Законы термодинамики. Методические указания к решению задач по ЕГЭ

Ирина Константиновна Тохадзе

**Методическое указание.** КИМ (контрольно-измерительные материалы) состоят из задач с кратким ответом и задач, в которых надо привести развернутый ответ. В 2019 задач с кратким ответом 27 (задачи с 1 по 27), а с развернутым – 5 (задачи с 28 по 32). Решать задачи с кратким ответом можно как угодно. Для многих таких задач полезно писать решение на черновике (опыт показывает, что можно легко сделать ошибку, решая простую задачу в уме), но делать это надо быстро, поэтому хорошо иметь краткие способы записи и использовать готовые алгоритмы и связи.

А вот решения задач с развернутым ответом надо писать подробно. Согласно правилам ФИПИ (федерального сайта педагогических измерений), чтобы получить три первичных балла за решение такой задачи, недостаточно получить правильный ответ и даже провести все необходимые математические преобразования, ничего не пропустив. Надо обязательно написать все законы и закономерности, а также положения теории, которые необходимы при решении задачи. Все вновь вводимые в решение буквенные обозначения должны быть описаны. Ненужные для решения формулы должны быть как-то отмечены (вычеркнуты, обведены и так далее). Обязательно надо указать единицы измерения (вообще в физике без этого никак). Ответ должен быть получен в виде формулы, и уже потом в формулу надо поставить числа (допускается получение промежуточных результатов в виде чисел). Получение ответа в виде формулы к тому же позволяет проверить результат на правильную размерность, а в ряде случаев еще и проверить, верно ли решение в крайних случаях (ответ в которых обычно просто получить). При получении численных ответов можно и нужно пользоваться калькулятором, однако без счета в уме не обойтись, так как в стандартном калькуляторе нельзя вводить числа подобные 1023 и 10-23. Наконец, надо отметить, что при правильной записи решения можно получить 1–2 балла даже за частично решенную задачу.

Важно отметить, что **формулы,** которые приводятся в виде законов в начале решения задачи, должны быть **из кодификатора**. В теоретической части данной методички все **формулы из кодификатора набраны полужирным шрифтом**. Иные формулы не только набраны обычным шрифтом, но и выделены звездочкой\*. Название законов и буквенные обозначения в данном пособии взяты из кодификатора 2019 года и демонстрационных вариантов КИМов за последние годы. Желательно пользоваться теми же обозначениями, что и в кодификаторе, поскольку допускается не писать “стандартные обозначения величин”. Так, что использование стандартных обозначений будет важным, если вы забудете указать обозначение какой-либо величины

**Методическое указание 2.** Задачи взяты с сайта ФИПИ. Однако так как в базе задач до сих пор встречаются задачи с 4 вариантами ответа, которых нет с 2017 года, в ряде случаев в задачах переформулирован вопрос. Кроме того на сайте ФИПИ нет обозначений номера задачи. Поэтому в данном пособии задачи имеют сплошную нумерацию, отдельно надписью С выделены задачи, в которых, судя по условию требуется развернутый ответ.

**Основные понятия молекулярной физики**

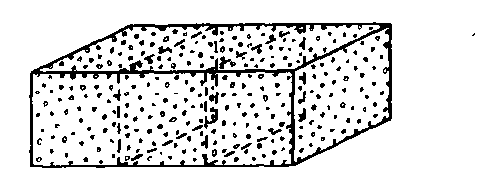
Молекулярная физика изучает макроскопические явления в телах, связанные с огромным количеством атомов и молекул в них (так, в 1 см3  воздуха находится около 2,7∙1019 частиц).  **Молекулярно-кинетическая теория вещества (MKT) рассматривает тела состоящими** из молекул, которые находятся в постоянном беспорядочном (тепловом) движении, сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда (рис 1.). Скорости молекул меняются в широких пределах. С помощью статистической физики при большом количестве частиц можно описывать тела на макроскопическом уровне, рассматривая движения молекул в среднем. Средняя квадратичная скорость молекулы связана с абсолютной температурой

Рис. 1. Макроскопическое тело

Здесь – константа Больцмана, – масса молекулы, – кинетическая энергия поступательного (движения центра масс, без учета вращения молекул) теплового движения молекулы. Черта сверху означает усреднение.

**Замечание 1**. *Важно отметить, что статистический подход возможен, если частицы неразличимые. Поэтому, хотя биологические объекты также подчинены законам физики, в некоторых случаях (к примеру, в молекуле ДНК) частицы могут многократно репродуцироваться, поэтому нельзя говорить об их неразличимости, а значит и использовать подход статистической физики.*

Температура – макроскопическая характеристика внутреннего строения тела, также как – давление, – масса вещества и – объем. Макроскопические величины связаны между собой, для них можно написать уравнение состояния тела. В частности можно написать уравнение состояния для простой, но неплохо работающей модели, называемой «идеальный газ». В идеальном газе отсутствует потенциальная энергия взаимодействия частиц и размеры частиц пренебрежимо малы по сравнению с размерами системы. Для идеального газа выполняется уравнение Менделеева– Клапейрона:

где – универсальная газовая постоянная (), число молей :

Здесь *M* – молярная масса, – число Авогадро ( моль-1). Легко убедиться, что уравнение (2) можно записать иными способами, используя концентрацию *n* и плотность . О системе единиц можно прочесть в Приложении I.

и

Уравнение Менделеева–Клапейрона в форме (4а) можно вывести из определения модели идеального газа, если считать, что молекулы упруго сталкиваются cо стенкой сосуда, а также использовать формулу (1).

**Методическое указание 3.** Запоминать значение универсальной газовой постоянной для сдачи ЕГЭ не надо. , как и другие константы, есть в справочных данных в начале КИМ. Однако, используя размерность (из справочных данных), полезно убедится, что в уравнении (1) слева и справа размерность одна и та же – Дж.

**Методическое указание 4.** В условиях задач иногда пишут «разреженный газ», имея в виду газ с большим расстоянием между молекулами. Для разреженного газа с большой точностью выполняется закон идеального газа, поэтому в задачах с кратким ответом рассматривайте разреженный газ как идеальный. В задачах с развернутым ответом надо написать примерно следующее: «Так как по условию газ разреженный, к нему можно применить уравнение идеального газа». Может быть и так, что про газ вовсе ничего не написано, однако, так как другой модели вы не знаете, все равно надо использовать модель идеального газа. Только не забудьте написать, если это задача с развернутым ответом, почему вы решили применить модель идеального газа

**Таблица1. Изопроцессы**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Название процесса и кривой | Условие прохождения процесса | При постоянном количестве вещества для идеального газа | | |
| Эмпирически выведенный закон | Формула | График |
| Изобарный процесс,  изобара | *p* = const | Закон Гей-Люссака | ***V*/*T*=const**  или  *V*~*T \** |  |
| Изохорный процесс, изохора | *V* = const | Закон Шарля | ***p*/*T*=const** или  *p*~*T \** |  |
| Изотермический процесс, изотерма | *T* = const | Закон Бойля − Мариотта | ***pV*=const**  или  *p*~1/*V \** |  |
| Адиабатический процесс, адиабата (смотри ниже формулу 14) | *Q*=0 |  |  |  |

**Методическое указание 5.** Обратите внимание на то, в каких переменных приводятся графики. В задачах могут использоваться совершенно разные переменные, и графики будут другими. Мало того, если заменить абсолютную температуру на температуру в градусах Цельсия, то графики изобары и изохоры не будут проходить через точку (0;0). Поэтому всегда сначала смотрите на оси.

**Методическое указание 6.** В некоторых демонстрационных вариантах приводятся исторические названия законов (смотри третью колонку), однако знать их не обязательно. Все эти законы можно легко вывести из уравнения Менделеева-Клапейрона. А вот, что крайне полезно, так это, нарисовав изотерму, словами (в задаче С) указать, что это именно гипербола. В этом случае не возникнет вопроса, насколько точно нарисована кривая.

**Методическое указание 7.** Обозначение пропорциональности (*V*~*T*) в кодификаторе не используется, однако такая запись очень удобна для решений (на черновике) задач с кратким ответом. При развернутых решениях можно писать примерно так ”*V*= α∙*T*, где α =const”.

**Методическое указание 8.** Полезно запомнить, если количество вещества не меняется (а так в большинстве задач), то температура , плотность ρ.

**Термодинамика. Внутренняя энергия и работа**

Термодинамика имеет дело с процессами, в которых энергия передается, как работа или тепло. Сумма энергий молекул называется внутренней энергией молекул. Это макроскопическая величина и она может быть найдена, хотя мы не знаем энергию каждой молекулы. Внутренняя энергия одноатомного идеального газа равна

**Замечание 2.** *Внутренняя энергия газа – это сумма кинетической и потенциальной энергии молекул. Однако у идеального газа по определению потенциальная энергия взаимодействия молекул равно нулю. Кроме того у одноатомных молекул есть только поступательное движение. Поэтому из формулы (1), которая верна для кинетической энергии поступательного движения любого газа, и следует формула (5).*

Учитывая уравнение (2), получим еще одно уравнение для внутренней энергии :

Важно отметить, что формулы (5) и (6) верны только для **одноатомного** идеального газа. Чаще всего в задачах используют такие одноатомные газы, как гелий, неон и аргон. К одноатомным газам также относятся пар**ы** металлов, ксенон, криптон и радон. Для любого идеального газа внутренняя энергия пропорциональна температуре:

однако величина  *i* зависит от того, сколько атомов в молекуле, и еще от ряда условий.

**Методическое указание 9.** Формула (5) показывает, что постоянном количестве вещества . Однако поскольку формулы (7), а тем более определения величины *i* в школьной физике нет, то значит, если в задаче не сказано, что газ одноатомный (прямо или через название одного из одноатомных газов), то внутреннюю энергию надо будет найти каким-то иным способом.

**Методическое указание 10**. Во всех задачах по молекулярной физике надо использовать только абсолютную температуру , измеряемую в К (кельвинах). Именно абсолютная температура стоит в формулах (1) – (7) и является мерой кинетической энергии. Исключение составляют задачи, в которых важна только разность температур (в кельвинах и градусах Цельсиях разница температур одинакова). Обычно это задачи на тепловой баланс. Однако не будет ошибкой и в этих задачах использовать . Также важно заметить, что обозначения градуса (°) не используется для абсолютной температуры. Пишут: 100 °С, но 373 К.

Внутренняя энергия идеального газа определяется только макроскопическими параметрами. Изменение внутренней энергии не зависит от того, в ходе какого процесса мы перешли из одного состояния в другое. Однако от вида процесса перехода зависит работа системы. Элементарная работа в термодинамике по определению равна

***Замечание 3****. Вывести формулу (8) из свойств одноатомного газа можно, если рассмотреть газ в цилиндре под поршнем площади S. Механическая работа будет по определению равна F∆x, где F − сила давления газа на поршень,* ∆*x –перемещение поршня. Учитывая, что p=F*/*S, а ∆V=∆x*∙*S*, *получим формулу (8).*

– работа, совершаемая системой (газом). Она находится в однозначном соответствии с − работой, проделанной над системой сторонними силами:

*.* (9\*)

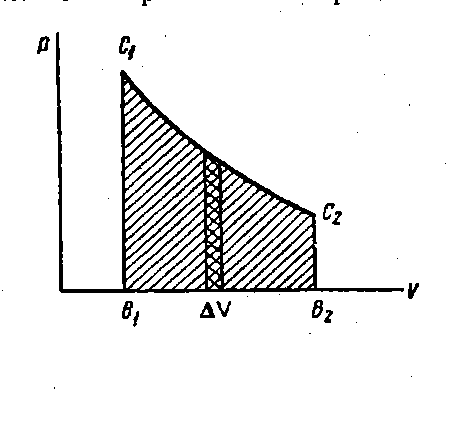
Формула (8) позволяет определить работу газа только при постоянном давлении (в изобарном процессе). Кроме того очевидно, что в изохорном процессе . Однако любой процесс можно разбить на множество небольших процессов, в каждом из которых можно считать давление *p* постоянным. Если изобразить какой-либо процесс в координатах *pV*, и взять очень маленькую величину , то можно считать прямоугольником на графике. На рис. 2 справа соответствует четырехугольник, выделенный двойной штриховкой, но чем меньше , тем больше четырехугольник будет прямоугольным. На рис. 2 видно, что если сложить все такие прямоугольники, то получим площадь фигуры под графиком процесса (на рисунке заштриховано). Таким образом, модуль работы в любом процессе можно найти, определив площадь под кривой в координатах *pV***.** Знак работы газа легко определить по тому увеличивается ли в процессе объем: если *V* растет, , если *V* уменьшается.

Рис 2. Работа совершаемая газом при расширении, изображенная как площадь фигуры С1 С2 В2 В1.

**Методическое указание 11.** Однако найти площадь под многими кривыми, такими как гипербола (гиперболой является изотерма), можно только используя интеграл. ЕГЭ по физике не предусматривает знание интегрального исчисления. Поэтому в задачах ЕГЭ непосредственно найти работу можно только в изобарном и изохорном процессе, а также в процессе, когда *p∼V* (в координатах *pV* процесс изображается как прямая линия).

**Методическое указание 12**. Работа связана с площадью, только если процесс изображен на графике в координатах *pV***.**

**Первый закон термодинамики**

Первый закон термодинамики выполняется для всех систем и во всех фазах. Он гласит, что

где (или просто ) − тепло, передаваемое системе в процессе 12, ( – работа, совершаемая системой, – изменение внутренней энергии системы:

**,** (11)

– внутренняя энергия в состоянии 2, – внутренняя энергия в состоянии 1. Первый закон термодинамики является формулировкой закона сохранения энергии, в которой учтено, что теплота – это форма энергии, и что энергия может быть запасена в системе (внутренняя энергия).

Тепло, отданное системой окружающей среде (, находится в простом и однозначном соотношении с :

Обозначение работы в формулах (8) и (10) соответствуют кодификатору, но некоторые авторы школьных учебников используют другую систему обозначений для работы системы и работы над системой. При этом очевидно, что первое начало можно записать в иной форме, используя формулу (9). Например

Поэтому важно разобраться, какое именно тепло и работа стоят в формуле (10), что имеет знак плюс, а что минус. Для понимания полезно рассмотреть энергетический баланс человека, который, очевидно, является термодинамической системой. Несколько упрощенно можно сказать, что в результате множества химических реакций из пищи человек получает тепло . Это тепло идет на увеличение внутренней энергии системы (теплокровные животные большую часть времени имеют температуру выше окружающей среды) и на то, чтобы термодинамическая система “человек” провела работу (сердце, легкие и прочие органы человека работают, даже когда он спит). Видно, что энергетический баланс следующий: слева в формуле (10) − приход (полученное тепло ), справа − расход (увеличение внутренней энергии и работа системы ).

**Методическое указание 14.** Из-за возможности использования разных обозначений величин при решении задач с развернутым ответом на тему термодинамики обязательно следует написать словами, что имеется в виду под и – соответственно, работа **газа**, или работа, проделанная **над газом,** тепло, **полученное** системой или **отданное** системой. По правилам всегда следует писать определения введенных величин, но в данном случае это особенно важно

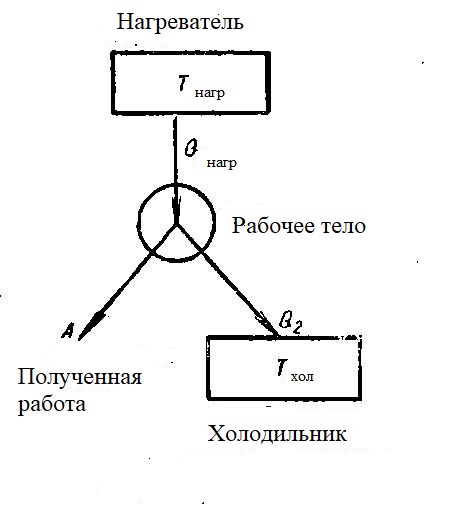
Если система теплоизолирована (находится в очень хорошем термосе), то эта система не получает тепло от окружающей системы и не отдает его: Такой процесс называется **адиабатическим**, а кривая – адиабатой (смотри таблицу 1). Согласно формуле (10) для адиабаты выполняются соотношения:

В изохорном процессе работа равна нулю, а значит . Если ввести молярную теплоемкость , которая по определению равна , то выражение (5) для внутренней энергии идеального газа (независящей от процесса перехода) можно записать в виде

, (15)

где – теплоемкость в изохорном процессе. Формула (15) в кодификаторе приводится, как формула для одноатомного идеального газа, однако она верна для любого идеального газа, при учете того, что о значение зависит от количества атомов в молекуле.

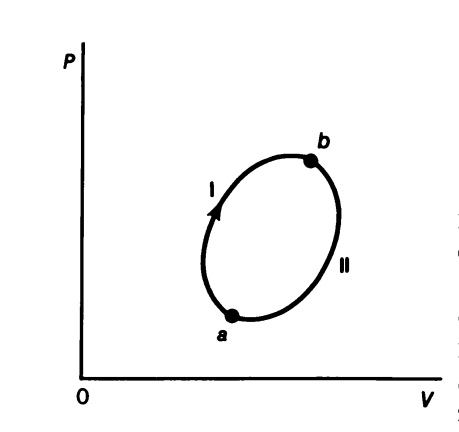
.

  **Принцип действия тепловых машин**

Тепловыми машинами (двигателями) называют устройства, которые превращают теплоту (внутреннюю энергию топлива) в механическую работу. Тепловые машины получают тепло от нагревателя (внешнего источника тепла), совершают работу неизбежно отдавая при этом тепло холодильнику (окружающей среды). Тепловые машины совершают повторяющийся процесс, который называется циклическим. Начало и конец цикл совпадают, поэтому цикл изображается на диаграмме процессов замкнутой кривой. Цикл может пройти как по часовой стрелке, так и против часовой стрелки. Направление цикла обязательно указывают стрелками, буквами или цифрами.

Рис. 3. Схема действия тепловой машины

Полученная механическая работа может быть использована непосредственно (в автомобиле работа передается на вращение коленвала) или превращена в электрическую энергию с помощью электрического генератора. Для того, чтобы получить работу в тепловой машине, надо затратить тепло, получив его от сжигания топлива, распада ядерного материала, геотермального источника… Разумеется, мы заинтересованы, чтобы механической работы было больше, а топлива ушло меньше. Поэтому коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины равен по определению

  **. (16)**

Рассмотрим циклический процесс (рис. 4). Разделим процесс на две участка, так чтобы на участке I система получала тепло, а на участке II – отдавала. Запишем на участке I (ab) и II (bа) первый закон термодинамики (10), соответственно, как

Рис. 4. Схематическое изображение цикла в координатах *pV*

Сложим формулы (17) и (18). Получим уравнение

На участке II , поэтому тепло переданное холодильнику , На участке I система получает тепло от нагревателя (,). , полная работа за цикл . В результате получим, что для любого циклического процесса:

Тогда КПД, определяемое по формуле (16), будет равно

  **Работа в циклическом процессе. Направление цикла**

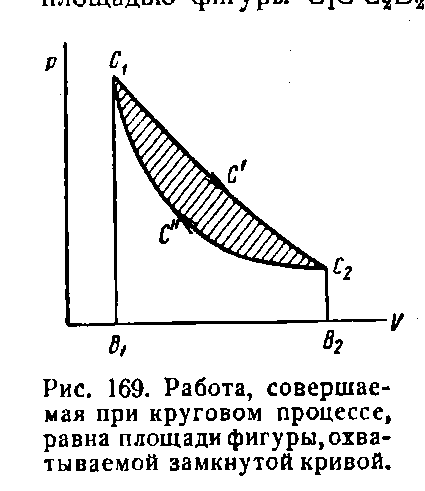
В циклическом процессе рабочее тело (это не обязательно газ) будет совершать положительную работу (), пока объем будет расти и отрицательную, когда объем будет уменьшаться (). На рис. 5 площадь на графике *pV*, соответствующая обозначена косой штриховкой, а площадь соответствующая обозначена вертикальной штриховкой. Работа за цикл равна , и очевидно это та площадь, где есть только косая штриховка (на графике обозначена как полезная работа). На рис. 6 можно увидеть работу в некотором циклическом процессе. Суммарная работа в циклическом процессе всегда по модулю равна площади, охватываемой замкнутой кривой. Но стоит вопрос в знаке этой работы. Очевидно, рабочее тело совершит за цикл полезную работу, если >. Для этого та часть кругового процесса, когда объем увеличивается, должна быть расположена на графике *pV* выше, чем та часть кругового процесса, когда объем уменьшается. При обходе цикла по часовой стрелке в систему поступает большее количество теплоты, чем выходит из нее, работа газа при этом положительна. Однако тепловую машину можно включить и в обратном направлении. Тогда это будет холодильная машина (в быту она и называется холодильником). О реальных тепловых машинах и устройстве холодильной машины можно прочесть в Приложении II.

Рис. 5. Работа в циклическом процессе.

Рис. 6. Полезная работа в циклическом процессе.

**Второй закон термодинамики**

Первый закон термодинамики говорит, что нельзя получить больше энергии, чем потратить (то есть нельзя построить вечный двигатель первого рода). Но было бы замечательно, если бы можно было создать тепловой двигатель, который бы все полученное тепло переводил бы в работу. Однако такое устройство (вечный двигатель второго рода) невозможно по второму закону термодинамики, который звучит так:

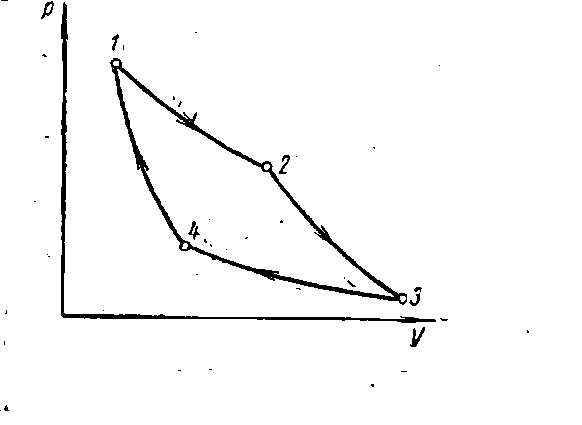
*Невозможно создать вечный двигатель второго рода, то есть, такой, который бы полностью превращал теплоту в механическую работу.*

Эта формулировка второго закона ведет свое началоот середины XIX века. В формулировке Томсона (с 1851 ставшего лордом Кельвином)второй закон термодинамики звучал так:

*Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара.*

Формулировок второго закона несколько, в вузовских курсах молекулярной физики доказывается, что все одни равнозначны и вытекают один из другого. В формулировке Клаузиса второй закон термодинамики звучит так:

*Теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к телу более нагретому.*

Важно отметить, что речь идет о невозможности **самопроизвольного** перехода, когда нет других изменений в окружающих телах. Легко можем убедиться, что в холодильнике мороженое охлаждается, а окружающая среда при этом нагревается (потрогайте заднюю стенку холодильника). Однако это процесс не идет самопроизвольно (холодильник нужно включить в сеть), зато самопроизвольно мороженое растает, если оставить его в теплой комнате.

Вопрос о самопроизвольных переходах подводит нас к важному понятию обратимости. Пусть система совершает какой-либо процесс, переходя из состояния А в состояние В. Процесс называется обратимым, если потом можно вернуть систему в исходное состояние А хотя бы одним способом, так чтобы во всех остальных телах не произошло никаких изменений. В противном случае процесс необратимый. Понять, что такое обратимый процесс проще на примере механических процессов. Возьмем мяч и сбросим его без начальной скорости с высоты *H*. Если удар мяча о пол будет абсолютно упругим, то мяч подпрыгнет на высоту *H*. Это и будет обратимым процессом, однако если удар не абсолютно упругий, то для того, чтобы мяч достиг высоты *H*, его надо будет каким-либо подбросить. А это нельзя сделать, не меняя состояние других тел. Точно также в термодинамике – обратный необратимому процессу процесс может проходить только как часть другого, более сложного процесса. Обратимый процесс должен протекать очень медленно, для того, чтобы система смогла последовательно перейти из одного равновесного состояния в другое.

Рис. 7. Цикл Карно. Процессы 12 и 34 − изотермы, процесс 23 и 41 − адиабаты

**Методическое указание 15.** В условиях задач часто пишут, что процесс проходит медленно. Именно так подчеркивается, что процесс равновесный или почти равновесный. Однако в некоторых задачах этого условия нет, но оно подразумевается, так как в школе не изучают неравновесные процессы

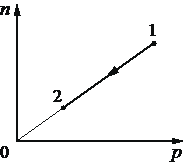
Следствием второго закона термодинамики (доказательство выходит за школьный курс физики и математики) является то, что максимальный КПД достигается в процессе Карно (рис. 7), состоящим из двух адиабат и двух изотерм (на рисунке справа). КПД такого цикла () зависит только от температуры нагревателя и холодильника:

**. (22)**

**Методическое указание 16.** Задачи непосредственно на второй закон термодинамики, скорее всего, будут задачами на формулировку второго закона. Однако могут быть задачи на цикл Карно, обычно в них говорится о максимально возможном КПД при заданных температурах холодильника и нагревателя. Также могут быть задачи на поиск КПД заданного цикла.

***Замечание 4.*** *В физике первый и второй закон термодинамики называется первым и вторым началом термодинамики. Кроме них есть еще третье начало термодинамики, иногда выделают и нулевое начало термодинамики. Нулевое начало термодинамики говорит о том, что если две системы находятся в состоянии теплового равновесия с третей системой, то они находятся в тепловом равновесии друг с другом (и у всех 3 систем одна температура). По третьему началу термодинамики невозможно достичь абсолютного нуля.*

**Примеры решения задач**

**Задача 1.** В цилиндре при 20°С находится 2 кг воздуха под давлением 9,8×105 Па. Какова работа воздуха при его изобарном нагревании на 100°С? Ответ выразите в килоджоулях (кДж) и округлите до целых.

**Решение**

Используем формулу (8) для изобарной работы газа и формулу (5).

![](data:None;base64,)≈57,3·103Дж=57 кДж.

**Ответ**: 57.

**Методическое указание 17.**  В этой задаче есть лишнее условие. Так бывает

**Задача 2**. Из приведённого ниже списка выберите **два** правильныхутверждения, характеризующих процесс 1−2, и укажите их номера.

1) Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа остаётся неизменной.

2) Плотность газа уменьшается.

3) Абсолютная температура газа увеличивается.

4) Происходит изотермическое сжатие газа.

5) Среднеквадратическая скорость теплового движения молекул газа увеличивается.

**Решение.** Так как один из параметров – концентрация, то сразу можно получить информацию об объеме и плотности, проверив утверждения **2** и **4**. Концентрация уменьшается, следовательно, объем растет, а плотность уменьшается. Таким образом, утверждение **2** верно, а утверждение **4** – не верно. Для дальнейших рассуждений нужно использовать уравнение идеального газа, в виде *p* = *nkT*. Из графика видно, что *p* ~*n*, следовательно. *T*=const., значит утверждение **3** не верно. Если температура постоянна, то очевидно, постоянны средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа и среднеквадратичная скорость теплового движения молекул газа. Следовательно, утверждение **1** верно, утверждение **5** неверно.

**Ответ**: 12

**Методическое указание 18**. Всегда лучше проверить все варианты. Если допущена ошибка, то количество правильных ответов не совпадает с тем, что сказано в условии. Полезно также писать краткое решение на черновике (используя формулы, условные знаки, сокращения...).

**Задача 3.**  Объем постоянной массы идеального одноатомного газа увеличился при постоянном давлении 5×105 Па на 30 л. Насколько увеличилась внутренняя энергия газа? Ответ выразите в кДж и округлите до десятых.

**Решение:**

![](data:None;base64,),

но согласно уравнению Менделеева-Клапейрона и тому, что *p*=const.

![](data:None;base64,), ![](data:None;base64,).

Учтя, что 1л = 10-3м3 , получим для одноатомного идеального газа.

![](data:None;base64,)

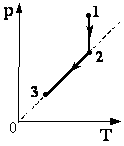
Подставим числа

![](data:None;base64,)

**Ответ** 22,5.

**Методическое указание 19**. В задачах такого типа, важно внимательно посмотреть на единицы измерения всех величин и требования к ответу.

**Методическое указание 20**. Значение констант и других справочных величин всегда берите с первых страниц КИМа, даже если вам кажется, что вы помните значение этой величины. В КИМе константы могут быть приведены с другой точностью.

**Задача 4** . Один моль идеального одноатомного газа сначала изотермически расширился (*Т*1 = 300 К). Затем газ охладили, понизив давление в 3 раза (см. рисунок). Какое количество теплоты отдал газ на участке 2 - 3? Ответ выразите в Дж.

**Решение.** Об участке 1−2 из условия известно только, что ![](data:None;base64,)=300К, то есть мы знаем ![](data:None;base64,)

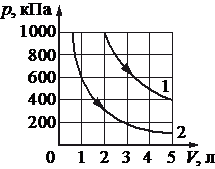
Рассмотрим процесс 2−3. Из рисунка ясно, что *p*~*T* . Значит это изохорный процесс. Работа в этом процессе равна нулю. Осталось найти температуру. Так как ![](data:None;base64,). Итого *T*3=100К => ![](data:None;base64,)=200 К => ![](data:None;base64,)**.**

**Ответ**: 2493.

**Задача 5.**  В сосуде, закрытом поршнем, находится идеальный газ. Процесс изменения состояния газа показан на диаграмме (см. рисунок). Как менялся объем газа при его переходе из состояния  А  в состояние  В?

**Решение.** Каждое из состояний от А до В находится на какой-либо изохоре (изображены пунктиром), где *p*=α*T*. Очевидно, что коэффициент α уменьшается при переходе от А до В. Очевидно, что для идеального газа α~![](data:None;base64,). Значит объем газа увеличивается.

**Ответ:** Объем газа увеличивался

**Задача 6.** На рисунке приведены графики двух изотермических процессов, проводимых с одной и той же массой одноатомного идеального газа.

Выберите два верных утверждения о процессах, происходящих с газом.

1) Процесс 1 идёт при более высокой температуре.

2) В процессе 1 внутренняя энергия газа увеличивается.

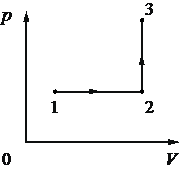
3) Оба процесса идут при одной и той же температуре.

4) Процесс 2 идёт при более высокой температуре.

5) В процессе 1 объём газа увеличивается.

**Решение.** Так как количество газа постоянно, то , Очевидно, что в процессе 1 произведение больше, чем в процессе 2. Значит верно утверждение 1, а 3 и 4 неверно. Утверждение 2 вообще не соответствует изотермическому процессу. Утверждение 5 верно, что ясно из стрелок на графике.

**Ответ**:15

** Задача 7.** Один моль одноатомного идеального газа участвует в процессе 1–– 2 – 3, график которого изображён на рисунке в координатах *p – V,* где *p*  – давление газа, *V*  – объём газа. Как изменяются абсолютная температура газа *Т* в ходе процесса 1 – 2 и плотность газа ρ в ходе процесса 2– 3? Масса газа остаётся постоянной  Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

|  |  |
| --- | --- |
| 1) | Увеличивается |
| 2) | Уменьшается |
| 3) | не изменяется |

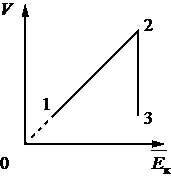
 Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

|  |  |
| --- | --- |
| Абсолютная температура  газа в ходе процесса 1–2 | Плотность газа  в ходе процесса 2–3 |

**Решение.** Поскольку график приведен в координатах *pV,* то так как плотность , получим, что при постоянном количестве вещества . Таким образом, плотность газа  в ходе процесса 1–2 уменьшается, а плотность газа  в ходе процесса 2–3 не изменяется. При постоянном количестве вещества . Произведение *pV* увеличивается в ходе процесса 1–2 и 2–3, а значит, увеличивалась и

**Ответ**

|  |  |
| --- | --- |
| Абсолютная температура  газа в ходе процесса 1–2 | Плотность газа  в ходе процесса 2–3 |
| 1 | 2 |

**Задача 8 (качественная задача, С).** На графике представлена зависимость объёма постоянного количества молей одноатомного идеального газа от средней кинетической энергии теплового движения молекул газа. Опишите, как изменяются температура и давление газа в процессах 1−2 и 2−3. Укажите, какие закономерности Вы использовали для объяснения.

**Возможное решение**

1 Газ идеальный. Значит согласно уравнению молекулярное-кинетической теории средняя квадратичная скорость молекулы

Здесь, – масса молекулы, – средняя квадратичная скорость молекулы. Для одноатомного газа

и, значит, c точностью до коэффициента по оси х отложена абсолютная температура . Из графика видно, что абсолютная температура растет в процессе 1-2 и постоянна в процессе 2−3.

2 Из графика (пунктирная линия начинается в нуле) следует, что в процессе 1-2

const

Или , что соответствует, согласно уравнению Менделеева-Клапейрона (уравнению идеального газа), изобарическому процессу 1-2. В процессе 2-3 согласно уравнению Менделеева-Клапейрона температура постоянна, значит const. Объем *V* уменьшается, значит, давление растет. Давление постоянно в процессе 1−2 и растет в процессе 2−3.

**Методическое указание 21.** Это возможный вариант решения. Смотрите демонстрационные варианты за последние годы.

**Задача 9.** Цилиндрический сосуд разделён лёгким теплоизолирующим поршнем на две части. В одной части сосуда находится аргон, в другой –  гелий. Концентрация атомов аргона в 2 раза больше, чем атомов гелия. Поршень может двигаться без трения. Определите отношение средней кинетической энергии теплового движения атома аргона к средней кинетической энергии теплового движения атома гелия при равновесии поршня.

**Решение**. Обозначим концентрации аргона и гелия, соответственно, как *n*Ar и *n*He, температуры как *T*Ar и *T*He, давления как  *p*Ar и *p*He. Поршень может двигаться без трения, означает, что при его движении нет потерь энергии. Раз поршень легкий, то его весом можно пренебречь, а, значит, по условию равновесия поршня, давление аргона равно давлению гелия (*p*He*= p*Ar). К тому же поршень теплоизолирующий – это значит, что температура аргона  *T*Ar может быть не равна температуре гелия. Воспользуемся формулой *p*=*nkT.* Тогда *T*Ar/ *T*He=(*p*Ar∙*n*He)/*(p*He∙*n*Ar).

После сокращения получим

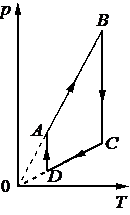
*T*Ar/ *T*He=*n*He/*n*Ar *=*0,5.

Обозначим кинетическую энергию одного атома E (*E*Ar и *E*He). Согласно формуле (1) и методическому указанию 9 *E*~*T*,

*E*Ar/ *E*He= *T*Ar/ *T*He=0,5.

**Ответ**: 0,5

**Методическое указание 22**. В задачах с кратким решением важно найти отношения правильных величин. Не экономьте время на записи решения такой задачи в черновике − заметное количество учеников находит выражение для *T*He/*T*Ar вместо *T*Ar/ *T*He.

**Задача 10.**  На рисунке показан график циклического процесса, проведённого с одноатомным идеальным газом, в координатах *р*––*Т*, где *р* – давление газа, *Т* – абсолютная температура газа. Количество вещества газа постоянно. Из приведённого ниже списка выберите два правильных утверждения, характеризующих процессы на графике

1) Газ за цикл совершает положительную работу.

2) В процессе АВ газ получает положительное количество теплоты.

3) В процессе ВС внутренняя энергия газа уменьшается.

4) В процессе СD над газом совершают работу внешние силы.

5) В процессе DA газ изотермически расширяется.

**Решение.** Так как график приведен в координатах *р*–*Т*, то сначала рассмотрим утверждения 3 и 5, так как в них фактически говорится о температуре (*T*~*U*). Можно сразу сказать, что утверждение **3** **не верно**, так как в процессе ВС температура не менялась, а значит, не менялась и внутренняя энергия. Рассмотрим утверждение 5. Процесс DA действительно изотермический, но в этом процессе растет давление, а значит, уменьшается объем, так как в изотермическом процессе *pV*=const*..* Итак,утверждение **5** **не верно**.

Утверждение **1 верно**, поскольку цикл идет по часовой стрелке. Осталось выбрать утверждениями 2 и 4. Сначала рассмотрим утверждение 2. Температура в процессе ВС растет, поэтому растет и внутренняя энергия. Пунктирная линия показывает, что *p*~*T,* п а значит (согласно уравнению Менделеева−Клапейона) объем постоянен. Тогда работа *A*AB=0. Итак *Q*AB=Δ*U*AB>0. Значит, утверждение **2 верно**. Убедимся, что утверждение 4 не верно. Очевидно что, также как процесс ВС, процесс СD − изохорный и *A*BС=0.

**Ответ: 12**

**Задача** **11**. При изучении процессов, происходящих с гелием, ученик занёс в таблицу результаты измерения температуры и давления одного и того же количества газа в различных равновесных состояниях. Какие **два** из утверждений, приведённых ниже, соответствуют результатам этих опытов? Газ считать идеальным.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | №  состояния | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | *р*, кПа | 100 | 90 | 75 | 50 | 55 | 75 | 100 | | *t*, °С | 27 | 27 | 27 | 27 | 57 | 177 | 327 |   1) Объём газа в состоянии 4 в 2 раза меньше объёма газа в состоянии 1.  2) В состояниях 4––7 объём газа был одинаковым.  3) Внутренняя энергия газа в состоянии 6 в 3 раза больше, чем  в состоянии 5.  4) При переходе от состояния 2 к состоянию 3 в ходе изотермического процесса газ получал тепло.  5) При переходе от состояния 5 к состоянию 6 в ходе изохорного процесса газ совершал работу.  **Решение**. Рассмотрим сначала процесс 1–4. Он изотермический, это значит, что полученное тепло *Q*23 = *A*23, а *pV*=const*.*  Давление в процессе 1–4 уменьшалось, а, значит, объем увеличивался и *A*14>0. Получаем, что утверждение 1 не верно, а 4 верно. Теперь рассмотрим процесс 4–7. В этом процессе росли давление и абсолютная температура. Найдем отношение давлений *p*5/*p*4=55/50=1,1=330/300=*T*5/*T*4; *p*6/*p*4=75/50=1,5=450/300=*T*6/*T*4; *p*7/*p*4=100/50=2=600/300=*T*7/*T*4. В процессе 4–7 *T*/*p*=const, значит *V*=const. Утверждение 2 верно, утверждение 3 точно не верно (*T*~*U*). Что касается утверждения 5, то в ходе изохорного процесса газ никогда не совершает работу. Это утверждения всегда неверно.  **Ответ:** 2,4 |
| **Методическое указание 23.** На первый взгляд достаточно найти соотношение *p*7/*p*4. Однако есть небольшая вероятность, что зависимость нелинейная, поэтому желательно проверить все соотношения. |

**Задача 12.** На графиках А и Б приведены диаграммы *p*–*T* и *p*–*V* для процессов 1–2 и 3–4 (гипербола), проводимых с 1 моль гелия. На диаграммах *p* – давление, *V* – объём и *T* – абсолютная температура газа. Установите соответствие между графиками и утверждениями, характеризующими изображённые на графиках процессы. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго столбца и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

|  |  |
| --- | --- |
| А | Б |
| undefined | undefined |

**Утверждения**

1) Над газом совершают работу, при этом газ отдаёт положительное количество теплоты.

2) Над газом совершают работу, при этом его внутренняя энергия увеличивается.

3) Газ получает положительное количество теплоты, при этом его внутренняя энергия увеличивается.

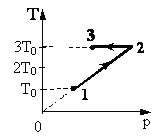
4) Газ получает положительное количество теплоты, при этом его внутренняя энергия не изменяется

|  |  |
| --- | --- |
| А | Б |
|  |  |

**Решение.** Сразу можно сказать, что в процессе изображенном на графике А растет внутренняя энергия, а в процессе, изображенном на графике Б работа газа положительна. Отсюда следует, что графику А могут соответствовать утверждения 1,2,3, а графику Б – 3,4. Проверив по клеточкам на графике Б произведение  *pV* легко убедиться что *pV*=const.Следовательно, *T*=const. Графику Б соответствует утверждение 4. Вернемся к графику А . На нем  *p* уменьшается, *T*=const, значит *V* увеличивается => газ совершает работу. Тогда утверждения 1 и 2 не верны, Проверим утверждение 3. Газ совершает работу, его температура растет, а значит Δ*U>*0 . Тогда по формуле (10) .

|  |  |
| --- | --- |
| А | Б |
| 3 | 4 |

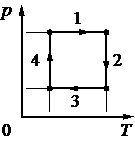
**Ответ*:* 34**

**Задача 13 (C).** Один моль одноатомного идеального газа совершает процесс 1 − 2−3 (см. рисунок, где *Т*0 = 100 К). На участке   2 − 3 к газу подводят 2,5 кДж теплоты. Найдите отношение работы *А*123, совершаемой газом в ходе процесса, к количеству поглощенной газом теплоты *Q*123.

**Решение.** На участке 1 −2  *T*/*p=*const (это видно, если посмотреть на пунктирную линию), значит процесс изохорный => *А*12=0 и  *Q*12= Δ*U*12.Тогда *А*123= *А*23. Так как процесс 2−3 изотермический то Δ*U*23=0 => *А*23= *Q*23

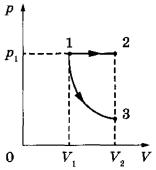
По условиям задачи  *Q*23 =2,5 кДж => *А*123=.2,5 кДж. Осталось найти *Q*123. По определению *Q*123=*Q*12+ *Q*23= Δ*U*12+ *А*23. Найдем Δ*U*12, учитывая, что ![](data:None;base64,), получим, что ![](data:None;base64,)**.**  *Q*123=2,5 кДж+2,5 кДж. Окончательно получим *А*123/ *Q*123= 2,493/5≈0,5.

**Ответ** 0,5.

**Задача 14.** На рисунке показан циклический процесс изменения состояния постоянной массы одноатомного идеального газа. На каком участке работа внешних сил над газом положительна и равна отданному газом количеству теплоты?

**Решение.** Важно понять из условия о какой работе и количестве теплоты идет речь. В данном случае это работа **внешних** сил **над газом**  и **отданном** газом количеству теплоты. и , а значит и . Из следует, что *V* уменьшается/, Из условия, что следует , а значит *T*=const. Этому условию соответствует 2 и 4 процесс. Если , что соответствует уменьшению *V* . Из таблицы 1 “изопроцессы” (или прямо из уравнение Менделеева-Клапейрона) ясно, что при *T*=const *V* ~1/*p*. Давление растет в процессе 4, значит *V* уменьшается, работа газа отрицательна и так как *T*=const, то

**Ответ** 4.

**Задача 15 (C).** Одно и то же постоянное количество одноатомного идеального газа расширяется из одного и того же начального состояния *р*1, *V*1 до одного и того же конечного объёма *V*2 первый раз по изобаре 1–2, а второй – по адиабате 1–3 (смотри рисунок). Отношение работы газа в процессе 1–– 2 к работе газа в процессе 1 – 3 равно *A*12/ *A*13 = *k* = 2. Чему равно отношение *х* количества теплоты *Q*12, полученного газом от нагревателя в ходе процесса 1 – 2, к модулю изменения внутренней энергии газа *|U3* −*U*1|?

**Решение.** В изобарическом процессt работа

(15.1).

Для адиабаты выполняется условие

(15.2).

По первому закону термодинамики

. (15.3).

Здесь – изменение внутренней энергии в процессе 13, – изменение внутренней энергии в процессе 12. Заметим, что раз *V* увеличивается, то и из (15.2) получим, что

По условиям задачи *.* Подставив в *x* формулу (15.3) и учтя (15.4) получим, что

(15.5)

Из условия следует, что первое слагаемое в формуле (15. 5) равно *k*. Найдем связь между и . Так как газ идеальный и одноатомный, то => учитывая (15.1)

. (15.6)

Значит формула (15.5) переходит в выражение

.

Из условия следует, что

**Ответ:**

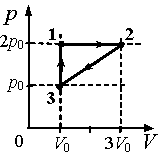
**Методическое указание 23.** Это возможная запись решения. Смотрите актуальные демонстрационные варианты. Не забывайте писать нужные формулы (и не писать ненужные), писать названия законов физики и обозначать все введенные величины. Обратите внимание, что сначала надо получить ответ, содержащей *k*, а потом уже учесть, что *k*=2.

**Задача 16** Рабочее тело тепловой машины за цикл получает от нагревателя количество теплоты, равное 100 Дж, и совершает работу 60 Дж. Каков КПД тепловой машины? Ответ укажите в процентах

**Решение.** Воспользуемся формулой (16):=0,6. 0,6\*100=60%.

**Ответ**: 60.

**Методическое указание 24.** В такой задаче легко ошибиться в 10 раз. Поэтому лучше проверяйте себя.

**Задача 17 (С).** С одноатомным идеальным газом неизменной массы происходит циклический процесс, показанный на рисунке. За цикл газ совершает работу *A*ц = 5 кДж. Какое количество теплоты газ получает за цикл от нагревателя?

**Решение.** Очевидно, что сначала надо найти КПД. Чтобы сосчитать КПД, есть по крайне мере два способа. Обозначим, в обоих способах решения, *Q* − полученное тепло, – работа газа, – число молей. , где – масса, – молярная масса газа. Раз масса неизменна, то также неизменно. Индекс внизу указывают на процессы (3−1,1−2,2−3).

**Первый способ.** Из графика ясно, что величина *pV,* а значит, по закону Менделеева-Клапейрона, *T* увеличивается на участке 3−1 и 1−2, таким образом, идеальный одноатомный газ увеличивает внутреннюю энергию в процессах 3−1 и 1−2 (). Процесс 13 изохорический, из чего следует, что работа . Объем увеличивается в процессе 1−2 => . Объем уменьшается в процессе 2−3 => . Таким образом, по первому закону термодинамики ясно ), что идеальный одноатомный газ получает тепло в процессах 3−1−2 => =+Δ*U*32. Газ одноатомный идеальный, процесс 12 изобарический, значит, из рисунка, , .

Итого=11,5**. *A*ц** равно площади замкнутой кривой => *A*ц =. По формуле (16) КПД =1/11,5.

**Второй способ:** Напишем внутреннюю энергию для трех точек =; =; =;

По первому началу термодинамики. .

Очевидно, что

.

По формуле (21) КПД=()/

**Общее решение**

По определению КПД  *A*ц/η.

**Ответ** 57,5 кДж

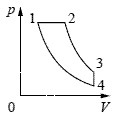
**Методическое указание 25.** Достаточно одного способа, но если есть время, то два способа, всегда лучше, чем один, ибо позволяют реже ошибаться.

**Задача 18.** Рабочее тело тепловой машины с КПД 8% совершает за один цикл работу 20 кДж. Какое количество теплоты получает рабочее тело от нагревателя за цикл? Ответ дайте в Дж.

**Решение.** Воспользуемся формулой (16): . По условию Следовательно ==1600 Дж или

==1,6 кДж=1600Дж. Проверим КПД 1,6/20=0,08.

**Ответ**: 1600

**Задача 19 (С).** Тепловой двигатель использует в качестве рабочего вещества 1 моль идеального одноатомного газа. Цикл работы двигателя изображён на *pV*−диаграмме и состоит из двух адиабат, изохоры, изобары. Зная, что КПД этого цикла η =15%, а минимальная и максимальная температуры газа при изохорном процессе *t*min = 37 °C и *t*max = 302 °C, определите количество теплоты, получаемое газом за цикл.

**Решение.** Газ обменивается теплом с окружающей средой только в процессах 1-2 и 3-4, а процессы 2-3 и 4-1, очевидно, адиабаты. Из рисунка видно, что в процессе 1-2 рабочее тело получает тепло , и это изобарный процесс. В процессе 34 рабочее тело тепло отдает . И это изохорный процесс => =0 . Газ одноатомный идеальный . По определению КПД . => =>

.265)(1-0,15)3886 Дж

Ответ: 3886 Дж.

**Методическое указание 26.** Даже если в задаче ν=1 моль не сокращайте его, поскольку получится неправильная размерность. имеет размерность Дж/моль.

**Методическое указание 27.** В задаче 17 можно непосредственно посчитать работу и изменение энергии в любом процессе, поскольку в условии есть все данные, но это нельзя сделать уже в задаче 19, так как в условиях даны только две температуры. Каждый раз надо смотреть, что можно взять из условия, и как это поможет найти нужные для ответа величины. Тем более это касается задачи 20. Правильное решение, возможно, удастся найти не сразу, и вы сначала попадете в тупик. Поэтому в задаче 20 продемонстрирован возможный ход поиска решения. Этого поиска решения (выделенного курсивом) в готовом решении быть не должно.

|  |
| --- |
| http://ege.fipi.ru/os11/docs/BA1F39653304A5B041B656915DC36B38/questions/E13.C3.21_28copy1_29/xs3qstsrcCE52EB762F578D3E45FB7B9CABA8F317_1_1355402554.png |

**Задача 20 (С).** Над одноатомным идеальным газом проводится циклический процесс, показанный на рисунке. На участке 1–2 газ совершает работу *А*12 = 1000 Дж. На адиабате 3–1 внешние силы сжимают газ, совершая работу |*A*31| = 370 Дж. Количество вещества газа в *ходе процесса не меняется. Найдите количество теплоты |Qхол*|, отданное газом за цикл холодильнику.

**Решение.** Обозначим давление в точки 3 как , в точке 2 как , а объем в точке 2 как. Рассмотрим график. Процесс 23 изохорный: . Процесс 13 адиабатический: . В процессе 12 как *p*/*V*=const. В циклическом процессе 3 участка, один из которых − адиабата. Остается два участка, на одном из которых газ, очевидно, должен получать энергию, а на другом участке − отдавать. В процессе 12 увеличивается как *V,* так и *pV,* азначит, на участке 12 газ получит тепло*.*  В изохорном процессе 23, напротив, уменьшается давление, а, значит уменьшается температура, то есть уменьшается внутренняя энергия. Таким образом, мы убедились, что на участке 23 газ отдает тепло. *Тогда . Найдена формула для , казалось бы, ответ почти получен, но нет никаких данных о , нельзя непосредственно рассчитать, так как мы ничего не знаем о (а также о температуре в точке 3). Пойдем другим путем. Пока мы не использовали то, что это цикл. Известно,* что в цикле .=> . Как объяснено выше Полная работа является суммой работ в каждом процессе . В изохорном процессе в процессе 31 работа газа отрицательна (объем уменьшается), поэтому , Из первого закона термодинамики . *Теперь смотрим, что известно из условия. Даны и . Значит осталось найти .* По определению внутренней энергии одноатомного идеального газа = . О*днако* значения и из условий неизвестны. Но мы можем рассчитать − это площадь под графиком => /2. *Почти получилось найти связь и . Последнее, что мы пока не учли, это то,* что *и что* давление (видно на графике) растет пропорционально объему. Значит.=>.

/2 = => **.** Собираем все вместе

=3371 Дж.

**Ответ** 3371 Дж.

**Задача 21.** Тепловая машина работает по циклу Карно. Температуру нагревателя тепловой машины увеличили, оставив температуру холодильника прежней. Количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику за цикл, не изменилось. Как изменились при этом КПД тепловой машины и количество теплоты, полученное газом за цикл от нагревателя?

Для каждой величины определите соответствующий характер её изменения:

1) увеличилась 2) уменьшилась 3) не изменилась

Запишите в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины. Цифры в ответе могут повторяться.

|  |  |
| --- | --- |
| КПД тепловой машины | Количество теплоты, полученное газом  от нагревателя за цикл работы |
|  |  |

**Решение**. Воспользуемся формулами 21 и 22. Из формулы 22 следует, что при росте выражение уменьшается, растет. Получим, что КПД растет. Из формулы 21 следует, что чем больше КПД, тем меньше . Раз =сonst, то растет.

**Ответ** 11.

|  |  |
| --- | --- |
| КПД тепловой машины | Количество теплоты, полученное газом  от нагревателя за цикл работы |
| 1 | 1 |

**Методическое указание 28.** Можно получить ответ на первый вопрос, подставив любые две температуры нагревателя. Пусть =100К, . Тогда КПД 50%, =100К, . Тогда КПД 25%. Итого КПД тепловой машины растет при росте Так можно делать потому, что постановка задачи подразумевается однозначный ответ. Не может быть в ответе к задаче с кратким ответом такого, что величина сначала растет, а потом убывает. Однако это вполне возможно в задаче с развернутым решением..

**Приложение I. Система СИ**

**Замечание.** *Данный раздел основан на программе по физике 11 класса.*

**Основные величины**

Измерения – это сравнение измеряемой величины с эталоном. Для определения величины нужен эталон и процедура измерения. Результат измерения зависит от выбора эталона, то есть единицы измерения. Кроме того, все измерения проводятся с погрешностью.

Среди единиц измерения выделяются основные единицы, через которые можно определить все остальные единицы. В современной метрологии (науке об измерениях и погрешностях) общепризнанной является система СИ (система интернациональная). В ней 7 основных единиц измерения − метр (м), килограмм (кг), секунда (с), кельвин (К), ампер (А), моль и кандела (кд). 16 ноября 2018 были проведены существенные изменения в системе СИ – приняты новые определения 4 основных единиц (килограмма, кельвина, моля и ампера) и уточнены определения оставшихся трех основных единиц. Новая система действует с 20 мая 2019 года. Но, разумеется, новые определения были выбраны так, чтобы максимально соответствовать предыдущим определениям величинам, иначе бы пришлось переписывать все справочники, заново градуировать приборы и так далее. Поэтому, чтобы понять нынешние определения, надо рассмотреть историю вопроса.

**Зарождение метрической системы**

Еще до появления современной науки стоял вопрос об единых единицах измерения длины и массы, так как это было важно для целей торговли, чеканки монет, определения норм законов и прочего. Однако единицы измерения носили локальный характер, и далеко не всегда они были едиными даже в одной стране. Во Франции после революции 1789 года новые революционные власти стали решать данную проблему. С одной стороны французы хотели избавиться от «старого порядка» и даже ввели новый революционный календарь с новыми месяцами и отсчетом времени от взятия Бастилии, с другой стороны до революции во Франции разные регионы имели свои законы, и были даже внутренние таможни. Поэтому ничего удивительного, что решили ввести совершенно новые французские единицы длины и массы. После некоторого обсуждения в 1791 году в качестве единицы длины, названной метром (от греческого слова, означающего ме­ру, раз­мер), выбрали де­ся­ти­мил­ли­он­ную час­ть расстояния от северного полюса до экватора по па­риж­ско­му ме­ри­диа­ну. Или, что практически одно и то же, метр – это 1/40000 длины меридиана, проходящего через Париж. По результатам измерения был в 1799 году изготовлена платиновая ли­ней­ка ши­ри­ной 25 мм, тол­щи­ной 4 мм, с рас­стоя­ни­ем ме­ж­ду кон­ца­ми, рав­ным метру. Одновременно было принято решение о том, чтобы считать граммом  массу одного кубического сантиметра чистой воды. Плотность зависит от температуры, поэтому сначала постановили использовать воду при температуре кристаллизации, затем решили, что лучше сделать эталоном массу кубического сантиметра чистой воды при температуре максимальной плотности воды (4°С). Но изготовить единицу в 1 г было неудобно, и изготовили гирю в 1000 г, то есть один килограмм. Килограмм, в результате и стал единицей массы. Изготовленные платиновый метр и платиновый килограмм были 22 июня 1799 сданы в архив Французской республики, поэтому они получили название архивного метра и архивного килограмма.

Измерения меридиана было трудоемким, проводились экспедиции в разные точки Земли (с 1792 по 1799 год), что было особенно сложно во время революционных войн. Позже выяснилось, что при измерении длины меридиана была допущена ошибка. Соответственно, ошибочно был определен метр, а масса 1 дм3 воды оказалась на 0,028 г меньше массы архивного килограмма. Тогда волевым решением уже ставшая международной конференция в 1872 года постановила считать именно архивный метр и архивный килограмм эталонами.

**Метрическая конвенция и система СИ**

Французская метрическая система оказалась весьма удобной, и 20 мая 1875 года была подписана международная Convention du Mètre (метрическая конвенция). Ее тогда подписали 17 стран, включая Францию и Россию. Хранение эталонов было возложено на Международное бюро мер и весов в Севре (Франция). На начало 2019 года 59 стран являются членами организации и еще 42 государства − ассоциированными членами. Быть членом организации − значит платить взносы и участвовать в принятии решений. Сейчас почти во всех странах, в том числе и не принявших Конвенцию, используется метрическая система, а вот в США, которые еще в 1878 году подписали метрическую конвенцию, в быту до сих пор используют футы, фунты, ярды, мили и градусы Фаренгейта. Однако в научных журналах используется система СИ. В России метрическая система была принята в 1918 году.

Каждые несколько лет страны-участницы проводят Генеральные конференции по мерам и весам, на которых обсуждают проблемы, вносят изменения в определения величин, добавляют новые величины. В 1889 на 1-й Генеральной конференции и по мерам и весам были приняты международные эталоны килограмма и метра, а в 1960 на 11-й конференции утверждена международная система единиц (СИ, SI). Рассмотрим каждую из единиц СИ.

**Секунда**

Секунда − самая древняя единица в СИ. Появилась она при измерении углов, как 1/60 минуты (1/3600 градуса). Со средних веков секунда известна как единица измерения времени (хотя у часов тогда не было даже минутной стрелки). Изначально секунду определили как 1/86400 (3600∙24) средних солнечных суток. Однако Земля вращается не совсем равномерно, и с повышением точности часов такая единица стала неприемлемой. В 1956 года секунда была определена как 1/3556925,9747 доля тропического года 1900. Затем была подобрана наиболее близкая величина, которую можно обнаружить в природе, и с 1967 год секунда **− это  192 631 770 периодов колебаний атома цезия-133** (соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния этого атома). Но даже такого определения, в котором сказано, о каком цезии, и о каком конкретно энергетическом переходе идет речь, было недостаточно, и в 1997 было добавлено, что атом цезия должен находится в покое при 0 К (чтобы не было вынужденного излучения). Цезиевые часы имеют погрешность всего 0,01 с за 15 лет.

**Метр**

После подписания в 1875 Метрической конвенции в Лондоне были изготовлены 31 брус из сплава 90% платины и 10% иридия. Они были более совершенными, чем архивный метр. Поперечное сечение имело Х-образную форму для необходимой прочности на изгиб. Длина линейки была 102 см, а вблизи ее концов было нанесено 3 штриха, расстояние между которыми 0,5 мм (рис. 8). Метр определяется как расстояние между осями средних штрихов. В 1889 году (на первой Генеральной конференции по мерам и весам) один из 31 платиново-иридиевых брусьев, наиболее близкий к архивному метру, был выбран как новый международный эталон метр. Он остался во Франции, а остальные эталоны были распределены между странами, подписавшими Метрическую конвенцию. Два национальных эталона были получены Россией. С тех пор они находились в Петербурге/Петрограде/Ленинграде, а в 1918 году после введения в России метрической системы один из двух эталонов был выбран национальным эталоном метра. Однако, так как вскоре точность измерений длины превысила точность, которую можно было достичь с помощью платиново-иридиевого бруса, с 1927 метр стал равен 1 553 164,13 длины волны красной линии кадмия в воздухе (при 0,15% углекислого газа при температуре 15°С, давлении 101,3 кПа). Затем в 1960 году метр стал равен 1 650 763,73 длин волн излучения в вакууме, соответствующей оранжевой линии спектра криптона-86 (при определенных условиях измерения). Из-за особенностей спектральных линий кадмия и криптона, новое определение метра повысило точность эталона длины примерно в 100 раз. Последующее изменения были связаны с расчетом скорости света в вакууме. Первые измерения скорости света были предприняты Оле Ремёрем еще в 1675 год, по запаздыванию спутников Юпитера. Тогда была получена величина (в современных единицах) примерно равная 224 тысячи км/c − и это было замечательная по тем временам точность, так как одни ученые XVII века считали, что скорость света лишь в десять раз больше скорость звука, а другие − что скорость света бесконечна. C XIX века измерения стали проводиться на Земле, их точность постоянно увеличивалась. Наконец в 1970-х годах, при использовании лазеров, точность измерения увеличилась еще на два порядка и скорость света была определена как 299 792 458 ± 1,2 м/с. Стало ясно, что дальнейшие измерения превышали бы точность, с которой можно определить метр. Поэтому с 1983 метр − это расстояние, проходимое светом в вакууме за 1/299 792 458 долю секунды. Эталон метра стал первым, определенным через фундаментальную константу. Однако для определения малых единиц длины продолжают использовать эталоны через длину волны лазера.

Рис. 8. Региональный эталон метра.



Рис 9. ВНИИМ. Национальный эталон килограмма.

**Килограмм**

Эталоном килограмма до 2019 год являлся платиново-иридиевый цилиндр, который хранится во Франции, в СевреДиаметр и высота цилиндра около 39 мм. Как и в случае метра, в 1889 году британские мастера сделали 42 цилиндра, один из них стал новым международным эталоном килограмма и был передан на хранение в Севр, а остальные стали национальными эталонами. Россия получила два национальных эталона. До 2019 года один из них, ставший в 1918 национальным эталоном, находился в лаборатории массы и силы во ВНИИМе (Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Менделеева). Национальный эталон килограмма хранился при температуре от 18 до 22 °С, в изолированном помещении с массивным фундаментом (рис 9).

Время от времени региональные эталоны килограмма сличали с французским эталоном. При этом оказалось, что измерения в разные годы показывало отличия в разные стороны на десятки микрограмм. Одни региональные эталоны увеличились на 60-70 мкг, другие уменьшились на 40 мкг. Возможные причины – оседание мельчайших частиц пыли, испарения, повреждения во время сличения. Однако неизвестно изменился ли сам эталон килограмма − его не с чем сравнить. Кроме этого не исключена вероятность, что случится какой-нибудь несчастный случай в Севре, и тогда эталон килограмма будет поврежден. Поэтому давно искали какие-либо варианты замены эталона килограмма. Пытались определить его через вольт или построить идеальный кристалл. В результате было решено ввести определения килограмма через постоянную Планка *h* – фундаментальную константу, которая определяет связь между частотой 𝛎 и энергией фотона *Е*:

В тех странах, где есть техническая такая возможность, для определения килограмма теперь надо использовать весы Киббла − они позволяют сосчитать электромагнитную энергию поля, сила которого уравновесит вес объекта.

**Ампер**

Для электрических измерений килограмма, метра и секунды было недостаточно. Нужно было добавить в систему единицу какой-либо электромагнитной величины. Ампер (А) был предложен как единица силы тока, но его определение несколько раз менялось, пока в 1948 году для эталона ампера не стали использовать феномен электромагнитного взаимодействия проводников с током. Силой тока в 1 А стала сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум прямолинейным бесконечным проводам ничтожно малого диаметра, находящихся на расстоянии 1 м, вызвал бы на каждом участке длиной 1 метр силу взаимодействия, равную 2∙10-7 H. Недостатком данного определения было то, что невозможно создать техническое устройство, непосредственно измеряющее ампер. Использовали либо косвенные методы, либо эталоны вольта и ома, поэтому с 2019 года ампер определяется через заряд электрона.

**Кельвин**

В 1889 году была введена шкала, изначально основанная на изменении объема газа при изменении температуры. В ней были фиксированы 0°С, как температура плавления воды, и 100 °С, как температура кипения воды. Недостатком этой системы было то, что температура кипения и плавления воды зависит от давления, к тому же физический смысл в формуле (1) имеет абсолютная температура. В соответствие с идеей выдвинутой самим лордом Кельвином в 1854, в 1954 был введен кельвин (с 1954 по 1968 назывался градусом Кельвина). Один кельвин стал 1/273,16 промежутка между абсолютным нулем и тройной точкой воды. Удобство такого определения, в том, что тройная точка (точка в которой существуют одновременно жидкая, твердая и газообразная вода) не зависит от давления. Однако позже было уточнено, какой изотопный состав воды надо использовать, ибо от этого зависит температура тройной точки. К тому же возникали проблемы с использованием разных типов термометров при низких и высоких температурах. Поэтому с 2019 года кельвин определяется через константу Больцмана.

**Моль**

Моль был введен в систему СИ в 1971 году. Это была единица количества вещества, содержащая ровно столько же тождественных структурных элементов (атомов или молекул), сколько содержит 12 г углерода-12. Когда удалось с достаточно большой точностью определить число атомов в сфере кремния-28, было введено новое определение через число Авогадро.

**Кандела (кд).**

В школьном курсе физики нет этой единицы, поэтому скажем всего несколько слов. Кандела – это единица силы света, она одна из физических величин, описывающих способность человеческого глаза ощущать свет данной величины. Силы света определяет световую энергию, переносимую в некотором направлении в единицу времени.Единица силы света менялась несколько раз, но каждый раз определение выбиралось так, чтобы соответствовать предыдущим. Последнее определение было выбрано в 1979. С 1979 года кандела определяется как 1/683 Вт/cр, в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение зеленого света (частотой 540∙1012 Гц). Здесь ср − стереорадиан, единица телесного угла.

**Другие системы единиц.**

Далеко не всегда удобно использовать в физике единицы системы СИ. Например, при изучение фотоэффекта, можно встретить единицу энергии электронвольт (эВ). Она имеет понятный физический смысл − частица с элементарным зарядом получает энергию в эВ при прохождении разности потенциалов в В (Вольт). Ускорение можно измерять в g (ускорении свободного падения), давление в атмосферах. Астрономы определяют расстояния в астрономических величинах (среднее расстояние от Земли до Солнца), световых годах и парсеках. В физике элементарных части используется система единиц, в которой скорость света c=1 и постоянная Планка ћ≡h/2π=1, а в качестве единицы энергии используется эВ. Все это удобные единицы для конкретных задач, потому что позволяют понять масштаб явления.

|  |
| --- |
|  |

**Фундаментальные константы.**

В физике есть величины, которые являются фундаментальными константами (постоянными). Их значения не зависят от внешних условий. Среди фундаментальных констант – число Авогадро, константа Больцмана, скорость света в вакууме, элементарный заряд (заряд электрона), постоянная Планка, гравитационная постоянная и другие. Очевидно, что произведение фундаментальных констант также является фундаментальной константой. Новая система эталонов (рис. 10) основана на наличии таких констант, определенных теперь точно, без погрешности. Раньше точной константой была только скорость света. Идея новой редакции системы СИ в инвариантности законов природа, а не материальных артефактах. Считается, что новая система обеспечит максимальную точность измерения и позволит проводить измерения в любой лаборатории, в которой есть необходимое оборудование. Официально новая система начинает действовать с 20 мая 2019 года.

Рис. 10. Система СИ. Связь констант и эталонов.

**Таблица 2. 7 основных единиц системы СИ**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Единица | Обозначение (в скобках международное) | Физическая величина | Константа, через которую определяют единицу |
| метр | м (m) | длина | *c* = 299 792 458 м/c |
| килограмм | кг (kg) | масса | *h* = 6,626 070 15 × 10–34Дж/c[кг∙м2/c2] |
| секунда | c (s) | время | ΔνCs = 9 192 631 770 Гц [1/c] |
| моль | моль (mol) | количество вещества | *N*A = 6,022 140 76 × 1023 моль–1 |
| кельвин | К (К) | абсолютная температура | *k* = 1,380 649 × 10–23 Дж/K [кг∙м2/c/К] |
| ампер | А (A) | сила тока | *e* =1,602 176 634 × 10–19 Кл [А/c] |
| кандела | кд (cd) | сила света | Для света частотой 540 × 1012  *K*cd = 683 лм/Вт [кд∙ср∙c/(кг∙м2)] |

Здесь *c* − скорость света в вакууме, *e−*заряд электрона*,*  *h−*постоянная Планка*, K*cd *–спектральная световая эффективность монохроматического излучения*

**Приложение II. КПД электростанций и тепловых двигателей.**

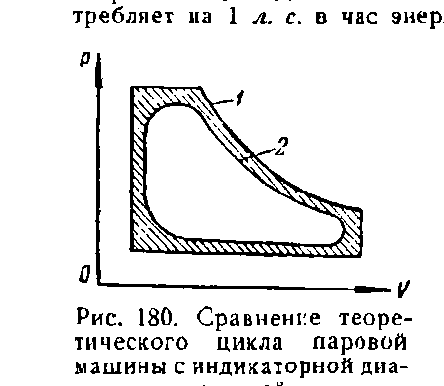
Формула (21) показывает, что 100% КПД можно достичь, только если холодильник находится при температуре абсолютного нуля. Однако такой температуры в природе не существует. Кроме того реальные холодильники – это резервуары, куда можно сбросить тепло. На Земле они имеют температуру окружающей нас среды, которая обычно находится при температуре 250−300К. Температура нагревателя определяется тем, из какого высокотемпературного процесса мы получаем тепло.  Так у паровой машины пар находится при температуре 373 К, даже если холодильник при температуре 273 К, то максимальный КПД будет 27% . Но практически, в результате несовершенства системы КПД еще меньше: на рис. 11 приведено сравнение теоретического цикла паровой машины с индикаторной диаграммой. В результате паросиловые установки имеют КПД около 13%, двигатели внутреннего сгорания 20-30%, у дизеля КПД 38−45% (с дополнительными устройствами до 53-54%). Большинство теплоэлектростанций работают при температуре нагревателя 600ºC (при большей температуре есть проблемы с коррозийной устойчивостью котла и турбин), таким образом их КПД (при температуре холодильника 20ºC) около 66%, а учитывая реальные потери около 40%. Котлы на ядерных электростанциях находятся при температуре примерно 330ºC, таким образом максимальный КПД 50%, а реальный 30%. Однако для электростанции есть способ увеличить эффективность ее работы. ТЭЦ использует тепло для нагрева воды, которая потом подается по системе центрального отопления или используется для целей промышленности, что может повысить долю используемой энергии до 70%.

Рис. 11. Сравнение реального и идеального цикла реальной паровой машины.

**Пример двигателя внутреннего сгорания. Дизель.**

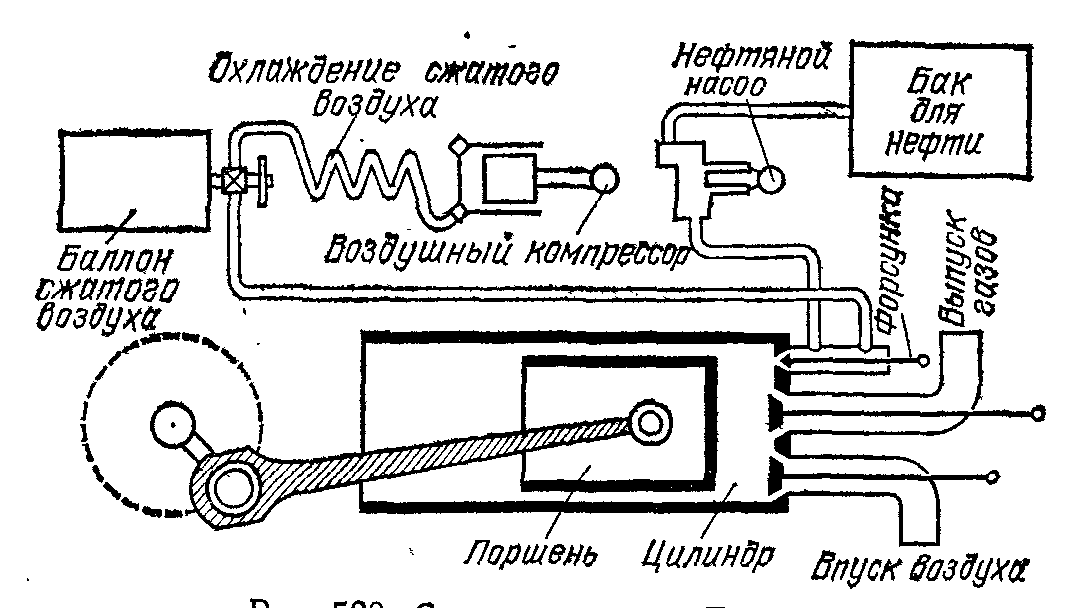
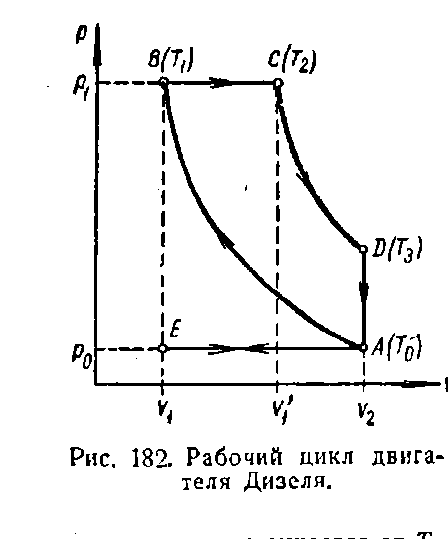


Рис. 12 . Слева − техническая схема работы дизеля. Справа − рабочий цикла двигателя дизеля в координатах *pV*.

*V*

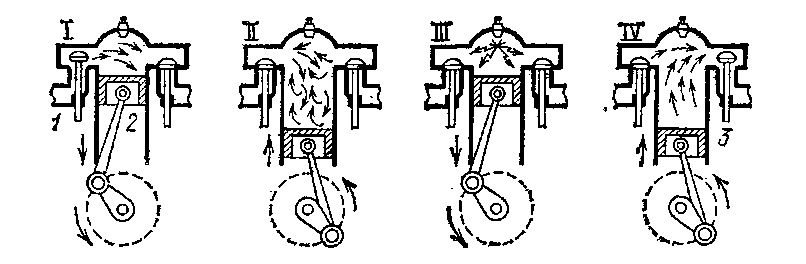
На рис. 12 изображен идеализированный цикл дизельного двигателя, предложенный Христианом Карлом Дизелем в 1896. На стадии спуска ЕА воздух засасывается в цилиндр двигателя внутреннего сгорания. Затем воздух сжимается адиабатически на участке АВ. В точке В в цилиндр впрыскивается дизельное топливо, которое сразу же воспламеняется (в цилиндре очень высокая температура). Процесс сгорания проходит медленно, поэтому газ расширяется почти изобарически по ВС. Затем процесс идет адиабатически. Потом происходит выпуск на DAE. Работа двигателя внутреннего сгорания показана на рис. 13

Рис. 13. Иллюстрация к работе 4-тактного двигателя внутреннего сгорания.

**Холодильные машины**

На рисунке 14 изображена тепловая машина и холодильная машина. Холодильная машина работает по такому же циклу, что и тепловая машина, но направленному в обратную сторону. Рабочее тело получает тепло от более холодного тела, над телом совершают работу (холодильник включен в электрическую сеть). Более горячее тело получает тепло Комната от работы холодильной машины нагревается, в чем легко убедиться, если потрогать заднюю стенку бытового холодильника.

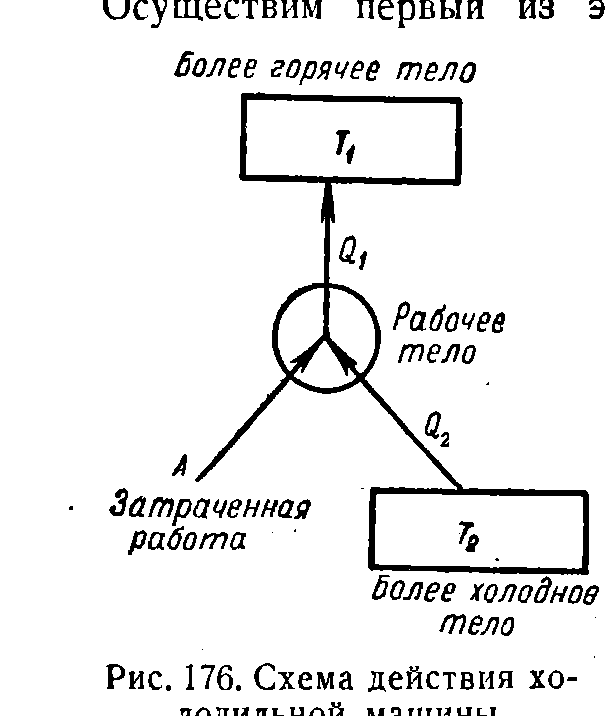
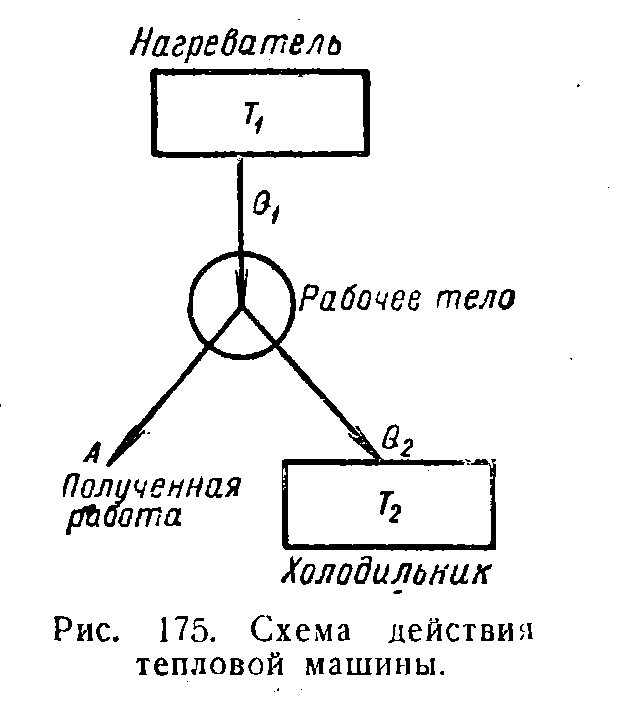
  
Эффективность холодильной машины оценивается как , так как задача как можно больше охладить продукты (или иные предметы), потратив как можно меньше электрической энергии. Однако есть еще и такое устройство как тепловой насос. Его задача иная, взяв тепло из холодной улицы, добавить к нему некоторое количество энергии от электрического двигателя, и как можно больше нагреть помещение. Эффективность теплового насоса, очевидно, оценивается величиной

Рис 14. Сравнения схемы действия тепловой и холодильной машины.

**Литература**

1 Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н.Н. Сотский. Физика. 10 класс. Любое издание.

2 Демонстрационный вариант ЕГЭ по физике. Кодификатор.

3. **Список дополнительной литературы**

3 Элементарный учебник физики под руководство Г.С. Лансберга в 3 томах. Том 1. Любое издание.

4 Д. Джанколи. Физика. В 2 томах. М. : Мир. 1989. 1 том.

## 5 Кл. Э. Суорц. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. 2 тома. М. : Наука 1986 (1 том).

**Литература к приложению 1**

6 Материалы сайта BIPM (Bureau international de Poids et Measures) https://www.bipm.org/

7 Алексей Левин, Дмитрий Мамонтов Высшая мера [«Популярная механика» №7, 2008](http://elementy.ru/lib/430619)

8 Большая российская энциклопедия. 2005-2019. Главный редактор:  Кравец С. Л. Статья международная система единиц.

9 Брян­ский Л. Н., Дой­ни­ков А. С., Кру­пин Б. Н. Мет­ро­ло­гия: шка­лы, эта­ло­ны, прак­ти­ка. М., 2004.

10 Le Système international d’uni­tés (SI). 8 éd. P., 2006.

11 С.Э. Фриш., А. В. Тиморева. Курс обшей физики. Том III. Оптика/ Атомная физика. Любое издание.