

Глава VI. ТЕРМОДИНАМИКА

§ 31. 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 *нагреются*. Значит, их внутренняя энергия *увеличилась* благодаря совершённой вами *работе*.

Когда вы накачиваете велосипедное колесо, насос нагревается вследствие *нагрева* 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. 31.1): внутренняя энергия бруска *увеличится* вследствие *теплопередачи*¹⁾.



Рис. 31.1

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*.

Какими формулами выражается количество теплоты?

При изучении тепловых явлений в курсе физики основной школы вы встречались с формулами

$$Q = cm(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}),$$

$$Q = qm.$$

- ° 1. Что обозначает каждая буква в приведённых формулах?
- ° 2. Какое количество теплоты надо передать двум литрам воды, чтобы нагреть воду от 0°C до температуры кипения? Оцените, на какой этаж можно было бы поднять всех учеников вашего класса, совершив работу, равную этому количеству теплоты.

Удельная теплоёмкость воды $4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

- ° 3. Какое количество теплоты выделяется при сгорании 1 кг бензина? Оцените, на какую высоту можно было бы поднять легковой автомобиль, совершив работу, равную этому количеству теплоты. Удельная теплота сгорания бензина $44 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$.

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. 31.2, а).

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

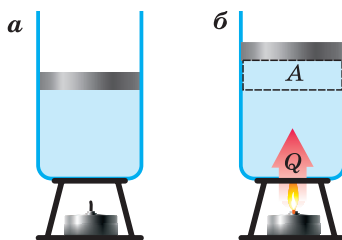


Рис. 31.2

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

Часть его посредством теплопередачи передаётся газу (рис. 31.2, б). Нагреваясь, газ *расширяется* и *поднимает* массивный поршень, *совершая механическую работу*: механическая энергия поршня при подъёме *увеличивается*!

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.

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: $A_r = -A$. Используя эту замену в написанной выше формуле, *первый закон*

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

термодинамики применительно к газовым процессам 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 цилиндр¹⁾. Если *резким* толчком вдвинуть в цилиндр поршень, то вата *воспламенится* (рис. 31.3)!

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.

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 прикладывали 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 со 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).

° 4. Как изменяется температура газа при адиабатном сжатии и при адиабатном расширении?

5. Попробуйте объяснить образование облаков.

¹⁾ Можно смочить ватку бензином или спиртом.



Рис. 31.3



- ° 6. При адиабатном расширении данной массы газа газ совершил работу, равную 200 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии газа?
- ° 7. На рисунке 31.4 приведены графики зависимости $p(V)$ для данной массы газа при изотермическом и адиабатном расширении. Какой график описывает адиабатное расширение?

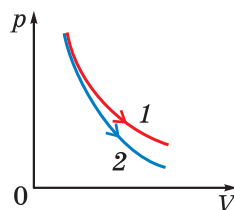


Рис. 31.4

5. Следствия первого закона термодинамики для изопроцессов

Изотермический процесс

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

Изохорный процесс

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

Изобарный процесс

- ° 16. Как изменяется внутренняя энергия данной массы газа при изобарном нагревании? при изобарном охлаждении?
- ° 17. Какой знак имеет работа газа при изобарном нагревании? при изобарном охлаждении?
- ° 18. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты при изобарном нагревании? изобарном охлаждении?

Адиабатный процесс

- ° 19. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты в адиабатном процессе?

- °20. Запишите первый закон термодинамики для адиабатного процесса.
- °21. Какой знак имеет работа газа при адиабатном расширении? при адиабатном сжатии?
- °22. 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**

$$\Delta U = Q + A$$

$$Q = \Delta U + A_r$$

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ¹⁾

Базовый уровень

23. По графику зависимости температуры двух тел массой по 100 г от переданного им количества теплоты (рис. 31.5) определите, чему равна удельная теплоёмкость вещества, из которого изготовлено каждое тело.
24. Чему равна температура смеси 37 л воды, взятой при температуре 20 °С, и 20 л воды, взятой при температуре 60 °С?
25. Медный цилиндр вынули из кипятка и погрузили в воду, масса которой равна массе цилиндра. Чему была равна начальная температура воды, если при тепловом равновесии температура стала равной 30 °С?
26. Какую работу совершил газ данной массы, если его внутренняя энергия уменьшилась на 300 Дж и при этом газ отдал количество теплоты 300 Дж?

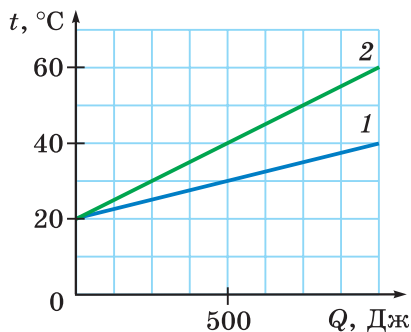


Рис. 31.5

¹⁾ В задачах этого параграфа предполагается, что теплообменом с окружающей средой можно пренебречь (если иное не оговорено в условии).

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

Повышенный уровень

30. Данная масса газа в некотором изопроцессе совершила работу 300 Дж. При этом количество теплоты, полученное газом, оказалось тоже равным 300 Дж. Каким был данный газовый процесс?
31. Количество теплоты, отданное данной массой газа в некотором изопроцессе, равно 500 Дж. При этом внутренняя энергия газа уменьшилась тоже на 500 Дж. Каким изопроцессом был данный газовый процесс?
32. Чему стала равной внутренняя энергия данной массы газа, если при изохорном нагревании газ получил количество теплоты, равное 6 кДж? Начальная внутренняя энергия газа равна 1 кДж.

Высокий уровень

33. Какое количество теплоты получила данная масса газа, если работа, совершённая газом, равна 200 Дж, а полученное газом количество теплоты в 3 раза больше изменения его внутренней энергии? Чему равно изменение внутренней энергии газа?
34. Чтобы определить удельную теплоёмкость вещества, тело из этого вещества массой 0,4 кг, нагретое до температуры 100 °С, опустили в железный стакан калориметра массой 0,1 кг, содержащий 200 мл воды при температуре 30 °С. Чему равна удельная теплоёмкость вещества, если после установления теплового равновесия температура оказалась равной 40 °С?
35. По трубе внутренним диаметром 15 мм течёт вода. Чему равна скорость течения воды в трубе, если ей каждую секунду сообщают 50 кДж количества теплоты и при этом вода нагревается на 25 °С?

§ 32. Применение первого закона термодинамики к газовым процессам

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_n до T_k выражается формулой

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

где $\Delta T = T_k - T_n$.





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

° 3. В баллоне, погружённом в воду с тающим льдом, содержится неон. После того как баллон погрузили в кипяток, внутренняя энергия газа увеличилась на 500 Дж.

а) Чему равно количество вещества в газе?

б) Чему равна масса неона?

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.



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

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

Из этой формулы следует, что *изменение* внутренней энергии одноатомного газа можно выразить формулой

$$\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(pV).$$

Обратите внимание: $\Delta(pV)$ — это изменение *произведения* давления на объём. Обозначим давление и объём газа в состоянии 1 соответственно p_1 и V_1 , а в состоянии 2 — p_2 и V_2 . Тогда при переходе газа из состояния 1 в состояние 2 изменение произведения давления на объём можно найти по формуле

$$\Delta(pV) = p_2V_2 - p_1V_1.$$

Следовательно, *изменение* внутренней энергии одноатомного газа выражается формулой

$$\Delta U = \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1).$$

Применим эту формулу к некоторым газовым процессам.



° 5. 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 $3V_0$.

° 6. Чему равно изменение внутренней энергии 2 л аргона при изохорном охлаждении, если начальное давление газа было в 3 раза больше нормального атмосферного давления, а конечное — равно нормальному атмосферному давлению?

7. В вертикальном цилиндрическом сосуде под лёгким подвижным поршнем площадью 5 см² находится криптон. Давление

над поршнем равно 200 кПа. Начальный объём газа равен 5 л. Давление над поршнем увеличили на 200 кПа и нагрели газ так, что его объём стал равным 10 л.

- Чему равно начальное значение внутренней энергии газа?
- Чему равно конечное значение внутренней энергии газа?
- Чему равно изменение внутренней энергии газа при переходе из начального состояния в конечное?

*Внутренняя энергия многоатомного газа

Кинетическая энергия молекулы *многоатомного* газа является суммой кинетической энергии поступательного движения молекулы и кинетической энергии её вращательного движения. Расчёт, выходящий за рамки нашего курса, показывает, что средняя кинетическая энергия молекул *двухатомного* газа (в частности, азота и кислорода, из которых в основном состоит воздух) выражается формулой

$$\bar{E} = \frac{5}{2}kT.$$

Следовательно, внутреннюю энергию *двухатомного* газа можно найти по формулам:

$$U = \frac{5}{2}\nu RT \text{ или } U = \frac{5}{2}pV.$$

- Чему равна внутренняя энергия U воздуха в комнате площадью $S = 20 \text{ м}^2$ и высотой $h = 3 \text{ м}$ при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении p (равном 10^5 Па)? На какую высоту можно поднять автомобиль массой 1 т, затратив такую энергию? Есть ли в условии лишние данные?



Полученный ответ может удивить: ведь кажется, что комната «пуста»!

2. Работа газа

Проще всего найти работу газа при изобарном расширении. Пусть газ изобарно расширяется под поршнем (рис. 32.1). Обозначим давление газа p , площадь поршня S . Тогда модуль силы давления газа $F = pS$.

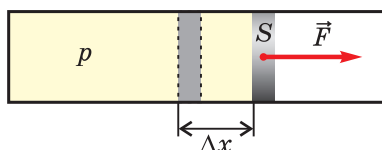


Рис. 32.1

- Докажите, что при изобарном расширении работа газа выражается формулой



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

- °10. Докажите, что в изобарном процессе *работа газа численно равна площади фигуры под графиком зависимости давления от объёма* (рис. 32.2).

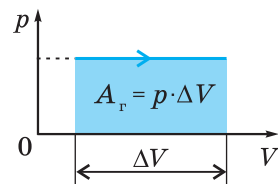


Рис. 32.2

Покажем, что это замечательное свойство графика зависимости $p(V)$ сохраняется и тогда, когда давление газа *изменяется* (рис. 32.3).

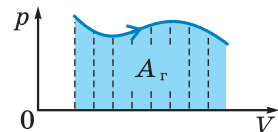


Рис. 32.3

Разобьём мысленно весь процесс расширения газа на последовательность процессов, при каждом из которых давление газа практически не изменяется, — это разбиение обозначено пунктирными линиями на рисунке 32.3. Для каждого процесса из этой последовательности работа газа численно равна площади соответствующей узкой полоски на графике. А отсюда следует, что вся работа, совершённая газом при расширении, численно равна площади фигуры под графиком зависимости $p(V)$. Обычно рассматриваются задачи, в которых площадь этой фигуры несложно найти: например, если фигура является прямоугольником, треугольником или трапецией.

Запомним: *для нахождения работы газа удобнее всего использовать график зависимости давления газа от объёма, то есть $p(V)$* . Поэтому если в условии задачи спрашивается о работе газа и приведён график газового процесса в координатах (p, T) или (V, T) , то первым делом надо изобразить график этого же процесса в координатах (p, V) .



- °11. На рисунке 32.4 изображён график зависимости объёма от температуры для ν молей одноатомного газа. Начальная и конечная температуры газа равны соответственно T_1 и T_2 .

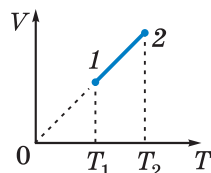


Рис. 32.4

- Выразите работу газа через величины, данные в условии.
- Выразите изменение внутренней энергии газа ΔU через величины, данные в условии.
- Выразите полученное газом количество теплоты Q через величины, данные в условии.

12. Данную массу газа переводят из состояния 1 в состояние 2 двумя различными способами: *a* и *б* (рис. 32.5).

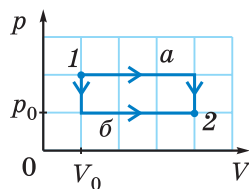


Рис. 32.5

- При каком способе работа газа больше? Во сколько раз больше?

- б) При каком способе изменение внутренней энергии газа больше? Во сколько раз больше?

Похожая задача

13. Данную массу газа переводят из состояния 1 в состояние 2 двумя различными способами: *a* и *б* (рис. 32.6). При каком из этих способов перехода переданное газу количество теплоты больше? Во сколько раз больше?

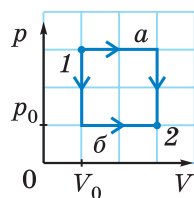


Рис. 32.6



*3. Циклические процессы

Циклическим процессом или *циклом* называют газовый процесс, в результате которого газ возвращается в начальное состояние.

Циклические процессы удобнее всего изучать с помощью графиков зависимости давления от объёма, то есть в координатах (p, V) .

На рисунке 32.7 приведён один из примеров графика циклического процесса в указанных координатах.

При переходе из состояния 1 в состояние 2 (эта часть графика изображена красным) газ *расширялся* и, следовательно, совершал *положительную работу* A_r .

Эта работа численно равна площади фигуры под данной частью графика (рис. 32.8).

При переходе же из состояния 2 в состояние 1 (эта часть графика изображена синим) газ *сжимался* — при этом работу совершали внешние силы.

Напомним, что при сжатии газа внешними силами площадь фигуры под графиком зависимости $p(V)$ равна *работе внешних сил* $A_{\text{внеш}}$ (рис. 32.9).

Полезной работой газа $A_{\text{пол}}$ называют разность работы газа и работы внешних сил:

$$A_{\text{пол}} = A_r - A_{\text{внеш}}.$$

Отсюда следует, что *полезная работа газа численно равна площади фигуры, заключённой внутри цикла в координатах (p, V)* . Эта фигура закрашена на рисунке 32.10.

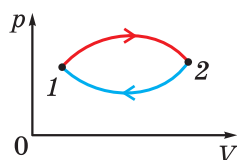


Рис. 32.7

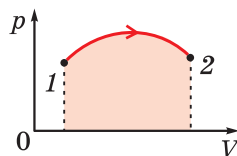


Рис. 32.8

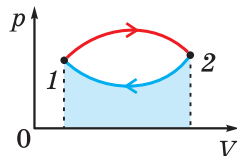


Рис. 32.9

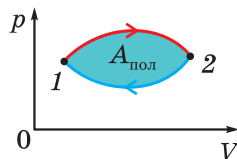


Рис. 32.10



14. На рисунке 32.11 изображён график циклического процесса, состоящий из четырёх этапов: a , b , c , d .

- На каких этапах внутренняя энергия газа увеличивалась, а на каких — уменьшалась?
- На каком этапе газ совершал положительную работу?
- На каком этапе положительную работу совершали внешние силы?
- На каких этапах газ получал некоторое количество теплоты, а на каких — отдавал?
- Выразите полезную работу газа через приведённые на рисунке значения давления и объёма.

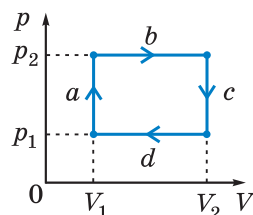


Рис. 32.11

Похожие задачи



15. На рисунке 32.12 изображён график циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного идеального газа. Одним из этапов этого процесса является изотермический процесс, а другим — адиабатный.

- Какой из этапов процесса представляет собой изотермический процесс, а какой — адиабатный?
- На каких этапах процесса работа газа положительна, а на каких этапах работа газа отрицательна (то есть работу совершают над газом)?
- На каких этапах процесса газ получает некоторое количество теплоты, а на каких этапах — отдаёт?

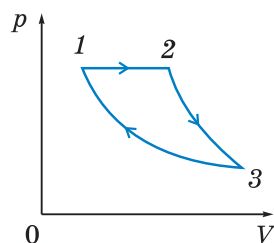


Рис. 32.12

16. Рассмотрим тот же циклический процесс (см. рис. 32.12). Обозначим ν количество вещества в одноатомном газе, T_1 , T_2 и T_3 — значения его абсолютной температуры соответственно в состояниях 1, 2, 3.

- Есть ли среди значений T_1 , T_2 и T_3 одинаковые?
- Выразите работу газа в изобарном процессе через величины, приведённые в условии.
- Выразите изменение внутренней энергии газа в изобарном процессе через величины, приведённые в условии.
- Выразите количество теплоты, полученное газом в изобарном процессе, через величины, приведённые в условии.
- Выразите работу газа в адиабатном процессе через величины, приведённые в условии.
- Как связаны количество теплоты, отданное газом в изотермическом процессе, с работой внешних сил над газом?

20. Температуру пяти молей одноатомного газа, находящегося в закрытом стеклянном сосуде, увеличили на 20 К. Какое количество теплоты получил газ?
21. Как изменилась температура пяти молей одноатомного газа, находящегося в закрытом металлическом сосуде, если ему передали количество теплоты, равное 5 кДж?

Повышенный уровень

22. В закрытом сосуде содержится 5 г гелия и 30 г аргона при температуре 300 К. Чему равна внутренняя энергия этой смеси газов?
23. На сколько процентов увеличится внутренняя энергия данной массы одноатомного газа, если его температуру увеличить от 0 °С до 127 °С?
24. Чему равна концентрация молекул одноатомного газа, находящегося в сосуде объёмом 5 л при температуре 27 °С, если внутренняя энергия газа равна 300 Дж?
25. Чему равна работа газа в каждом из случаев, изображённых на рисунках 32.14, а—е?

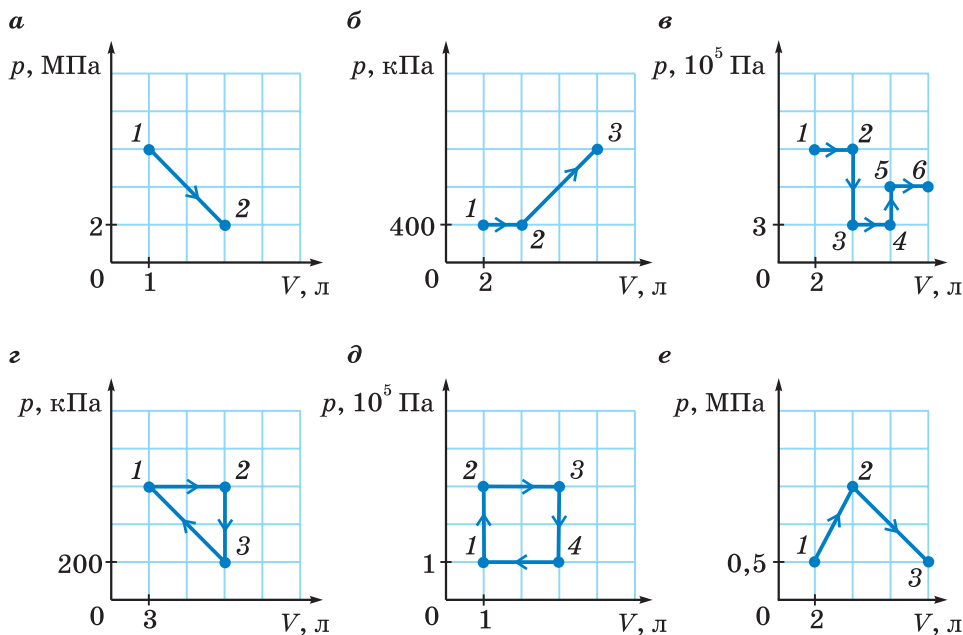


Рис. 32.14

26. График зависимости давления данной массы газа от объёма представляет собой отрезок прямой. Чему равна работа газа, давление которого при расширении от 3 до 6 л уменьшилось с 300 до 100 кПа?

Высокий уровень

27. Объём газа массой 20 г при изобарном расширении увеличился в 4 раза, при этом газ совершил работу 6,23 кДж. Какой это может быть газ, если его начальная температура равна 127 °С?
28. Начальная температура одного моля одноатомного газа равна 300 К. Насколько изменилась внутренняя энергия газа, если состояние газа изменялось по закону $p^3V = \text{const}$, а его объём увеличился в 8 раз?
29. Внутренняя энергия данной массы одноатомного газа при изохорном охлаждении уменьшилась на 120 кДж. Какое количество теплоты надо сообщить газу для последующего изобарного нагревания до начальной температуры?
30. Какое количество теплоты получили 2 моля одноатомного газа в процессе 2—3 (рис. 32.15), если начальная температура газа равна 400 К?
31. Какое количество теплоты получили 4 моля одноатомного газа в результате изобарного нагревания и последующего изохорного нагревания, если в результате этих процессов как объём, так и давление газа увеличились в 3 раза, а начальная температура газа была 100 К?

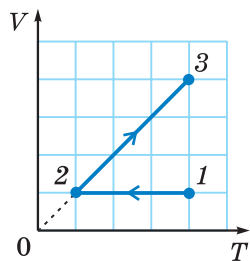


Рис. 32.15

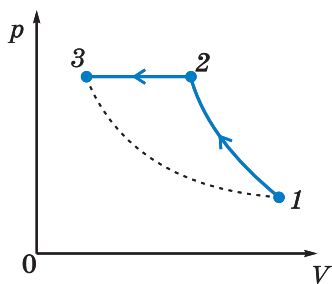


Рис. 32.16

32. Одноатомный газ сжимается сначала адиабатно, а затем изобарно так, что конечная температура газа равна начальной (рис. 32.16). Чему равна работа внешних сил в процессе 2—3, если при адиабатном сжатии внешние силы совершили работу, равную 6 кДж?
33. В сосуде под поршнем содержится насыщенный водяной пар при температуре 80 °С. Чему равна работа пара, если при медленном вдвигании поршня в сосуде образовался 1 г воды, а температура содержимого сосуда не изменилась?

§ 33. 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.

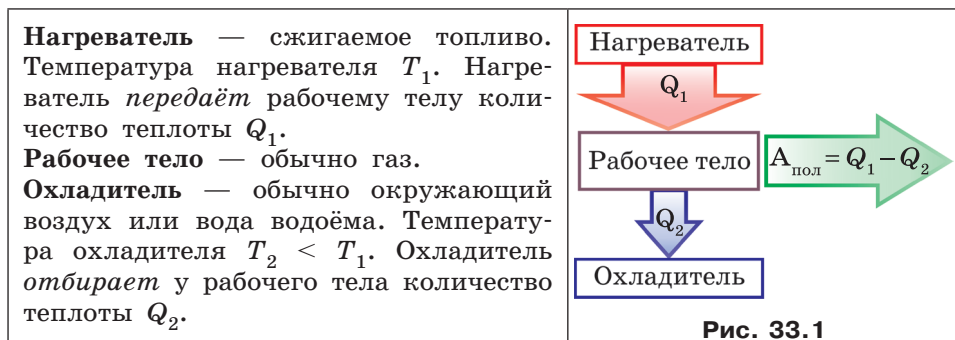
При сгорании топлива рабочее тело (напомним, что рабочим телом является некоторая масса *газа*) *нагревается* и *расширяется* под большим давлением, совершая *полезную* работу. При этом рабочему телу (газу) передаётся количество теплоты Q_1 от *нагревателя* (сгорающего топлива).

Чтобы рабочее тело (газ) могло расшириться 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. 33.1) показаны основные элементы теплового двигателя. Слева приведены пояснения к схеме.



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*.

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.

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. 33.2). Такой цикл называют *циклом Карно*.

Рассматривая упомянутый цикл, учёный доказал, что

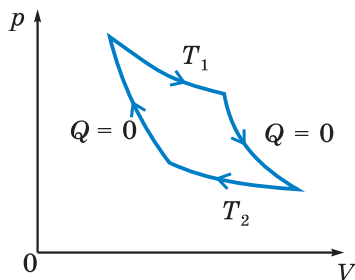


Рис. 33.2

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

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

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

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°C , а температура охладителя 20°C ? Сравните полученный ответ с КПД реальных тепловых двигателей. Например, КПД двигателей внутреннего сгорания составляет 30—40 %.

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. Пример расчёта КПД цикла

4. На рисунке 33.3 изображён график состоящего из четырёх этапов цикла для одноатомного идеального газа.

- Назовите четыре этапа цикла.
- На каком этапе газ совершает положительную работу? Выразите её через p_0 и V_0 .
- Чему равно количество теплоты Q_1 , полученное газом от нагревателя за один цикл?
- Чему равна *полезная* работа газа?
- Чему равен КПД данного цикла?

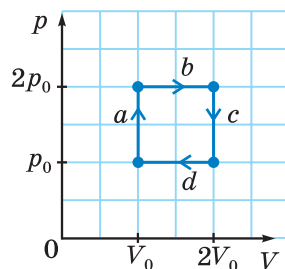


Рис. 33.3

Похожая задача

5. На рисунке 33.4 изображён график циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа. Чему равен КПД цикла?

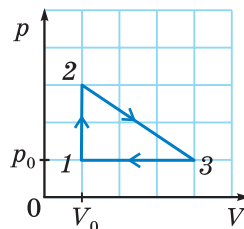


Рис. 33.4

4. 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.

5. Энергетический и экологический кризисы

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

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

При сгорании огромного количества топлива в атмосферу 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

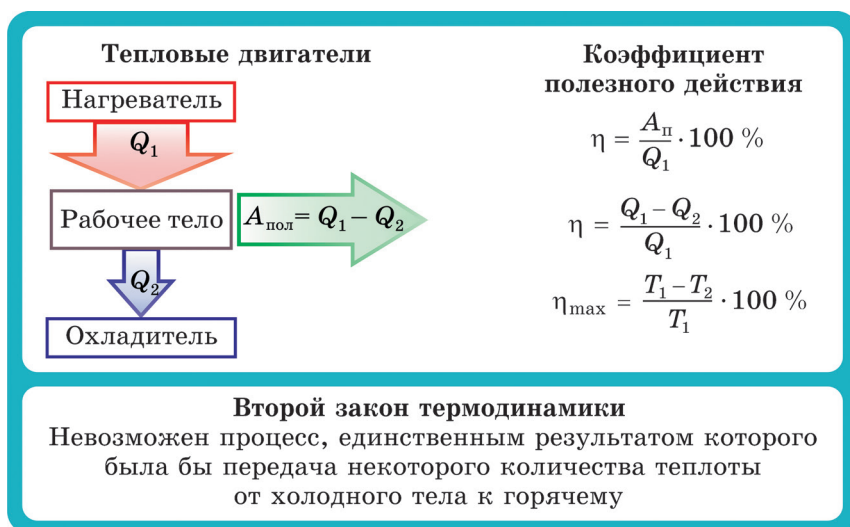
¹⁾ Неизбежность такого перехода следует из теории вероятностей.

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

Базовый уровень

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

8. Чему равен максимально возможный КПД теплового двигателя, если температура нагревателя теплового двигателя равна 500 К , а температура охладителя равна 77°С ?
9. Чему равна абсолютная температура охладителя, если максимально возможный КПД теплового двигателя равен 25% , а температура нагревателя 127°С ?
10. Чему равна абсолютная температура нагревателя, если максимально возможный КПД теплового двигателя равен 30% , а температура охладителя 27°С ?

Повышенный уровень

11. Температура нагревателя теплового двигателя равна 1200°С , а температура охладителя составляет 20°С . Во сколько раз КПД теплового двигателя меньше максимально возможного, если нагреватель передал рабочему телу теплового двигателя количество теплоты 5 кДж , а рабочее тело отдало охладителю 4 кДж ?
12. Абсолютная температура нагревателя теплового двигателя в $1,3$ раза больше абсолютной температуры охладителя. Чему равен максимально возможный КПД этого двигателя?
13. Количество теплоты, которое рабочее тело теплового двигателя отдаёт охладителю, увеличили на 10% , а количество теплоты, которое он получает от нагревателя, увеличили на 15% . Как изменился КПД двигателя — увеличился или уменьшился? Каким он стал, если первоначально он был равен 35% ?
14. Сколько керосина потребуется для одного часа полёта самолёта со скоростью 2000 км/ч , если сила тяги двигателя равна 90 кН , а его КПД равен 45% ? Удельная теплота сгорания керосина 45 МДж/кг .

Высокий уровень

15. По графику зависимости давления данной массы одноатомного газа от объёма (рис. 33.5) определите:

- а) работу газа за один цикл;
- б) количество теплоты, которое получил газ за один цикл;
- в) КПД цикла.

16. С данной массой одноатомного газа осуществляют циклический процесс.

Сначала при изохорном нагревании давление газа увеличивают в 3 раза, затем при изобарном нагревании объём газа увеличивают на 50% . Потом газ изохорно охлаждают, и, наконец, возвращают в начальное состояние с помощью изобарного охлаждения. Изобразите график цикла в наиболее удобных координатах и найдите его КПД.

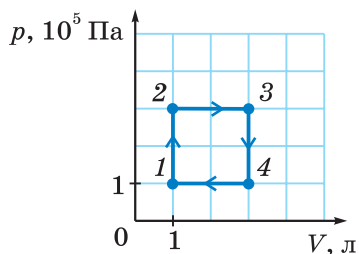


Рис. 33.5

17. Чему равен КПД циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа (рис. 33.6)?
18. Чему равен КПД циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа (рис. 33.7)?

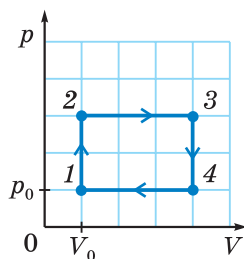


Рис. 33.6

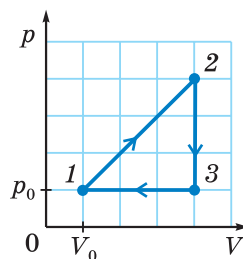


Рис. 33.7

19. Циклический процесс, который осуществляется с пятью молями одноатомного газа, состоит из изотермического расширения, изохорного охлаждения и адиабатического сжатия. Чему равен КПД цикла, если в изохорном процессе температура газа уменьшается на 300 К, а работа, совершённая газом в изотермическом процессе, равна 25 кДж?
20. На рисунке 33.8 изображён график циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа. Какое количество теплоты газ отдаёт за цикл охладителю, если при переходе из состояния 1 в состояние 2 газ совершает работу, равную 8 кДж?

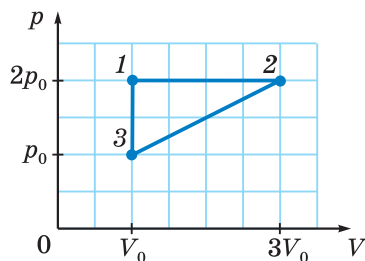


Рис. 33.8

*§ 34. Фазовые переходы

1. Плавление и кристаллизация

Напомним, что агрегатными состояниями называют газообразное, жидкое и твёрдое состояния вещества. Переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое являются примерами *фазовых переходов*.

Начнём с рассмотрения перехода вещества из твёрдого (а точнее — кристаллического) состояния в жидкое. Такой переход называют *плавлением*.

Обратный процесс, при котором вещество переходит из жидкого состояния в кристаллическое, называют *кристаллизацией* или *отвердеванием*.

Температура плавления

Опыт показывает, что процесс плавления происходит при *постоянной* температуре, которая различна для различных веществ. Эту температуру называют *температурой плавления* данного вещества.

Температуры плавления для различных веществ могут отличаться на тысячи градусов.

° 1. Какова температура плавления льда?

Очень низкие температуры плавления характерны для веществ, которые мы привыкли считать газами: например, водород плавится при -259°C , а кислород — при -218°C .

Железо плавится при 1539°C , а наиболее тугоплавкий металл — вольфрам — имеет температуру плавления 3387°C .

° 2. Известен ли вам металл, температура плавления которого ниже температуры плавления льда?

Удельная теплота плавления

Чтобы полностью расплавить кристаллическое тело, мало нагреть его до температуры плавления — надо *продолжать* подводить к нему тепло до *полного* превращения в жидкость.

Какое же превращение энергии при этом происходит, если температура тела остаётся *постоянной*?

Напомним, что температура является мерой средней *кинетической* энергии хаотического движения молекул, — следовательно, если температура тела остаётся постоянной, средняя кинетическая энергия молекул в процессе плавления *не изменяется*.

А поскольку внутренняя энергия тела — это сумма кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия, мы приходим к выводу, что в процессе плавления *всё подводимое к телу количество теплоты Q идёт на увеличение потенциальной энергии молекул*.

Количество теплоты Q , необходимое для того, чтобы полностью расплавить тело, взятое при температуре плавления, пропорционально массе m этого тела:

$$Q = \lambda m.$$



Величину λ называют *удельной теплотой плавления*. Она численно равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы расплавить 1 кг кристаллического вещества, взятого при температуре плавления.



° 3. Докажите, что единицей удельной теплоты плавления является

$$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

° 4. Кусок льда, взятый при температуре 0°C , полностью превратили в воду при той же температуре, сообщив ему некоторое количество теплоты. До какой температуры нагреется образовавшаяся вода, если сообщить ей такое же количество теплоты? Удельная теплота плавления льда равна 330 кДж/кг , а удельная теплоёмкость воды равна $4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Сравнительно большое значение удельной теплоты плавления льда спасает нас весной от слишком бурного таяния льда и снега.



° 5. На рисунке 34.1 приведён график зависимости температуры образца вещества массой 1 кг в процессе плавления от переданного ему количества теплоты.

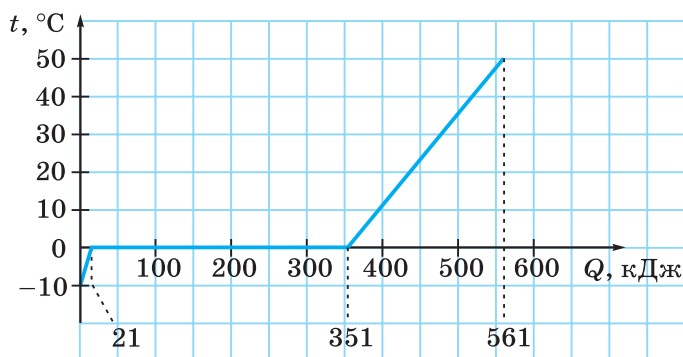


Рис. 34.1

- Какова удельная теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии?
- Чему равна температура плавления вещества?
- Чему равна удельная теплота плавления вещества?
- Какова удельная теплоёмкость вещества в жидком состоянии?
- Какое это вещество?

Кристаллизация

Кристаллизация также происходит при *постоянной* температуре, которая равна температуре плавления. В процессе кристаллизации

тело *отдаёт* такое же количество теплоты, которое надо сообщить ему для плавления.

На первый взгляд это может показаться странным: как может, например, вода при *замерзании* отдавать некоторое количество теплоты? И тем не менее, это действительно так: когда вода превращается в лёд, она отдаёт довольно большое количество теплоты окружающему *холодному* воздуху, температура которого *ниже* $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это явление смягчает заморозки при наступлении холодного времени года.

2. Парообразование и конденсация

Парообразование

Процесс превращения жидкости в пар называют *парообразованием*. Парообразование, происходящее со свободной поверхности жидкости, называют *испарением*.

Испарение происходит при *любой* температуре: например, вода постепенно «улетучивается» из открытого стакана, а лужи после дождя высыхают.

Скорость испарения жидкости зависит от вида вещества, от площади свободной поверхности жидкости, от температуры, а также от движения воздуха над поверхностью жидкости.

° 6. Объясните, почему скорость испарения жидкости увеличивается при увеличении площади свободной поверхности жидкости и при повышении температуры.

Испаряться могут не только жидкости, но и твёрдые тела: это явление называют *возгонкой* или *сублимацией*. Например, хорошо известно, что замёрзшее на морозе бельё высыхает: это означает, что лёд испаряется, непосредственно превращаясь в водяной пар, минуя жидкое состояние (воду).

7. Если капнуть йодом на лист бумаги, образовавшееся пятно со временем будет светлеть и через некоторое время совсем исчезнет. Как это объяснить? Попробуйте поставить сами такой опыт.

При испарении жидкость *охлаждается*: поэтому человек ощущает прохладу, выходя из воды после купания в море или в реке.

° 8. Почему при испарении жидкость охлаждается?

Удельная теплота парообразования

Чтобы температура жидкости при парообразовании не уменьшалась, к жидкости надо постоянно подводить тепло. Так как температура жидкости при этом не изменяется, всё сообщаемое жидкости количество теплоты «идёт» на разрыв связей между молекулами. При этом потенциальная энергия молекул увеличивается.



Количество теплоты Q , необходимое для того, чтобы превратить жидкость в пар при постоянной температуре, пропорционально массе m жидкости:

$$Q = Lm.$$

Величину L называют *удельной теплотой парообразования*. Она численно равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы превратить в пар 1 кг жидкости при постоянной температуре.



°9. Докажите, что *единицей удельной теплоты парообразования*

является $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

- °10. На какой этаж можно было бы поднять слона массой 4 т, совершив работу, численно равную количеству теплоты, необходимому для превращения 2 л воды в пар при постоянной температуре? Удельная теплота парообразования воды равна 2,3 МДж/кг. Высоту одного этажа примите равной 3 м.

Конденсация

Процесс, обратный парообразованию, то есть превращение пара в жидкость, называют *конденсацией*.

При конденсации пара теплота *выделяется*: при конденсации 1 кг пара выделяется количество теплоты, численно равное удельной теплоте парообразования.



- °11. Почему обжечься паром опаснее, чем кипятком?

3. Уравнение теплового баланса при наличии фазовых переходов

При решении задач, в которых идёт речь о плавлении кристаллического тела, надо помнить, что если начальная температура тела не равна температуре плавления, то ему надо сообщить некоторое количество теплоты для того, чтобы нагреть его до этой температуры.



12. В атмосферу Земли влетает железный метеорит, имеющий температуру, равную -260°C . Вследствие сопротивления воздуха при движении сквозь атмосферу 80 % кинетической энергии метеорита переходит в его внутреннюю энергию. Удельная теплоёмкость железа равна $460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, температура плавления 1540°C , удельная теплота плавления 270 кДж/кг .

- При какой минимальной скорости входа в атмосферу метеорит нагреется до температуры плавления?
- Какая часть массы метеорита расплавится, если при входе в атмосферу его скорость равна $1,6 \text{ км/с}$?

13. В калориметр, содержащий некоторую массу воды $m_{\text{в}}$, помещают кусок льда массой $m_{\text{л}}$. Каким может быть состояние вещества, когда в калориметре будет тепловое равновесие? Какой может быть конечная температура содержимого калориметра в каждом случае?
14. В калориметр, содержащий 1,5 л воды при температуре 20 °С, кладут кусок льда при температуре –10 °С. Чему равна масса льда, если после установления теплового равновесия в калориметре находится:
- а) только лёд;
 - б) только вода;
 - в) лёд и вода в тепловом равновесии?
15. В калориметр, в котором находится 1 л воды при температуре 20 °С, впускают 100 г водяного пара при температуре 100 °С. Чему будет равна температура в калориметре после установления теплового равновесия? Необходимые вам данные найдите в тексте параграфа.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ



Фазовые переходы — переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое.

Агрегатные состояния:

газообразное, жидкое и твёрдое состояния вещества

Количество теплоты Q , необходимое для того, чтобы полностью расплавить тело, взятое при температуре плавления, пропорционально массе m этого тела:

$$Q = \lambda m,$$

λ — удельная теплота плавления вещества

Количество теплоты Q , необходимое для того, чтобы превратить жидкость в пар при постоянной температуре, пропорционально массе m жидкости:

$$Q = Lm,$$

L — удельная теплота парообразования

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Повышенный уровень

16. До какой наименьшей температуры надо нагреть алюминиевый куб, чтобы после того, как его положат на плоскую льдину при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, он полностью погрузился в лёд? Примите, что количество теплоты, выделившееся при остывании алюминиевого куба, равно количеству теплоты, поглощённому льдом при таянии.
17. В калориметр поместили 100 г льда при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем впустили пар при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чему будет равна масса воды в калориметре, когда весь лёд растает, а температура воды будет равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?
18. В калориметр, содержащий 1 кг льда, добавили 4 кг воды при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какой была начальная температура льда в калориметре, если после установления теплового равновесия в калориметре оказалась только вода при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?
19. Для нагревания на плите некоторой массы воды от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры кипения потребовалось 6 мин . Сколько потребуются времени, чтобы эта вода выкипела, если потерями тепла можно пренебречь?
20. До какой температуры была нагрета вода, полученная из 100 кг снега, взятого при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, если для этого в печи с КПД 20% сожгли 22 кг дров? Удельная теплота сгорания дров равна 10 МДж/кг .

Высокий уровень

21. В $1,5\text{ л}$ воды, содержащейся в калориметре при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, кладут лёд, температура которого равна $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплообменом с окружающей средой и теплоёмкостью калориметра можно пренебречь. Какая температура установится в калориметре, если масса льда равна:
 - а) 40 кг ;
 - б) 200 г ?
22. В калориметре начали нагревать некоторую массу вещества в кристаллическом состоянии. На рисунке 34.2 изображён график зависимости температуры содержимого калориметра от времени. Чему равна удельная теплота

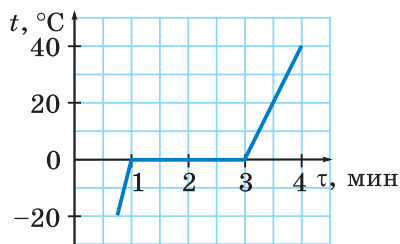


Рис. 34.2

плавления данного вещества, если его удельная теплоёмкость в жидком состоянии равна $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$? Теплоёмкостью калориметра и тепловыми потерями можно пренебречь, мощность нагревателя считайте постоянной.

23. В калориметр налили 1 л воды при температуре 20°C . Чему станет равна температура содержимого калориметра после того, как в воду опустят 100 г мокрого снега, содержание воды в котором (по массе) равно 60 %, и в калориметре установится тепловое равновесие? Потерями тепла можно пренебречь.
24. Свинцовая пуля массой 10 г, летящая со скоростью 400 м/с, ударяется о стальную плиту и отскакивает от неё со скоростью 100 м/с. Примите, что изменение внутренней энергии пули составляет 0,6 от модуля изменения её механической энергии. Чему равна масса расплавленного свинца? Температуру пули до удара о плиту примите равной 50°C . Удельная теплота плавления свинца равна 25 кДж/кг .
25. В калориметре смешали 40 мл воды при 5°C и 20 мл воды при 10°C . В образовавшуюся смесь поместили 0,4 кг льда при температуре -6°C . Весь ли лёд растает? Если нет, то чему будет равна масса льда после установления теплового равновесия?

ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ VI

Два способа
изменения
внутренней энергии

$\swarrow$ A $\searrow$ Q

**Первый закон
термодинамики**

$$\Delta U = Q + A$$

$$Q = \Delta U + A_{\Gamma}$$

Внутренняя энергия
одноатомного
идеального газа

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

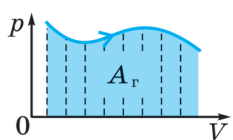
$$U = \frac{3}{2} p V$$

Изменение внутренней энергии
одноатомного
идеального газа

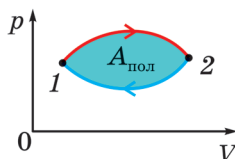
$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \Delta(pV)$$

Работа газа



Полезная работа газа

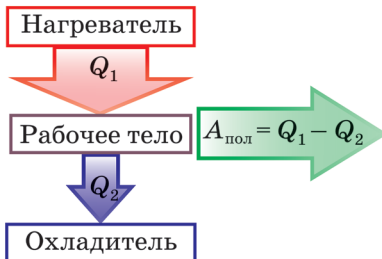


Адиабатный
процесс

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -A_{\Gamma}$$

Тепловые двигатели



**Коэффициент
полезного действия**

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

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

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

Количество теплоты

$$Q = cm(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$$

$$Q = \lambda m$$

$$Q = Lm$$