

Глава VI. ТЕРМОДИНАМИКА

§ 22. Первый закон термодинамики

1. Внутренняя энергия и способы её изменения

С понятием внутренней энергии тела вы уже познакомились в курсе физики основной школы при изучении тепловых явлений. Напомним:

внутренней энергией называют сумму кинетической энергии хаотического движения частиц и потенциальной энергии их взаимодействия между собой.

Будем обозначать внутреннюю энергию U .

Два способа изменения внутренней энергии тела

Напомним, какими способами можно изменять внутреннюю энергию тела.

Посредством совершения работы

Потрите друг о друга два деревянных бруска — они *нагреваются*. Значит, их внутренняя энергия *увеличилась* благодаря совершённой вами *работе*.

Когда вы накачиваете велосипедное колесо, насос нагревается вследствие *нагревания* воздуха при сжатии. Увеличение внутренней энергии воздуха также происходит благодаря совершённой вами работе.

Посредством теплопередачи

Внутреннюю энергию тела можно изменить и без совершения работы. Например, брусок можно *нагреть*, положив его на горячую батарею отопления (рис. 22.1): внутренняя энергия бруска *увеличится* вследствие *теплопередачи*¹⁾.

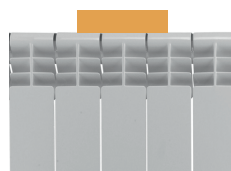


Рис. 22.1

Меру изменения внутренней энергии тела при теплопередаче называют *количеством теплоты* и обозначают Q .

Единица количества теплоты в СИ такая же, как и единица энергии, то есть *джоуль* (Дж).

¹⁾ Теплопередачу называют также *теплообменом*.

2. Как внутреннюю энергию частично превратить в механическую?

Решив предыдущие задачи, вы могли убедиться, как велика внутренняя энергия тел. *Можно ли хотя бы часть внутренней энергии превратить в механическую?*

Казалось бы, это невозможно: в большинстве явлений, которые мы наблюдаем вокруг себя, происходит противоположный процесс — механическая энергия превращается во внутреннюю вследствие трения.

Но человек всё-таки догадался, как можно частично превратить внутреннюю энергию в механическую! Для этого он использовал замечательное свойство газа.

Поставим опыт

В цилиндрическом сосуде под массивным поршнем находится газ (рис. 22.2, а).

Зажжём огонь под сосудом. При сгорании топлива его *внутренняя энергия*¹⁾ *уменьшается*, при этом выделяется некоторое количество теплоты.

Часть его посредством теплопередачи передаётся газу (рис. 22.2, б). Нагреваясь, газ *расширяется* и *поднимает* массивный поршень, *совершая механическую работу*: механическая энергия поршня при подъёме *увеличивается*!

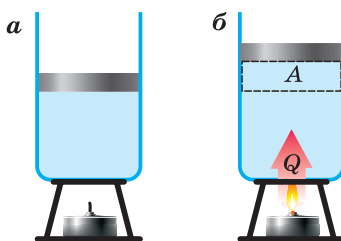


Рис. 22.2

Мы повторили одно из самых великих изобретений за всю историю человечества — «изобрели» *тепловой двигатель*, в котором *внутренняя энергия топлива превращается частично в механическую энергию*. Появление тепловых двигателей изменило ход мировой истории.

Главная особенность теплового двигателя состоит в том, что работу в нём совершает *расширяющийся газ*. В отличие от жидкостей и твёрдых тел газ может *значительно изменять свой объём* (в десятки раз!). При *расширении* газ совершает *механическую работу*.

«Работающий» в тепловом двигателе газ так и называют: *рабочее тело*. На работе газа при расширении основано действие всех тепловых двигателей — от моторов автомобилей до турбин электростанций. Действие тепловых двигателей мы рассмотрим подробнее в одном из следующих параграфов.

1) При сгорании топлива происходит химическая реакция, в результате которой потенциальная энергия взаимодействия атомов в молекулах уменьшается.

3. Первый закон термодинамики

Раздел физики, изучающий превращения энергии в тепловых процессах, называют *термодинамикой*. Основы термодинамики заложил в начале 19-го века французский учёный и инженер С. Карно в работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

Закон сохранения энергии применительно к тепловым явлениям называют *первым законом термодинамики*. Согласно этому закону изменение внутренней энергии тела ΔU равно сумме количества теплоты Q , переданного телу, и работы A , совершённой над телом:

$$\Delta U = Q + A.$$

При использовании первого закона термодинамики «телом» является обычно некоторая масса *газа*¹⁾. Поэтому мы будем рассматривать первый закон термодинамики главным образом применительно к данной массе газа.

Полезную работу в тепловом двигателе совершает расширяющийся газ, поэтому практический интерес представляет *работа газа*. Так называют работу, совершаемую силой давления газа (например, на поршень, соединённый передаточным механизмом с ведущим колесом автомобиля).

Работа газа A_r равна по модулю работе A , совершённой над газом внешними силами, но имеет противоположный знак: $A_r = -A$. Поэтому применительно к газовым процессам *первый закон термодинамики* формулируют так:

количество теплоты, переданное газу, равно сумме изменения внутренней энергии ΔU газа и работы A_r , совершённой газом:

$$Q = \Delta U + A_r.$$

4. Адиабатный процесс

Поставим опыт

Поместим кусочек ваты в толстостенный прозрачный цилиндр²⁾. Если *резким* толчком вдвинуть в цилиндр поршень, то вата *воспламенится* (рис. 22.3)!

Объяснить этот опыт можно с помощью первого закона термодинамики, который в данном случае удобнее записать в виде:

$$\Delta U = Q + A,$$

где A — работа внешних сил.

1) Напомним, что именно газ является рабочим телом в тепловых двигателях.

2) Можно смочить ватку бензином или спиртом.



Рис. 22.3

В нашем опыте сжатие газа произошло настолько быстро (толчок был *резким!*), что теплообмен с окружающей средой не успел произойти. Поэтому можно принять, что $Q = 0$. В таком случае изменение внутренней энергии газа равно работе внешних сил. Если эта работа достаточно велика (напомним, что толчок был резким, то есть мы прикладываем довольно большую силу!), повышение температуры газа вследствие увеличения его внутренней энергии оказывается достаточным, чтобы зажечь вату.

Нагревание газа при резком сжатии используют в дизельных двигателях: при сжатии горючая смесь в цилиндре нагревается настолько, что воспламеняется *без искры*.

Газовый процесс, который происходит без теплообмена с внешней средой, называют *адиабатным*.

Адиабатным можно считать также процесс, когда теплообменом можно пренебречь: например, если процесс происходит за время, в течение которого теплообмен с окружающей средой не успевает произойти (как в описанном выше опыте).

1. Как изменяется температура газа при адиабатном сжатии и при адиабатном расширении?
2. Попробуйте объяснить образование облаков.
3. При адиабатном расширении данной массы газа газ совершил работу, равную 200 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии газа?
4. На рисунке 22.4 приведены графики зависимости $p(V)$ для данной массы газа при изотермическом и адиабатном расширении. Какой график описывает адиабатное расширение?

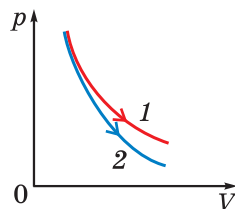


Рис. 22.4



5. Следствия первого закона термодинамики для изопроцессов

Изотермический процесс

5. Изменяется ли внутренняя энергия данной массы газа в изотермическом процессе?
6. Запишите первый закон термодинамики для изотермического процесса.
7. Какой знак имеет работа газа при изотермическом расширении? при изотермическом сжатии?
8. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты при изотермическом расширении? изотермическом сжатии?



Изохорный процесс

9. Совершает ли газ работу при изохорном процессе?
10. Запишите первый закон термодинамики для изохорного процесса.
11. Как изменяется внутренняя энергия данной массы газа при изохорном нагревании? при изохорном охлаждении?
12. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты при изохорном нагревании? при изохорном охлаждении?

Изобарный процесс

13. Как изменяется внутренняя энергия данной массы газа при изобарном нагревании? при изобарном охлаждении?
14. Какой знак имеет работа газа при изобарном нагревании? при изобарном охлаждении?
15. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты при изобарном нагревании? изобарном охлаждении?

Адиабатный процесс

16. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты в адиабатном процессе?
17. Запишите первый закон термодинамики для адиабатного процесса.
18. Какой знак имеет работа газа при адиабатном расширении? при адиабатном сжатии?
19. Как изменяется внутренняя энергия данной массы газа при адиабатном расширении? при адиабатном сжатии?

**ЧТО МЫ УЗНАЛИ**

Два способа
изменения
внутренней энергии

A Q

Первый закон термодинамики

$$\Delta U = Q + A$$

$$Q = \Delta U + A_T$$

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

20. Какую работу совершил газ данной массы, если его внутренняя энергия уменьшилась на 300 Дж и при этом газ отдал количество теплоты 300 Дж?

21. На сколько изменилась внутренняя энергия данной массы газа, если газ получил 300 Дж количества теплоты и совершил при этом работу 200 Дж?
22. Какую работу совершила данная масса газа при адиабатном расширении, если внутренняя энергия газа при этом уменьшилась с 300 Дж до 150 Дж?
23. Какую работу совершил газ данной массы, если его внутренняя энергия увеличилась от 100 Дж до 500 Дж и при этом газу передали количество теплоты 2 кДж?

§ 23. Изменение внутренней энергии газа и работа газа

1. Изменение внутренней энергии газа

Чтобы использовать первый закон термодинамики

$$Q = \Delta U + A_r,$$

нужно уметь находить выражения для изменения внутренней энергии газа ΔU и работы газа A_r .

Начнём с внутренней энергии газа. В модели идеального газа потенциальной энергией взаимодействия между молекулами пренебрегают, поэтому внутренняя энергия U газа равна суммарной кинетической энергии всех молекул в данном образце газа, то есть произведению средней кинетической энергии \bar{E} одной молекулы на число молекул N :

$$U = \bar{E}N.$$

Мы уже знаем, что средняя кинетическая энергия *поступательного* движения молекул газа выражается формулой

$$\bar{E}_{\text{пост}} = \frac{3}{2}kT,$$

где k — постоянная Больцмана, а T — абсолютная температура.

Кинетическая энергия молекулы является суммой кинетических энергий поступательного и вращательного движений. Расчёты, выходящие за рамки нашего курса, показывают, что для *одноатомных* молекул кинетическую энергию вращательного движения учитывать не нужно, поэтому для таких газов (напомним, что одноатомными

являются все *инертные газы*) средняя кинетическая энергия молекул равна средней кинетической энергии их поступательного движения:

$$\bar{E} = \bar{E}_{\text{пост}}.$$



1. Докажите, что внутренняя энергия *одноатомного* идеального газа выражается формулой

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Отсюда следует, что *изменение внутренней энергии одноатомного идеального газа* при изменении температуры от $T_{\text{н}}$ до $T_{\text{к}}$ выражается формулой

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T,$$

где $\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{н}}$.



2. Два моля гелия нагрели от 300 до 500 °С. Как изменилась внутренняя энергия газа?

Из приведённой выше формулы для внутренней энергии газа следует, что *внутренняя энергия газа зависит только от его температуры и количества вещества*. Однако при решении многих задач нужно найти изменение внутренней энергии при некотором изменении давления и объёма газа. Поэтому полезно знать, как выражается внутренняя энергия через давление и объём газа.



3. Докажите, что внутреннюю энергию одноатомного идеального газа можно найти по формуле

$$U = \frac{3}{2} pV.$$

4. Запишите выражение для изменения внутренней энергии данной массы одноатомного идеального газа при изобарном расширении, если начальное давление газа равно p_0 , а объём газа увеличился от V_0 до $3V_0$.

2. Работа газа

Проще всего найти работу газа при изобарном расширении. Пусть газ изобарно расширяется под поршнем (рис. 23.1). Обозначим давление газа p , площадь поршня S . Тогда модуль силы давления газа $F = pS$.

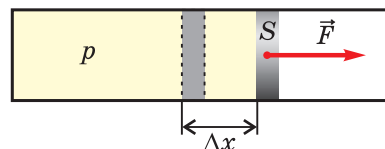


Рис. 23.1

5. Докажите, что при изобарном расширении работа газа выражается формулой

$$A_r = p \cdot \Delta V.$$



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Внутренняя энергия
одноатомного идеального газа

$$U = \frac{3}{2} \nu RT$$

$$U = \frac{3}{2} pV$$

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

6. Внутренняя энергия одноатомного газа, находящегося в сосуде объёмом 4 л, равна 1,5 кДж. Чему равно давление данной массы газа в сосуде?
7. На сколько изменилась при нагревании внутренняя энергия одноатомного газа, содержащегося в сосуде объёмом 10 л, если при этом давление газа увеличилось на 50 кПа?

§ 24. Тепловые двигатели. Второй закон термодинамики

1. Принцип действия и основные элементы теплового двигателя

Тепловым двигателем называют устройство, совершающее механическую работу за счёт использования внутренней энергии топлива.

При сгорании топлива рабочее тело (напомним, что рабочим телом является некоторая масса *газа*) *нагревается* и *расширяется* под большим давлением, совершая *полезную* работу. При этом рабочему телу (газу) передаётся количество теплоты Q_1 от *нагревателя* (сгорающего топлива).

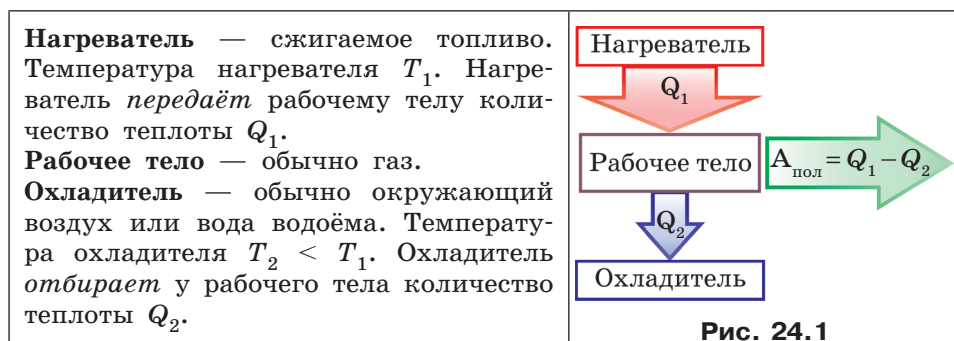
Чтобы рабочее тело (газ) могло расширяться снова, его необходимо *сжать* до прежнего объёма. Работа внешних сил при сжатии газа должна быть меньше, чем работа газа при расширении, чтобы тепловой двигатель мог совершать полезную работу. Для этого необходимо, чтобы сжатие газа происходило при меньшем давлении,

чем расширение. Чтобы уменьшить давление при сжатии газа его *охлаждают*, отбирая у него некоторое количество теплоты Q_2 , которое передаётся *охладителю*¹⁾. Охладителем является обычно окружающий воздух или вода водоёмов.

Из закона сохранения энергии следует, что полезная работа теплового двигателя выражается формулой

$$A_{\text{пол}} = Q_1 - Q_2.$$

На следующей схеме (рис. 24.1) показаны основные элементы теплового двигателя. Слева приведены пояснения к схеме.



2. Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя

Коэффициентом полезного действия (КПД) η теплового двигателя называют выраженное в процентах отношение полезной работы $A_{\text{пол}}$, совершённой двигателем, к количеству теплоты Q_1 , полученному двигателем от нагревателя:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{Q_1} \cdot 100 \%$$



1. Докажите, что

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \%,$$

где Q_2 — количество теплоты, отданное охладителю.

¹⁾ Охладитель теплового двигателя часто называли ранее *холодильником*, что приводило к недоразумениям, потому что холодильником называют также устройство для охлаждения различных предметов (например, продуктов). В настоящее время более точное название «охладитель» для одного из основных элементов теплового двигателя получает всё большее распространение, что обусловлено также единообразием терминов *нагреватель* и *охладитель*.

Поскольку $Q_2 > 0$, коэффициент полезного действия любого теплового двигателя меньше 100 %.

2. За некоторое время тепловой двигатель получил от нагревателя количество теплоты, равное 5 кДж. Чему равно количество теплоты, отданное за это же время охладителю, если КПД теплового двигателя равен 20 %?



Максимально возможный КПД теплового двигателя

Французский учёный С. Карно доказал, что максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя достигается при условии, что цикл¹⁾ рабочего тела двигателя состоит из *двух изотерм и двух адиабат* (рис. 24.2). Такой цикл называют *циклом Карно*.

Рассматривая упомянутый цикл, учёный доказал, что

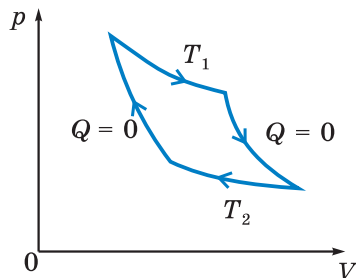


Рис. 24.2

максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя зависит только от температуры нагревателя T_1 и температуры охладителя T_2 и выражается формулой

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \%$$

Обратите внимание: приведённое выражение для КПД является лишь *максимальным теоретически возможным*. К сожалению, тепловой двигатель, работающий по циклу Карно, работал бы с максимально возможным КПД, но *бесконечно медленно*, потому что теплообмен рабочего тела с нагревателем и охладителем происходил бы при бесконечно малой разности температур. Поэтому цикл Карно невозможно осуществить на практике, и, следовательно, приведённой формулой для максимально возможного КПД теплового двигателя нельзя пользоваться при решении задач, в которых требуется найти значение КПД *реального* теплового двигателя! Приведём пример.

3. Чему равен максимально возможный КПД теплового двигателя, у которого температура нагревателя 1000 °С, а температура охладителя 20 °С? Сравните полученный ответ с КПД реальных тепловых двигателей. Например, КПД двигателей внутреннего сгорания составляет 30—40 %.



1) Напомним, что циклом называют последовательность газовых процессов, в результате которых газ возвращается в начальное состояние.

Как увеличить КПД теплового двигателя? Увеличить КПД можно, повышая температуру T_1 нагревателя и/или понижая температуру T_2 охладителя. Однако температура охладителя T_2 не может быть ниже температуры окружающего воздуха. Следовательно, в действительности можно только повышать температуру T_1 нагревателя. Однако и тут есть ограничение: например, она не может достигать температуры плавления материалов, из которых изготовлен двигатель.

3. Второй закон термодинамики

Общая закономерность природных процессов состоит в том, что *более упорядоченное состояние вещества со временем переходит в менее упорядоченное*¹⁾.

Например, вследствие трения кинетическая энергия тела, движущегося как *единое целое*, превращается в кинетическую энергию *хаотического* движения молекул.

Если температуры двух тел выравниваются вследствие теплообмена, упорядоченность также уменьшается. Действительно, в начальном состоянии, когда температуры тел были различны, молекулы этих тел были «рассортированы» по энергиям (средняя кинетическая энергия молекул одного тела была больше средней кинетической энергии молекул другого тела), а в конечном состоянии, когда температуры тел стали равными, средние кинетические энергии молекул обоих тел тоже стали одинаковыми.

Необратимость тепловых процессов

Тепловые процессы, в которых имеет место теплопередача, являются *необратимыми*: в процессе теплопередачи количество теплоты может переходить только от более нагретого тела к менее нагретому.

Необратимость тепловых процессов обусловлена *вторым законом термодинамики*, который был сформулирован в 19-м веке. Есть несколько равноценных с физической точки зрения формулировок этого закона. Приведём наглядную формулировку, предложенную немецким учёным Р. Клаузиусом:

невозможен процесс, *единственным* результатом которого была бы передача некоторого количества теплоты от холодного тела к горячему.

4. Энергетический и экологический кризисы

Современная цивилизация очень широко использует тепловые двигатели: например, они установлены на всех тепловых электростанциях и в автомобилях.

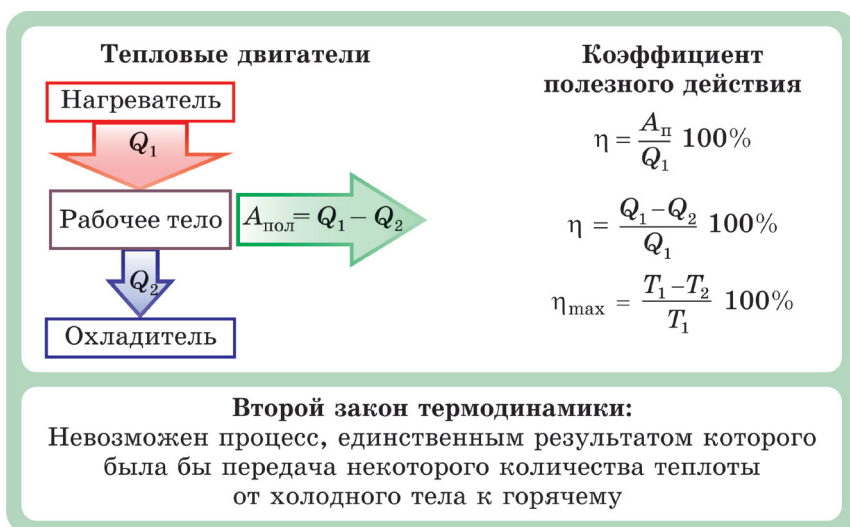
¹⁾ Неизбежность такого перехода следует из теории вероятностей.

Однако «результаты работы» этого огромного числа тепловых двигателей уже начали оказывать воздействие на климат Земли и состав атмосферы.

При сгорании огромного количества топлива в атмосфере ежегодно выбрасываются миллионы тонн продуктов сгорания и к тому же неуклонно повышается концентрация углекислого газа в атмосфере. А углекислый газ не пропускает в космическое пространство тепловое излучение нагретой Солнцем Земли. В результате возникает так называемый *парниковый эффект*, что приводит к постепенному повышению средней температуры поверхности Земли — это явление называют иногда *глобальным потеплением*. По мнению некоторых учёных, глобальное потепление может привести к таянию ледников и подъёму уровня мирового океана.

Чтобы уменьшить негативные последствия работы тепловых двигателей, учёные и инженеры непрерывно ищут возможности повысить их КПД и уменьшить выбросы вредных веществ.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ



? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

- Во сколько раз количество теплоты, полученное тепловым двигателем от нагревателя, больше совершённой двигателем работы, если КПД теплового двигателя равен 30 %?

5. Чему равны полезная работа, совершённая двигателем за один цикл, и КПД теплового двигателя, если нагреватель передал рабочему телу теплового двигателя количество теплоты, равное 1 кДж, а рабочее тело отдало охладителю количество теплоты, равное 650 Дж?
6. Чему равен максимально возможный КПД теплового двигателя, если температура нагревателя теплового двигателя равна 500 К, а температура охладителя равна 77 °С?
7. Чему равна абсолютная температура охладителя, если максимально возможный КПД теплового двигателя равен 25 %, а температура нагревателя 127 °С?
8. Чему равна абсолютная температура нагревателя, если максимально возможный КПД теплового двигателя равен 30 %, а температура охладителя 27 °С?

ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ VI

