

Физика. 8 класс

Самостоятельные работы № 1 и № 2

Подробные решения всех заданий всех четырёх вариантов
Сборник контрольных работ по физике. 7–9 классы (Аверсэв), с. 46–51

Как устроена эта работа. Сначала полностью переписано условие задания — так же, как в сборнике. Потом идёт «Решение» с пронумерованными шагами: видно, какое правило применяется и почему. После шагов — плашка **«Простыми словами»**: тот же вывод обычным человеческим языком, без формул, — она для родителей, которые физику учили давно. В конце каждого задания — рамка **«Ответ»**, которую можно переписать в тетрадь.

Перед решениями — короткая шпаргалка по теме. Если что-то в решении непонятно, почти всегда ответ находится в ней.

Шпаргалка № 1. Внутренняя энергия и теплопередача

Понятие	Строгое определение	Как это понять
Внутренняя энергия U	Сумма кинетической энергии беспорядочного движения всех молекул тела и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом	«Запас энергии внутри самого тела». Чем быстрее движутся молекулы — тем она больше
Два способа изменить U	1) совершение работы; 2) теплопередача	Руки можно согреть, потеряв их друг о друга (работа) или подержав над батареей (теплопередача)
Теплопроводность	Передача энергии от частицы к частице внутри тела; само вещество при этом не переносится	Ложка в горячем чае: тепло «ползёт» по металлу к пальцам
Конвекция	Перенос энергии потоками (струями) самой жидкости или газа. В твёрдых телах невозможна	Нагретое — более лёгкое, всплывает; холодное — более тяжёлое, опускается
Излучение	Передача энергии электромагнитными волнами. Возможна даже через вакуум	Солнце греет Землю через пустой космос; костёр греет лицо сбоку



Три вида теплопередачи

ГЛАВНОЕ ПРАВИЛО ВСЕЙ РАБОТЫ № 1

Если тело **нагрелось** — его внутренняя энергия **выросла**; если **остыло** — **уменьшилась**. А вопрос «каким способом?» всегда имеет ровно два возможных ответа: **совершили работу** или **была теплопередача**.

Самостоятельная работа № 1

Внутренняя энергия. Работа и теплопередача.

Виды теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение

Вариант 1

Аргументируйте ответы на вопросы письменно.

1. Как изменилась внутренняя энергия оливкового масла в закрытой бутылке, если средняя скорость поступательного движения его молекул увеличилась?

Решение.

Шаг 1 Вспоминаем, из чего состоит внутренняя энергия. Она складывается из двух частей: кинетической энергии движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. Значит, чтобы ответить на вопрос, надо проследить за обеими частями.

Шаг 2 Смотрим на кинетическую часть. Кинетическая энергия одной молекулы $E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$. Скорость v вошла в формулу, причём в квадрате. Раз средняя скорость выросла — выросла и средняя кинетическая энергия молекул, а с ней и вся кинетическая часть внутренней энергии.

Шаг 3 Смотрим на потенциальную часть. Бутылка закрыта, масло не переливали, объём его не менялся. Значит среднее расстояние между молекулами осталось прежним, и потенциальная энергия взаимодействия практически не изменилась.

Шаг 4 Складываем. Одно слагаемое выросло, второе осталось тем же — сумма выросла: $U \uparrow$. Попутно отметим: средняя скорость поступательного движения молекул связана с температурой, поэтому рост скорости означает, что масло **нагрелось**.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Молекулы масла «забегали быстрее». Энергия движения — это и есть часть внутренней энергии тела. Раз бегают быстрее, значит энергии внутри стало больше. По-бытовому: масло стало теплее.

Ответ: внутренняя энергия оливкового масла **увеличилась**, потому что выросла кинетическая энергия движения его молекул (масло нагрелось), а потенциальная часть при неизменном объёме осталась прежней.

2. Почему металлические ложки, лежащие в ящике стола, кажутся на ощупь более холодными, чем находящиеся там деревянные?

Решение.

Шаг 1 Сравниваем температуры. Ложки долго лежат в одном ящике, то есть находятся в тепловом равновесии с воздухом комнаты. Значит температура у всех ложек **одинаковая** — комнатная, примерно 20–22 °С. Разница в ощущениях никак не связана с разницей температур: её просто нет.

Шаг 2 Определяем направление теплопередачи. Температура кожи руки около 33–36 °С, это выше комнатной. Энергия всегда переходит от более нагретого тела к менее нагретому, значит при касании тепло идёт **от руки к ложке**.

Шаг 3 Понимаем, что именно чувствует кожа. Нервные окончания реагируют не на температуру предмета, а на то, **насколько быстро остывает сам участок кожи**. Быстро теряем тепло — мозг говорит «холодное».

Шаг 4 Сравниваем теплопроводность. У металлов теплопроводность очень большая: полученная от пальца энергия мгновенно «растекается» по всей ложке, и место контакта остаётся холодным. У дерева теплопроводность в сотни раз меньше: прогревается только тонкий слой прямо под пальцем, а дальше тепло почти не уходит. Этот слой быстро принимает температуру кожи, и отток тепла прекращается.

Шаг 5 Делаем вывод. Металл продолжает забирать у руки тепло — ощущение «холодный». Дерево почти перестаёт забирать — ощущение «тёплое».

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Рука — не термометр, а «измеритель скорости кражи тепла». Металл ворует тепло у пальца быстро, дерево — медленно. Температура у них при этом одна и та же.

КАК ЭТО ПРОВЕРИТЬ ДОМА. Положите на деревянную доску и на металлическую кастрюлю по кубику льда. На металле лёд растает заметно быстрее — хотя «на ощупь» металл казался холоднее. Это прямое доказательство того, что дело в теплопроводности, а не в температуре.

Ответ: температура у всех ложек одинаковая (комнатная). Металлическая ложка кажется холоднее потому, что **теплопроводность металла намного больше теплопроводности дерева**: металл быстрее отводит тепло от руки, и кожа в месте касания охлаждается сильнее.

3. Как поступить, чтобы быстрее охладить пакет молока: положить его на лёд или обложить льдом сверху?

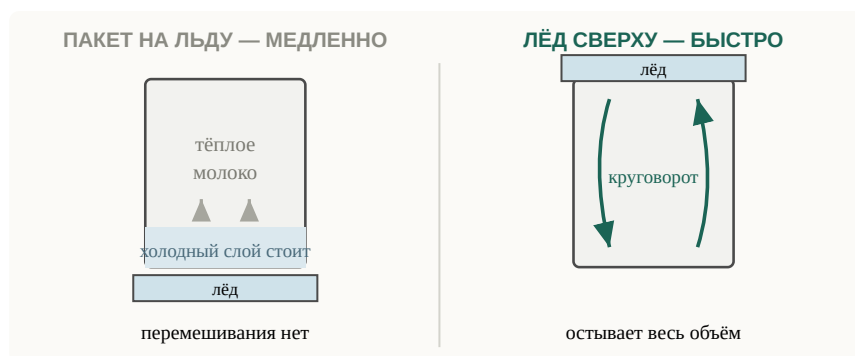
Решение.

Шаг 1 **Что вообще охлаждает молоко.** Лёд холоднее молока, поэтому энергия переходит от молока ко льду. Молоко — жидкость, а в жидкостях главный «транспорт» энергии — не теплопроводность (она у воды и молока мала), а **конвекция**.

Шаг 2 **Вспоминаем правило конвекции.** При охлаждении жидкость сжимается, её плотность увеличивается, и она **опускается вниз**. Нагретая жидкость, наоборот, расширяется, становится легче и **поднимается вверх**. Конвекционный поток сам собой идёт только в одну сторону — холодное вниз, тёплое вверх.

Шаг 3 **Разбираем вариант «лёд сверху».** Охлаждается верхний слой молока. Он становится плотнее и тонет, а на его место снизу поднимается тёплое молоко. Оно тоже охлаждается и тонет. Возникает непрерывный круговорот, и весь объём пакета перемешивается и остывает.

Шаг 4 **Разбираем вариант «пакет на льду».** Охлаждается нижний слой. Но он и так уже самый тяжёлый и остаётся внизу — «нырять» ему некуда. Перемешивания не возникает, холодный слой работает как «пробка», и тепло сверху может пробиваться вниз только теплопроводностью, которая у молока очень мала. Охлаждение идёт медленно.



Почему лёд сверху работает лучше

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Холод в жидкости умеет «падать», но не умеет «всплывать». Если лёд снизу — холод остаётся лежать на дне. Если лёд сверху — холод всё время стекает вниз, а тёплое молоко поднимается ему навстречу, и получается естественное перемешивание. Тот же приём работает с любым напитком: охлаждать всегда лучше сверху.

Ответ: надо **обложить пакет льдом сверху**. Тогда охлаждённые слои молока опускаются вниз, а тёплые поднимаются вверх — возникает конвекция, и остывает весь объём. Если поставить пакет на лёд, холодное молоко останется внизу, конвекции не будет, и охлаждение пойдёт только за счёт малой теплопроводности — гораздо медленнее.

Вариант 2

Аргументируйте ответы на вопросы письменно.

1. Как изменилась внутренняя энергия воды, находящейся в закрытом стакане, если средняя скорость поступательного движения её молекул уменьшилась?

Решение.

Шаг 1 Разбираем внутреннюю энергию на части. U — это кинетическая энергия движения молекул плюс потенциальная энергия их взаимодействия.

Шаг 2 Кинетическая часть. Так как $E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$, уменьшение средней скорости v означает уменьшение средней кинетической энергии молекул.

Шаг 3 Потенциальная часть. Стакан закрыт, воду не доливали и не выливали, объём тот же — расстояния между молекулами в среднем прежние, потенциальная часть практически не изменилась.

Шаг 4 Вывод. Одно слагаемое уменьшилось, второе не изменилось — сумма уменьшилась: $U \downarrow$. Вода остыла: раз молекулы движутся в среднем медленнее, температура воды стала ниже.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Это та же задача, что и № 1 в первом варианте, только «наоборот». Молекулы замедлились — значит энергии внутри стало меньше, вода остыла.

Ответ: внутренняя энергия воды **уменьшилась** — уменьшилась кинетическая энергия движения её молекул (вода остыла), а потенциальная часть при неизменном объёме осталась прежней.

2. Почему деревянная дверная ручка в квартире на ощупь кажется более тёплой, чем металлическая?

Решение.

Шаг 1 Сравниваем температуры. Обе ручки давно находятся в одной квартире и имеют одну и ту же комнатную температуру. Значит объяснять разницу ощущений разницей температур нельзя.

Шаг 2 Куда идёт тепло. Рука теплее комнаты, поэтому при касании энергия переходит от руки к ручке.

Шаг 3 Дерево — плохой проводник тепла. Древесина пористая, в её порах заперт воздух, а воздух проводит тепло очень плохо. Поэтому от руки успевает прогреться только тонкий поверхностный слой; дальше тепло почти не уходит. Прогретый слой быстро становится той же температуры, что и кожа, и отток тепла практически прекращается.

Шаг 4 Металл — хороший проводник. Энергия немедленно уносится вглубь металла, место касания всё время остаётся холодным, рука продолжает терять тепло.

Шаг 5 Вывод. Кожа оценивает скорость потери тепла: у дерева она мала — «тёплое», у металла велика — «холодное».

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Дерево почти сразу «сдаётся» и принимает температуру вашей ладони, а металл упрямо продолжает тянуть из неё тепло. Отсюда и ощущение, что деревянная ручка теплее.

Ответ: температура ручек одинакова. Деревянная кажется теплее, потому что **теплопроводность дерева значительно меньше**, чем у металла: оно медленно отводит тепло от руки, и кожа почти не охлаждается.

3. В два сосуда, содержащие равные объёмы воды, опустили два одинаковых кипятильника так, как показано на рисунке 1. В каком из сосудов вода нагреется быстрее?

На рисунке 1: в левом сосуде спираль кипятильника опущена почти до дна, в правом — находится у самой поверхности воды.

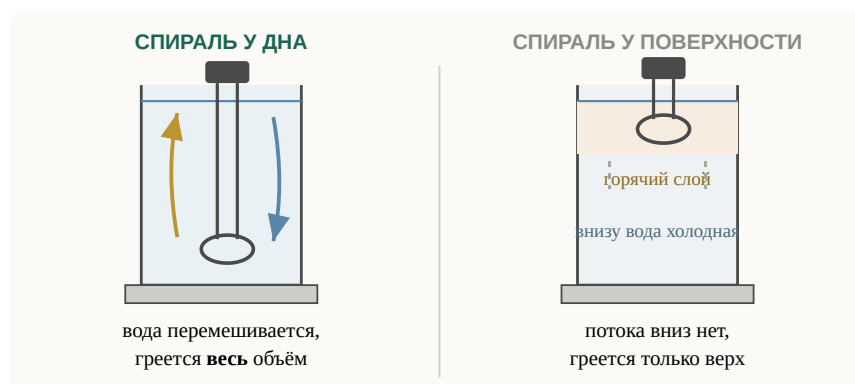


Рис. 1 (перерисован). Два одинаковых кипятильника на разной глубине

Решение.

Шаг 1 Что одинаково. Кипятильники одинаковые — значит их мощность одна и та же, и за равное время они отдают воде равное количество теплоты. Объёмы воды тоже равны. Различается только **глубина**, на которой расположена спираль.

Шаг 2 Что происходит у спирали. Вода возле спирали нагревается, расширяется, её плотность уменьшается — и эта вода **всплывает**. На её место приходит более холодная и плотная вода. Это и есть конвекция.

Шаг 3 Левый сосуд (спираль внизу). Нагретые порции воды поднимаются через **всю** толщу жидкости, а сверху им навстречу опускается холодная вода. Круговорот охватывает весь сосуд, вода непрерывно перемешивается и прогревается целиком.

Шаг 4 Правый сосуд (спираль вверху). Нагретая вода уже находится наверху — всплывать ей некуда, конвекционный круговорот не возникает. Вниз энергия могла бы уйти только теплопроводностью, но у воды она очень мала. Поэтому прогревается практически лишь верхний слой, а нижние слои остаются холодными.

Шаг 5 Вывод. Вся вода быстрее нагреется в том сосуде, где спираль опущена ко дну, — в левом.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Греть жидкость надо снизу, а охлаждать — сверху. Причина одна и та же: тёплое само всплывает, холодное само тонет. Поэтому конфорка у плиты — под кастрюлей, а не над ней.

Ответ: быстрее нагреется вода **в левом сосуде**, где спираль кипятильника опущена ко дну: там возникает конвекция, охватывающая весь объём. В правом сосуде (спираль у поверхности) конвекционный поток вниз не идёт, и быстро прогревается только верхний слой воды.

Вариант 3

Аргументируйте ответы на вопросы письменно.

1. Как и каким способом изменяется внутренняя энергия рыбы, помещённой в морозильную камеру?

Решение.

Шаг 1 **Отвечаем на вопрос «каким способом».** Изменить внутреннюю энергию тела можно всего двумя способами: совершением работы и теплопередачей. Рыбу никто не сжимает, не растягивает и не трёт — работа над ней не совершается. Остаётся **теплопередача**.

Шаг 2 **Определяем направление.** Температура рыбы (около $+5\dots+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) выше температуры воздуха в морозильной камере (около $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$). Энергия самопроизвольно переходит от более нагретого тела к менее нагретому, значит рыба **отдаёт** энергию.

Шаг 3 **Уточняем виды теплопередачи.** Здесь работают сразу все три: **теплопроводность** — через контакт с холодной полкой и с прилегающим воздухом; **конвекция** — охлаждённый воздух у рыбы опускается, более тёплый подходит на его место, поэтому в камере есть постоянные воздушные потоки; **излучение** — на холодные стенки камеры.

Шаг 4 **Прослеживаем, что происходит дальше.** Сначала рыба просто остывает — падает температура, значит уменьшается кинетическая часть внутренней энергии. Когда вода в тканях рыбы дойдёт до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, начнётся **кристаллизация** (замерзание): температура какое-то время стоит на месте, но энергия продолжает уходить в камеру, так что внутренняя энергия всё это время уменьшается. Затем замёрзшая рыба остывает дальше, до температуры камеры.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Рыба ничего не «делает» и над ней ничего не «делают» — её просто положили в холод. Значит способ один: теплопередача. А направление очевидно: тепло уходит от рыбы в морозилку, поэтому энергии внутри рыбы становится меньше.

Ответ: внутренняя энергия рыбы **уменьшается**; способ изменения — **теплопередача** (работа над рыбой не совершается). Тепло уходит от рыбы к холодному воздуху и стенкам камеры теплопроводностью, конвекцией и излучением; при замерзании воды в тканях энергия отдаётся ещё и в процессе кристаллизации.

2. Какой дом — деревянный или кирпичный — вы бы рекомендовали купить родителям для летней дачи? Почему?

Решение.

Шаг 1 Понимаем, чем летняя дача отличается от обычного дома. На дачу приезжают ненадолго — на выходные. Дом в это время нужно **быстро прогреть**, а ночью — не дать теплу уйти наружу. Значит нас интересуют две физические характеристики стен: теплопроводность и теплоёмкость.

Шаг 2 Сравниваем теплопроводность. Древесина пористая: между волокнами заперто много воздуха, а воздух — один из худших проводников тепла. Поэтому теплопроводность дерева в несколько раз меньше, чем у кирпича. Через деревянные стены такой же толщины тепло уходит наружу медленнее.

Шаг 3 Сравниваем «тепловую инерцию». Чтобы прогреть стену, ей надо передать $Q = cm\Delta t$. Масса кирпичной кладки огромна, поэтому и теплоты на её прогрев нужно очень много: холодный кирпичный дом «раскачивается» сутки и больше, сначала всё тепло печки уходит в стены. Лёгкие деревянные стены прогреваются за часы.

Шаг 4 Делаем выбор под задачу. Для дома, куда приезжают на два дня, решающим оказывается именно быстрый прогрев плюс малые теплотери — это деревянный дом.

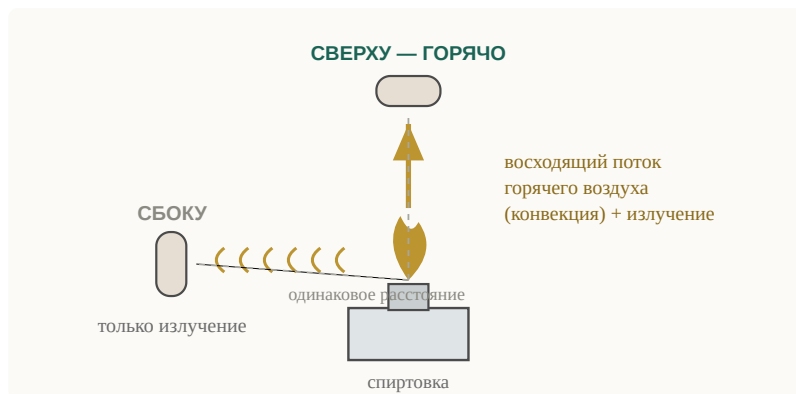
ЧЕСТНОЕ ЗАМЕЧАНИЕ. Большая теплоёмкость кирпича — это не только минус. В доме, где живут постоянно, она работает как «тепловой аккумулятор»: такой дом медленно нагревается, но и медленно остывает, в нём ровная температура и не жарко летом. Поэтому правильный ответ звучит не «кирпич хуже», а «для летней дачи выгоднее дерево, для постоянного жилья — кирпич».

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Деревянный дом — как куртка: надел и сразу тепло. Кирпичный — как толстая каменная стена: пока прогреешь, выходные закончатся. Зато потом долго держит тепло.

Ответ: для летней дачи лучше **деревянный дом**. У древесины меньше теплопроводность (в порах много воздуха), поэтому теплотери через стены меньше, и намного меньше масса и теплоёмкость стен, поэтому дом прогревается за несколько часов, а не за сутки. Кирпичный дом с его большой теплоёмкостью выгоднее для постоянного проживания.

3. В каком случае рука, находясь на одинаковом расстоянии от пламени спиртовки, согревается быстрее: сверху или сбоку от него?



Сверху к руке идут два «канала» энергии, сбоку — один

Решение.

Шаг 1 **Перечисляем, чем вообще пламя может передать энергию руке.** Теплопроводность воздуха здесь ни при чём — воздух проводит тепло очень плохо. Остаются **излучение** и **конвекция**.

Шаг 2 **Излучение.** Электромагнитные волны от пламени расходятся во все стороны примерно одинаково. Раз расстояние в обоих случаях одно и то же, излучением рука получает **примерно поровну** и сверху, и сбоку. Значит разницу объясняет не оно.

Шаг 3 **Конвекция.** Пламя сильно нагревает воздух и продукты горения. Нагретый газ расширяется, его плотность становится меньше плотности окружающего холодного воздуха, и он **поднимается вверх** — строго вверх, а не вбок. Над пламенем образуется мощный восходящий поток горячего газа.

Шаг 4 **Складываем каналы.** Рука сбоку получает энергию только излучением. Рука сверху — излучением **и** конвекционным потоком, который к тому же приносит энергию очень интенсивно. Суммарно сверху приходит заметно больше энергии за то же время.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Над огнём всегда «река» горячего воздуха, которая течёт вверх. Сбоку этой реки нет — там только «свет тепла». Поэтому ладонь над свечой обжигается за секунды, а сбоку от свечи её можно держать долго. Расстояние при этом одинаковое.

Ответ: рука быстрее согревается **сверху** от пламени. Сбоку энергия приходит практически только излучением, а сверху к излучению добавляется конвекция — восходящий поток горячего воздуха и продуктов горения, который поднимается вверх, потому что нагретый газ легче холодного.

Вариант 4

Аргументируйте ответы на вопросы письменно.

1. Изменилась ли внутренняя энергия резиновой ленты, когда её растянули (рис. 2)? Почему?

На рисунке 2: девушка двумя руками растягивает упругую резиновую ленту-эспандер.

Решение.

Шаг 1 Ищем, какой из двух способов сработал. Ленту никто не нагревал и не охлаждал — теплопередачи нет. Зато человек тянул ленту с силой, и точки приложения силы переместились. Сила есть, перемещение есть — значит **совершена механическая работа** над лентой.

Шаг 2 Куда делась эта работа. Лента никуда не улетела, её кинетическая энергия как целого тела не выросла, высота не изменилась. Значит работа пошла на изменение **внутренней** энергии ленты.

Шаг 3 Что именно изменилось внутри. Молекулы каучука — длинные и в свободном состоянии свёрнуты в клубки. При растяжении они распрямляются, взаимное расположение молекул меняется — значит меняется **потенциальная** часть внутренней энергии. Кроме того, при быстром растяжении лента заметно нагревается, то есть растёт и **кинетическая** часть.

Шаг 4 Вывод. Внутренняя энергия ленты увеличилась, причём именно за счёт совершённой над ней работы.

ОПЫТ НА 10 СЕКУНД. Возьмите широкую канцелярскую резинку, прижмите её к губе — запомните ощущение. Затем резко растяните и снова прижмите: она ощутимо теплее. Отпустите, дайте сжаться и прижмите ещё раз — она стала прохладнее. Это прямое доказательство того, что работа меняет внутреннюю энергию.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Энергию, которую человек потратил на растяжение, лента забрала себе. Отдельно её «потратить» ей некуда — значит она осталась внутри самой ленты. Поэтому внутренняя энергия выросла.

Ответ: да, изменилась — **увеличилась**. Над лентой совершили механическую работу (приложили силу и растянули), а совершение работы — один из двух способов изменения внутренней энергии. Изменилось взаимное расположение молекул (потенциальная часть U), и лента при этом нагрелась (кинетическая часть U).

2. Плотность одного куска пенопласта $\rho_1 = 40 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, другого — $\rho_2 = 20 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Одинакова ли теплопроводность кусков пенопласта?

Решение.

Шаг 1 Разбираемся, из чего состоит пенопласт. Это застывшая «пена»: тонкие стенки из твёрдого полистирола, а между ними — множество мельчайших замкнутых пузырьков воздуха. То есть кусок пенопласта — это смесь двух веществ.

Шаг 2 Сравниваем эти два вещества. Твёрдый полистирол проводит тепло **замечательно лучше**, чем воздух: воздух — один из худших проводников тепла, если он неподвижен и заперт в маленьких порах (конвекция в них тоже невозможна). Значит теплопроводность всего куска зависит от того, какую долю объёма занимают твёрдые стенки.

Шаг 3 Связываем это с плотностью. По определению $\rho = \frac{m}{V}$. Возьмём два куска одинакового объёма V . У первого масса вдвое больше:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\rho_1 V}{\rho_2 V} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{40}{20} = 2.$$

Шаг 4 Что это значит. В первом куске в том же объёме вдвое больше твёрдого полистирола (стенки пузырьков толще), а воздуха — меньше. Во втором куске наоборот: воздуха больше, стенки тоньше. Доли веществ разные — значит и теплопроводность у кусков **разная**.

Шаг 5 Кто лучше утепляет. Чем больше доля воздуха, тем хуже кусок проводит тепло. Значит у более лёгкого пенопласта ($\rho_2 = 20 \text{ кг/м}^3$) теплопроводность меньше, а у более плотного ($\rho_1 = 40 \text{ кг/м}^3$) — больше.

ЧЕСТНОЕ ЗАМЕЧАНИЕ. У реальных утеплителей зависимость не строго «чем легче, тем лучше»: у очень лёгких пен поры становятся крупными, и внутри них начинают работать излучение и слабая конвекция, поэтому у каждого материала есть своя оптимальная плотность. Но для школьной задачи главное — вывод: теплопроводность зависит от плотности, поэтому у двух кусков с разной плотностью она различна.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Пенопласт греет не пластмассой, а запертым в нём воздухом. Чем больше в куске воздуха (то есть чем он легче), тем хуже он проводит тепло и тем лучше утепляет. У кусков с разной плотностью «начинки» разное — значит и теплопроводность разная.

Ответ: нет, **не одинакова**. Теплопроводность пенопласта зависит от того, какую долю объёма занимает воздух, а плотность как раз показывает эту долю. У менее плотного куска ($\rho_2 = 20 \text{ кг/м}^3$) воздуха больше, поэтому его теплопроводность меньше; у более плотного ($\rho_1 = 40 \text{ кг/м}^3$) теплопроводность больше.

3. При нагревании воды кипятыльником (рис. 3) первый термометр показал температуру $t_1 = 30^\circ\text{C}$, второй — $t_2 = 50^\circ\text{C}$. Какими физическими закономерностями можно объяснить разницу в показаниях термометров?

На рисунке 3: в сосуде с водой стоят два термометра. Резервуар термометра 1 опущен почти ко дну, резервуар термометра 2 находится выше, недалеко от поверхности воды. Справа в воду опущен кипятыльник.

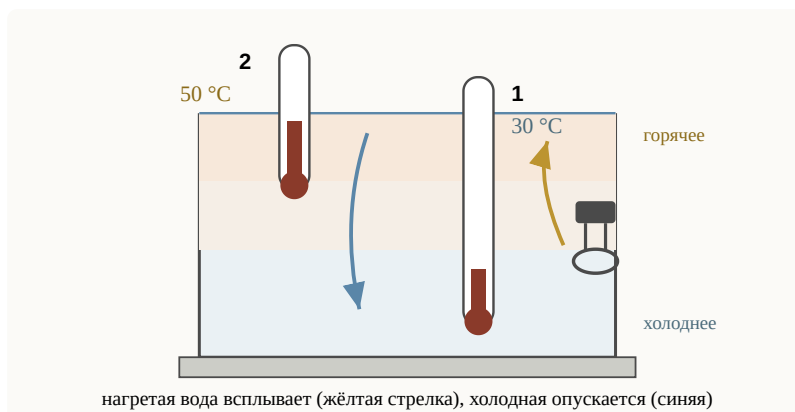


Рис. 3 (перерисован). Верхний термометр показывает больше

Решение.

Шаг 1 Что делает кипятильник. Спираль отдаёт энергию воде, которая её окружает. Эта вода нагревается.

Шаг 2 Первая закономерность — тепловое расширение. При нагревании вода расширяется: объём растёт, масса не меняется, значит по формуле $\rho = \frac{m}{V}$ плотность нагретой воды **уменьшается**.

Шаг 3 Вторая закономерность — выталкивающая сила. На более лёгкую (менее плотную) порцию воды со стороны окружающей холодной воды действует архимедова сила, превышающая её вес. Поэтому нагретая вода **всплывает**, а холодная, более плотная, опускается вниз, занимая её место. Это и есть **конвекция**.

Шаг 4 Что из этого следует. Горячая вода постоянно собирается в верхней части сосуда, а самая холодная остаётся у дна. Поэтому термометр 2, расположенный выше, показывает **большую** температуру (50 °С), чем термометр 1, опущенный ко дну (30 °С).

Шаг 5 Третья закономерность — малая теплопроводность воды. Можно спросить: почему же низ не прогревается сам? Потому что вода — **плохой проводник тепла**. Конвекционный поток вниз энергию не несёт, а теплопроводность выравнивает температуру очень медленно. Поэтому разница в 20 °С сохраняется.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Горячая вода всегда наверху — как горячий воздух под потолком комнаты. Верхний термометр стоит в «горячем этаже», нижний — в «холодном подвале». А сама вода тепло вниз почти не проводит, поэтому «этажи» долго не перемешиваются.

Ответ: разницу объясняет **конвекция**: при нагревании вода расширяется, её плотность уменьшается, и она поднимается вверх, а более плотная холодная вода опускается вниз. Поэтому верхние слои воды горячее нижних, и термометр 2 (расположенный выше) показывает 50 °С, а термометр 1 (у дна) — 30 °С. Выравниванию температуры мешает малая теплопроводность воды.

Шпаргалка № 2. Количество теплоты: четыре формулы

Вся самостоятельная работа № 2 держится на четырёх формулах и одном уравнении. Больше ничего знать не нужно — важно только каждый раз правильно понять, **какой процесс идёт**, и взять соответствующую формулу.

Процесс	Формула	Что означают буквы	Как узнать процесс
Нагревание или охлаждение	$Q = cm(t_2 - t_1)$	c — удельная теплоёмкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Температура меняется , вещество остаётся в том же состоянии
Плавление или кристаллизация	$Q = \lambda m$	λ — удельная теплота плавления, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Температура стоит на месте и равна $t_{\text{пл}}$; твёрдое ↔ жидкое
Парообразование или конденсация	$Q = Lm$	L — удельная теплота парообразования, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Температура стоит на месте и равна $t_{\text{кип}}$; жидкое ↔ газ
Сгорание топлива	$Q = qm$	q — удельная теплота сгорания, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Топливо сгорает и выделяет энергию
Уравнение теплового баланса	$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{получ}}$	—	Тела обмениваются теплом в калориметре (потерь нет)

КАК ЧИТАТЬ УДЕЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Любая «удельная» величина отвечает на вопрос «**сколько энергии приходится на 1 килограмм?**». Например, $\lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ означает: чтобы расплавить 1 кг льда, уже доведённого до 0°C , нужно 330 кДж. Поэтому во всех формулах стоит просто «умножить на массу».

Числа, которые встретятся в работе № 2

Величина	Значение	То же в других единицах
Удельная теплоёмкость воды c	$4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Удельная теплота плавления льда λ	$330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Удельная теплота парообразования воды L	$2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	$2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Удельная теплота сгорания авиационного керосина q	$43 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	$43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Удельная теплота сгорания ракетного топлива q	$9,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	$9,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Удельная теплота сгорания пеллет q	$18,5 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	$18,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Удельная теплота сгорания ацетилена q	$48 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	$48 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Температура плавления свинца	327°C	по таблице учебника
Удельная теплота плавления золота	$\approx 67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	по таблице учебника

Перевод единиц — где чаще всего теряют баллы

Было	Стало	Было	Стало
1 т	1000 кг	1 кДж	10^3 Дж
1 г	0,001 кг	1 МДж	10^6 Дж
270 г	0,27 кг	1 ГДж	10^9 Дж

ХИТРОСТЬ, КОТОРАЯ ЭКОНОМИТ ВРЕМЯ. Если все величины в задаче даны в килоджоулях (как в задачах про калориметр), можно не переводить их в джоули: достаточно всюду считать в кДж и кг. Ответ получится в килоджоулях или в килограммах — это правильно. Главное — не смешивать в одном уравнении кДж и МДж.

Самостоятельная работа № 2

Нагревание. Удельная теплоёмкость. Удельная теплота сгорания топлива.

Плавление (кристаллизация). Удельная теплота плавления.

Испарение и конденсация. Кипение. Удельная теплота парообразования

Вариант 1

1. Какое количество теплоты выделяется при сгорании авиационного керосина массой $m = 0,93$ т в двигателе реактивного самолёта? Удельная теплота сгорания авиационного керосина $q = 43 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

ДАНО

$$m = 0,93 \text{ т}$$

$$q = 43 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Найти: Q — ?

Решение.

Шаг 1 Выбираем формулу. В задаче сгорает топливо — значит работает формула теплоты сгорания:

$$Q = qm.$$

Шаг 2 Переводим массу в килограммы. Формула требует массу в кг, а у нас тонны:

$$m = 0,93 \text{ т} = 0,93 \cdot 1000 \text{ кг} = 930 \text{ кг}.$$

Шаг 3 Проверяем единицы. $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{Дж}$ — получится именно количество теплоты. Значит формула собрана правильно.

Шаг 4 Считаем.

$$Q = 43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 930 \text{ кг} = 39\,990 \cdot 10^6 \text{ Дж} \approx 4,0 \cdot 10^{10} \text{ Дж}.$$

Шаг 5 Переводим ответ в удобные единицы. $4,0 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 40 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 40 \text{ ГДж}$ (точное значение — 39,99 ГДж).

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Один килограмм керосина при сгорании отдаёт 43 миллиона джоулей. Килограммов у нас 930, поэтому просто умножаем: $43 \text{ млн} \times 930$. Получается около 40 миллиардов джоулей — примерно столько энергии нужно, чтобы вскипятить 100 тонн воды.

Ответ: $Q \approx 4,0 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 40 \text{ ГДж}$ (точнее 39,99 ГДж).

2. График зависимости температуры вещества, стоящего на электроплите в стакане, от времени представлен на рисунке 1. Поясните, какие изменения с веществом описывает каждый участок графика. Что это за вещество?

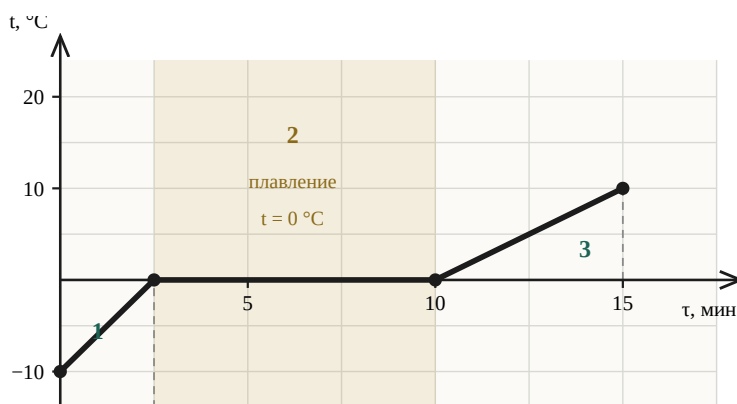


Рис. 1 (перерисован). Нагревание вещества на электроплите

Решение.

Шаг 1 Читаем график по точкам. Вещество начинают греть при температуре -10°C . Далее:

- от 0 до $\approx 2,5$ мин температура растёт от -10°C до 0°C ;
- от $\approx 2,5$ до 10 мин температура **не меняется** и равна 0°C ;
- от 10 до 15 мин температура снова растёт — от 0°C до $+10^\circ\text{C}$.

Шаг 2 Участок 1 — нагревание твёрдого тела. Температура растёт, состояние не меняется. Вся теплота от плиты идёт на увеличение скорости молекул: $Q_1 = cm(t_2 - t_1)$. Вещество в твёрдом состоянии.

Шаг 3 Участок 2 — плавление. Плита продолжает греть, энергия подводится, а температура стоит на месте. Это главный признак фазового перехода. Подводимая энергия расходуется **не на разгон молекул, а на разрушение кристаллической решётки** — вещество плавится: $Q_2 = \lambda m$. Температура этого участка и есть температура плавления: $t_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}$.

Шаг 4 Участок 3 — нагревание жидкости. Твёрдого вещества больше нет, подводимая энергия снова идёт на рост температуры — теперь нагревается уже жидкость: $Q_3 = cm(t_2 - t_1)$.

Шаг 5 Определяем вещество. Температура плавления по графику равна 0°C — это лёд. Значит в стакане был лёд при -10°C , а в конце опыта — вода при $+10^\circ\text{C}$.

ПОЛЕЗНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ. Обратите внимание на длину площадки: плавление заняло около 7,5 минуты, а нагрев льда на 10 градусов — всего 2,5. Это не случайность: на плавление льда нужно намного больше энергии, чем на его нагрев на несколько градусов. Именно поэтому лёд в стакане с напитком «держит холод» так долго.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Горизонтальная полка на графике — это всегда «вещество меняет состояние». Плиту не выключали, энергия шла, а градусник стоял на нуле: вся энергия уходила на то, чтобы развалить ледяные кристаллы и превратить лёд в воду. Как только последний кусочек льда растаял — термометр снова пополз вверх.

Ответ: участок 1 ($0 \dots \approx 2,5$ мин) — нагревание льда от -10°C до 0°C ; участок 2 ($\approx 2,5 \dots 10$ мин) — плавление льда при постоянной температуре 0°C ; участок 3 ($10 \dots 15$ мин) — нагревание образовавшейся воды от 0°C до $+10^\circ\text{C}$. Вещество — **вода (лёд)**, так как его температура плавления равна 0°C .

3. В теплоизолированном калориметре находится лёд массой $m_1 = 270$ г при температуре $t_1 = 0^\circ\text{C}$. Какую минимальную массу водяного пара надо впустить в калориметр, чтобы расплавить весь лёд? Удельная теплоёмкость воды $c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, удельная теплота плавления льда $\lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, удельная теплота парообразования воды $L = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Температура пара $t = 100^\circ\text{C}$. Теплоёмкостью калориметра пренебречь.

ДАНО

$$m_1 = 270 \text{ г} = 0,27 \text{ кг}$$

$$t_1 = 0^\circ\text{C} \text{ (лёд)}, \quad t = 100^\circ\text{C} \text{ (пар)}$$

$$c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad \lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad L = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Найти: m — ? (масса пара)

Решение.

Шаг 1 Разбираемся, кто отдаёт тепло, а кто получает. Пар горячий (100°C), лёд холодный (0°C). Значит пар **отдаёт** энергию, лёд **получает**.

Шаг 2 Расписываем путь пара — он проходит два этапа.

- **Конденсация:** пар при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ превращается в воду при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отдаёт $Q_1 = Lm$.
- **Остывание получившейся воды** от $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до конечной температуры: $Q_2 = cm(100 - t_{\text{кон}})$.

Шаг 3 Расписываем путь льда. Лёд уже находится при температуре плавления $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагревать его не нужно. Он сразу плавится: $Q_3 = \lambda m_1$.

Шаг 4 Расшифровываем слово «минимальную». Чем больше пара впустить, тем больше энергии он отдаст и тем сильнее нагреется вода в калориметре. Энергии будет **ровно впритык**, если её хватает только на плавление льда и ни на что больше. Тогда конечная температура смеси равна $t_{\text{кон}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$: весь лёд только-только растаял, а нагревать получившуюся воду уже нечем.

Шаг 5 Составляем уравнение теплового баланса $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{получ}}$:

$$Lm + cm(100 - 0) = \lambda m_1.$$

Шаг 6 Выражаем искомую массу. Слева выносим m за скобку:

$$m(L + 100c) = \lambda m_1 \implies m = \frac{\lambda m_1}{L + 100c}.$$

Шаг 7 Подставляем числа (всё в кДж и кг — переводить в джоули не нужно):

$$m = \frac{330 \cdot 0,27}{2260 + 4,2 \cdot 100} = \frac{89,1}{2260 + 420} = \frac{89,1}{2680} \approx 0,0332 \text{ кг}.$$

Шаг 8 Переводим в граммы: $0,0332 \text{ кг} \approx 33 \text{ г}$.

Шаг 9 Проверяем. Один килограмм пара, сконденсировавшись и остыв до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, отдаёт $2260 + 420 = 2680$ кДж, а на плавление 1 кг льда нужно 330 кДж. Значит 1 г пара способен растопить $2680/330 \approx 8,1$ г льда. Тогда для 270 г льда нужно $270/8,1 \approx 33$ г пара. Совпало. ✓

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Пар — невероятно «энергоёмкая» вещь: при конденсации один грамм отдаёт столько тепла, что растапливает примерно восемь граммов льда. Поэтому пара нужно совсем немного — 33 грамма на 270 граммов льда. Кстати, именно поэтому ожог паром опаснее ожога кипятком.

Ответ: $m = \frac{\lambda m_1}{L + 100c} \approx 0,033 \text{ кг} \approx 33 \text{ г}.$

Вариант 2

1. При сгорании ракетного топлива выделилось количество теплоты $Q = 6,9$ ГДж. Определите массу сгоревшего ракетного топлива, удельная теплота сгорания которого $q = 9,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

ДАНО

$$Q = 6,9 \text{ ГДж} = 6,9 \cdot 10^9 \text{ Дж}$$

$$q = 9,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 9,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Найти: m — ?

Решение.

Шаг 1 Берём ту же формулу, что и в варианте 1, но теперь неизвестна масса:

$$Q = qm.$$

Шаг 2 **Выражаем массу.** Чтобы найти множитель, делим произведение на второй множитель:

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

Шаг 3 **Приводим единицы к одной системе.** Гигаджоули и мегаджоули смешивать нельзя, переводим всё в джоули: $6,9 \text{ ГДж} = 6,9 \cdot 10^9 \text{ Дж}$, $9,2 \text{ МДж} = 9,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Шаг 4 **Считаем** — отдельно числа, отдельно степени десятки:

$$m = \frac{6,9 \cdot 10^9 \text{ Дж}}{9,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \frac{6,9}{9,2} \cdot 10^3 \text{ кг} = 0,75 \cdot 10^3 \text{ кг} = 750 \text{ кг}.$$

Шаг 5 **Проверяем обратным ходом.** $9,2 \cdot 10^6 \cdot 750 = 6900 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 6,9 \text{ ГДж}$ — сходится. ✓

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Каждый килограмм топлива даёт 9,2 МДж. Нам нужно набрать 6900 МДж. Значит килограммов понадобится $6900 : 9,2 = 750$.

Ответ: $m = \frac{Q}{q} = 750 \text{ кг} = 0,75 \text{ т}.$

2. Поясните, для каких веществ построены графики зависимости модуля количества теплоты, выделяющегося при кристаллизации жидкости, от её массы (рис. 2).

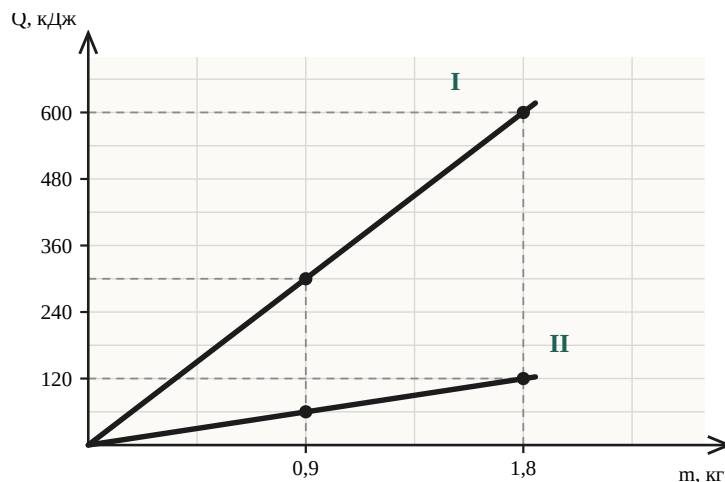


Рис. 2 (перерисован). Наклон прямой и есть удельная теплота плавления

Решение.

Шаг 1 Понимаем, что нарисовано. При кристаллизации выделяется количество теплоты $Q = \lambda m$. Здесь λ — постоянная для каждого вещества, а m — переменная. Значит Q прямо пропорционально m , и график — **прямая, проходящая через начало координат**. Так и есть на рисунке.

Шаг 2 Соображаем, как «достать» из графика λ . Из $Q = \lambda m$ следует

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

То есть надо взять на прямой любую удобную точку, прочесть её координаты и поделить Q на m . Чем круче прямая — тем больше λ .

Шаг 3 Снимаем точку с прямой I. Удобнее всего точка $m = 1,8$ кг, $Q = 600$ кДж:

$$\lambda_1 = \frac{600 \text{ кДж}}{1,8 \text{ кг}} \approx 333 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \approx 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Шаг 4 Ищем это значение в таблице. $330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ — это удельная теплота плавления (и кристаллизации) **льда**. Значит график I построен для воды.

Шаг 5 Снимаем точку с прямой II. При том же $m = 1,8$ кг она даёт $Q = 120$ кДж:

$$\lambda_2 = \frac{120 \text{ кДж}}{1,8 \text{ кг}} \approx 67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Шаг 6 Ищем в таблице. Значение $\approx 67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ соответствует **золоту**.

Шаг 7 Проверяем по второй точке. При $m = 0,9$ кг прямая I даёт 300 кДж: $300/0,9 \approx 333$ — то же самое. Прямая II даёт 60 кДж: $60/0,9 \approx 67$ — тоже совпало. Значит точки сняты верно. ✓

ВАЖНО. Ответ «какое это вещество» всегда сверяется с таблицей удельных теплот плавления в вашем учебнике. Если в таблице класса золота нет, правильным будет ответ: «вещество с $\lambda \approx 67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ » — само рассуждение от этого не меняется.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

График здесь работает как измерительный прибор. Берём на прямой точку, смотрим: «полтора-два килограмма дали столько-то килоджоулей», делим одно на другое — получаем, сколько даёт один килограмм. А это число и есть «паспортная примета» вещества, по которой его находят в таблице.

Ответ: график I построен для **воды (льда)**: $\lambda_1 = \frac{Q}{m} = \frac{600}{1,8} \approx 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. График II — для **золота**: $\lambda_2 = \frac{120}{1,8} \approx 67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

3. Лёд массой $m_1 = 500$ г, находящийся при температуре $t_1 = 0^\circ\text{C}$, необходимо расплавить и полученную из него воду нагреть до температуры $t_2 = 40^\circ\text{C}$ путём пропускания водяного пара, температура которого $t_3 = 100^\circ\text{C}$. Удельная теплоёмкость воды $c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, удельная теплота плавления льда $\lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, удельная теплота парообразования воды $L = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Определите массу пара. Потерями энергии пренебречь.

ДАНО

$$m_1 = 500 \text{ г} = 0,5 \text{ кг}; \quad t_1 = 0^\circ\text{C}; \quad t_2 = 40^\circ\text{C}; \quad t_3 = 100^\circ\text{C}$$

$$c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad \lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad L = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Найти: $m_{\text{п}}$ — ?

Решение.

Шаг 1 Выписываем, что получает лёд — два этапа.

- плавление при 0°C : $Q_1 = \lambda m_1$;
- нагревание получившейся воды от 0°C до 40°C : $Q_2 = cm_1(t_2 - t_1)$.

Обратите внимание: масса воды после плавления равна массе льда — вещество никуда не делось.

Шаг 2 Считаем полученную теплоту.

$$Q_{\text{получ}} = \lambda m_1 + cm_1(t_2 - t_1) = 330 \cdot 0,5 + 4,2 \cdot 0,5 \cdot 40 = 165 + 84 = 249 \text{ кДж}.$$

Шаг 3 Выписываем, что отдаёт пар — тоже два этапа.

- конденсация при 100°C : $Q_3 = Lm_{\text{п}}$;
- остывание получившейся из пара воды от 100°C до конечной температуры 40°C : $Q_4 = cm_{\text{п}}(t_3 - t_2)$.

Конечная температура здесь известна из условия: в конце в калориметре вся вода имеет 40°C .

Шаг 4 Записываем уравнение теплового баланса.

$$Lm_{\text{п}} + cm_{\text{п}}(t_3 - t_2) = \lambda m_1 + cm_1(t_2 - t_1).$$

Шаг 5 Выражаем массу пара. Выносим $m_{\text{п}}$ за скобку и делим:

$$m_{\text{п}} = \frac{\lambda m_1 + c m_1 (t_2 - t_1)}{L + c(t_3 - t_2)}.$$

Шаг 6 Считаем знаменатель.

$$L + c(t_3 - t_2) = 2260 + 4,2 \cdot (100 - 40) = 2260 + 252 = 2512 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Шаг 7 Получаем ответ.

$$m_{\text{п}} = \frac{249}{2512} \approx 0,099 \text{ кг} \approx 99 \text{ г}.$$

Шаг 8 Проверяем на здравый смысл. 99 г пара отдают $0,099 \cdot 2512 \approx 249$ кДж — ровно столько, сколько нужно льду. Заодно видно, что пара примерно в 5 раз меньше, чем льда, — и этого хватает, потому что пар при конденсации отдаёт огромную энергию. ✓

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Схема любой задачи про калориметр одна и та же: слева пишем «сколько тепла нужно холодному», справа — «сколько отдаст горячий», приравниваем и находим неизвестное. Здесь холодному льду нужно 249 кДж: 165 на то, чтобы растаять, и 84 на то, чтобы нагреться до сорока градусов.

Ответ: $m_{\text{п}} = \frac{\lambda m_1 + c m_1 (t_2 - t_1)}{L + c(t_3 - t_2)} \approx 0,099 \text{ кг} \approx 99 \text{ г}.$

Вариант 3

1. Какое количество теплоты выделилось в отопительном котле, в котором сожгли пеллеты (древесные гранулы) массой $m = 2,0$ кг? Удельная теплота сгорания пеллет $q = 18,5 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$

ДАНО

$$m = 2,0 \text{ кг}$$

$$q = 18,5 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 18,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Найти: Q — ?

Решение.

Шаг 1 Определяем процесс. Топливо сгорает — значит формула теплоты сгорания:

$$Q = qm.$$

Шаг 2 Проверяем единицы. Масса уже дана в килограммах, переводить ничего не нужно. $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{Дж}$ — всё верно.

Шаг 3 Считаем.

$$Q = 18,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 2,0 \text{ кг} = 37 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 37 \text{ МДж}.$$

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Один килограмм гранул даёт 18,5 МДж, килограммов два — значит энергии вдвое больше, 37 МДж. Для сравнения: этого хватит, чтобы нагреть примерно 100 литров воды от холодной водопроводной до кипятка.

Ответ: $Q = qm = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 37 \text{ МДж}$.

2. Для какого вещества построен график зависимости температуры от времени (рис. 3)? К какому состоянию вещества относятся участки I и II графика? Ответы аргументируйте.

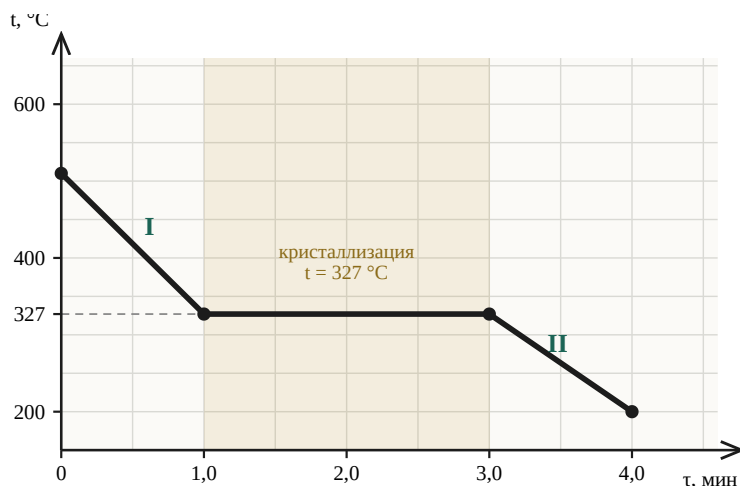


Рис. 3 (перерисован). Остывание вещества

Решение.

Шаг 1 Определяем, греют вещество или охлаждают. С самого начала температура **падает** (от $\approx 510^\circ\text{C}$ и ниже). Значит вещество отдаёт энергию окружающей среде — идёт остывание. Это важно: все процессы на графике будут «обратными» — не плавление, а кристаллизация.

Шаг 2 Находим главную подсказку — **горизонтальный участок**. С 1,0 до 3,0 мин температура стоит на 327°C , хотя вещество продолжает отдавать теплоту. Энергия уходит, а температура не падает — значит идёт фазовый переход. При охлаждении это **кристаллизация** (отвердевание): выделяется теплота $Q = \lambda m$, запасённая веществом при плавлении.

Шаг 3 Определяем вещество. Температура кристаллизации всегда равна температуре плавления: $t_{\text{кр}} = t_{\text{пл}} = 327^\circ\text{C}$. По таблице температур плавления это **свинец**.

Шаг 4 Разбираем участок I (от 0 до 1,0 мин, от $\approx 510^\circ\text{C}$ до 327°C). Он идёт **до** начала кристаллизации, то есть вещество ещё не начинало твердеть. Температура при этом выше температуры плавления. Значит свинец здесь **жидкий** (расплавленный) и просто остывает: $Q = cm(t_1 - t_2)$.

Шаг 5 Разбираем участок II (от 3,0 до 4,0 мин, от 327°C до 200°C). Он идёт **после** горизонтальной площадки: к моменту 3,0 мин вся масса уже затвердела. Температура ниже температуры плавления. Значит свинец здесь **твёрдый** и остывает дальше.

Шаг 6 Аргумент «почему площадка кончилась». Пока в сосуде есть хоть капля жидкого свинца, температура держится на $327\text{ }^{\circ}\text{C}$. Как только последняя капля затвердела, выделять теплоту кристаллизации больше нечему — и температура снова начинает падать. Это и есть точка $\tau = 3,0$ мин.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

График читается слева направо как история остывания: «горячая жидкость остывает → застывает, и пока застывает, температура стоит → застывший кусок остывает дальше». Ровная полка на 327 градусах — это «паспорт» вещества: по ней свинец и узнают.

Ответ: вещество — **свинец**, так как его температура кристаллизации (она же температура плавления) равна $327\text{ }^{\circ}\text{C}$. Участок **I** — вещество в **жидком** состоянии (остывание расплавленного свинца от $\approx 510\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $327\text{ }^{\circ}\text{C}$). Участок **II** — вещество в **твёрдом** состоянии (остывание затвердевшего свинца от $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Горизонтальный участок между ними — кристаллизация при постоянной температуре.

3. В теплоизолированном калориметре находился лёд при температуре $t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В калориметр впустили водяной пар массой $m_{\text{п}} = 600\text{ г}$ при температуре $t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите массу льда, который находился в калориметре, если весь лёд растаял и в калориметре установилась температура $t_3 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельная теплоёмкость воды $c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$, удельная теплота плавления льда $\lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, удельная теплота парообразования воды $L = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Теплоёмкостью калориметра пренебречь.

ДАНО

$m_{\text{п}} = 600\text{ г} = 0,6\text{ кг}; \quad t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t_3 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}, \quad \lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad L = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Найти: $m_{\text{л}} - ?$

Решение.

Шаг 1 Читаем условие внимательно. Сказано две важные вещи: **весь лёд растаял** и конечная температура $t_3 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значит получившуюся воду никто не нагревал — вся энергия ушла ровно на плавление.

Шаг 2 Что отдаёт пар (два этапа).

- конденсация при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$: $Lm_{\text{п}}$;
- остывание образовавшейся воды от $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$: $cm_{\text{п}}(t_2 - t_3)$.

$$Q_{\text{отд}} = Lm_{\text{п}} + cm_{\text{п}}(t_2 - t_3) = m_{\text{п}}(L + c(t_2 - t_3)).$$

Шаг 3 Считаем, сколько всего отдал пар.

$$Q_{\text{отд}} = 0,6 \cdot (2260 + 4,2 \cdot 100) = 0,6 \cdot (2260 + 420) = 0,6 \cdot 2680 = 1608\text{ кДж}.$$

Шаг 4 Что получает лёд (один этап). Лёд уже при 0 °С — нагревать его не нужно; вода после плавления тоже остаётся при 0 °С — нагревать её не нужно. Остаётся только плавление:

$$Q_{\text{получ}} = \lambda m_{\text{л}}.$$

Шаг 5 Уравнение теплового баланса и ответ.

$$\lambda m_{\text{л}} = m_{\text{п}}(L + c(t_2 - t_3)) \implies m_{\text{л}} = \frac{m_{\text{п}}(L + c(t_2 - t_3))}{\lambda}.$$

$$m_{\text{л}} = \frac{1608}{330} \approx 4,87 \text{ кг} \approx 4,9 \text{ кг}.$$

Шаг 6 Проверяем прикидкой. Мы уже считали в варианте 1, что 1 г пара растапливает примерно 8,1 г льда. Тогда 600 г пара растопят $600 \cdot 8,1 \approx 4900 \text{ г} \approx 4,9 \text{ кг}$. Совпадает. ✓

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

600 граммов пара — это меньше стакана воды, а растопить они способны почти пять килограммов льда. Вся «сила» пара в конденсации: превращаясь в воду, он отдаёт больше энергии, чем потом отдаст, остывая на все сто градусов.

Ответ: $m_{\text{л}} = \frac{m_{\text{п}}(L + c(t_2 - t_3))}{\lambda} \approx 4,87 \text{ кг} \approx 4,9 \text{ кг}.$

Вариант 4

1. При сгорании ацетилена выделилось количество теплоты $Q = 7,2 \text{ МДж}$. Определите массу сгоревшего ацетилена, удельная теплота сгорания которого $q = 48 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

ДАНО

$$Q = 7,2 \text{ МДж} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$q = 48 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 48 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Найти: m — ?

Решение.

Шаг 1 Формула та же: $Q = qm$, откуда

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

Шаг 2 Единицы совпадают. И Q , и q даны в мегаджоулях, поэтому можно делить прямо так: мегаджоули сократятся, останутся килограммы.

Шаг 3 Считаем.

$$m = \frac{7,2 \text{ МДж}}{48 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}} = 0,15 \text{ кг} = 150 \text{ г}.$$

Шаг 4 Проверяем обратным ходом. $48 \cdot 0,15 = 7,2$ МДж — сходится. ✓

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Килограмм ацетилена даёт 48 МДж, а нам нужно всего 7,2 МДж — то есть примерно седьмая часть. Значит и газа нужно примерно седьмую часть килограмма: 150 граммов.

Ответ: $m = \frac{Q}{q} = 0,15 \text{ кг} = 150 \text{ г}$.

2. На рисунке 4 представлен график зависимости температуры при нагревании и охлаждении воды от времени. Какой процесс отражает каждый участок графика? Ответ аргументируйте.

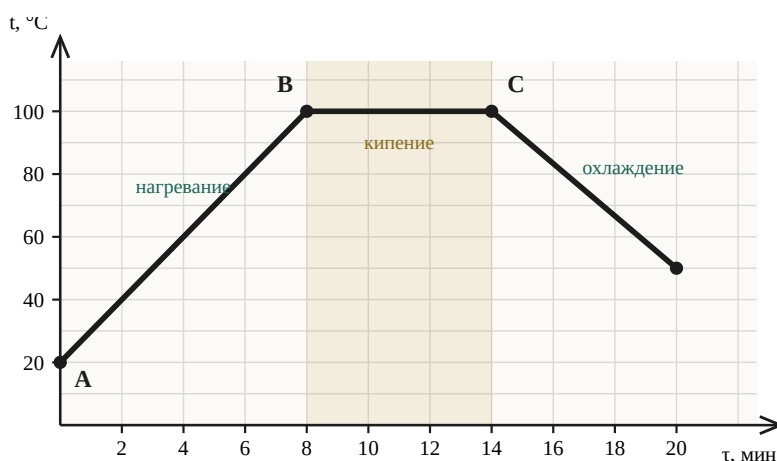


Рис. 4 (перерисован). Нагревание, кипение и охлаждение воды

Решение.

Шаг 1 Участок АВ (от 0 до 8 мин, от 20 °C до 100 °C). Температура **растёт**, вода остаётся жидкой. Значит идёт **нагревание воды**, вся подводимая теплота тратится на увеличение скорости молекул: $Q = cm(t_2 - t_1)$.

Дополнительный аргумент: участок — прямая линия, температура растёт равномерно. Это значит, что нагреватель отдаёт энергию с постоянной мощностью.

Шаг 2 Участок ВС (от 8 до 14 мин, температура постоянна и равна 100 °C). Нагреватель работает, энергия подводится, а температура **не растёт**. Значит идёт фазовый переход, причём при 100 °C — это температура кипения воды. Идёт **кипение** (парообразование по всему объёму жидкости): вся подводимая энергия расходуется на отрыв молекул от жидкости и превращение воды в пар, $Q = Lm$.

Шаг 3 Участок после точки С (от 14 до 20 мин, от 100 °C до 50 °C). Температура **падает** — значит нагрев прекратили. Вода отдаёт энергию окружающему воздуху и остывает: **охлаждение** воды, $Q = cm(t_1 - t_2)$.

Шаг 4 **Общий аргумент, которым удобно ответить на экзамене.** На графике «температура — время» наклонный участок всегда означает нагревание или охлаждение **в пределах одного состояния**, а горизонтальный участок — **смену состояния** (плавление/кристаллизация или кипение/конденсация). По значению температуры на полке определяют, какой именно это переход: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — плавление льда, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ — кипение воды.

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Это история чайника. Первые 8 минут вода греется до ста градусов. Потом 6 минут кипит — и как бы сильно вы ни грели, градусник упрямо показывает 100: лишняя энергия улетает вместе с паром. Затем чайник выключили, и вода стала остывать.

Ответ: АВ — нагревание воды от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура растёт, $Q = cm\Delta t$); **ВС** — кипение воды при постоянной температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть парообразование ($Q = Lm$); **участок после точки С** — охлаждение воды от $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ после прекращения нагрева.

3. Лёд, находящийся в теплоизолированном калориметре при температуре $t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, расплавили и полученную из него воду нагрели до температуры $t_2 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ путём пропускания водяного пара, температура которого $t_3 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельная теплоёмкость воды $c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$, удельная теплота плавления льда $\lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, удельная теплота парообразования воды $L = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Определите массу льда, который находился в калориметре, если масса пара $m_{\text{п}} = 400\text{ г}$. Потерями энергии пренебречь.

ДАНО

$$m_{\text{п}} = 400\text{ г} = 0,4\text{ кг}; \quad t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t_2 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t_3 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}, \quad \lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad L = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Найти: $m_{\text{л}}$ — ?

Решение.

Шаг 1 **Выписываем, что отдаёт горячий пар.** Конечная температура всего содержимого — $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому пар сначала конденсируется при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а потом получившаяся вода остывает со $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$Q_{\text{отд}} = Lm_{\text{п}} + cm_{\text{п}}(t_3 - t_2) = m_{\text{п}}(L + c(t_3 - t_2)).$$

Шаг 2 **Считаем это число.**

$$Q_{\text{отд}} = 0,4 \cdot (2260 + 4,2 \cdot 20) = 0,4 \cdot (2260 + 84) = 0,4 \cdot 2344 = 937,6\text{ кДж}.$$

Шаг 3 **Выписываем, что получает лёд.** Он при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому сразу плавится, а затем полученная вода нагревается до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$Q_{\text{получ}} = \lambda m_{\text{л}} + cm_{\text{л}}(t_2 - t_1) = m_{\text{л}}(\lambda + c(t_2 - t_1)).$$

Шаг 4 **Составляем уравнение теплового баланса и выражаем массу льда.**

$$m_{\text{л}}(\lambda + c(t_2 - t_1)) = m_{\text{п}}(L + c(t_3 - t_2)) \implies m_{\text{л}} = \frac{m_{\text{п}}(L + c(t_3 - t_2))}{\lambda + c(t_2 - t_1)}.$$

Шаг 5 Считаем знаменатель.

$$\lambda + c(t_2 - t_1) = 330 + 4,2 \cdot 80 = 330 + 336 = 666 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Шаг 6 Получаем ответ.

$$m_{\text{л}} = \frac{937,6}{666} \approx 1,41 \text{ кг} \approx 1,4 \text{ кг}.$$

Шаг 7 **Проверяем.** Лёд забрал $1,41 \cdot 666 \approx 938$ кДж — ровно то, что отдал пар. Логика тоже сходится: здесь воду надо было нагреть аж до 80°C , поэтому «полезность» одного грамма пара упала, и льда он растопил гораздо меньше, чем в предыдущих задачах. ✓

ПРОСТЫМИ СЛОВАМИ

Чем выше требуемая конечная температура, тем меньше льда способен обслужить тот же пар: во-первых, пар сам остывает не до нуля, а лишь до 80°C (значит отдаёт меньше), во-вторых, воду из льда надо не только растопить, но и подогреть на 80°C . Отсюда и скромный результат — всего $1,4$ кг.

Ответ: $m_{\text{л}} = \frac{m_{\text{п}}(L + c(t_3 - t_2))}{\lambda + c(t_2 - t_1)} \approx 1,41 \text{ кг} \approx 1,4 \text{ кг}.$

Итоговая таблица ответов

Эту таблицу удобно использовать для самопроверки: сначала решить задание самостоятельно, потом сверить ответ, и только если не сошлось — читать подробный разбор.

Вариант	№	Самостоятельная работа № 1 — краткий ответ
1	1	Увеличилась (масло нагрелось): выросла кинетическая энергия молекул
	2	Температура одинакова; у металла больше теплопроводность, он быстрее отводит тепло от руки
	3	Обложить льдом сверху — тогда работает конвекция и остывает весь объём
2	1	Уменьшилась (вода остыла): уменьшилась кинетическая энергия молекул
	2	Температура одинакова; у дерева меньше теплопроводность, рука почти не охлаждается
	3	В левом сосуде — там, где спираль у дна: конвекция охватывает весь объём
3	1	Уменьшается; способ — теплопередача (работа не совершается)
	2	Деревянный: меньше теплопроводность и меньше теплоёмкость стен — быстро прогревается
	3	Сверху: к излучению добавляется восходящий конвекционный поток
4	1	Да, увеличилась; способ — совершение работы над лентой
	2	Не одинакова: у менее плотного куска (20 кг/м^3) теплопроводность меньше
	3	Конвекция: нагретая вода всплывает, поэтому верхний термометр показывает больше

Вариант	№	Самостоятельная работа № 2 — краткий ответ
1	1	$Q = qm \approx 4,0 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 40 \text{ ГДж}$
	2	Нагревание льда $\rightarrow$ плавление при 0°C $\rightarrow$ нагревание воды. Вещество — вода (лёд)
	3	$m = \frac{\lambda m_1}{L + 100c} \approx 33 \text{ г}$
2	1	$m = \frac{Q}{q} = 750 \text{ кг}$
	2	I — вода (лёд), $\lambda \approx 330 \text{ кДж/кг}$; II — золото, $\lambda \approx 67 \text{ кДж/кг}$
	3	$m_{\text{п}} \approx 99 \text{ г} \approx 0,1 \text{ кг}$
3	1	$Q = qm = 37 \text{ МДж}$
	2	Свинец ($t_{\text{пл}} = 327^\circ\text{C}$); I — жидкое состояние, II — твёрдое
	3	$m_{\text{л}} \approx 4,87 \text{ кг} \approx 4,9 \text{ кг}$
4	1	$m = \frac{Q}{q} = 0,15 \text{ кг} = 150 \text{ г}$
	2	AB — нагревание воды; BC — кипение при 100°C ; после C — охлаждение
	3	$m_{\text{л}} \approx 1,41 \text{ кг} \approx 1,4 \text{ кг}$

ТРИ ПРАВИЛА, КОТОРЫЕ ЗАКРЫВАЮТ ПОЧТИ ВСЕ ЗАДАЧИ ЭТОЙ ТЕМЫ

1. Температура меняется — работает $Q = cm\Delta t$. Температура стоит на месте — идёт смена состояния, работает $Q = \lambda m$ или $Q = Lm$.
2. В калориметре всегда пишем «сколько отдал горячий = сколько получил холодный» и не забываем, что и тот и другой обычно проходят **два** этапа.
3. Тёплое всплывает, холодное тонет. Отсюда сразу следуют ответы про кипятильник, термометры, пламя спиртовки и пакет молока.