

Термодинамика – это раздел физики, изучающий тепловые свойства макроскопических тел и систем тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, на основе закона сохранения энергии, без учета внутреннего строения тел, составляющих систему.

Внутренняя энергия

Внутренняя энергия – это сумма кинетической энергии теплового движения частиц тела и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом. Обозначение – U , единица измерения – Джоуль (Дж).

Внутренняя энергия тел зависит от температуры, массы и агрегатного состояния. С ростом температуры внутренняя энергия увеличивается. Наибольшая внутренняя энергия у вещества в газообразном состоянии, наименьшая – в твердом.

Важно! В модели идеального газа пренебрегают взаимным притяжением и отталкиванием молекул. Поэтому *внутренняя энергия идеального газа представляет собой только кинетическую энергию теплового движения его частиц; потенциальная энергия взаимодействия частиц равна нулю.*

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его температуре, а от объема не зависит (молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом)

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

Коэффициент i - число степеней свободы молекулы. Число степеней свободы равно числу возможных движений частицы.

Если газ одноатомный, то $i = 3$.

Если газ двухатомный, то $i = 5$.

Если газ трех атомный или состоит из большего числа атомов, то $i = 6$.

На практике, больший интерес вызывает не само значение внутренней энергии в каком-либо состоянии термодинамической системы, а ее изменение. В любом процессе при постоянной массе газа

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

Важно! Внимательно следите за условием задачи. Чаще всего в задачах, изменение внутренней энергии происходит за счет изменения температуры. Но встречаются задачи в которых внутренняя энергия изменяется за счет изменения температуры и массы газа.

Некоторые полезные соотношения:

1. В произвольном процессе, выражение νRT , согласно уравнению Менделеева-Клапейрона, можно заменить на pV

$$pV = \nu RT.$$

2. При нахождении изменения внутренней энергии в изобарном процессе $\nu R \Delta T = p \Delta V$.

3. При нахождении изменения внутренней энергии в изохорном процессе $\nu R \Delta T = \Delta p V$.

Важно! В изотермическом процессе $\Delta U = 0$ (внутренняя энергия не изменяется).

Работа газа в термодинамике

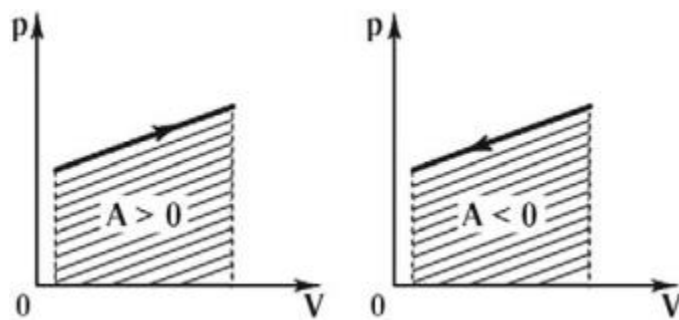
Если газ **расширяется**, то газ совершает работу ($A > 0$).

Если газ **сжимают**, то над ним совершают работу ($A < 0$).

Если **объем газа не изменяется**, то работа газа равна нулю ($A = 0$).

Работу газа можно вычислить:

1. В изобарном процессе - $A = p\Delta V$.
2. Как площадь фигуры под графиком зависимости давления от объема в координатных осях (p,V), ограниченная графиком, осью V и перпендикулярами, проведенными из точек начального и конечного значений объема.
3. Из первого закона термодинамики.



Важно! Работу газа за цикл можно вычислить как площадь цикла, заданного в координатных осях (p,V).

Количество теплоты

Тепловое равновесие – это состояние системы, при котором все ее макроскопические параметры остаются неизменными сколь угодно долго.

В состоянии теплового равновесия объем, давление могут быть различными в разных частях термодинамической системы, и только *температура во всех частях термодинамической системы, находящейся в состоянии теплового равновесия, является одинаковой*. Микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

Если привести в контакт два тела, имеющих разную температуру, то они будут стремиться к состоянию теплового равновесия. При этом энергия от более нагретого тела переходит к менее нагретому. **Теплопередача** – процесс изменения внутренней энергии тела без совершения работы. Существуют три вида *теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение (лучистый теплообмен)*.

Количество теплоты – это энергия, которую тело получает или отдает при теплопередаче. Обозначение – Q , единица измерения – Дж. Если тело получает некоторое количество теплоты, то $Q > 0$, если отдает, то $Q < 0$.

Расчет количества теплоты в тепловых процессах:

1. **Нагревание (охлаждение):** удельная теплоемкость – это величина, численно равная количеству теплоты, которое тело массой 1 кг получает или отдает при изменении его температуры на 1 К. Обозначение – c , в СИ единица измерения – Дж/(кг·К). Количество теплоты, необходимое для нагревания тела (выделяющееся при его охлаждении)

$$Q = \pm cm\Delta t.$$

Важно! При решении задач можно не переводить температуру в кельвины. Так как $1\text{K}=1^\circ\text{C}$, то $\Delta t = \Delta T$.

Важно! Удельная теплоемкость определяется не только свойствами вещества, но и тем, в каком процессе осуществляется теплопередача. Поэтому выделяют удельную теплоемкость газа при постоянном давлении – c_p и удельную теплоемкость газа при постоянном объеме – c_v . Для нагревания газа на 1 К при постоянном давлении требуется большее количество теплоты, чем при постоянном объеме – $c_p > c_v$.

2. **Плавление (кристаллизация, отвердевание):** удельная теплота плавления – это физическая величина, равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления в жидкость той же температуры. Обозначение – λ . Единица измерения в СИ – Дж/кг. Количество теплоты, необходимое для плавления тела, взятого при температуре плавления (выделяющееся при кристаллизации)

$$Q = \pm \lambda m.$$

Температура, при которой тело плавится называется температурой плавления. Температура, при которой тело затвердевает называется температурой кристаллизации. Температура кристаллизации равна температуре плавления.

Важно! При плавлении (кристаллизации) кристаллических тел их температура в течении всего процесса не меняется.

3. **Парообразование (конденсация):** удельная теплота парообразования вещества – это физическая величина, равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 кг жидкости при постоянной температуре в пар. Обозначение - L , единица измерения удельной теплоты парообразования в СИ – Дж/кг. Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости, нагретой до температуры кипения, в пар (выделяющееся при конденсации пара в жидкость)

$$Q = \pm Lm.$$

Парообразование – это процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное (в пар).

Испарение - парообразование, происходящее с поверхности жидкости. Жидкости испаряются при любой температуре. Скорость испарения жидкости зависит от: температуры, рода жидкости, площади поверхности и плотности паров над поверхностью жидкости. Так как поверхность жидкости покидают молекулы с наибольшей скоростью (соответственно и кинетической энергией), то в результате испарения температура жидкости уменьшается.

Конденсация – это процесс, обратный процессу испарения. При конденсации молекулы пара возвращаются в жидкость.

Кипением - процесс интенсивного парообразования, происходящий по всему объему жидкости.

В жидкости всегда имеются мельчайшие пузырьки пара. Пар внутри пузырька является насыщенным. При повышении температуры жидкости давление пара в пузырьке возрастает и его объем увеличивается. Под действием архимедовой силы пузырек всплывает на поверхность. Если давление насыщенного пара внутри пузырька равно внешнему давлению, то жидкость кипит.

Важно! Кипение жидкости начинается при такой температуре, при которой давление ее насыщенных паров становится равным внешнему давлению.

Температурой кипения называется температура жидкости, при которой давление ее насыщенного пара равно внешнему давлению. Температура кипения повышается с ростом внешнего давления и понижается при его уменьшении. При нормальном атмосферном давлении вода кипит при температуре 100 °С. Это значит, что при такой температуре давление насыщенных паров воды равно 1 атм или 10⁵ Па.

Важно! В герметически закрытом сосуде жидкость кипеть не может, т. к. при каждом значении температуры устанавливается равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром.

Уравнение теплового баланса

Теплоизолированная система тел - это система тел, которая не получает и не отдает энергию, а уменьшение или увеличение внутренней энергии тел системы происходит только вследствие теплопередачи между телами этой системы.

Если система тел является теплоизолированной, то ее внутренняя энергия не будет изменяться несмотря на изменения, происходящие внутри системы. Если $A = 0$, $Q = 0$, то и $\Delta U = 0$.

При любых процессах, происходящих в теплоизолированной системе, ее внутренняя энергия не изменяется (закон сохранения внутренней энергии).

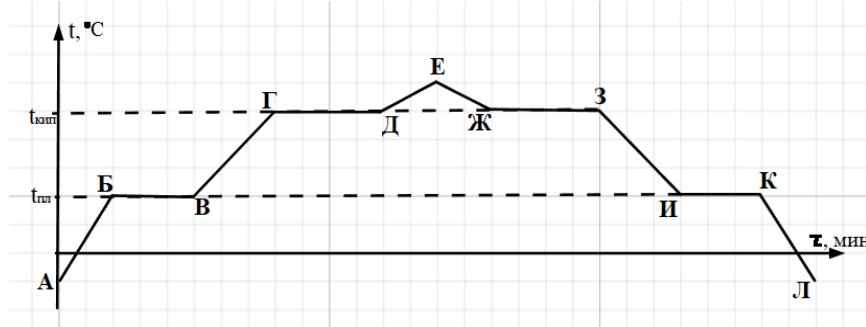
Последнее утверждение, в частности, означает что, если тела образуют замкнутую систему и между ними происходит только теплообмен, то алгебраическая сумма отданных и полученных количеств теплоты будет равна нулю:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0.$$

Это уравнение называется уравнение теплового баланса.

Графики тепловых процессов

Вещество первоначально находится в твердом состоянии.



АБ – нагревание твердого тела (t – увел., $Q > 0$, U – увел.)

ВВ – плавление (t – не изм., $Q > 0$, U – увел.)

ВГ – нагревание жидкости (t – увел., $Q > 0$, U – увел.)

ГД – кипение жидкости (t – не изм., $Q > 0$, U – увел.)

ДЕ – нагревание (газа) пара (t – увел., $Q > 0$, U – увел.)

ЕЖ – охлаждение (газа) пара (t – умен., $Q < 0$, U – умен.)

ЖЗ – конденсация пара (t – не изм., $Q < 0$, U – умен.)

ЗИ – охлаждение жидкости (t – умен., $Q < 0$, U – умен.)

ИК – кристаллизация (отвердевание) (t – не изм., $Q < 0$, U – умен.)

КЛ – охлаждение твердого тела (t – умен., $Q < 0$, U – умен.)

Первый закон термодинамики

Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, называется первым законом (началом) термодинамики. В зависимости от способа изменения внутренней энергии можно дать различные формулировки закона.

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе

$$\Delta U = A_{\text{вн}} + Q.$$

Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и совершение системой работы над внешними телами (совершением газом работы)

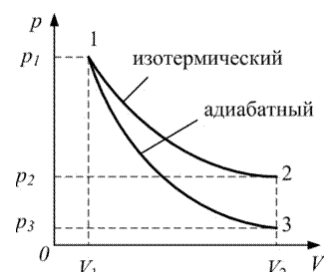
$$Q = \Delta U + A$$

Если система изолирована и над ней не совершается работа и нет теплообмена с внешними телами, то в этом случае внутренняя энергия не изменяется. Если к системе не поступает теплота, то работа системой может совершаться только за счет уменьшения внутренней энергии. Это значит, что невозможно создать вечный двигатель – устройство, способное совершать работу без каких-либо затрат топлива.

Адиабатный процесс – процесс, который происходит без теплопередачи ($Q = 0$).

$$\Delta U + A = 0 \Rightarrow A = -\Delta U.$$

При адиабатном процессе газ совершает работу за счет своей внутренней энергии (при этом газ охлаждается). Если над газом совершать работу, то его внутренняя энергия увеличивается (газ нагревается).



Первый закон термодинамики для изопроцессов

Процесс	Работа газа, изменение внутренней энергии	Первый закон термодинамики	Физический смысл
Изотермический	$T = const$ $\Delta U = 0$	$Q = A$	Все переданное газу тепло идет на совершение работы
Изобарный		$Q = \Delta U + A$	Подводимое к газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение газом работы
Изохорный	$V = const$ $A = 0$	$Q = \Delta U$	Внутренняя энергия газа увеличивается за счет подводимого тепла
Адиабатный	$Q = 0$	$\Delta U + A = 0$ $A = -\Delta U$	Внутренняя энергия газа уменьшается за счет совершения газом работы

Второй закон термодинамики

Первый закон термодинамики ничего не говорит о направлении процессов в природе. Второй закон термодинамики выражает необратимость процессов, происходящих в природе. Существует несколько его формулировок.

Второй закон термодинамики (формулировка Клаузиуса): невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии одновременных изменений в обеих системах или окружающих телах.

Второй закон термодинамики (формулировка Кельвина): невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой от одного источника.

Эта формулировка говорит также и о том, что невозможно построить вечный двигатель второго рода, то есть двигатель, совершающий работу за счет охлаждения какого-либо одного тела.

В формулировке второго закона термодинамики большое значение имеют слова «единственным результатом». Если процессы, о которых идет речь, не являются единственными, то запреты снимаются. Например, в холодильнике происходит передача тепла от более холодного тела к нагретому и при этом осуществляется компенсирующий процесс превращения механической энергии окружающих тел во внутреннюю энергию.

Второй закон термодинамики выполняется для систем с огромным числом частиц. В системах с малым количеством частиц возможны флуктуации – отклонения от равновесия.

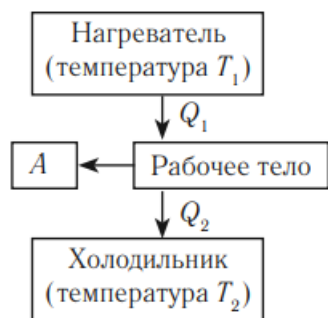
Тепловые двигатели

Тепловой двигатель - устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Основные части теплового двигателя:

1. Нагреватель - устройство, от которого рабочее тело получает энергию, часть которой идет на совершение работы.
2. Рабочее тело – газ или пар, который совершает работу при расширении.

3. Холодильник – тело, к которому поступает часть энергии, полученной тепловой машиной от нагревателя.



Любая тепловая машина получает от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1 (или Q_H). Часть от этого количества теплоты идет на совершение газом работы, она называется полезной (A_P). Часть передается холодильнику - Q_2 (или Q_X). Полезная работа может быть найдена как разность количества теплоты, полученного от нагревателя и количества теплоты, отданной холодильнику

$$A_P = Q_H - Q_X.$$

При работе, тепловой двигатель развивает некоторую мощность, поэтому полезную работу можно найти через мощность двигателя

$$A_P = N \cdot t.$$

В реальных тепловых машинах нагревателем является камера сгорания. В них рабочее тело нагревается за счет тепла, выделяющегося при сгорании топлива. Количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива, вычисляется по формуле

$$Q_H = qm,$$

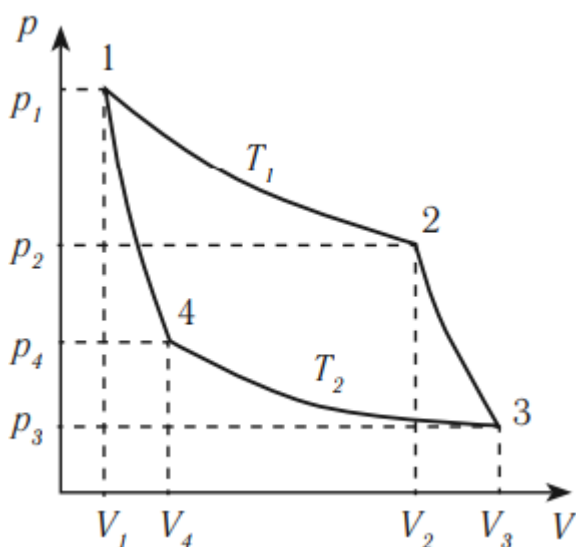
где q – удельная теплота сгорания топлива (показывает, какое количество теплоты выделяется при сгорании 1 кг топлива).

Холодильником чаще всего у реальных двигателей служит атмосфера.

КПД тепловой машины

Коэффициентом полезного действия (КПД) тепловой машины (двигателя) называется отношение полезной работы A_P , совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты Q_H , полученному за цикл от нагревателя

$$\eta = \frac{A_P}{Q_H} \cdot 100\% = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{Q_X}{Q_H}\right) \cdot 100\%$$



Идеальная тепловая машина – рабочим телом является идеальный газ. Идеальная тепловая машина с максимальным КПД была создана Карно. В машине осуществляется круговой процесс (*цикл Карно*), при котором после ряда преобразований система возвращается в начальное состояние.

Цикл Карно состоит из четырех стадий:

1. *Изотермическое расширение* (на рисунке — процесс 12). В начале процесса рабочее тело имеет температуру T_1 , то есть температуру нагревателя (T_H). Затем тело приводится в контакт с нагревателем, который изотермически (при постоянной температуре) передает ему количество теплоты Q_H . При этом объем рабочего тела увеличивается.

2. *Адиабатное расширение* (на рисунке — процесс 23). Рабочее тело отсоединяется от нагревателя и продолжает расширяться без теплообмена с окружающей средой. При этом его температура уменьшается до температуры холодильника T_X .

3. *Изотермическое сжатие* (на рисунке — процесс 34). Рабочее тело, имеющее к тому времени температуру T_x , приводится в контакт с холодильником и начинает изотермически сжиматься, отдавая холодильнику количество теплоты Q_H .

4. *Адиабатное сжатие* (на рисунке — процесс 41). Рабочее тело отсоединяется от холодильника. При этом его температура увеличивается до температуры нагревателя T_H .

КПД цикла Карно

КПД цикла Карно с идеальным газом зависит только от температуры нагревателя и холодильника

$$\eta = \frac{T_H - T_x}{T_H} \cdot 100\%$$

Формула даёт теоретический предел для **максимального значения КПД** тепловых двигателей.

Важно! Любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем, имеющим температуру T_1 , и холодильником с температурой T_2 , не может иметь КПД, превышающий КПД идеальной тепловой машины

Из формулы КПД следуют выводы:

1. для повышения КПД тепловой машины нужно увеличить температуру нагревателя и уменьшить температуру холодильника;
2. КПД тепловой машины всегда меньше 1 (меньше 100%).