

Тепло. Термодинамика

О втором разделе физики, занимающимся теплом - о Термодинамике.

Напомню:

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) и Термодинамика - это два разных, но тесно связанных раздела физики, занимающихся одним и тем же - изучением макроскопических свойств физических систем, но совершенно разными методами.

МКТ является *статистической теорией* - она рассматривает поведение систем, состоящих из огромного числа частиц (атомов, молекул), на основе вероятностных моделей.

Термодинамика при изучении свойств макроскопических систем не опирается ни на какие представления о молекулярной структуре вещества. Термодинамика делает выводы о свойствах вещества на основе законов, установленных на опыте, таких, как закон сохранения энергии. Термодинамика оперирует только с макроскопическими величинами (давление, температура, объем и т.п.), которые вводятся на основе физического эксперимента.

Оба подхода не противоречат, а дополняют друг друга. Только совместное использование термодинамики и молекулярно-кинетической теории может дать наиболее полное представление о свойствах систем, состоящих из большого числа частиц.

➔ Термодинамика

Термодинамической системой называют тело или совокупность тел, обменивающихся энергией между собой и с внешними телами. Если обмена энергией с внешними телами нет, то система является *изолированной*. Понятие изолированной системы - абстракция, все реальные системы можно считать изолированными лишь с той или иной степенью точности.

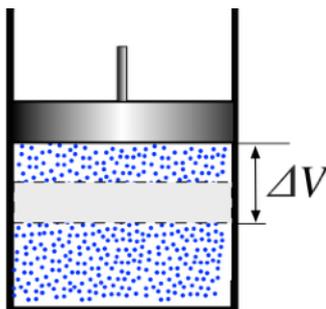
Термодинамика рассматривает *изолированные системы тел*, находящиеся в состоянии *термодинамического равновесия*. Это означает, что в таких системах прекратились все наблюдаемые макроскопические процессы. Важным свойством термодинамически равновесной системы является выравнивание температуры всех ее частей.

Если термодинамическая система была подвержена внешнему воздействию, то в конечном итоге она перейдет в другое равновесное состояние. Такой переход называется *термодинамическим процессом*. Если процесс протекает достаточно медленно (в пределе бесконечно медленно), то система в каждый момент времени оказывается близкой к равновесному состоянию.

Одним из важнейших понятий термодинамики является *внутренняя энергия тела*. Все макроскопические тела обладают энергией, заключенной внутри самих тел.

Зная принципы молекулярно-кинетической теории, можно сказать, что внутренняя энергия тела складывается из кинетической энергии теплового движения молекул (зависит от температуры T тела) и потенциальной энергии взаимодействия между ними (зависит от расстояния между ними, а следовательно, и от объема V).

Таким образом, **внутренняя энергия U тела однозначно определяется макроскопическими параметрами, характеризующими состояние тела**. Она не зависит от того, каким путем было реализовано данное состояние. Принято говорить, что **внутренняя энергия является функцией состояния**.



Рассмотрим газ в цилиндре под поршнем. Опустим поршень вниз, уменьшив объём газа на **небольшую** величину ΔV . Мы (внешние силы) совершили над газом работу ΔA , а силы давления, действующие со стороны газа на поршень, совершили работу $-\Delta A$. **При расширении работа, совершаемая газом, положительна, при сжатии - отрицательна.**

Посмотрим на диаграмму pV , описывающую этот процесс. При малом ΔV считаем p постоянным и можем записать, что $\Delta A = p \cdot \Delta V$. В общем случае при переходе из некоторого начального состояния (1) в конечное состояние (2) **работа газа** выражается формулой: $A = \sum p_i \cdot \Delta V_i$ или в пределе

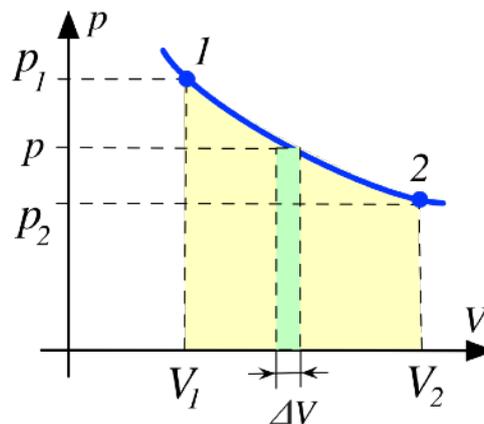
при $\Delta V_i \rightarrow 0$ $A = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$. Вы в школе проходите

интеграл, поэтому не надо падать в обморок при виде

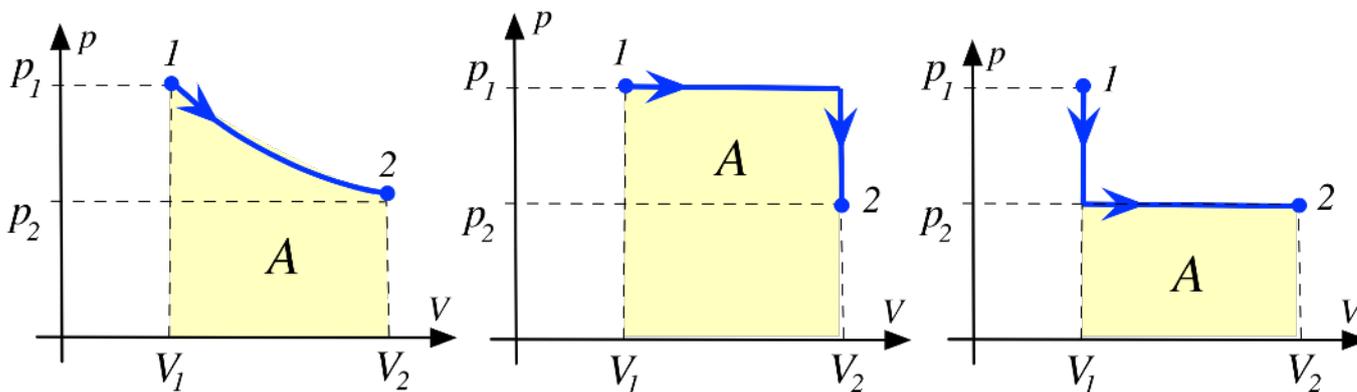
"страшного" знака \int . А этот интеграл численно равен площади под графиком pV .

Или:

Работа газа численно равна площади под графиком процесса на диаграмме pV .



На рисунке изображены три различных процесса, переводящих газ из состояния (1) в состояние (2). Во всех трех случаях газ совершает разную работу.



Процессы, изображенные на рисунке, можно провести и в обратном направлении, тогда работа A просто изменит знак на противоположный. Процессы такого рода, которые можно проводить в обоих направлениях, называются **обратимыми**.

В отличие от газа, жидкости и твердые тела мало изменяют свой объём, так что во многих случаях работой, совершаемой при расширении или сжатии, можно пренебречь. Однако, внутренняя энергия жидких и твердых тел также может изменяться в результате совершения работы. При механической обработке деталей (например, при сверлении) они

нагреваются. Это означает, что изменяется их внутренняя энергия. Если вы энергично потрете рука об руку, то вы почувствуете как нагрелись ваши ладони.



В этих двух примерах процессы не могут быть проведены в противоположном направлении. Такие процессы называются **необратимыми**.

Внутренняя энергия тела может изменяться не только в результате совершаемой работы, но и вследствие **теплообмена**. При тепловом контакте тел внутренняя энергия одного из них может увеличиваться, а другого - уменьшаться. В этом случае говорят о тепловом потоке от одного тела к другому. Количество теплоты Q , полученным телом, называют изменение внутренней энергии тела в результате теплообмена.

Передача энергии от одного тела другому в форме тепла может происходить только при наличии разности температур между ними. **Тепловой поток всегда направлен от горячего тела к холодному**. Количество теплоты Q является энергетической величиной. В СИ количество теплоты измеряется в единицах механической работы - джоулях (Дж).

➔ Законы (начала) термодинамики

Четыре закона термодинамики традиционно называют "Началами". Будем и мы придерживаться этой традиции.

Нулевое начало термодинамики (общее начало термодинамики) - физический принцип, утверждающий, что вне зависимости от начального состояния системы в конце концов в ней при фиксированных внешних условиях установится **термодинамическое равновесие**, а также что все части системы при достижении термодинамического равновесия будут иметь **одинаковую температуру**.

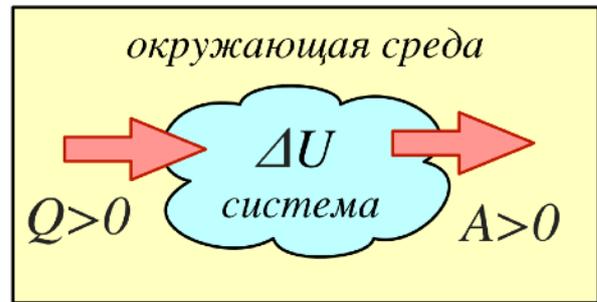
Интуитивно здесь всё понятно. Настолько, что в школьном курсе физики о нулевом начале термодинамики даже не упоминают. А зря. Этот принцип утверждает, что после внешнего воздействия за достаточно долгое время (пусть даже очень долгое) любая термодинамическая система при отсутствии дальнейших внешних воздействий "успокоится" (в ней перестанут происходить *разнородные* термодинамические процессы), она придёт в равновесие и выравняет свою температуру во всех своих частях. Система станет **термодинамически симметричной**. Этот принцип сформулирован на основе многочисленных экспериментальных данных.

■ Первое начало термодинамики

На рисунке условно изображены энергетические потоки между выделенной термодинамической системой и окружающей средой.

Величина теплового потока $Q > 0$, если тепло от окружающей среды передается системе. И $Q < 0$, если наоборот. Величина работы $A > 0$, если система совершает работу над окружающими телами. И $A < 0$, если наоборот.

Если система обменивается теплом с окружающей средой и совершает работу (положительную или отрицательную), то изменяется состояние системы, т. е. изменяются ее макро-параметры (температура, давление, объем). Так как внутренняя энергия U однозначно определяется макро-параметрами, то процессы теплообмена и совершения работы сопровождаются изменением ΔU внутренней энергии системы.



Первое начало термодинамики: Изменение ΔU внутренней энергии неизолированной термодинамической системы равно разности между количеством теплоты Q , переданной системе, и работой A , совершенной системой над внешними телами: $\Delta U = Q - A$

Или иногда формулируют в другой эквивалентной форме: *Количество теплоты, полученное системой, идет на изменение ее внутренней энергии и совершение работы над внешними телами:* $Q = \Delta U + A$

- По сути первое начало термодинамики позволяет *энергетически описывать взаимодействие термодинамической системы с окружающей средой*: посчитали все работы, совершаемые системой/над системой, посчитали все тепловые потоки в систему/из системы - можно узнать изменение внутренней энергии системы. Или в другой комбинации.

Первое начало термодинамики является обобщением закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы и является обобщением опытных фактов. Согласно ему, энергия не может быть создана или уничтожена; она передается от одной системы к другой и превращается из одной формы в другую. Важным следствием первого начала термодинамики является утверждение о невозможности создания машины, способной совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри самой машины - вечного двигателя. Многочисленные попытки создать такую машину неизменно заканчивались провалом. Любая машина может совершать положительную работу A над внешними телами только за счет получения некоторого количества теплоты Q от окружающих тел или уменьшения ΔU своей внутренней энергии.



А у вдумчивого ученика возник вопрос: "Ну хорошо, система получила из окружающей среды тепло Q . А *в каком соотношении* это тепло пойдёт на увеличение внутренней энергии системы и на совершение ей работы?"

Общего ответа быть не может - всё зависит от конкретной системы и, обычно, нетермодинамических условий. Вот вам бытовой пример. Вы съели вкусное сладкое жирное пирожное калорийностью в 1000 калорий (бывают и такие). Здорово! По сути вы получили из внешней среды энергию $Q=1000$ кал. Как этой энергией распорядиться? Если вы пробежите 20 километров (совершите работу), то вы в среднем "сожжёте" 800 калорий. Остальные 200 калорий пойдут в жировые отложения (увеличение внутренней энергии). Можно покомбинировать цифрами. Так что вам решать: есть пирожное, бегать после этого или "и так хорошо".

■ Общие важные слова об энергии

В физике работой называется перемещение массы на определенное расстояние под воздействием силы. Для совершения работы тело, которое ее совершает, должно обладать запасом энергии, необходимым для совершения этой работы. То есть энергия - это способность совершить работу.

Энергия обладает тремя важнейшими свойствами:

- энергия может проявляться в различных формах;
- различные формы энергии могут переходить друг в друга;
- при любых физических процессах совокупная энергия в замкнутой системе сохраняется.

По большому счёту энергию можно разделить на три вида.

■ Энергия движения

Движущееся тело способно оказывать силовое воздействие на другие тела на отрезке своего пути. Следовательно, оно способно совершить работу, и значит, оно обладает энергией. Энергия движения такого рода называется кинетической энергией.

Согласно молекулярно-кинетической теории, *теплота - это проявление движения молекул вещества, и значит, ее можно считать особым видом кинетической энергии.*

■ Энергия положения

Материальное тело, находящееся в гравитационном поле (например, Земли), может совершить работу (если его отпустить). Говорят, что такое материальное тело обладает потенциальной энергией гравитационного поля, поскольку оно в нем находится. Именно гравитационное поле реально производит работу при падении тела. Точно так же электрически заряженная частица, помещенная в электрическое поле, обладает потенциальной энергией электрического поля. Имеется множество видов потенциальной энергии, связанных с магнитными и электрическими полями, с различными свойствами веществ. *Потенциальная энергия присутствует в любой системе, где может быть совершена работа, которая до сих пор не совершена.*

■ Энергия массы

В рамках теории относительности Эйнштейн открыл совершенно неожиданную для всех форму энергии, описываемую знаменитой формулой $E = m \cdot c^2$ Материальное тело обладает такой формой энергии просто потому, что оно имеет массу.

■ Превращение и сохранение энергии

Различные формы энергии взаимозаменяемы - энергия может переходить из одной формы в другую. Все формы энергии, за исключением тепловой, могут полностью преобразовываться друг в друга (тепловая энергия, согласно *второму началу термодинамики*, может преобразовываться в работу лишь частично).

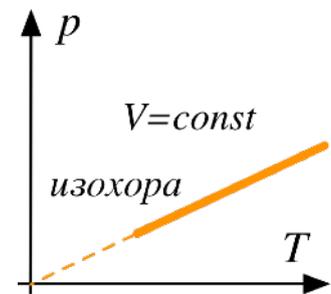
Преобразование одной формы энергии в другую носит отнюдь не случайный характер, поскольку в замкнутых системах выполняется закон сохранения энергии. Это значит, что в замкнутой изолированной системе совокупное количество энергии со временем не меняется, хотя энергия может принимать различную форму. Принимая различные формы и перераспределяясь, энергия ниоткуда не поступает и никуда не исчезает. В этом и заключается закон сохранения энергии, который гласит: полная энергия замкнутой системы остается постоянной.

=====

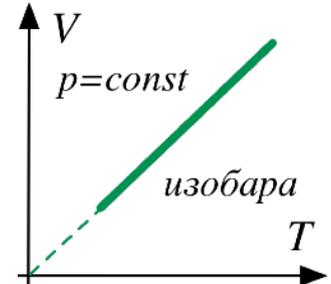
! Для *одноатомного идеального* газа внутренняя энергия определяется как $U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT$

Применим первое начало термодинамики к *изопроцессам* в газах.

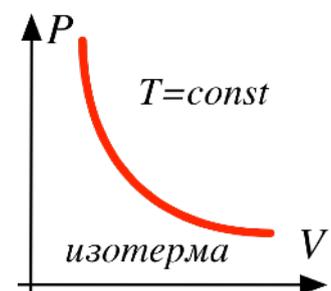
→ При **изохорическом процессе** ($V = const$) объём газа не изменяется, поэтому газ работы не совершает (и над газом работа не совершается): $A = 0$. Поэтому $Q = \Delta U$: при изохорическом нагревании тепло поглощается газом ($Q > 0$), и его внутренняя энергия увеличивается; при изохорическом охлаждении тепло отдается внешним телам ($Q < 0$).



→ При **изобарическом процессе** ($p = const$) работа, совершаемая газом (над газом) выражается так: $A = p \cdot \Delta V$ и первое начало термодинамики дает: $Q = \Delta U + p \cdot \Delta V$: при изобарическом расширении $Q > 0$ - тепло поглощается газом, и газ совершает положительную работу. При изобарическом сжатии $Q < 0$ - тепло отдается внешним телам. В этом случае $A < 0$. Температура газа при изобарическом сжатии уменьшается; внутренняя энергия убывает, $\Delta U < 0$.

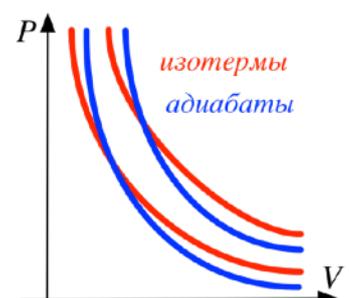


→ При **изотермическом процессе** ($T = const$) температура газа не меняется, следовательно не меняется и внутренняя энергия газа: $\Delta U = 0$. Тогда $Q = A$. Количество теплоты Q , полученное газом в процессе изотермического расширения, превращается в работу над внешними телами. При изотермическом сжатии работа внешних сил, произведенная над газом, превращается в тепло, которое передается окружающим телам.



Рассматривая первое начало термодинамики, надо сказать ещё об одном *изопроцессе*.

→ **Адиабатический процесс** - это такое изменение состояния газа, при котором отсутствует теплообмен газа с окружающей средой ($Q = 0$). Адиабатический процесс происходит в сосудах с теплонепроницаемыми стенками. Адиабатическими можно считать *быстро протекающие процессы*.



Уравнение адиабатического процесса в координатах pV имеет вид: $p \cdot V^\gamma = const$ (уравнение Пуассона), где γ - показатель адиабаты (для любого одноатомного газа $\gamma = 1,67$, для любого двухатомного газа $\gamma = 1,4$). Для адиабатического процесса ($Q = 0$) первое начало термодинамики имеет вид: $A = -\Delta U$.

При *адиабатическом процессе* газ совершает работу только за счет убыли своей внутренней энергии.

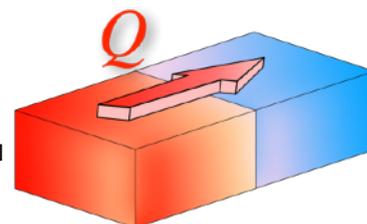
■ Теплообмен



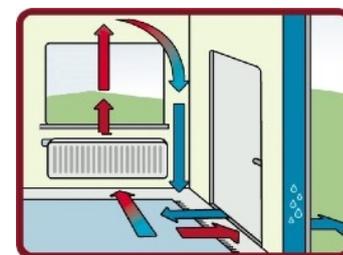
В природе существуют три способа теплообмена:

- теплопроводность
- конвекция
- излучение

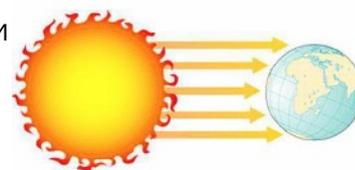
Теплопроводность - это процесс переноса внутренней энергии от более нагретых частей тела (или тел) к менее нагретым частям (или телам), осуществляемый хаотически движущимися частицами тела (атомами, молекулами, электронами и т.п.). Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур, но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества. Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет температуру тела, передаётся другому телу при их взаимодействии или передаётся из более нагретых областей тела к менее нагретым областям. Но сами атомы и молекулы остаются на месте - переноса вещества не происходит.



Конвекция - вид теплообмена, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками. Существует так называемая **естественная конвекция**, которая возникает в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения. При такой конвекции нижние слои вещества нагреваются, становятся легче и всплывают, а верхние слои, наоборот, остывают, становятся тяжелее и опускаются вниз, после чего процесс повторяется снова и снова. Конвекция, по сути, представляет собой теплообмен посредством переноса вещества. Накопив теплоту в одном месте, вещество-носитель переносит его в более холодное и там отдает окружающей среде. В этом коренное отличие конвекции от теплопроводности.



Излучение. В отличие от двух предыдущих видов теплообмена при лучевом переносе тепла вещество - будь оно в твердом, жидком или газообразном состоянии - не задействовано вовсе. В этом случае теплообмен осуществляется в силу того, что любая материя, имеющая температуру выше абсолютного нуля, излучает энергию в окружающую среду.

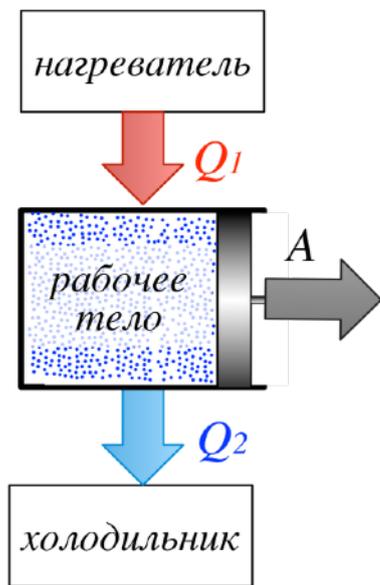


Относительно холодные тела излучают в инфракрасном диапазоне волн, и мы их излучения не видим, а только осязаем, как тепловое. Самые горячие тела испускают также невидимое излучение в микроволновом диапазоне. Самый яркий пример теплообмена излучением - Солнце, отделенное от Земли миллионами километров безвоздушного пространства.

→ Тепловой двигатель

Тепловым двигателем называют систему, которая преобразует теплоту, поступающую от внешнего источника, в механическую работу.

Мы знаем, что совершение над телом работы есть один из способов изменения его внутренней энергии: совершённая работа как бы растворяется в теле, переходя в энергию беспорядочного движения и взаимодействия его частиц. Тепловой двигатель - это устройство, которое, наоборот, извлекает полезную работу из «хаотической» внутренней энергии тела. Изобретение теплового двигателя радикально изменило облик человеческой цивилизации.



Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке. **Рабочее тело** двигателя - это газ (пары бензина, воздух, водяной пар). Он расширяется, двигает поршень и совершает тем самым полезную механическую работу.

Но чтобы заставить газ расширяться, преодолевая внешние силы, нужно нагреть его до температуры, которая существенно выше температуры окружающей среды. Для этого газ приводится в контакт с **нагревателем** - сгорающим топливом. В процессе сгорания топлива выделяется значительная энергия, часть которой идёт на нагревание газа. Газ получает от нагревателя количество теплоты Q_1 . Именно за счёт этого тепла двигатель совершает полезную работу A .

Разберитесь с этим!

Это всё понятно. Что такое **холодильник** (под холодильником здесь понимается **не бытовой холодильник на кухне**) и зачем он нужен?

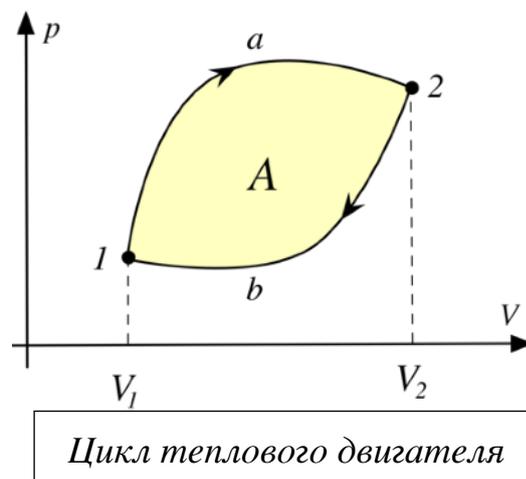
При однократном расширении газа мы можем использовать поступающее тепло максимально эффективно и целиком превратить его в работу. Для этого надо расширять газ **изотермически**: первый закон термодинамики, как мы знаем, даёт нам в этом случае $A = Q_1$.

! Но однократное расширение никому не нужно. Двигатель должен работать **циклически**, обеспечивая периодическую повторяемость движений поршня. **Следовательно, по окончании расширения газ нужно сжимать, возвращая его в исходное состояние.**

! В процессе расширения газ совершает некоторую положительную работу A_1 . В процессе сжатия над газом совершается положительная работа A_2 (а сам газ совершает отрицательную работу $-A_2$). В итоге полезная работа газа за цикл: $A = A_1 - A_2$. Разумеется, должно быть $A > 0$, или $A_1 > A_2$ (**иначе никакого смысла в двигателе нет**). Сжимая газ, мы должны совершить меньшую работу, чем совершил газ при расширении.

Как этого достичь? Ответ: **сжимать газ под меньшими давлениями, чем были в ходе расширения**. Иными словами, на pV -диаграмме процесс сжатия должен идти **ниже** процесса расширения, т. е. цикл должен проходиться **по часовой стрелке**.

Например, в цикле на рисунке работа газа при расширении равна площади криволинейной трапеции $V_1 1a2V_2$. Аналогично, работа газа при сжатии равна площади криволинейной трапеции $V_1 1b2V_2$ со знаком минус. В результате работа A газа за цикл оказывается положительной и равной площади цикла $1a2b1$.



Хорошо, но как заставить газ возвращаться в исходное состояние по более низкой кривой, т. е. через состояния с меньшими давлениями? Вспомним, что при данном объёме давление газа тем меньше, чем ниже температура. Стало быть, при сжатии газ должен проходить состояния с меньшими температурами.

Вот именно для этого и нужен **холодильник**: чтобы охлаждать газ в процессе сжатия. Холодильником может служить атмосфера (для двигателей внутреннего сгорания) или охлаждающая проточная вода (для паровых турбин). При охлаждении газ отдаёт холодильнику некоторое количество теплоты Q_2 . Суммарное количество теплоты, полученное газом за цикл, оказывается равным $Q_1 - Q_2$. Согласно первому началу термодинамики: $Q_1 - Q_2 = A + \Delta U$, где ΔU - изменение внутренней энергии газа за цикл. Оно равно нулю: $\Delta U = 0$, так как газ вернулся в исходное состояние (а внутренняя энергия, как мы помним, является функцией состояния). В итоге работа газа за цикл получается равна: $A = Q_1 - Q_2$ [1]

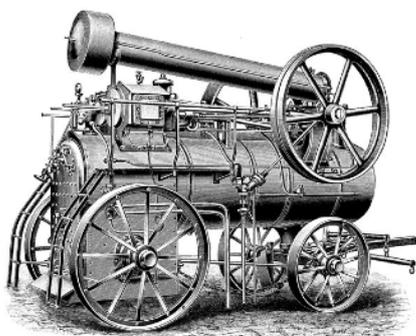
Как видите, $A < Q_1$: не удаётся полностью превратить в работу поступающее от нагревателя тепло. Часть теплоты приходится отдавать холодильнику - для обеспечения цикличности процесса.

Показателем эффективности превращения энергии сгорающего топлива в механическую работу служит **коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя**.

КПД теплового двигателя - это отношение механической работы A к количеству теплоты Q_1 , поступившему от нагревателя (как всегда КПД считается как отношение

Работа Полезная к Работе Затраченной): $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ (с учётом [1]) [2]

КПД теплового двигателя, как видим, всегда меньше единицы. Например, КПД паровых турбин приблизительно 25%, а КПД двигателей внутреннего сгорания около 40%.



паровая машина

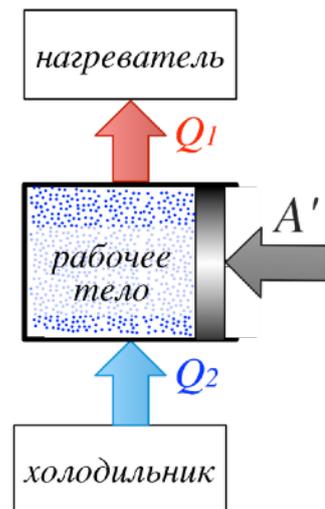


двигатель внутреннего сгорания

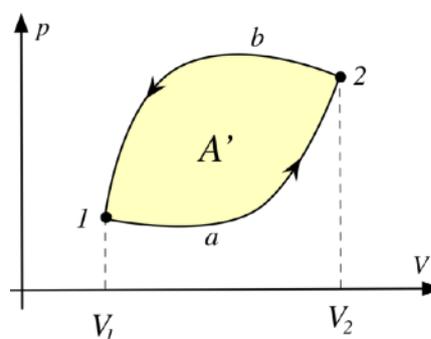
А как же работает обыкновенный холодильник на кухне? Вроде есть в нем электродвигатель, работающий от сети, есть охлаждаемые камеры.



Холодильные машины, используя внешний источник энергии, осуществляют процесс передачи тепла от холодного тела к горячему. По сравнению с тепловым двигателем процессы в холодильной машине имеют противоположное направление. **Рабочее тело** холодильной машины называют также **хладагентом** (газ, который поглощает теплоту при расширении и отдаёт при сжатии, например - фреон).



Холодильник в холодильной машине - это тело, от которого отводится теплота (морозильная камера). Холодильник передаёт рабочему телу (газу) количество теплоты Q_2 , в результате чего газ расширяется. В ходе сжатия газ отдаёт теплоту Q_1 более нагретому телу **нагревателю** (окружающему воздуху). Чтобы такая теплопередача осуществлялась, надо сжимать газ при более высоких температурах, чем были при расширении. Это возможно лишь за счёт работы A' , совершаемой внешним источником (например, электродвигателем). Температура воздуха в кухне растёт.



Вопрос для вдумчивых: что произойдет с температурой в кухне, если надолго открыть дверцу работающего холодильника?

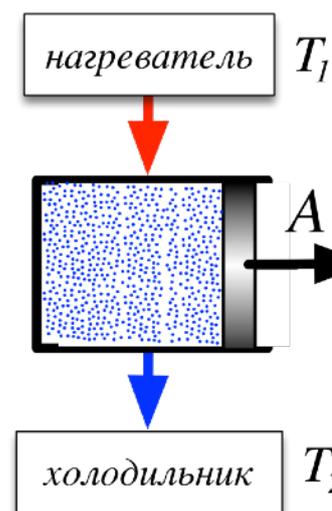


"Ага, при этом **холодильник** (морозильная камера) и **нагреватель** (окружающий воздух) станут единым целым и никакого охлаждения не будет. Но двигатель-то работает и выделяет тепло (теплопотери в электрических цепях). Значит температура в кухне будет продолжать расти."

Молодец, вдумчивый ученик.

Цикл Карно

Ну, вроде бы всё понятно с принципом работы. Но возникает вопрос: коль можно придумать много различных циклов работы теплового двигателя, то какие из этих циклов будут оптимальными с точки зрения КПД? На этот вопрос отвечает теорема Карно.



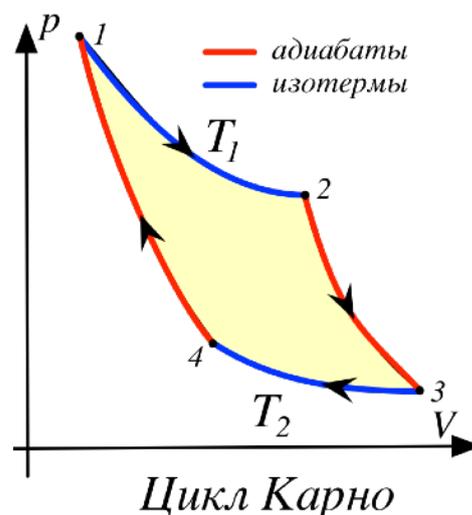
Французский физик и инженер **Сади Карно** в 1824 году придумал идеальный двигатель (двигатель Карно) и доказал, что **ни один тепловой двигатель, работающий по замкнутому циклу при двух заданных температурах, не может быть эффективнее идеального двигателя Карно (теорема Карно)**.

Идеальных машин в реальной жизни не существует, это всего лишь теоретическая модель. Рабочую часть двигателя Карно можно представить себе в виде поршня в заполненном газом цилиндре. Поскольку двигатель Карно - машина идеальная, то силы трения между поршнем и цилиндром и тепловые потери считаются равными нулю. Поршень может свободно перемещаться между двумя тепловыми резервуарами - с высокой температурой (нагреватель) и с низкой температурой (холодильник). (Для

удобства представим, что нагреватель нагревается посредством сжигания смеси бензина с воздухом, а холодильник - остужается водой или воздухом комнатной температуры.)

В этой тепловой машине происходит следующий идеальный четырехфазный цикл (цикл Карно):

1. **Изотермическое расширение** (изотерма 1-2 при температуре нагревателя T_1). Рабочее тело (идеальный газ) имеет температуру нагревателя T_1 . Рабочее тело вступает в контакт с нагревателем, который изотермически (при постоянной температуре) передает ему количество теплоты Q , идущее на расширение рабочего тела и совершение им механической работы.
2. **Адиабатическое расширение** (адиабата 2-3). Рабочее тело отсоединяется от нагревателя, окружается идеальной теплоизоляцией, за счет чего количество тепла, имеющееся у рабочего тела, сохраняется, и оно продолжает расширяться, совершая механическую работу, пока его температура не упадет до температуры холодильника T_2 .
3. **Изотермическое сжатие** (изотерма 3-4 при температуре холодильника T_2). Теплоизоляция снимается, и рабочее тело сжимается, отдавая при этом часть тепла холодильнику.
4. **Адиабатическое сжатие** (адиабата 4-1). Рабочее тело отсоединяется от холодильника. Когда сжатие достигает определенной точки, рабочее тело снова окружается теплоизоляцией, и оно сжимается за счет поднятия поршня до тех пор, пока его температура не сравняется с температурой горячего резервуара. Над рабочим телом совершается работа. После этого теплоизоляция удаляется и цикл повторяется вновь с первой фазы.



Так вот, Карно показал, что КПД такой идеальной машины равен $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.



КПД цикла Карно зависит только от температуры нагревателя и холодильника. КПД цикла Карно не зависит от вида рабочего тела (газа).

Карно показал также, что максимальный КПД любой тепловой машины не может превосходить КПД тепловой машины Карно, работающей при тех же температурах нагревателя и холодильника. КПД тепловой машины Карно даёт верхний предел КПД любой тепловой машины и позволяет оценить отклонение реального КПД от максимального, то есть потери энергии вследствие неидеальности тепловых процессов.

В **реальных тепловых двигателях** нельзя создать условия, при которых их рабочий цикл был бы циклом Карно. Так как процессы в них происходят быстрее, чем это необходимо для изотермического процесса, и в то же время они не настолько быстрые, чтоб быть адиабатическими.

→ Второе начало термодинамики

Возьмем из холодильника несколько кубиков льда и положим их на стол. По прошествии некоторого времени кубики льда растают, потому что теплота от более теплого тела (воздуха) передастся более холодному (кубикам льда). *С точки зрения закона сохранения энергии, нет причин для того, чтобы тепловая энергия передавалась именно в таком направлении:* даже если бы лед становился всё холоднее, а воздух всё теплее, закон сохранения энергии всё равно бы выполнялся. Тот факт, что этого не происходит, как раз и свидетельствует о *направленности физических процессов*.



Природным процессам свойственна *направленность и необратимость*, однако в большинстве законов это не находит отражения. Разбить яйца и сделать яичницу не сложно, воссоздать же сырые яйца из готовой яичницы - невозможно. Запах из открытого флакона духов наполняет комнату - однако обратно во флакон его не соберешь. И причина такой необратимости процессов, происходящих во Вселенной, кроется во *Втором начале термодинамики*.

У Второго начала термодинамики есть несколько *эквивалентных формулировок*, данных физиками в разное время.

1-я формулировка: Невозможна *самопроизвольная* передача теплоты от холодного тела к тёплому.

Пример с кубиками и льда как раз и иллюстрирует эту формулировку. Сколько бы раз мы ни вынимали кубики льда из холодильника - столько бы раз он таял от соприкосновения с тёплым воздухом. "Ну," - скажете вы, "а если я возьму да и засуну эти кубики обратно в холодильник?" Конечно, кубики замерзнут, но это уже не будет *САМОПРОИЗВОЛЬНАЯ* передача теплоты. Холодильник совершит работу по отъёму у них тепла.

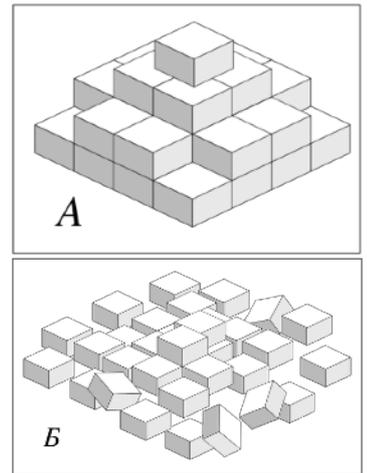
2-я формулировка: Никакой двигатель не может преобразовывать теплоту в работу с КПД в 100%.

Уже в работах Карно с его идеальным тепловым двигателем (еще до формулировок Второго начала термодинамики) показано, что 100%-ный КПД недостижим.

Перевести *работу в теплоту* можно со 100%-ной эффективностью. Например, когда вы нажимаете на педаль тормоза в автомобиле: вся кинетическая энергия движения автомобиля плюс затраченная вами энергия силы нажатия на педаль через работу вашей ноги и гидравлической системы тормозов полностью превращается в теплоту, выделяющуюся в процессе трения колодок о тормозные диски. Но вот обратный процесс невозможен, говорит Второе начало термодинамики: сколько ни пытайтесь всю тепловую энергию превратить в работу - тепловые потери в окружающую среду неизбежны и силы трения "сожрут" часть полезной энергии. *Любая форма энергии может полностью перейти в теплоту, но теплота преобразуется в другие формы энергии лишь частично.*

Ну и перед тем, как привести третью формулировку Второго начала термодинамики, чисто качественно введем важное понятие - **энтропия**. В институтских курсах вам дадут точное математическое определение и научат формулам. А пока давайте объяснимся "на пальцах".

Вот на рисунке А - аккуратно сложенная башенка из кубиков. Мы затратили какую-то работу на её построение. А вот на рисунке Б то же количество кубиков валяется в беспорядке - то ли ветер дунул, то ли мы неаккуратно задели нашу башенку - не важно. Вопрос: в каком из случаев упорядоченность системы выше? Ну очевидно же, что в случае А, чего спрашивать-то! Ага, а в каком из этих случаев **выше неупорядоченность системы**? В случае Б неупорядоченность выше.



Так вот, под **энтропией понимают меру неупорядоченности (беспорядка, хаоса) системы**. У этой меры есть вполне чёткое математическое выражение.

3-я формулировка: В замкнутых системах энтропия не может уменьшаться.

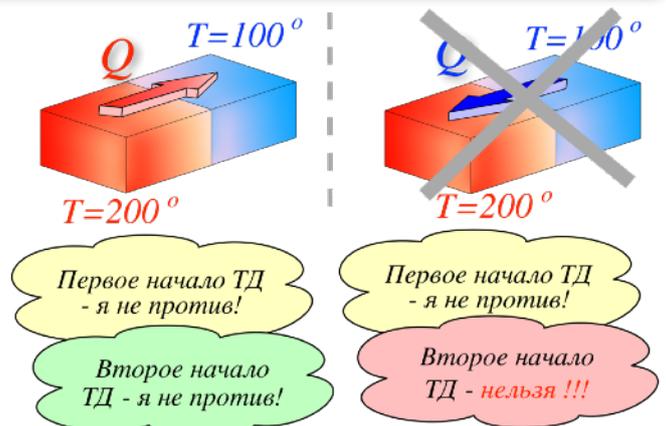
Под **замкнутыми**, как и всегда, понимаются системы без внешней энергетической подпитки и энергетических потерь. То есть **в замкнутых системах, беспорядок (хаос) либо возрастает, либо остаётся прежним**.

Представьте, вы сидите в своей комнате. На полу, на диване разбросаны ваши книжки, вещи. Убираться неохота, зато есть куча самых разнородных желаний: пойти туда, сюда, поваляться, поработать, и т.д. Каковы эти желания - неважно, главное, что они не связаны с уборкой и не связаны друг с другом. Чтобы снизить энтропию (навести порядок в комнате), нужно подвергнуть систему внешнему воздействию и совершить над ней работу. Например, согласно Второму началу термодинамики, энтропия в комнате будет непрерывно возрастать, пока не зайдёт мама и не попросит вас слегка прибраться. Необходимость совершить работу означает также, что любая система будет сопротивляться уменьшению энтропии и наведению порядка (ну, вы понимаете).



Из всех допускаемых Первым началом процессов (то есть процессов, не противоречащих закону сохранения энергии) Второе начало позволяет выделить фактически возможные процессы, установить **направление** их протекания, найти предельное (наибольшее или наименьшее) значение энергии, которое может быть полезным образом использовано (получено или затрачено) в термодинамическом процессе.

Второе начало термодинамики, также как и первое, является обобщением человеческого опыта, результатом многочисленных наблюдений и экспериментов. Скажу более, некоторые физики считают, что Второе начало термодинамики напрямую связано с необратимостью времени.



→ Третье начало термодинамики

Напомню: когда мы начинали рассматривать идеальный газ в рамках молекулярно-кинетической теории и заговорили о температуре, мы ввели понятие **абсолютного нуля** и шкалы Кельвина (температура абсолютного нуля по шкале Кельвина равна 0°K , а по шкале Цельсия равна $-273,15^{\circ}\text{C}$). Мы сказали, что температурой абсолютного нуля является такая температура, при которой молекулы любого охлаждённого тела перестают совершать тепловые движения и замирают. (*Честно говоря, с точки зрения квантовой физики это не совсем так, но у них там всё "не совсем так".*)

Так вот, **Третье начало термодинамики утверждает:**

Невозможно за конечное время довести температуру тела до абсолютного нуля.

Третье начало термодинамики просто констатирует, что **абсолютный нуль недостижим** - и в этом он похож на скорость света: материальное тело может сколь угодно близко подойти к нему, но достичь - никогда. Дело в том, что чем ближе система подходит к абсолютному нулю температуры, тем больше работы нужно затратить на ее дальнейшее охлаждение. В лабораторных условиях ученым удавалось получать температуры предельно близкие к нулевой.



Все три (или четыре, с учетом нулевого) начала термодинамики являются обобщением человеческого опыта. Они образуют систему аксиом термодинамики.

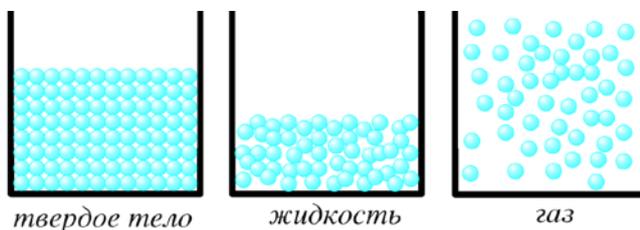


➔ Агрегатные состояния вещества

В зависимости от условий одно и то же вещество может находиться в различных **агрегатных состояниях (фазах)**: в твёрдом, в жидком и в газообразном. В природе есть и четвёртое агрегатное состояние - плазма, но в школьном курсе физики оно не рассматривается.

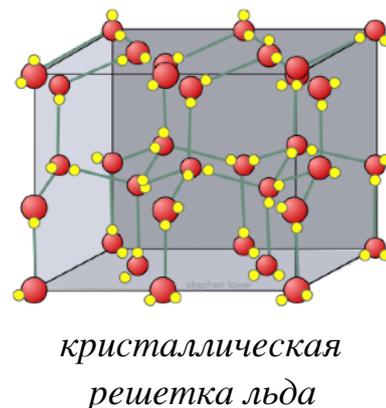
Молекулярные силы в разных агрегатных состояниях различны: в твёрдом состоянии они наибольшие, в газообразном - наименьшие. Различием молекулярных сил объясняются свойства, которые проявляются в разных агрегатных состояниях:

- твёрдые тела сохраняют объём и форму, характеризуются плотной молекулярной упаковкой. Молекулы твёрдых тел при тепловом движении колеблются около положения своего равновесия. По своей молекулярной структуре твёрдые тела разделяются на *кристаллические* и *аморфные*;
- жидкости текучи, практически не сжимаются (сохраняют объём), принимают форму сосуда;
- газы легко сжимаются, полностью занимают весь предоставленный им объём, имеют малую плотность.



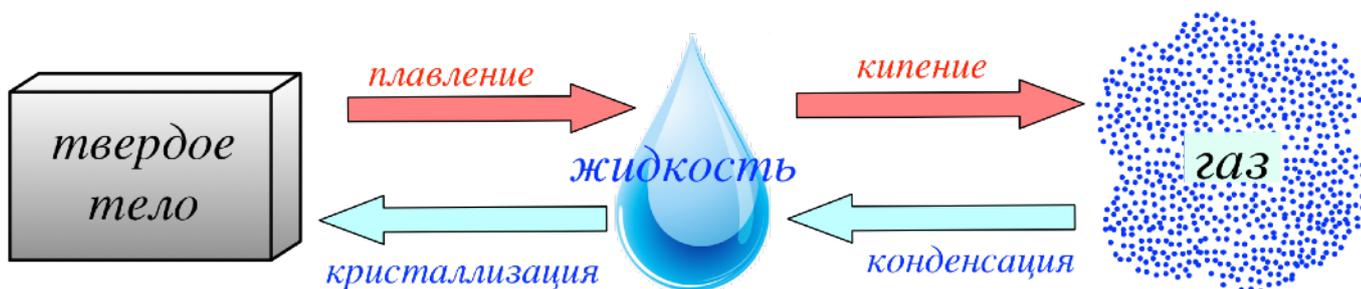
Кристаллические твёрдые тела имеют в своей молекулярной структуре кристаллическую решетку - регулярную пространственную сетку, в узлах которой расположены молекулы.

Аморфные тела - это твёрдые тела, которые не имеют кристаллической структуры. К ним относятся: стекло, смола, пластик и т.д. *В силу специфики поведения аморфных тел (непостоянство температуры плавления и пр.) они не рассматриваются в школьном курсе физики.*



■ Фазовые переходы

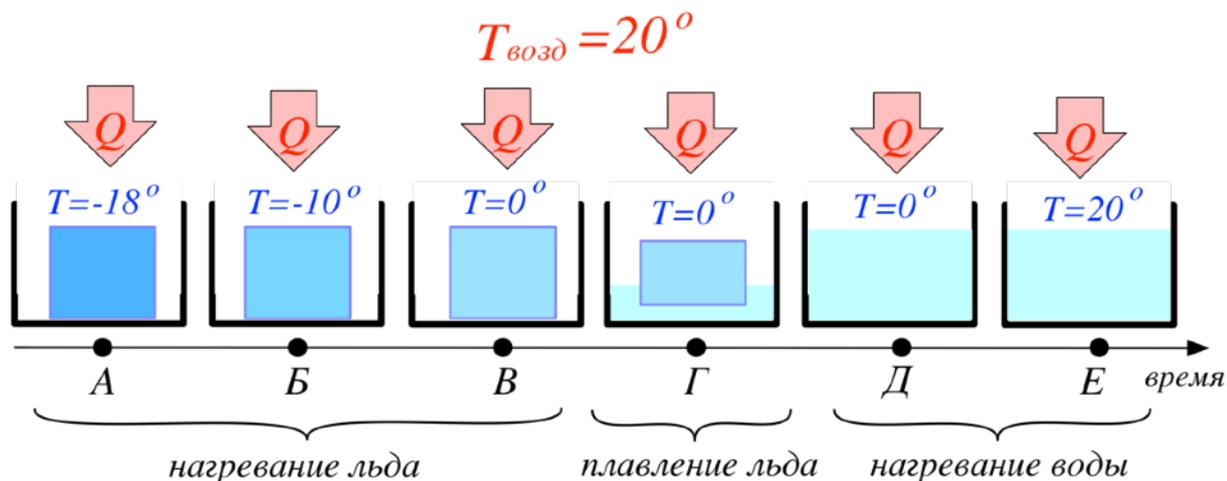
Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое под воздействием внешних воздействий называется **фазовым переходом**. Для осуществления фазового перехода тело должно обладать определенной температурой. При фазовом переходе свойства тела изменяются скачком.



В первой части нашей Истории о тепле - про молекулярно-кинетическую теорию газов - мы уже рассмотрели вопросы кипения и конденсации. Поговорим о них (а также о плавлении и кристаллизации) с точки зрения термодинамики.

■ Плавление, кристаллизация, теплообмен

Рассмотрим на качественном уровне такой пример: вынем из морозильника кубик льда и положим его в стакан на столе на кухне. Температура кубика льда -18°C , температура воздуха в кухне 20°C . Начнем наблюдать за кубиком и периодически измерять его температуру. Вот так результат наших наблюдений можно изобразить на рисунке.



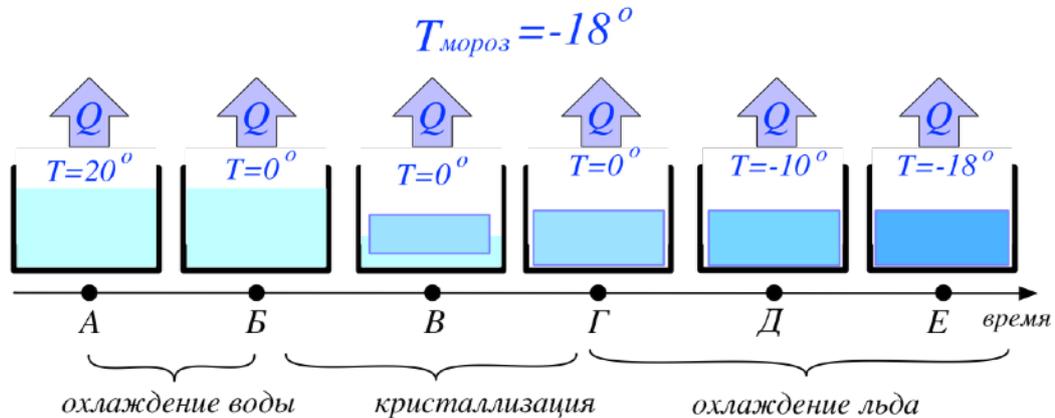
Рассмотрим подробнее все этапы нашего опыта.

- Точка А - начало наблюдений. Поскольку температура воздуха в кухне 20°C , а температура кубика льда -18°C , то начинается теплообмен между тёплым воздухом и холодным льдом (Второе начало термодинамики такое направление теплового процесса разрешает).
- Точка Б - через некоторое время (внешне кубик льда не изменился) мы измерили температуру кубика. Ага! Его температура стала -10°C , значит лёд нагревается, но льдом быть не перестает. Считаем, что температура воздуха в кухне осталась той-же - 20°C (даже если он немного охладился, отдав часть своего тепла на нагрев льда, то батареи на кухне вернули воздуху прежнюю температуру). Теплообмен между тёплым воздухом и льдом продолжается.
- Точка В - Кубик льда - по-прежнему кубик льда, хотя... Измеряем его температуру и обнаруживаем, что она - 0°C ! А это (мы прекрасно знаем) - температура плавления льда. Значит на интервале А-В лёд нагревался (но оставался льдом), достигнув в В точки плавления. Ещё чуть-чуть тепла от воздуха и лёд начнет таять (плавиться). И действительно, вот появилась под нашим кубиком первая лужица. Начался фазовый переход "лёд-вода".
- Точка Г - лёд тает-плавится. Время идет, тепло от воздуха поступает. В стакане уже вода и часть нашего кубика льда (но всё еще льда). Замеры показали, что температура льда и воды одинаковая - 0°C . Значит потребуется ещё тепла, чтобы расплавить весь лёд.
- Точка Д - ура, весь лёд растаял! Закончился фазовый переход "лёд-вода". В стакане - только вода. Её температура - всё те же 0°C . Заметьте, пока весь лёд не расплавился, температура получившейся воды держалась на одном уровне - 0°C . То есть *всё тепло, поступавшее от тёплого воздуха, шло на плавление остатков льда, а не на нагрев воды*. А что дальше? А дальше продолжается теплообмен: тёплый воздух шлёт тепло холодной воде - вода нагревается.
- Точка Е - температура воды стала 20°C и сравнялась с температурой воздуха в кухне - теплообмен закончился: наступило **термодинамическое равновесие**, как и предсказывало Нулевое начало термодинамики.



Эти наблюдения вполне понятны, исходя из наших обыденных представлений. Просто мы употребили важные уместные физические слова: начала термодинамики, теплообмен, фазовый переход. Важно лишь отметить следующее: **всё поступавшее тепло между точками В-Д целиком шло на плавление льда.**

Аналогично мы могли бы взять стакан с образовавшейся водой температурой 20°C и засунуть его обратно в морозильник, проводя подобные же наблюдения.



Не будем повторять ещё раз подробных рассуждений, скажем лишь самое важное:

- температура воды в начале 20°C , температура в морозильнике -18°C . Значит начнется теплообмен: теплая вода, охлаждаясь, начнет отдавать тепло морозильнику;
- после остывания воды до 0°C начнется фазовый переход "вода-лёд" - кристаллизация;
- до окончания этого фазового перехода (пока вся вода не превратится в лёд) температура замерзающей воды и температура появляющегося льда будет постоянной - 0°C : **всё забираемое тепло отнимается только за счет кристаллизации** (а не за счет дополнительного охлаждения воды);
- после окончания фазового перехода (у нас в стакане только лёд - правда не в форме исходного кубика, а в той форме, какую занимала вода) лёд, охлаждаясь, продолжит отдавать своё тепло более холодному морозильнику;
- когда температура льда и морозильника сравняются (-18°C), настанет динамическое равновесие и теплообмены прекратятся.

Мы рассмотрели процессы теплообмена, плавления и кристаллизации на качественном уровне. А есть ли формулы, чтобы рассчитать все эти процессы? Есть.

■ Теплообмен

Напомню: Количество теплоты - это физическая величина, показывающая, какая энергия передана телу (забрана у тела) в результате теплообмена.

Как узнать количество теплоты Q , необходимое для нагревания стакана воды на 10°C , например? Считаем, что при **таком нагревании никаких фазовых переходов не происходит.**

Вот универсальная (не только для стакана воды) термодинамическая формула:

→ $Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1)$, где Q - количество теплоты [Джоуль = Дж]; c - удельная теплоемкость вещества тела [Дж/кг·К]; m - масса тела [кг]; t_2 - конечная температура состояния [К]; t_1 - начальная температура состояния [К].

Поясним формулу:

- c - удельная теплоемкость вещества - величина табличная, характеризующая способность вещества хранить тепло;
- если $t_2 > t_1$ (тело нагревается), то $Q > 0$, то есть для нагревания тела нам нужно взять внешнее тепло (например, совершить теплообмен с более горячим телом);
- если $t_2 < t_1$ (тело охлаждается), то $Q < 0$, то есть для охлаждения тела нам нужно отнять у него тепло (например, совершить теплообмен с более холодным телом или заставить тело совершить работу);
- разность температур может быть вычислена и в градусах Цельсия.

Удельные теплоемкости некоторых веществ, $10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$

древесина	2,4	лёд	2,1	керосин	2,14
железо	0,46	сталь	0,46	ртуть	0,1
алюминий	0,9	стекло	0,83	азот	1,04
медь	0,38	золото	0,13	воздух	1,009
серебро	0,24	вода	4,2	водяной пар	2,2

Поэтому, отвечая на вопрос о том, каково количество теплоты Q , необходимое для нагревания стакана воды (200 г) на 10°C , получим: $Q = 4,2 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 10 = 8400 \text{ Дж}$.

■ Плавление и кристаллизация

Для того, чтобы тело начало совершать фазовый переход "твердое тело \leftrightarrow жидкость" (начало плавиться/кристаллизоваться), оно должно иметь температуру плавления/кристаллизации. Температура плавления/кристаллизации - табличная величина для каждого из веществ.

Температуры плавления/кристаллизации некоторых веществ, 0°C

вольфрам	3420	лёд	0
железо	1539	сталь	1500
алюминий	660	олово	232
медь	1083	золото	1064
серебро	960	свинец	327

Для того, чтобы твердое тело массой m , имеющее температуру плавления, совершило фазовый переход "твердое тело \rightarrow жидкость" (расплавилось), оно должно получить некоторое количество тепла Q . Эта энергия расходуется на уничтожение порядка, в котором располагались молекулы твердого тела, на разрыв межмолекулярных связей. Причем *всё получаемое тепло Q будет идти на плавление до тех пор, пока тело не расплавится полностью.*

Для того, чтобы твердое тело массой m , имеющее температуру кристаллизации, совершило фазовый переход "жидкость \rightarrow твердое тело" (кристаллизовалось), оно должно отдать некоторое количество своего тепла Q . Причем *всё отдаваемое тепло Q будет браться за счет кристаллизации до тех пор, пока тело не кристаллизуется полностью.*

→ А формула для плавления/кристаллизации одна и та же: $Q = \lambda \cdot m$, где Q - количество теплоты [Джоуль = Дж]; λ - удельная теплота плавления/кристаллизации вещества тела (величина табличная) [Дж/кг]; m - масса тела [кг].

Удельная теплота плавления/кристаллизации некоторых веществ, 10^5 Дж/кг

вольфрам	1,84	лёд	3,3
железо	2,7	сталь	0,83
алюминий	3,8	олово	0,59
медь	1,75	золото	0,67
серебро	0,87	свинец	0,25

■ Испарение, кипение, конденсация

Давайте вспомним основные положения об испарении, кипении и конденсации, когда мы их рассматривали в Истории про молекулярно-кинетическую теорию газов.

Испарение и кипение - это процессы **парообразования** - фазовые переходы "жидкость → газ".

- **Испарение** - это парообразование с поверхности жидкости.
- Испарение происходит при любой температуре.
- При испарении жидкость охлаждается.
- При повышении температуры жидкости испарение происходит интенсивнее.

- **Кипение** - это парообразование во всем объеме жидкости.
- Кипение происходит при температуре кипения.
- Во время кипения температура жидкости и пара над ней не меняется. Она сохраняется неизменной до тех пор, пока вся жидкость не выкипит. Вся подводимая к жидкости энергия уходит на превращение ее в пар.
- Температура кипения зависит от давления, оказываемого на поверхность жидкости.

- **Конденсация** - это фазовый переход "газ → жидкость".
- Конденсация происходит при температуре кипения.
- При конденсации температура оставшегося газа (пара) уменьшается.

В школьном курсе физики термодинамика испарения не рассматривается. А кипение и конденсация - да.

Температуры кипения некоторых жидкостей (при давлении 100 кПа), $^{\circ}\text{C}$

азот	-196	керосин	200
водород	-253	спирт	78
гелий	-269	эфир	35
кислород	-183	вода	100

Для того, чтобы жидкость массой m , имеющее температуру кипения, полностью выкипела, она должна получить некоторое количество тепла Q . Причем *всё получаемое тепло Q будет идти на кипение до тех пор, пока жидкость не выкипит полностью.*

Для того, чтобы газ (пар) массой m , имеющий температуру кипения, полностью сконденсировался, он должен отдать некоторое количество тепла Q . Причем *всё отдаваемое тепло Q будет браться за счет конденсации до тех пор, пока весь газ не конденсируется полностью.*

→ А формула для кипения/конденсации одна и та же: $Q = L \cdot m$, где Q - количество теплоты [Джоуль = Дж]; L - удельная теплота парообразования/конденсации вещества тела (величина табличная) [Дж/кг]; m - масса тела [кг].

Удельная теплота парообразования/конденсации некоторых веществ, 10^3 Дж/кг

аммиак	1360	керосин	220
бензин	300	спирт	850
вода	2260	эфир	350

■ Горение

Хоть горение никаким боком не относится к видам фазовых переходов, а является чисто химической реакцией окисления с изменением химического состава сгорающих веществ и с выделением тепла (химики сказали бы "экзотермическая реакция"), однако в термодинамике есть формула, позволяющая определить количество теплоты, выделяющееся при сгорании массы m вещества:

→ $Q = q \cdot m$, где Q - количество теплоты [Джоуль = Дж]; q - удельная теплота сгорания вещества (величина табличная) [Дж/кг]; m - масса тела [кг]. Эта формула используется в некоторых задачах.

Удельная теплота сгорания некоторых веществ, 10^6 Дж/кг

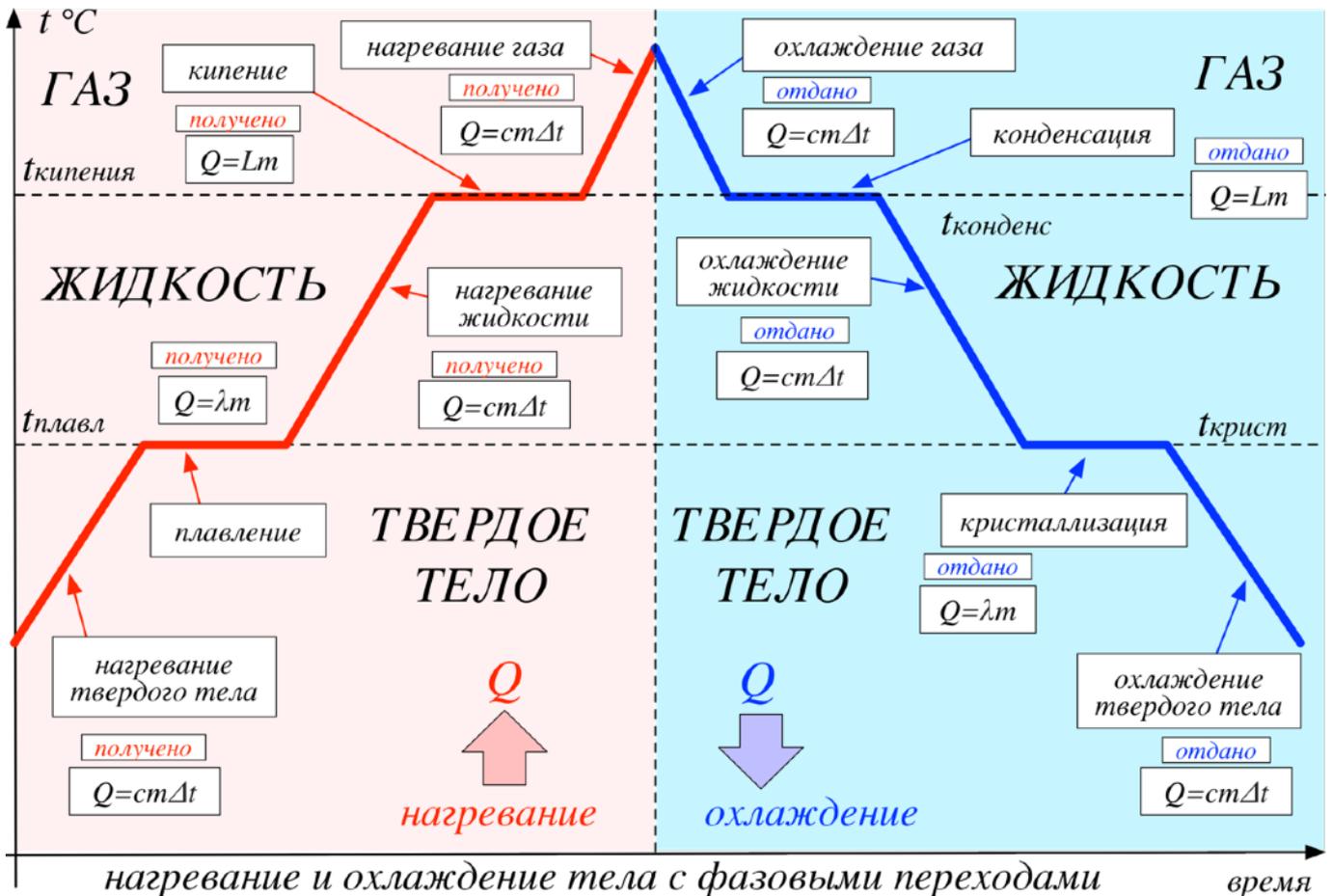
бензин	44	дизель	43
бурый уголь	9,3	керосин	41-44
каменный уголь	30	мазут	41
древесный уголь	32	нефть	46
дерево	9-15	порох	3,8

Замечание: все удельные теплоемкости и теплоты, температуры фазовых переходов являются экспериментальными и не могут быть вычислены теоретически.

=====

На картинке изображен обобщенный график процессов нагревания и охлаждения некоторого тела. По вертикальной оси отложена температура тела, по горизонтальной - время.

Что за тело? - спросите вы. Да любое. Проще всего представить воду в виде льда-жидкости-газа. Хотя это может быть и кусок меди. Медь можно расплавить и испарить при соответствующих температурах.



В течение первой половины к телу непрерывно подводится внешнее тепло. Технически это может быть газовая горелка (у газовой горелки температура пламени около 1500°C).

Во второй половине от тела тепло отводится. Как это сделать технически? Ну, например, поместив тело (или сосуд, в котором тело заключено) в ёмкость с жидким азотом (его температура может быть -160°C).

Нагреванием и охлаждением тело "проводят" по всем фазовым переходам в обе стороны.

График сам по себе достаточно красноречив и лишних слов не требует. Хочу обратить ваше внимание лишь на *горизонтальные участки* этого графика. Они относятся к фазовым переходам: плавлению, кипению, конденсации и кристаллизации. То, что эти участки графика горизонтальны, говорит о том, что **температура на них не изменяется** (мы об этом говорили раньше). На этих участках тело присутствует в двух фазах: например, при плавлении - есть части тела в твёрдой форме и есть уже расплавившаяся часть. Пока всё не расплавится - фазовый переход продолжится.

→ Уравнение теплового баланса

С теплообменом как таковым и с теплом, выделяемым/поглощаемым при фазовых переходах мы разобрались. А если у нас есть в сосуде лёд, вода и тёплый воздух, причем все они с разными температурами, то как нам описать возможные теплообмены и фазовые переходы? Предположим для определенности, что сосуд термоизолирован: нет ни потерь тепла во внешнюю среду, ни внешних источников тепла.

Ведь если есть в сосуде тела с разными температурами, то между ними должны начаться теплообмен: кто-то будет тепло отдавать, кто-то будет тепло получать. А ведь возможны при этом не только теплообмены, но и фазовые переходы с поглощением тепла: ведь если вода очень горячая, то она своим теплом может лёд расплавить. И эти теплообмены и фазовые переходы будут продолжаться в термоизолированном сосуде до тех пор, пока система не придет в *термодинамическое равновесие*, то есть пока температуры всех тел в сосуде не станут одинаковыми (нулевое начало термодинамики).



Важное замечание: существенным отличием термодинамики жидкости или твердого тела от термодинамики идеального газа является то, что жидкости и твердые тела слабо расширяются при нагревании и имеют свободные границы. Поэтому *они не совершают работу при нагревании*, которую, следовательно, не нужно учитывать в уравнениях баланса энергии.

Теперь обратимся к Первому началу термодинамики: "Изменение ΔU внутренней энергии термодинамической системы равно $\Delta U = Q - A$ ". Но у нас система термоизолированная, поэтому $Q = 0$ (нет внешних тепловых потоков). А с учетом предыдущего важного замечания $A = 0$ (работу ни система в целом, ни ее элементы не совершают). Поэтому $\Delta U = 0$, что означает, что в результате всех термодинамических процессов в нашей термоизолированной системе внутренняя энергия системы не изменится. Или

$\Delta U = \sum_1^n \Delta U_i = 0$, где ΔU_i - изменение внутренней энергии каждого отдельного

элемента системы. А поскольку, как мы уже говорили выше, элементы системы работу не совершают, то мы можем переписать эту формулу в виде: $\sum_1^n Q_i = 0$ [1], где Q_i -

количество тепла полученное (тогда $Q_i > 0$) или отданное (тогда $Q_i < 0$) каждым элементом системы. Уравнение [1] называется *уравнением теплового баланса*.

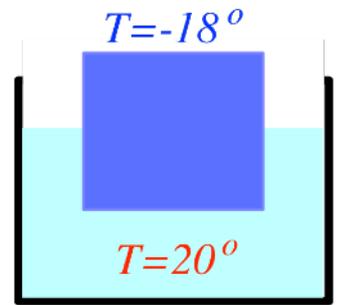
Или же [1] можно записать так: $\sum_1^l Q_i = \sum_1^m Q'_i$, где Q_i - отдаваемое количество теплоты одним элементом системы, Q'_i - получаемое количество теплоты одним элементом системы.

Уравнение теплового баланса: суммарное количества теплоты, которое выделяется в теплоизолированной системе равно суммарному количеству теплоты, которое в этой системе поглощается.

По своему смыслу уравнение теплового баланса - это *закон сохранения энергии* для процессов теплообмена в термоизолированных системах.

Ну вот, все инструменты у нас есть. А теперь порешаем задачки.

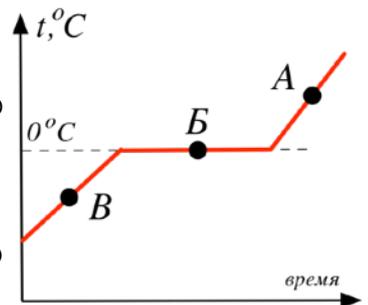
> **Задача:** В сосуде находится $m = 0,3$ кг льда при температуре -18°C и $M = 2$ кг воды при температуре 20°C . Считать систему лед-вода термоизолированной. Какова будет температура содержимого сосуда после того, как система достигнет термодинамического равновесия. Удельная теплоемкость льда $c = 2 \cdot 10^3$ Дж/кг·К, удельная теплоемкость воды $C = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/кг·К, удельная теплота плавления льда $\lambda = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг.



Решение: Разберем эту задачу подробно. Давайте порассуждаем.

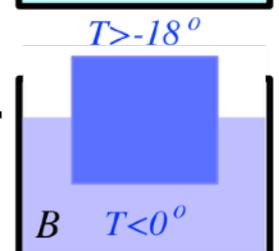
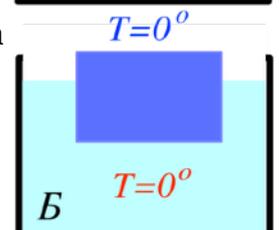
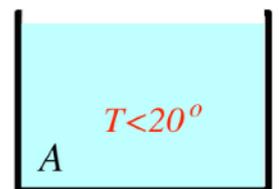
- Поскольку система теплоизолирована, то в ней работает уравнение теплового баланса.
- Система достигнет состояния термодинамического равновесия и все теплообмены в ней прекратятся. При этом в системе установится одинаковая температура.
- Самым горячим элементом системы является вода - она может тепло отдавать.
- Самым холодным элементом системы является лёд - он может тепло получать.
- Лёд **может** нагреваться до температуры плавления (0°C), таять, а вода, получившаяся из него, может нагреваться.
- Вода **может** охлаждаться до температуры конденсации (0°C), превращаться в лед и охлаждаться в виде льда.
- Очевидно, что температура, которая установится в системе после всех теплообменов, будет больше -18°C и меньше 20°C .

Давайте посмотрим как мог бы себя вести лёд (самое холодное тело в системе), если бы к нему подводилось **много внешнего тепла**. В начале лёд бы нагревался от -18°C до температуры своего плавления 0°C , затем бы он таял, превращаясь в воду температурой 0°C , затем эта вода нагревалась бы. Мы не рассматриваем процесс дальше (до кипения) потому, что понимаем, что в нашей термоизолированной системе до этого дело не дойдет. На каждом из этих этапов льду требуется тепло. Но в нашей теплоизолированной системе источник тепла один - вода. И возможности её по снабжению льда теплом ограничены тем запасом тепла, которое изначально у неё имелось.



Итак, в зависимости от конкретной величины запасенного в воде тепла, возможны три варианта поведения системы:

- **Вариант А:** воде хватит тепла, чтобы: нагреть лёд до 0°C , полностью его расплавить и немного нагреть получившуюся воду. Сама же вода охладится.
- **Вариант Б:** воде хватит тепла, чтобы: нагреть лёд до 0°C и частично его расплавить. Сама же вода и вода, получившаяся из льда будут иметь температуру 0°C . В системе будет вода и лёд при температуре 0°C .
- **Вариант В:** воде не хватит тепла, чтобы нагреть лёд до 0°C . Вода немного нагреет лёд (до температуры ниже 0°C), но при этом охладится до 0°C , полностью кристаллизуется, превратившись в лёд и охладится до температуры ниже 0°C .



Так какой же вариант реализуется на самом деле? А вот теперь надо смотреть на цифры.

Сколько тепла может отдать вода (самое горячее тело), охладившись с 20°C до 0°C?

$$Q_V = C \cdot M \cdot \Delta t = 4,2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 20 = 168 \text{ кДж.}$$
 Запомнили цифру.

Сколько тепла нужно льду, чтобы нагреться с -18°C до 0°C?

$Q_{L1} = c \cdot m \cdot \Delta t' = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \cdot 18 = 10,8 \text{ кДж.}$ Ага, $Q_V > Q_{L1}$, значит у воды хватит тепла, чтобы нагреть лёд до температуры плавления (0°C). *Значит точно не Вариант В.* И после этого у воды ещё останется $168 - 10,8 = 157,2 \text{ кДж}$ "в запасе".

Сколько тепла нужно нагретому до температуры плавления льду чтобы расплавиться?

$Q_{L2} = \lambda \cdot m = 3,3 \cdot 10^5 \cdot 0,3 = 99 \text{ кДж.}$ Такое количество тепла есть в запасе у воды! Значит лёд расплавится полностью. И у воды ещё останется $157,2 - 99 = 58,2 \text{ кДж}$ после этого. Вот теперь-то понятно, что реализуется *вариант А:* у воды с запасом хватит тепла, чтобы лёд нагреть и расплавить.

Настало время писать уравнение теплового баланса. Пусть t - итоговая температура, которая установится в системе.

Тепло, отданное водой: $Q_V = C \cdot M \cdot (20^0 - t)$

Тепло, полученное льдом при нагревании с -18°C до 0°C: $Q_{L1} = c \cdot m \cdot (18^0 - 0^0)$

Тепло, полученное льдом при плавлении: $Q_{L2} = \lambda \cdot m$

Тепло, полученное растаявшей водой при нагревании с 0°C до t : $Q_{L3} = C \cdot m \cdot (t - 0^0)$.

А вот и уравнение теплового баланса: $Q_V = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3}$. Подставляем и выражаем t .

$$t = \frac{20CM - 18cm - \lambda m}{C(M + m)} \simeq 6^0\text{C.}$$

А если бы воды было в два раза меньше или если бы она была в два раза холодней (10°C), то всё бы пошло по сценарию Б. Можете сами проверить!

Это - типовая задача на теплообмены с фазовыми переходами. Надо аккуратненько вначале посмотреть: каковы возможные состояния могут стать у самого холодного тела в системе, затем определить какое максимальное количество тепла одни элементы системы могут отдать, а потом смотреть что из этого можно "сшить" для удовлетворения потребностей других элементов системы.

> Ещё задача: Машина-снеготаялка имеет КПД $\eta = 25\%$. Какую массу льда можно растопить, если сжечь $m = 1$ тонну дров? Температура льда -10°C. Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$; удельная теплоемкость льда $c = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; удельная теплота сгорания дров $q = 12 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$.

Решение: Посчитаем тепло, которое пойдёт на плавление льда. Как и всякий КПД $\eta = Q_{\text{полезн}}/Q_{\text{затрач}}$. $Q_{\text{затрач}} = qm$ (теплота, выделившаяся от сгорания 1 тонны дров), тогда $Q_{\text{полезн}} = \eta qm$

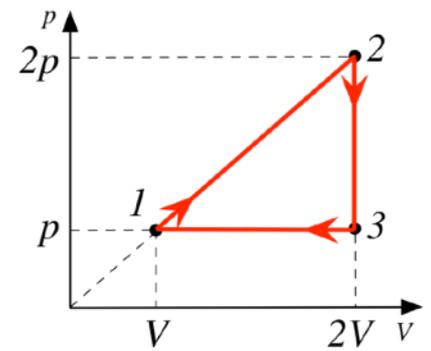
Для плавления массы M льда надо сначала лёд нагреть с -10°C до 0°C, а затем весь расплавить.

Поэтому потребуется вот такое количество тепла: $cM(10^0 - 0^0) + \lambda M$.

Уравнение теплового баланса: $Q_{\text{полезн}} = \eta qm = cM(10^0 - 0^0) + \lambda M$.

$$\text{Откуда } M = \frac{\eta qm}{10c + \lambda} = 8570 \text{ кг.}$$

> **А вот задача на тепловые машины:** С одноатомным идеальным газом происходит циклический процесс 1-2-3-1, pV -диаграмма которого приведена на рисунке (процесс 2-3 является изохорическим, процесс 3-1 - изобарическим, на участке 1-2 давление является линейной функцией объема, причем продолжение прямой 1-2 проходит через начало координат). Найти коэффициент полезного действия этого процесса.



Решение: Типичная графическая задача на тепловые машины.

Вспоминаем:

- Схему тепловой машины.

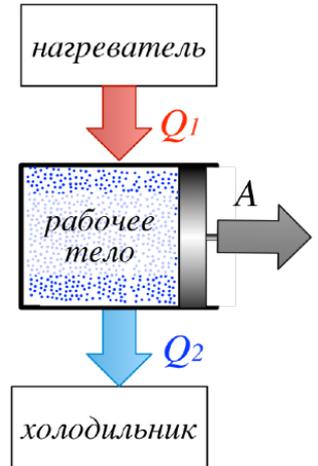
- Уравнение идеального газа (УИГ): $pV = \frac{m}{\mu}RT$

- Внутренняя энергия одноатомного идеального газа: $U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu}RT$

- КПД тепловой машины: $\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H}$, где Q_H - количество тепла, полученное рабочим телом от нагревателя, Q_X - количество тепла, отданное рабочим телом холодильнику. Или

$\eta = \frac{A}{Q_H}$, где A - механическая работа, совершенная рабочим телом (за цикл).

- Работа газа численно равна площади под графиком процесса на диаграмме pV .



Ответим сначала на вопрос о том, на каких участках процесса газ контактирует с нагревателем, на каких с холодильником.

В процессе 1-2 газ расширяется, и, следовательно, совершает положительную работу $A_{1-2} > 0$. В этом процессе растет его температура (это можно увидеть, применяя УИГ к состояниям 1 и 2), и потому растет его внутренняя энергия $\Delta U_{1-2} > 0$.

Поэтому из первого начала термодинамики (ПНТД) заключаем, что $Q_{1-2} = A_{1-2} + \Delta U_{1-2} > 0$. В течение процесса 1-2 газ получал тепло, а, следовательно, **контактировал с нагревателем**.

В процессе 2-3 объем газа не меняется, значит газ не совершает работу: $A_{2-3} = 0$. Температура газа в этом процессе уменьшается (по УИГ): $\Delta U_{2-3} < 0$. По ПНТД: $Q_{2-3} = A_{2-3} + \Delta U_{2-3} < 0$ - поэтому на участке процесса 2-3 газ отдавал тепло, то есть **контактировал с холодильником**.

Аналогичное рассмотрение процесса 3-1 приводит к неравенству $Q_{3-1} < 0$ и выводу о том, что газ **контактировал с холодильником** в течение всего этого процесса.

Итак, в течение цикла на участке 1-2 газ контактировал с нагревателем (получал от него тепло), а на участках 2-3 и 3-1 - с холодильником.

Найдем теперь количество теплоты, полученное газом от нагревателя в течение всего цикла (а это лишь участок 1-2). По ПНТД $Q_H = A_{1-2} + \Delta U_{1-2}$.

Приращение внутренней энергии газа на 1-2:

$$\Delta U_{1-2} = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T_{1-2} = \frac{3}{2} \left(\frac{m}{\mu} R T_2 - \frac{m}{\mu} R T_1 \right)$$

$$\text{Или с учетом УИГ: } \Delta U_{1-2} = \frac{3}{2} ((pV)_2 - (pV)_1) = \frac{3}{2} (2p2V - pV) = \frac{9}{2} pV$$

Работу газа на участке 1-2 найдем как площадь фигуры под графиком процесса на диаграмме pV . Эта фигура - трапеция. Её площадь: $A_{1-2} = \frac{p + 2p}{2} (2V - V) = \frac{3}{2} pV$.

$$\text{В результате: } Q_H = \frac{9}{2} pV + \frac{3}{2} pV = 6pV.$$

Механическую работу газа за цикл найдем как площадь цикла - на диаграмме pV - это площадь треугольника цикла: $A = \frac{1}{2} pV$. Откуда $\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{1}{12}$.

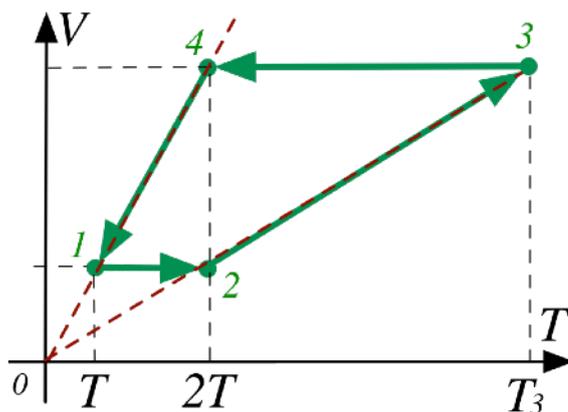
А вот ещё одна задачка на цикл тепловой машины из ЕГЭ-2020. Эти задачи требуют понимания, навыков, внимательности и аккуратности. Поэтому и даю ещё одну похожую.

> Задача из ЕГЭ

В тепловом двигателе 1 моль идеального одноатомного газа совершает цикл 1-2-3-4-1. Определите КПД цикла.

Решение: Типичная графическая задачка на тепловые машины. Коричневые пунктирные линии - изобары - линии с одинаковым давлением газа.

Все дельты считаем "стало" - "было" !!!



Вспоминаем:

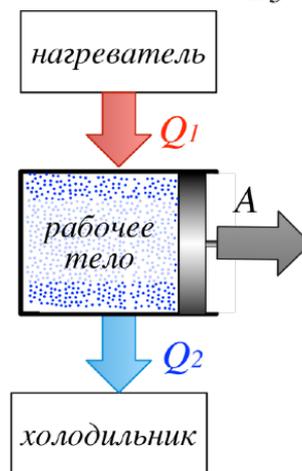
- Схему тепловой машины.

- Уравнение идеального газа (УИГ): $pV = \frac{m}{\mu} RT$

- Внутренняя энергия одноатомного идеального газа: $U = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT$

- КПД тепловой машины: $\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H}$, где Q_H - количество тепла, полученное рабочим телом от нагревателя, Q_X - количество тепла, отданное рабочим телом холодильнику. Или $\eta = \frac{A}{Q_H}$, где A - механическая работа, совершенная рабочим телом (за цикл).

- Работа газа численно равна площади под графиком процесса на диаграмме pV .



У нас график в координатах pV . 1 моль $\Rightarrow pV = RT$; $U = \frac{3}{2}RT$.

Где газ получает тепло от нагревателя, а где отдаёт тепло холодильнику?

Температура газа: растёт $\Rightarrow \Delta U > 0$; убывает $\Rightarrow \Delta U < 0$
 Объём газа: растёт $\Rightarrow A > 0$; уменьшается $\Rightarrow A < 0$

Процесс 1-2: газ не меняет объём: $A = 0$; температура растёт: $\Delta U > 0$.

$\Delta U = \frac{3}{2}R \cdot 2T - \frac{3}{2}R \cdot T = \frac{3}{2}RT$. В этом процессе газ получает тепло от нагревателя ($Q > 0$). По ПНТД: $Q_{12} = \Delta U = \frac{3}{2}RT$

Процесс 2-3: газ расширяется при постоянном давлении: $A_{23} > 0$; $A_{23} = p_2(V_3 - V)$;

температура растёт: $\Delta U_{23} > 0$; $\Delta U_{23} = \frac{3}{2}R \cdot (T_3 - 2T)$. В этом процессе газ получает тепло от нагревателя ($Q > 0$). По ПНТД: $Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23} = \frac{3}{2}R \cdot (T_3 - 2T) + p_2(V_3 - V)$

Процесс 3-4: объём газа не меняется: $A_{34} = 0$; температура газа уменьшается: $\Delta U_{34} < 0$;

$\Delta U_{34} = \frac{3}{2}R \cdot (2T - T_3)$. В этом процессе газ отдаёт тепло холодильнику ($Q < 0$).

$Q_{34} = \frac{3}{2}R \cdot (2T - T_3)$.

Процесс 4-1: газ сжимается при постоянном давлении $A_{41} < 0$; $A_{41} = p(V - V_3)$; газ

охлаждается: $\Delta U_{41} < 0$; $\Delta U_{41} = \frac{3}{2}R \cdot (T - 2T) = -\frac{3}{2}RT$. В этом процессе газ отдаёт тепло холодильнику ($Q < 0$). $Q_{41} = \Delta U_{41} + A_{41} = -\frac{3}{2}RT + p(V - V_3)$.

Итак, от нагревателя получили: $Q_{12} + Q_{23} = \frac{3}{2}RT + \frac{3}{2}R \cdot (T_3 - 2T) + p_2(V_3 - V)$ или

$Q_H = Q_{12} + Q_{23} = \frac{3}{2}R \cdot (T_3 - T) + p_2(V_3 - V)$ [1]

Холодильник получил: $-Q_{34} - Q_{41}$ (мы считали сколько газ отдал холодильнику, а сколько холодильник получил - это то же, но с минусом).

$Q_X = -Q_{34} - Q_{41} = \frac{3}{2}R \cdot (T_3 - 2T) + \frac{3}{2}RT + p(V_3 - V)$ или

$Q_X = \frac{3}{2}R \cdot (T_3 - T) + p(V_3 - V)$ [2]

Наша цель: посчитать КПД по формуле $\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H}$, но надо еще связать

V_3, V, T, p, T_3, p_2 .

В каждой из четырёх точек цикла у газа есть параметры:

- точка 1: p, V, T ;
- точка 2: $p_2, V, 2T$ (объём не изменился);
- точка 3: p_2, V_3, T_3 (давление не изменилось);
- точка 4: $p, V_3, 2T$ (объём не изменился; давление то же, что и в t_1).

Для каждой из этих четырех точек (да и вообще для любой точке на графике цикла) можно записать УИГ. Выписываем УИГи:

точка 1:	$pV = RT$
точка 2:	$p_2V = 2RT$
точка 3:	$p_2V_3 = RT_3$
точка 4:	$pV_3 = 2RT$

Откуда получаем связи:

$pV = RT$
$V_3 = 2V$
$T_3 = 4T$
$p_2 = 2p$

Подставляем в [1] и [2]:

Получаем: $Q_H = \frac{13}{2}RT$; $Q_X = \frac{11}{2}RT$.

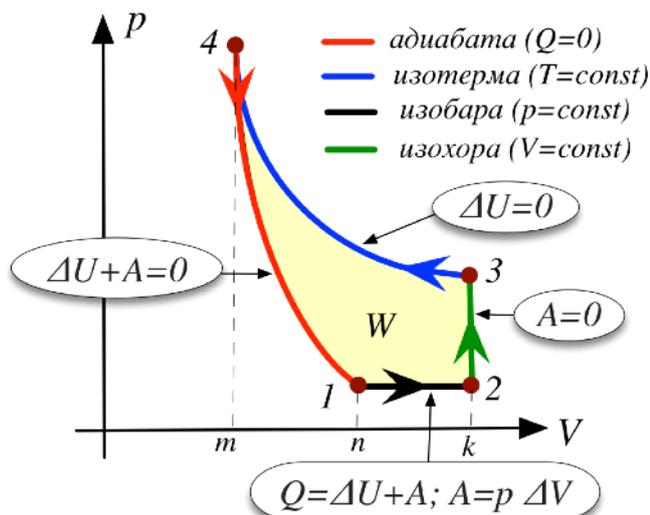
Подставляем в $\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = \frac{2}{13} \approx 0,154 \rightarrow 15,4\%$

> Задача для закрепления

На рисунке в координатах pV изображён 4-тактный цикл работы тепловой машины на одноатомном идеальном газе. Каждый процесс - это один из четырёх видов изопроцессов. Считаем КПД тепловой машины.

В этом цикле представлены все изопроцессы - именно они встречаются в задачах.

Поговорим о каждом из тактов цикла.



площадь фигуры W - работа газа за цикл

Процесс 1-2: изобарический ($p = const$).

Газ совершает положительную работу поскольку его объём увеличивается. Поскольку $p = const$, то эту работу можно посчитать так: $A_{12} = p(V_2 - V_1)$.

Температура точки 2 выше температуры точки 1: поскольку точка 2 лежит на более высокой изотерме (гиперболе), чем точка 1 (напомню: чем выше изотерма в координатах pV , тем температура газа выше), следовательно внутренняя энергия газа увеличилась.

Поскольку газ одноатомный, то это изменение можно посчитать по формуле

$$\Delta U_{12} = \frac{3}{2} m R(T_2 - T_1). \text{ Поскольку } A_{12} > 0, \quad \Delta U_{12} > 0 \quad \Rightarrow \quad Q_{12} = A_{12} + \Delta U_{12} > 0 -$$

газ получает тепло от нагревателя.

Процесс 2-3: изохорический ($V = const$).

Газ не совершает работу поскольку его объём не изменяется: $A_{23} = 0$.

Температура точки 3 выше температуры точки 2 (точка 3 выше по изотерме, чем точка 2),

следовательно внутренняя энергия газа увеличивалась: $\Delta U_{23} = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} R(T_3 - T_2)$.

Поскольку $A_{23} = 0$, $\Delta U_{23} > 0 \Rightarrow Q_{23} = A_{23} + \Delta U_{23} > 0$ - газ получает тепло от нагревателя.

Процесс 3-4: изотермический ($T = const$).

Газ совершает отрицательную работу поскольку его объём уменьшается. Формульно мы с вами ещё не умеем выражать такую работу, но численно это работа равна площади фигуры $k34m$ (со знаком минус). Температура газа не меняется: $\Delta U_{34} = 0$. Поскольку

$A_{34} < 0$, $\Delta U_{34} = 0 \Rightarrow Q_{34} = A_{34} < 0$ - газ отдаёт тепло холодильнику.

Процесс 4-1: адиабатический (без теплообмена с внешней средой: $Q=0 !!!$).

Газ совершает положительную работу поскольку его объём увеличивается. Численно это работа равна площади фигуры $4m1$.

Температура точки 1 ниже температуры точки 4 (точка 1 ниже по изотерме, чем точка 4),

следовательно внутренняя энергия газа уменьшилась: $\Delta U_{41} = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} R(T_1 - T_4)$.

Поскольку $A_{41} > 0$, $\Delta U_{41} < 0 \Rightarrow Q_{41} = A_{41} + \Delta U_{41} = 0$ - газ ни получает тепло от нагревателя, ни отдаёт тепло холодильнику.

В итоге: $Q_H = Q_{12} + Q_{23}$; $Q_X = -Q_{34}$. (Обратите внимание на знак "-" перед Q_{34} : мы считали Q_{34} как тепло, отданное газом холодильнику. Но нам надо для формулы КПД знать тепло, полученное холодильником от газа - отсюда и минус).

Можно считать КПД по формуле $\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H}$. Но обычно в задачах ещё придётся найти связки параметров p, V, T для точек цикла через УИГ.

Ещё можно воспользоваться такой формулой для КПД (эквивалентной предыдущей

формуле): $\eta = \frac{A}{Q_H}$, где A - механическая работа, совершенная газом (за цикл). Эта

формула отражает общий смысл понятия КПД: "КПД равен энергия полезная делить на энергию затраченную". Численно A равняется площади фигуры 1234 (фигуры W).

В таких задачах главное - это определить куда идёт внешнее тепло Q - от нагревателя к газу или от газа к холодильнику, аккуратно расписать работы и ΔU и аккуратно выписывать УГИ для связки параметров p, V, T .

Ну вот, мы и закончили рассмотрение всех вопросов школьной термодинамики.



