

Термодинамика

В термодинамике рассматривают процессы перехода тепловой энергии от одних тел к другим. Каждое тело обладает своей внутренней энергией.

Внутренней энергией называется сумма кинетических и потенциальных энергий всех молекул тела.

Так как у молекул идеального газа нет потенциальной энергии взаимодействия, то *внутренней энергией идеального газа называется сумма только кинетических энергий его молекул.*

Изменить внутреннюю энергию можно двумя путями: путем совершения работы и путем теплопередачи.

Теплопередачей называют передачу тепла от одного тела другому без совершения механической работы или без превращения тепловой энергии в иные виды.

Теплопередачу делят на *теплопроводность, конвекцию и излучение.*

Теплопроводность — это передача тепла от горячего тела холодному при их соприкосновении.

Конвекция — это передача тепла путем взаимного перемещения теплых и холодных слоев жидкости и газа.

Излучение — это передача тепла с помощью электромагнитных волн.

При теплопередаче тела передают друг другу количество теплоты.

Количество теплоты Q — это мера изменения внутренней энергии тела, происшедшего без совершения механической работы, то есть только при теплопередаче.

При нагревании, плавлении и парообразовании тело получает извне количество теплоты, а при охлаждении, кристаллизации и конденсации выделяет его во внешнюю среду. Для характеристики способности вещества поглощать теплоту при нагревании, плавлении или парообразовании и выделять ее при охлаждении, кристаллизации и конденсации, а также при сгорании, введены понятия *удельной теплоемкости c , удельной теплоты плавления λ , удельной теплоты парообразования r и удельной теплоты сгорания q .*

Удельная теплоемкость c — это величина, равная отношению количества теплоты, полученного при нагревании тела или выделенного при его охлаждении, к массе этого тела и изменению его температуры:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}.$$

Удельная теплота плавления λ — это величина, равная отношению количества теплоты, полученного при плавлении тела или выделенного при его кристаллизации к массе тела:

$$\lambda = \frac{Q}{m}.$$

Удельная теплота парообразования r (или L) — это величина, равная отношению количества теплоты, полученному при парообразовании или выделенному при конденсации, к массе вещества:

$$r = \frac{Q}{m}.$$

Удельная теплота сгорания q — это величина, равная отношению количества теплоты, выделившегося при сгорании вещества к его массе:

$$q = \frac{Q}{m}.$$

Все эти, постоянные для твердых и жидких веществ, величины приводятся в справочных таблицах.

Ниже приведены основные формулы термодинамики.

Работа при изобарном изменении объема газа

$$113) A = p\Delta V$$

$$114) A = p(V_2 - V_1)$$

Здесь A — работа (Дж), p — давление газа (Па), ΔV — изменение объема газа (м^3), V_1 и V_2 — соответственно начальный и конечный объемы газа (м^3).

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

$$115) U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

$$116) U = \frac{3}{2} \nu RT$$

$$117) \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$$

Здесь U — внутренняя энергия газа (Дж), m — масса газа (кг), M — молярная масса газа (кг/моль), R — молярная газовая постоянная (Дж/(моль · К)), T — абсолютная температура (К), ν — количество вещества или число молей (моль), ΔU — изменение внутренней энергии (Дж), ΔT — изменение температуры (К).

Первый закон термодинамики

$$118) Q = \Delta U + A$$

Здесь Q — количество теплоты, переданное термодинамической системе (Дж), ΔU — изменение внутренней энергии системы (Дж), A — работа против внешних сил (Дж).

Формулы количества теплоты при нагревании или охлаждении тел

$$119) Q = cm\Delta t = cm(t_2 - t_1)$$

$$120) Q = cm\Delta T = cm(T_2 - T_1)$$

$$121) Q = C\Delta t = C(t_2 - t_1)$$

$$122) Q = C\Delta T = C(T_2 - T_1)$$

Здесь Q — количество теплоты, переданное телу при нагревании или отданное им при охлаждении (Дж), c — удельная теплоемкость вещества (Дж/(кг · К)), m — масса тела (кг), Δt — изменение температуры тела по шкале Цельсия, t_1 и t_2 — температуры тела в начале и в конце процесса передачи теплоты по шкале Цельсия, ΔT — изменение абсолютной температуры тела (К), T_1 и T_2 — абсолютные температуры тела в начале и в конце процесса передачи теплоты (К), $C = cm$ — теплоемкость тела (Дж/К).

Формула количества теплоты при плавлении или кристаллизации

$$123) Q = m\lambda$$

Здесь Q — количество теплоты (Дж), m — масса тела (кг), λ — удельная теплота плавления вещества (Дж/кг).

Формула количества теплоты при парообразовании или конденсации

$$124) Q = mr$$

Здесь Q — количество теплоты (Дж), m — масса тела (кг), r — удельная теплота парообразования (Дж/кг).

Формула количества теплоты при сгорании топлива

$$125) Q = mq$$

Здесь Q — количество выделившейся теплоты, m — масса топлива (кг), q — удельная теплота сгорания (Дж/кг).

Коэффициент полезного действия теплового двигателя

$$126) \eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\%$$

$$127) \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

Здесь η — коэффициент полезного действия (безразмерный или в %), $A = Q_1 - Q_2$ — работа, совершенная двигателем (Дж), Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим веществом от нагревателя (Дж), Q_2 — количество теплоты, отданное рабочим веществом холодильнику (Дж).

Коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя

$$128) \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$$

Здесь η — коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя (безразмерный или в %), T_1 — абсолютная температура нагревателя (К), T_2 — абсолютная температура холодильника (К).

Линейное расширение твердых тел при нагревании

$$129) l = l_0 (1 + \alpha t)$$

Здесь l — длина тела (или иной линейный размер) при температуре t °С (м), l_0 — длина при 0 °С (м), α — температурный (термический) коэффициент линейного расширения вещества (К⁻¹).

Объемное расширение твердых и жидких тел при нагревании

$$130) V = V_0 (1 + \beta t)$$

Здесь V — объем тела при температуре t °С (м^3), V_0 — его объем при 0 °С (м^3), β — температурный (термический) коэффициент объемного расширения вещества (К^{-1}), для твердых веществ $\beta = 3\alpha$.

При решении задач на составление уравнения теплового баланса, когда горячие тела, соприкасаясь с холодными, отдают им некоторое количество теплоты, а холодные его получают, сложите все количества теплоты, полученные телами в процессах нагревания, плавления или кипения, и приравняйте эту сумму сумме количеств теплоты, отданных другими телами при их охлаждении, кристаллизации, конденсации или сгорании. А затем выразите эти количества теплоты через данные и искомые величины, пользуясь формулами 119) – 125), и подставьте правые части этих формул в предыдущее равенство вместо количеств теплоты. Так вы получите уравнение теплового баланса, из которого можно найти искомую величину. Подобную задачу мы рассмотрим ниже. При этом, чтобы не запутаться в знаках, советуем в формулах 119) – 122) всегда из большей температуры тела вычитать его меньшую температуру независимо от того, нагревается оно или охлаждается. (Хотя в некоторых пособиях советуют вычитать из конечной температуры начальную, а перед количеством выделяемой теплоты ставить минус. Но потом все равно приходится менять знаки).

Следует знать, что вода и лед могут находиться в тепловом равновесии, когда лед не тает, а вода не замерзает, только при 0 °С.

Пока лед не нагреется до 0 °С, он таять не начнет. Так и вода, пока не охладится до 0 °С, не начнет превращаться в лед.

Температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении 100 °С, и при этих условиях до более высокой температуры воду нагреть нельзя.

Если в задаче на превращение механической энергии в тепловую, или наоборот, что либо сказано о коэффициенте полезного действия (КПД) процесса, решение удобно начинать с формулы КПД, который равен отношению полезно использованной энергии ко всей затраченной. При этом как полезной, так и затраченной энергией, могут быть механическая работа, потенциальная и кинетическая энергии, внутренняя энергия или количество теплоты — все зависит от условия задачи. Например, если летящее тело обладало кинетической энергией, и часть ее превратилась в тепло, т. е. пошла на увеличение внутренней энергии тела, то КПД будет равен:

$$\eta = \frac{Q}{E_k} \cdot 100\%.$$

А если за счет полученного тепла тело пришло в движение, то будет наоборот:

$$\eta = \frac{E_k}{Q} \cdot 100\%.$$

Если за счет совершенной работы тело нагрелось, то

$$\eta = \frac{Q}{A} \cdot 100\%,$$

а если за счет тепловой энергии тело совершило работу, то

$$\eta = \frac{A}{Q} \cdot 100\%.$$

Если за счет падения с высоты, где тело обладало потенциальной энергией, оно нагрелось, т. е. часть его энергии превратилась в теплоту, то

$$\eta = \frac{Q}{E_p} \cdot 100\%,$$

а если за счет полученного тепла тело взлетело на некоторую высоту, т. е. приобрело потенциальную энергию, то

$$\eta = \frac{E_p}{Q} \cdot 100\%.$$

Что ставить в числитель или знаменатель формулы КПД, зависит от того, какая энергия или работа в какую превращается. При этом числитель в этих формулах всегда меньше знаменателя, так как КПД меньше 100%, потому что в полезную энергию превращается только часть затраченной.

Если потерями энергии можно пренебречь и считать КПД равным 100%, то числитель и знаменатель этих формул можно просто приравнять друг другу.

В термодинамике основным законом является первый закон термодинамики.

Первый закон термодинамики: количество теплоты Q , переданное термодинамической системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии ΔU и на совершение работы A против внешних сил (формула 118):

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

Если система (например, газ) получает извне количество теплоты, в формуле 118) перед Q ставится плюс, а если отдает тепло во внешнюю среду, перед Q следует ставить минус. Если система нагревается, т. е. ее температура повышается и внутренняя энергия увеличивается, перед ΔU ставится плюс, а если охлаждается, т. е. температура понижается и внутренняя энергия системы уменьшается, перед ΔU следует ставить минус. Если система расширяется, т. е. ее объем увеличивается, то перед работой A ставится плюс, а если газ сжимают, объем системы уменьшается, то перед работой A следует ставить минус. Эти знаки можно ставить в самой формуле 118), тогда при подстановке числовых значений следует брать их модули. А можно в формуле 118) оставить все величины положительными, тогда при подстановке в нее числовых значений следует записывать их с плюсами и минусами, главное — не перепутать знаки.

Если в газе происходит изотермический процесс, т. е. температура не меняется, то его внутренняя энергия, согласно формуле 117)

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

тоже остается постоянной, и ее изменение $\Delta U = 0$. При этом все тепло, переданное термодинамической системе, идет на совершение работы против внешних сил. При изотермическом процессе первый закон термодинамики принимает вид:

$$Q = A.$$

Если газ находится в закрытом сосуде и с ним происходит изохорный процесс, то изменение его объема $\Delta V = 0$, поэтому, согласно формуле 113) $A = p \Delta V$ работа $A = 0$, такой газ работы не совершает. При этом формула первого закона термодинамики 118) принимает вид:

$$Q = \Delta U.$$

Таким образом, при *изохорном процессе* все тепло, переданное газу, идет на изменение его внутренней энергии.

При *изобарном процессе* в газе изменяется его внутренняя энергия и совершается работа против внешних сил, поскольку, согласно закону Шарля (формула 106)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

меняются и объем, и температура газа. Поэтому применительно к изобарному процессу формула 118) записывается полностью:

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

Если процесс в газе протекает очень быстро, так быстро, что газ не успевает обменяться теплом с внешней средой, то такой процесс называется адиабатным.

Адиабатный процесс — это процесс, протекающий без теплообмена системы с внешней средой.

При адиабатном процессе газ не получает и не отдает тепло, поэтому в формуле первого закона термодинамики $Q = 0$ и она принимает вид:

$$0 = \Delta U + A \quad \text{или} \quad \Delta U = -A.$$

Если при адиабатном процессе газ совершает работу против внешних сил, расширяясь, то его внутренняя энергия уменьшается и температура понижается. И наоборот, если при адиабатном процессе внешние силы совершают над газом работу, сжимая его, то внутренняя энергия газа увеличивается и температура повышается.

На графике в координатах $p - V$ адиабата выглядит круче изотермы (рис. 88).

Процессы, происходящие в реактивном двигателе при истечении газа из сопла ракеты, являются адиабатными.

При изобарном процессе на графике в координатах $p - V$ работа численно равна площади фигуры, ограниченной графиком и прямыми, параллельными оси давлений (на рис. 89, а) эта площадь заштрихована). При круговом процессе, когда система возвращается в исходное состояние, работа равна площади фигуры, ограниченной замкнутым графиком (рис. 89, б).

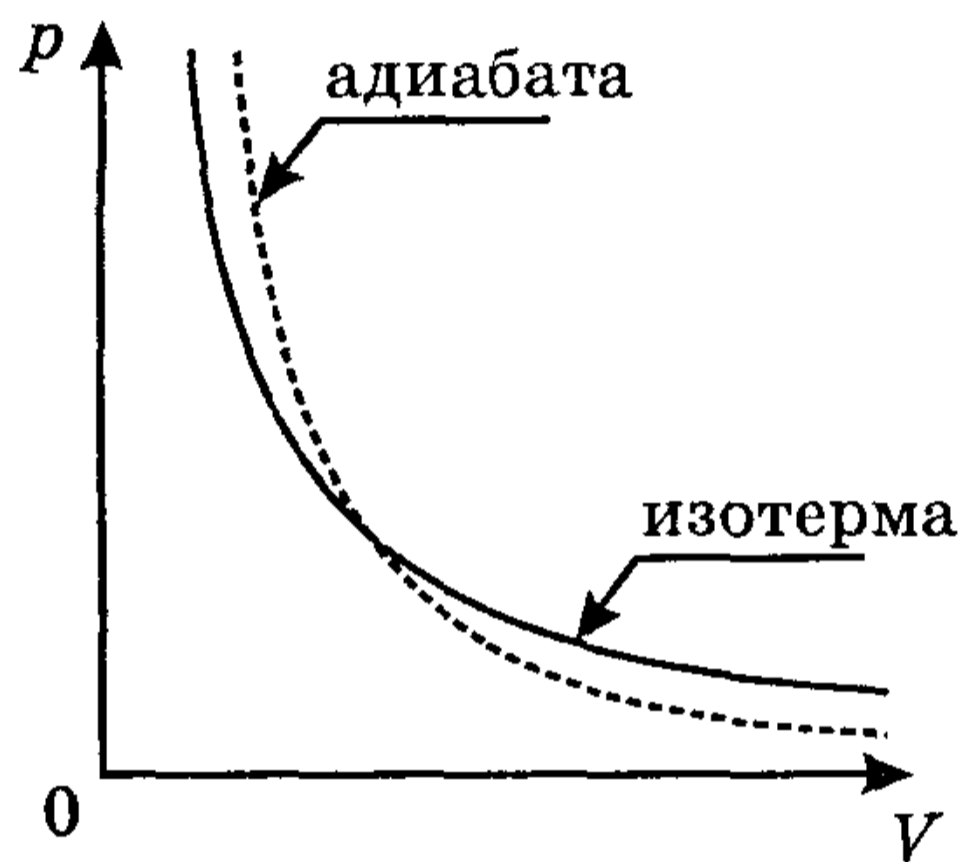


Рис. 88

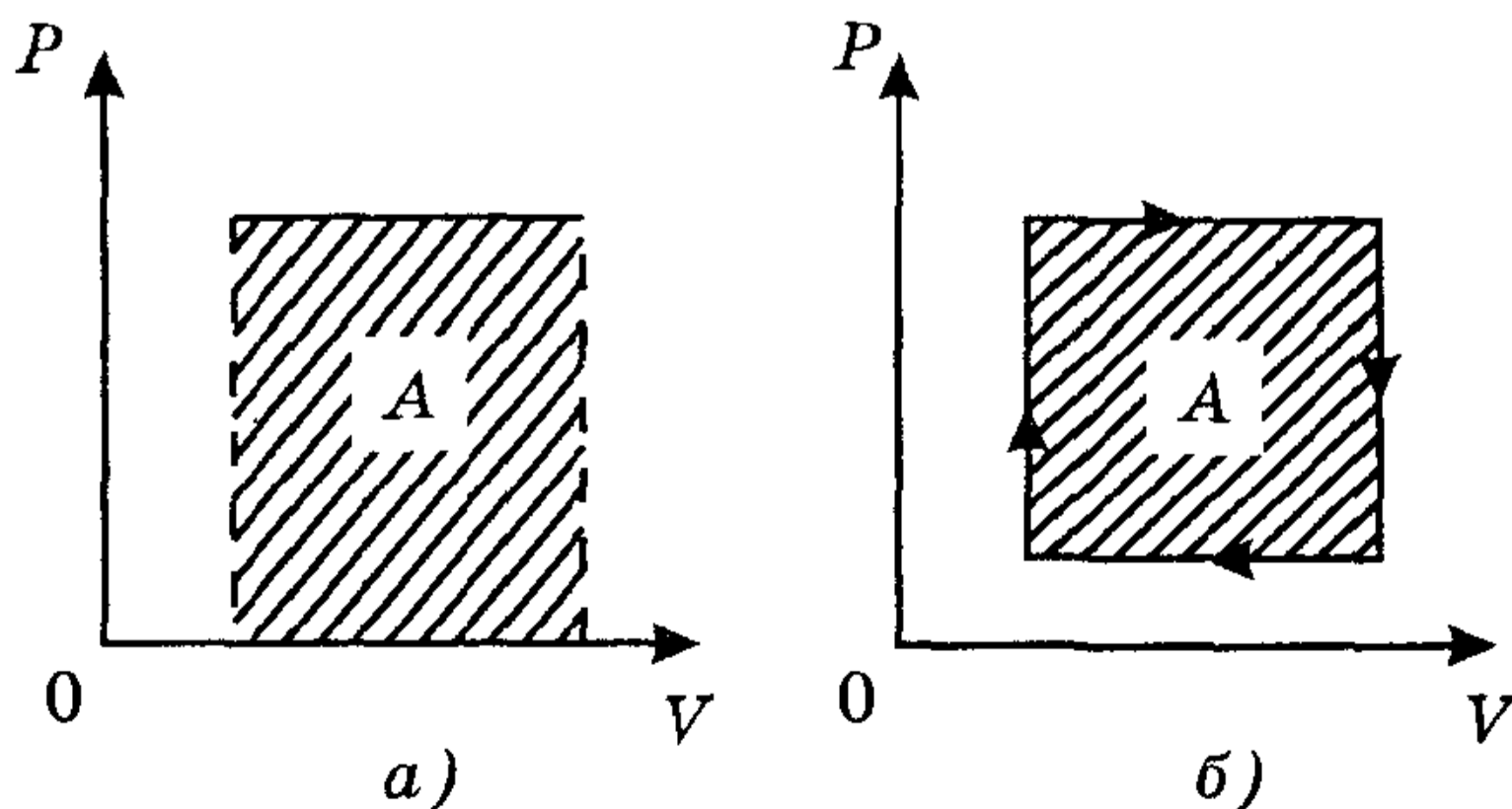


Рис. 89

Тепловыми двигателями называют устройства, в которых тепловая энергия превращается в механическую. При всем многообразии тепловые двигатели имеют общую схему работы: количество теплоты Q_1 от нагревателя передается рабочему телу, которое совершает работу A , и при этом часть переданного тепла Q_2 отдается холодильнику (внешней среде) (рис. 90).

КПД теплового реального двигателя определяется формулами 126) и 127):

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

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

Французский инженер С. Карно доказал, что КПД любого теплового двигателя определяется температурой нагревателя T_1 и температурой холодильника T_2 (внешней среды). Он вывел формулу КПД идеального теплового двигателя, работающего на идеальном газе по так называемому круговому циклу Карно, состоящему из двух изотерм и двух адиабат. КПД идеального теплового двигателя определяет формула 128):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%.$$

КПД любого реального теплового двигателя не может превысить КПД идеального, работающего при тех же температурах нагревателя и холодильника. Из формулы 128) следует, что при одинаковой температуре нагревателя T_1 КПД теплового двигателя выше при более низкой температуре холодильника T_2 . Поэтому самый высокий КПД у данного теплового двигателя зимой.

Все тела при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. Исключение составляет вода в пределах температур от 0°C до $+4^\circ\text{C}$. При нагревании от 0°C вода сжимается, становясь при 4°C наиболее плотной. И, наоборот, при охлаждении от $+4^\circ\text{C}$ до 0°C вода расширяется, делаясь при 0°C наименее плотной.

Формулы 129) и 130) позволяют определить линейные и объемные размеры тел при их нагревании или охлаждении:

$$l = l_0 (1 + \alpha t) \quad \text{и} \quad V = V_0 (1 + \beta t).$$

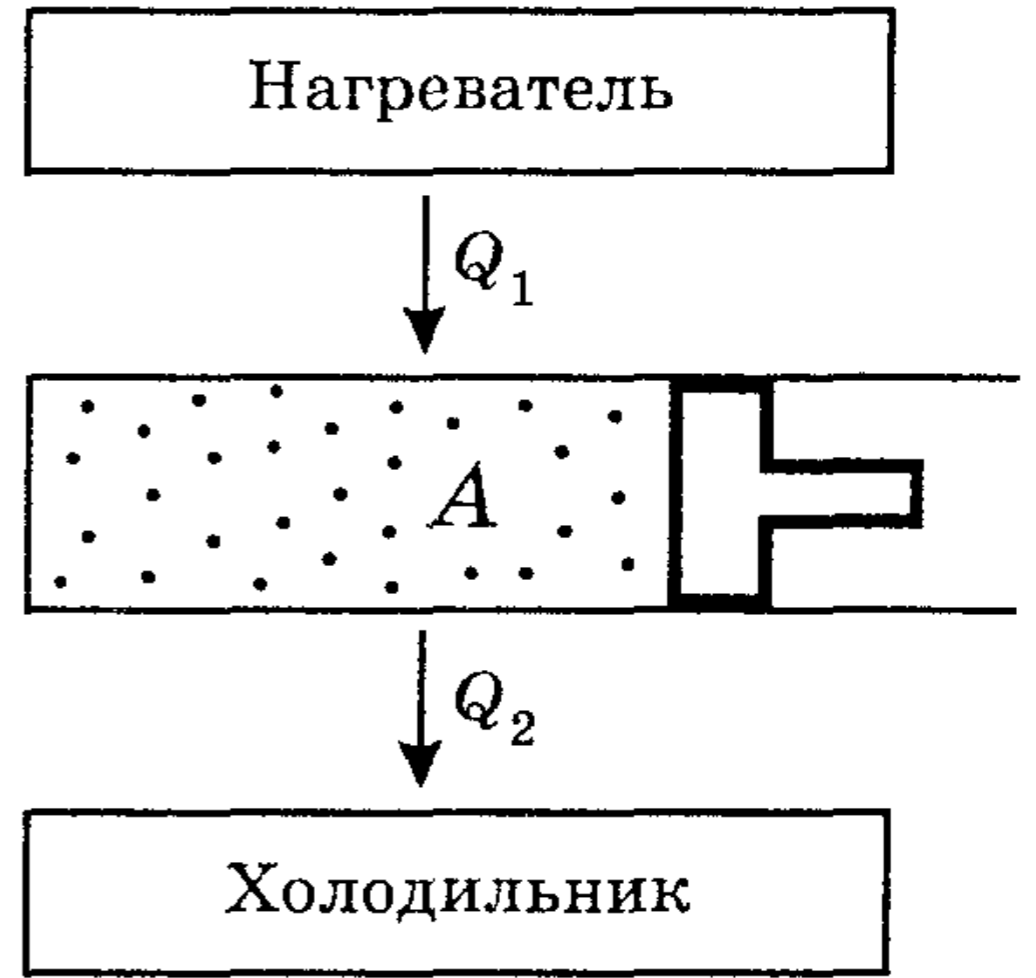


Рис. 90

A21. На рис. 97 показан график зависимости количества теплоты, необходимого для нагревания на 10°C некоторого вещества, от его массы. Удельная теплоемкость этого вещества равна

- 1) $600 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ 2) $1200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
 3) $3000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ 4) $4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

A22. На рис. 98 изображен график зависимости давления газа от его температуры. Газ получает от нагревателя количество теплоты 300 Дж . При этом

- 1) изменение его внутренней энергии равно нулю, а совершенная газом работа равна 300 Дж

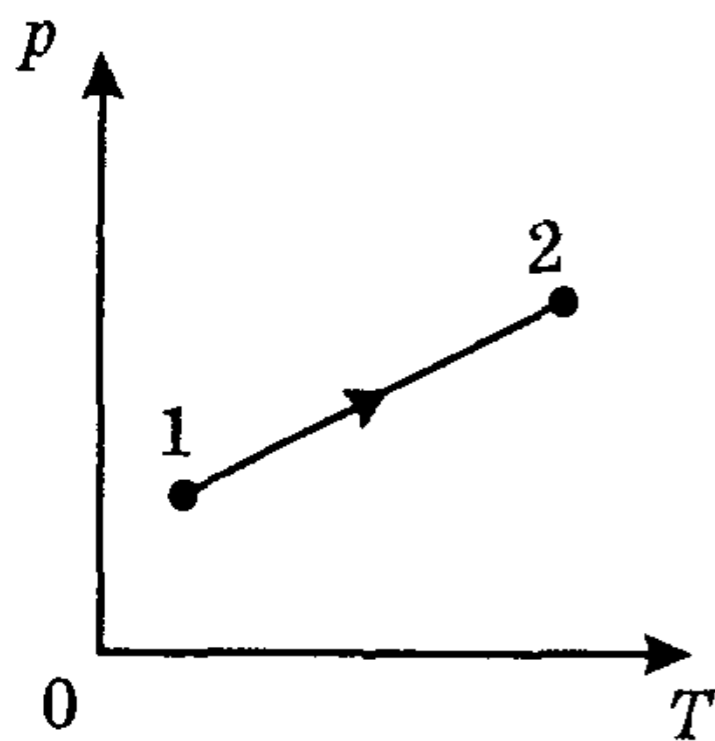


Рис. 96

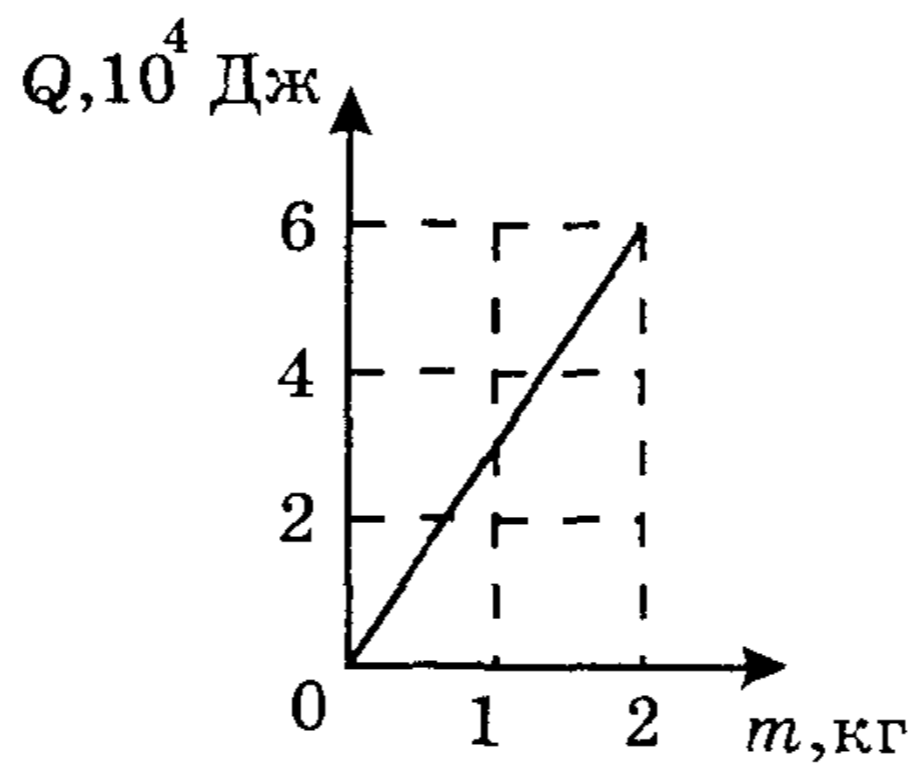


Рис. 97

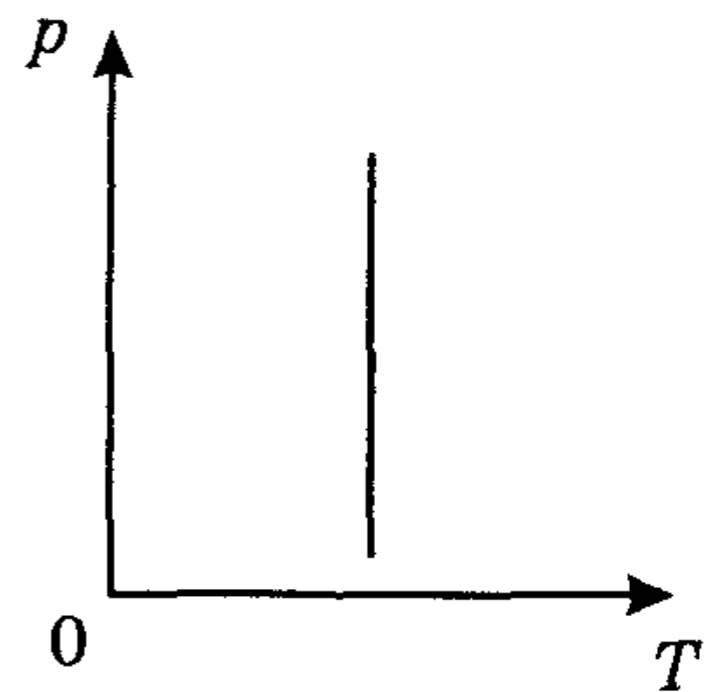


Рис. 98

- 2) изменение его внутренней энергии равно 300 Дж, а работы газ не совершает
- 3) внутренняя энергия газа уменьшается на 300 Дж, и газ совершает работу 300 Дж
- 4) внутренняя энергия газа увеличивается на 150 Дж, и газ совершает работу 150 Дж

А23. На рис. 99 изображен график изменения температуры жидкости массой 1 кг в зависимости от переданного ей количества теплоты. Удельная теплота парообразования этой жидкости равна

- 1) $5 \cdot 10^6$ Дж/кг
- 2) $7 \cdot 10^6$ Дж/кг
- 3) $2 \cdot 10^6$ Дж/кг
- 4) $3 \cdot 10^6$ Дж/кг

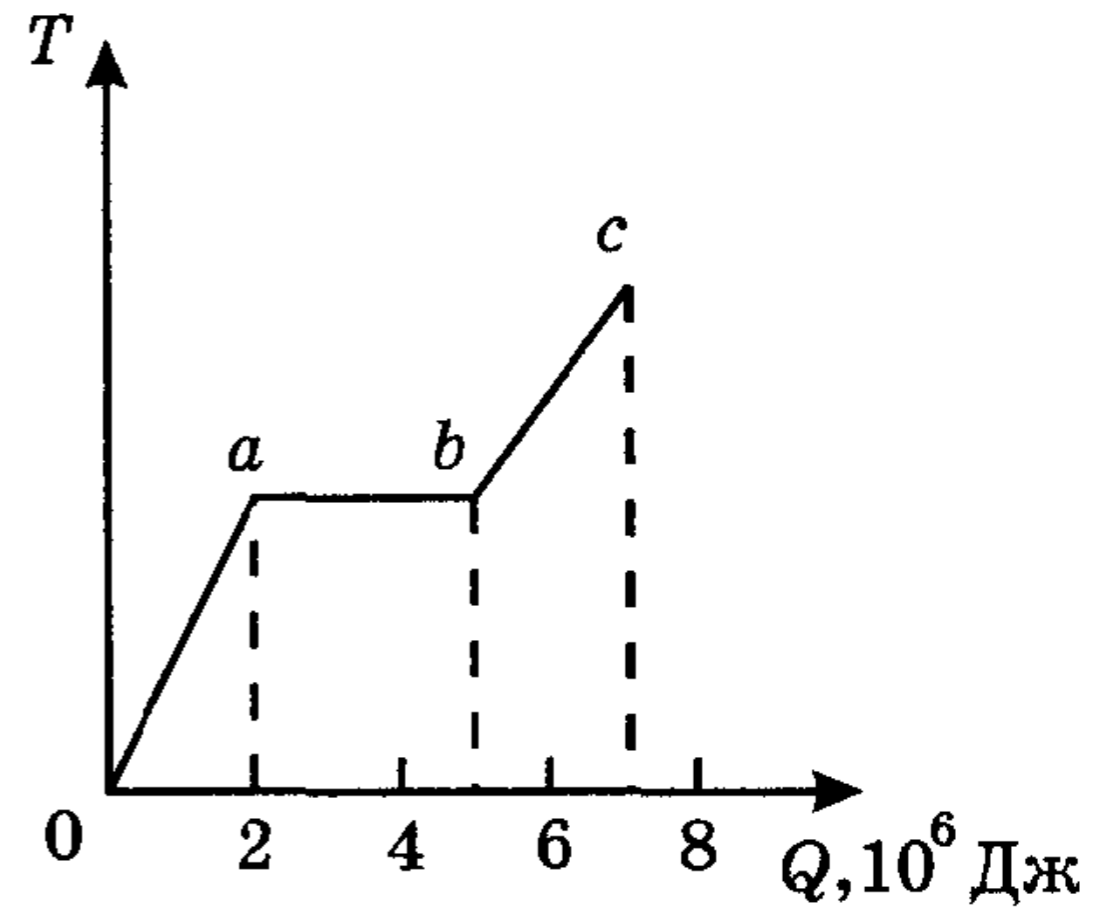


Рис. 99

А24. Газ сжали, совершив 300 Дж работы, и он выделил во внешнюю среду 500 Дж теплоты. При этом его внутренняя энергия

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1) увеличилась на 800 Дж | 2) уменьшалась на 200 Дж |
| 3) уменьшилась на 100 Дж | 4) увеличилась на 400 Дж |

А25. Под давлением 100 кПа данная масса газа изобарно расширилась, увеличив объем с 3 л до 9 л. При этом внутренняя энергия газа

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1) увеличилась на 1800 Дж | 2) увеличилась на 900 Дж |
| 3) уменьшилась на 600 Дж | 4) уменьшилась на 300 Дж |

А26. Тело массой 5 кг упало с высоты 4 м. При этом 40% его механической энергии пошла на нагревание. Количество теплоты, полученное телом при нагревании равно

- | | | | |
|-----------|-----------|----------|----------|
| 1) 200 Дж | 2) 100 Дж | 3) 60 Дж | 4) 80 Дж |
|-----------|-----------|----------|----------|

А27. На рис. 100 изображен график изобарного расширения газа в координатах $p - V$, вследствие передачи ему извне 900 Дж теплоты. При этом внутренняя энергия газа

- 1) увеличилась на 300 Дж
- 2) увеличилась на 500 Дж
- 3) уменьшилась на 400 Дж
- 4) уменьшилась на 100 Дж

А28. При изотермическом сжатии идеального газа его внутренняя энергия

- 1) увеличивается
- 2) не изменяется
- 3) уменьшается
- 4) может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от скорости сжатия

А29. Двигатель внутреннего сгорания автомобиля имеет наибольший КПД

- | | |
|----------|-----------|
| 1) летом | 2) осенью |
| 3) зимой | 4) весной |

А30. КПД идеального теплового двигателя 60 %, температура внешней среды 27°C . Температура его нагревателя равна

- | | | | |
|----------|----------|-----------|-----------|
| 1) 350 К | 2) 750 К | 3) 1050 К | 4) 3000 К |
|----------|----------|-----------|-----------|

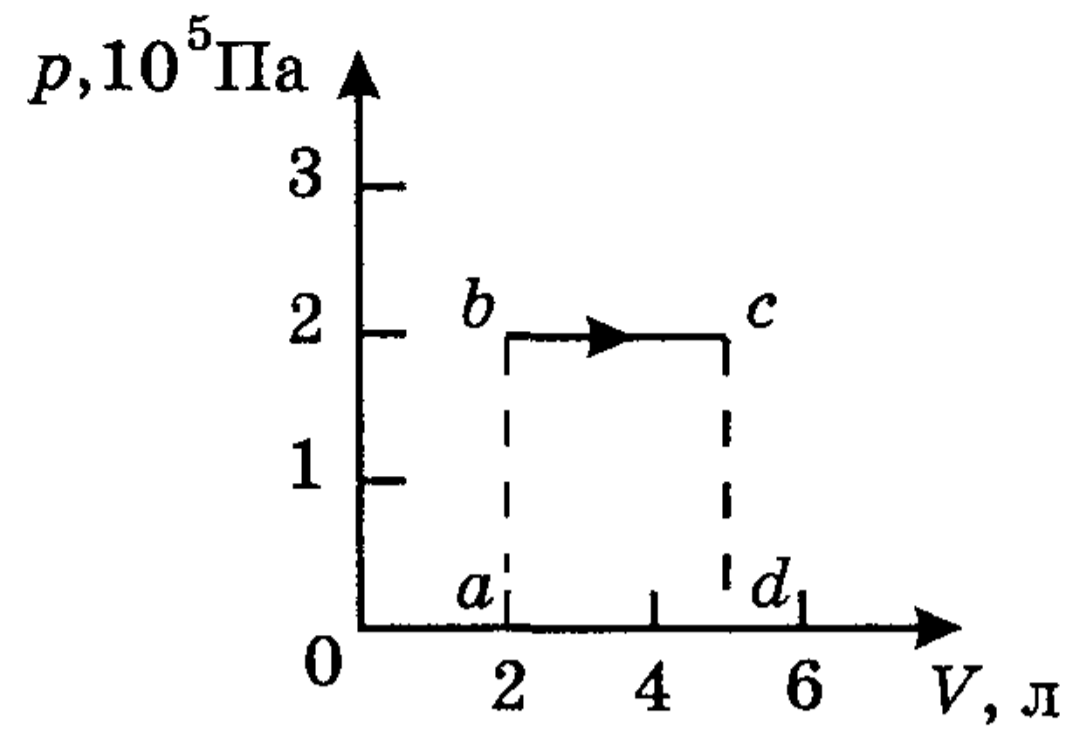


Рис. 100

Решения и ответы:

А 21. Согласно формуле 119:

$$Q = c m \Delta t,$$

следовательно:

$$c = Q / (m \Delta t) = 60000 / (2 \cdot 10) = 3000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Правильный ответ: 3).

А 22. Согласно формуле 118:

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

Изменение внутренней энергии при изотермическом процессе согласно формуле 117 равно нулю:

$$\Delta U = 0.$$

Следовательно:

$$Q = A$$

и совершенная газом работа равна 300 Дж.

Правильный ответ 1).

А 23. Согласно формуле 124:

$$Q = m r ,$$

следовательно:

$$r = Q / m = 3 \cdot 10^6 / 1 = 3 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}.$$

Правильный ответ 4).

А 24. Согласно формуле 118:

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

– 500 Дж = ΔU – 300 Дж, откуда $\Delta U = -200$ Дж.

Правильный ответ 2).

A25. Изменение внутренней энергии, согласно формуле 117), равно:

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

а из уравнения Менделеева – Клапейрона 101) $pV = \nu RT$ следует, что $R\Delta T = p\Delta V$, поэтому формулу 117) можно записать так:

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

Согласно условию изменение объема газа

$$\Delta V = 9 \text{ л} - 3 \text{ л} = 6 \text{ л} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

а давление $p = 100 \text{ кПа} = 10^5 \text{ Па}$.

С учетом этих данных изменение внутренней энергии равно:

$$\Delta U = \frac{3}{2} 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 900 \text{ Дж}$$

Правильный ответ 2).

A26. На высоте 4 м тело обладало потенциальной энергией $E_p = mgh$. Согласно условию 40% = 0,4 этой энергии превратилось в теплоту, которая пошла на нагревание тела, поэтому количество полученной им теплоты

$$Q = 0,4 mgh = 0,4 \cdot 5 \cdot 10 \cdot 4 \text{ Дж} = 80 \text{ Дж}.$$

Правильный ответ 4).

A27. Из первого закона термодинамики 118) $Q = \Delta U + A$ следует, что изменение внутренней энергии $\Delta U = Q - A$. Работа при изобарном процессе на графике в координатах $p - V$ равна площади прямоугольника $abcd$, а площадь прямоугольника равна произведению его сторон. Следовательно,

$$A = 2 \cdot 10^5 \cdot (5 - 2) \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 600 \text{ Дж}.$$

Напомним, что $1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$. Значит, $\Delta U = 900 - 600 \text{ (Дж)} = 300 \text{ Дж}$, т. е. внутренняя энергия газа увеличилась на 300 Дж.

Правильный ответ 1).

A28. При изотермическом процессе температура газа не меняется, значит, согласно формуле 115

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT,$$

и внутренняя энергия данной массы газа остается постоянной.

Правильный ответ 2).

A29. Согласно формуле КПД 128)

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

при одинаковой температуре нагревателя T_1 , чем ниже температура холодильника T_2 , т. е. температура окружающей среды, тем больше числитель в формуле КПД и тем больше сам КПД двигателя. Наиболее низкая температура среды зимой, значит, и КПД максимален зимой.

Правильный ответ 3).

A30. Найдем температуру нагревателя T_1 из формулы КПД идеального теплового двигателя 128):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{T_1}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Отсюда

$$T_1 = \frac{T_2}{1 - \eta}.$$

Вычислим T_1 . При этом учтем, что $60\% = 0,6$ и $27^\circ\text{C} = (27 + 273)\text{K} = 300\text{K}$.

Тогда получим:

$$T_1 = \frac{300}{1 - 0,6}\text{K} = 750\text{K}.$$

Правильный ответ 2).