая относится к определению абсолютного значения внутренней энергии и вторая — к определению изменения внутренней энергии (т. е. разности ее значений в начале и конце взаимодействия системы с окружающей средой). Абсолютное значение внутренней энергии системы найти довольно трудно. Однако для технических приложений важно знать лишь изменение внутренней энергии, которое легко определяется на основе количественного анализа характера взаимодействия системы и окружающей среды.

## 8. Внешне изолированная система

Система всегда находится во взаимодействии с окружающей средой. Однако, как показывает опыт, взаимодействия могут быть весьма различными по интенсивности. Во многих случаях можно влиять на интенсивность взаимодействий, усиливая или неограниченно ослабляя их по произволу.

Например, заметного ослабления теплового взаимодействия системы и окружающей среды можно достичь, если в качестве изолятора для системы использовать такие плохие проводники тепла, как шерсть, асбест, пеноматериалы и т. п. Электрические взаимодействия ослабляются, если в качестве изолятора применять фарфор, текстолит и т. д.

Развивая идею о возможности неограниченного ослабления взаимодействий системы с окружающей средой (как результат, непосредственно вытекающий из опыта), можно прийти к понятию *внешне изолированной системы*, т. е. системы, не взаимодействующей с окружающей средой. У внешне изолированной системы контрольная поверхность обладает свойством абсолютной непроницаемости по отношению к взаимодействиям любого вида.

Внешне изолированная система, как и другие «предельные» понятия физики (например, идеальный газ, идеальный

---

<sup>1</sup> Обозначение  $\text{кг}$  применяется согласно ОСТ 6052 (1934 г.) для того, чтобы отличать килограмм-силу ( $\text{кг}$ ) от килограмма-массы ( $\text{кг}$ ).

проводник электричества, идеальный электрический изолятор), представляет собой абстракцию. Подобного рода абстракции имеют в своей основе огромный экспериментальный материал и являются результатом правильного научного осмысления опыта. Поэтому они чрезвычайно широко и плодотворно используются в технической практике.

## 9. Внутренняя энергия изолированной системы

Применительно к внешне изолированной системе основной закон термодинамики (закон сохранения энергии) означает, что внутренняя энергия системы остается неизменной при любых взаимодействиях, происходящих в системе. Иными словами, внутри системы возможны любые взаимные преобразования различных форм движения материи, однако общая энергия системы от этого не изменяется. Изменение энергии системы, а следовательно, и энергии окружающей среды имеет место только при том условии, если внешняя изоляция системы будет нарушена.

С помощью понятия внутренней энергии уравнение основного закона для изолированной системы можно записать следующим образом:

$$dU = 0, \quad (1)$$

или

$$U = \text{const}, \quad (2)$$

где  $dU$  — элементарное (бесконечно малое) изменение внутренней энергии системы;

$U$  — внутренняя энергия системы.

Как видим, изменение внутренней энергии изолированной системы равно нулю, т. е. внутренняя энергия изолированной системы остается постоянной.

## 10. Род взаимодействия

Если система не изолирована, то между нею и окружающей средой происходит взаимодействие. *Род взаимодействия* зависит от свойств (структуры) системы и конкретных условий, в которые она поставлена. Различают взаимодействия термические, механические, электрические, магнитные, химические и т. п. Таким образом, каждой форме движения материи отвечает свой род взаимодействия между системой и окружающей средой.

## 11. Внешние степени свободы системы

Предположим, что с изолированной вначале системы снята внешняя изоляция определенного рода (т. е. системе предоставлена возможность участвовать во взаимодействии соот-