



Заочный физико-математический лицей «Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

Ф И З И К А

8

Часть 1
Тепловые явления

МОСКВА



Заочный физико-математический лицей «Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

ФИЗИКА

8

Учебное пособие

Часть 1

Тепловые явления

МОСКВА

Филатов Е.Н. Физика 8: Часть 1. Тепловые явления:
Учебное пособие. М.: АНО ЗФМЛ «Авангард»; НИЯУ МИФИ,
2014. – 196 с.

Учебное пособие предназначено в помощь учащимся 8 класса общеобразовательных школ. Главная цель пособия – научить учащихся самостоятельно решать задачи, поэтому большое количество задач предлагается для самостоятельного решения.

Все задачи условно разбиты на пять категорий сложности: очень легкие, легкие, средней трудности, трудные, очень трудные. К большинству задач приведены «подсказки» – краткие рекомендации к их решению и ответы.

Рекомендовано в качестве учебного пособия РИС ОУМС НИЯУ МИФИ.

© Филатов Е.Н., 2014

© АНО ЗФМЛ «Авангард», 2014

ISBN

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие для ученика	4
Предисловие для учителя	5
1. Математическое введение: уравнения, в которых одни только буквы, а чисел почти совсем нет	19
2. О точности вычислений	33
3. Внутренняя энергия. Теплопередача. Количество теплоты. Теплоемкость. Удельная теплоемкость	40
4. Уравнение теплового баланса. Калориметр	60
5. Плавление и отвердевание. Удельная теплота парообразо- вания. Переохлажденная жидкость	74
6. Испарение и конденсация. Удельная теплота парообразова- ния. Кипение. Перегретая жидкость	102
7. Теплота сгорания топлива. Коэффициент полезного дейст- вия нагревателя. Тепловая мощность нагревателя	121
8. Теплопроводность	136
9. Конвекция и излучение	153
10. Тепловые двигатели	160
Приложение	173
Подсказки	175
Ответы	188

Предисловие для ученика

Научиться физике = научиться решать задачи по физике.

Это основная формула данного учебника. Учебник составлен так, что его можно проходить как в школе, на уроках, так и дома самостоятельно. Главное при этом, прочитав определенный кусок текста, обязательно остановиться и решить несколько задач на эту тему.

Задачи находятся в конце каждого параграфа. Задач много. Все они условно разбиты на пять категорий: очень легкие, легкие, средней трудности, трудные и очень трудные. К каждой задаче в конце учебника дана *подсказка*, поэтому если, прочитав условие задачи, вы не поняли, как к ней подступиться, посмотрите подсказку. Кроме того, почти ко всем задачам даны ответы, поэтому правильность решения можно проверить самостоятельно.

Помните: для того чтобы научиться решать задачи по физике, надо... их решать! Поэтому постарайтесь решить больше задач.

Желаю вам успеха!

Автор

Предисловие для учителя

В чем главная особенность данного учебника? Автор на основе своего многолетнего опыта сформулировал для себя главный принцип, придерживаясь которого можно добиться успеха в преподавании физики в школе. Этот принцип можно кратко выразить формулой:

Научить физике = научить решать задачи по физике.

Представляется совершенно очевидным и не требующим доказательств утверждение, что если ученик хорошо понимает физику, то он может успешно решать задачи по физике. Верно и обратное утверждение: если ученик свободно решает задачи по физике, то он хорошо понимает физику.

Скажем прямо: в традиционном курсе физики для средней школы задачам отводится вспомогательная роль – на них зачастую просто не находится времени. Главное внимание уделяется усвоению теории. Но что греха таить: под усвоением часто кроется запоминание, причем запоминание без понимания. Не потому ли физика считается едва ли не самым трудным предметом школьной программы, а оценки по физике почти в любом классном журнале в среднем ниже, чем по той же математике?

Данный учебник позволяет так организовать учебный процесс, что главным «действующим персонажем» на уроке становится задача по физике, а главной целью учебного процесса – научить ребят решать задачи по физике.

Что же касается собственно теории, то, как это ни парадоксально, если ее специально не заучивать, она запоминается значительно лучше, как бы «сама собой». Это не удивительно: ведь без многократного обращения к теории (причем осмысленного обращения!) просто невозможно решить большое количество задач.

На какую программу ориентирован учебник? Учебник ориентирован на самую, что ни на есть *обычную* программу для средней общеобразовательной школы: физика (7–9 классы с сеткой 2+2+3 час. в неделю) (см.: Программы общеобразовательных учреждений. Физика. Астрономия. М.: Просвещение, 1996). Последовательность изложения материала в общем соответствует традиционному школьному учебнику А.В. Перышкина, поэтому начинать работать по этому учебнику с 8 класса можно и в том случае, если в 7 классе обучение велось по обычному учебнику.

Структура учебника. Учебник разбит на параграфы, каждый из которых включает определенную (иногда достаточно обширную) тему. Всего в книге 10 параграфов. Если считать, что в первом полугодии 16 учеб-

ных недель, то в среднем на прохождение одного параграфа приходится 1,6 учебной недели, т.е. 3,2 урока. Но, конечно, параграфы неравноценные, кроме того, часть учебного времени уйдет на фронтальные лабораторные работы и на контроль успеваемости.

Каждый параграф содержит в себе теоретические сведения, которые иногда излагаются в форме диалога Автора с Читателем. Это сделано для того, чтобы читатель воображаемый мог заострить внимание читателя реального (т.е. ученика) на тех вопросах, в которых учащиеся обычно допускают ошибки. Кроме того, диалог (в умеренных дозах) несколько оживляет повествование.

В теоретический материал вставлены разобранные задачи по следующему принципу: как только теоретических сведений данного параграфа становится достаточно для того, чтобы приступить к решению очередной группы задач (как расчетных, так и качественных), изложение теории прерывается и дается подробное решение характерной задачи на данную тему. Прочитав решение задачи, учащиеся должны прекратить на время дальнейшее чтение параграфа и решить несколько аналогичных задач самостоятельно (из числа приведенных в конце данного параграфа). Затем чтение продолжается.

В конце каждого параграфа приведено достаточно много задач (в среднем около 50). О принципах подбора задач скажем особо.

1. Задачи отбирались *строго по теме*, т.е. задачи, не относящиеся непосредственно к материалу данного параграфа полностью исключены.

2. Все задачи разбиты на пять условных категорий: А – задачи очень легкие, Б – задачи легкие, В – задачи средней трудности, Г – задачи трудные; Д – задачи очень трудные. *Очень легкие* – это задачи, в которых требуется лишь подстановка численных данных в известную формулу. *Легкие* – это задачи, для решения которых требуется решение одного линейного уравнения первой степени с одним неизвестным. В задачах *средней трудности* требуется составить и решить одно линейное уравнение, но при этом решение требует определенных алгебраических преобразований (раскрытия скобок, переноса членов из одной части уравнения в другую и т.п.). В *трудных задачах*, как правило, требуется составить и решить несколько линейных уравнений, причем необходимо достаточно уверенно владеть аппаратом элементарной алгебры. *Очень трудные* – это типичные задачи физических олимпиад, для решения которых требуется нестандартный подход, творческая интуиция.

3. Никаких знаний, выходящих за пределы данного параграфа, для решения любой из приведенных задач не требуется (иногда, правда, требуются сведения из ранее пройденных параграфов).

4. К каждой задаче имеется *подсказка*, т.е. указание, которое позволяет даже слабому ученику начать работу над решением задачи. Обычно это ссылка на конкретную разобранную в тексте задачу или на приведенную в данном параграфе формулу.

5. К каждой расчетной задаче дается ответ, позволяющий ученикам самостоятельно убедиться в правильности своего решения.

Всего в учебнике 511 задач (только в 1-й части 8-го класса!). Возникает резонный вопрос: мыслимое ли это дело восьмикласснику столько решить? Может быть учебник рассчитан все-таки на одаренных детей? Отвечаю: нет! Учебник рассчитан на *обычные* школы и на *обычных* детей, среди которых есть и сильные, и средние, и слабые.

Под слабым учеником здесь и далее мы будем понимать ученика, который к концу восьмого класса с большим трудом складывает дроби с одинаковыми знаменателями и не слишком уверенно решает уравнение вида $2x = 3$. А дроби с разными знаменателями он складывать не умеет и решить уравнение вида $4(x+1) = x$ не может.

Учебник предусматривает наличие в классе таких учеников. И эти ученики должны *работать*, по мере возможности повышая свой уровень и *не мешая при этом более сильным ученикам*. Иными словами, учебник хорошо приспособлен для работы с *разноуровневым* классом. При этом предполагается, что самые слабые ученики должны за полугодие решить самостоятельно 50–70 задач, а наиболее сильные – 300–400. Скажу более: почти наверняка найдутся в классе и такие «фанаты» (2–3 человека), которые решат всё или почти всё! И именно эти ребята привезут в школу дипломы победителей районной олимпиады по физике.

Новая образовательная технология. Ясно, что учебный процесс, организованный на основе данного учебника, должен проходить иначе, чем при работе с традиционными учебниками. Объясним подробно, как следует организовать учебный процесс.

Урок (после необходимых организационных моментов) начинается с того, что учащиеся открывают учебники на том месте, где начинается материал данного урока. После этого учитель вслух *читает* текст параграфа, а ученики следят по книге. Как правило, чтение должно длиться не более 5–7 минут. Чтение следует прекратить сразу же после первой разобранной в тексте задачи. Затем учитель предлагает учащимся открыть тетради и записать тему урока, после чего разбирает *на доске* задачу, аналогичную той, что только что была прочитана в учебнике. Ученики записывают решение с доски к себе в тетради. Далее учитель записывает на доске номера тех задач, которые ученики должны решить самостоятельно. Например: А3, Б2, Б4, Г1 (обычно 4–5 задач). Задачи должны быть по

возможности разного уровня трудности. Затем класс минут 5–7 самостоятельно решает задачи, аккуратно записывая решения в классные тетради. Учитель в это время помогает наиболее слабым ученикам. Крайне важно, чтобы к концу срока, отведенного на решение данной серии задач, *каждый* ученик самостоятельно решил хотя бы одну задачу (пусть даже с помощью учителя).

Первым трем–пяти учащимся, первыми решившими все задачи данной серии, учитель назначает «премию» (обычно в условных баллах, о которой речь пойдет ниже).

Целесообразно закончить работу класса над данной серией задач после того, как с ней полностью справятся три ученика.

Далее продолжается чтение учителем учебника, потом решение следующей серии задач и т.д. Реально за один урок (45 минут) решить 2 серии по 5 задач (в не очень сильном классе).

Возникает вопрос: следует ли *разбирать* решенные задачи? Отвечаю: если задачи качественные, т.е. не требуют никаких расчетов, то после окончания времени на самостоятельное решение эти задачи следует устно разобрать. Желательно, чтобы разбор проходил в форме устных ответов тех учеников, которые решили эти задачи. Все остальные при этом записывают правильное решение. Ученик, давший правильный ответ, получает определенное число премиальных баллов.

Сразу отметим, что ставить за устные ответы оценки по 5-балльной системе не следует, так как опасение получить невысокую отметку будет сковывать инициативу выступающих и, в конечном счете, учителю придется разбирать задачи самому. Если же придерживаться принципа: за правильный ответ – премиальные баллы, а за неправильный – ничего, учащиеся, как правило, работают активно.

Если же задачи расчетные, то разбирать их в классе *не надо*! Благодаря ответам ребята сами могут определить, правильно ли они решили ту или иную задачу.

В конце урока (лучше в конце изучения параграфа) можно дать самостоятельную работу из 3–4 задач с полной или выборочной проверкой.

На дом обычно задаются все задачи, относящиеся к данному параграфу. Если кто-то из ребят забежит вперед и решит задачи, относящиеся к будущему уроку, большой беды не будет. При этом учитель объясняет, что решать все задачи совершенно необязательно, но чем больше задач решит данный ученик, тем выше будет его *рейтинг* по физике, а значит, и четвертная оценка.

Контроль знаний. Возникает вопрос: как чисто практически контролировать, во-первых, работу учащихся в течение урока, а во-вторых, решение ими домашних заданий? Отвечаю: для этого существует успеш-

но апробированная автором система «деклараций о доходах». Образцы таких «деклараций» приведены ниже. Каждый раз в конце урока каждый ученик на отдельном листе выписывает номера всех решенных им задач и подсчитывает общее число заработанных им баллов (по указанной учителем методике) за эти задачи. Точно так же составляется отчет-декларация и за все решенные к данному моменту домашние задачи. Учителю остается только собрать эти листочки и внести сведения из деклараций в свою учетную тетрадь.

Конечно, могут возникнуть сомнения в достоверности предоставляемой учащимися информации. (Такое, конечно, бывает.) Поэтому для поддержания чувства ответственности полезно время от времени проверять тетради на предмет проверки соответствия «деклараций» реальности. К нарушителям могут быть применены «санкции» в форме вычитания определенного числа баллов.

Дата 15 апреля

*Лист учета самостоятельной работы
учащегося на уроке*

Сучилин Дмитрий, 8А

	<i>Балл</i>	<i>/</i>		<i>Балл</i>	<i>/</i>
<i>5</i>			<i>А11</i>	<i>1</i>	
<i>А2</i>	<i>1</i>		<i>Б15</i>	<i>2</i>	
<i>Б1</i>	<i>2</i>		<i>А13</i>	<i>1</i>	
<i>Б2</i>	<i>2</i>		<i>А14</i>	<i>1</i>	
<i>Б5</i>	<i>2</i>		<i>А15</i>	<i>1</i>	
<i>Б1</i>	<i>3</i>		<i>А16</i>	<i>1</i>	
<i>Б3</i>	<i>3</i>		<i>Б7</i>	<i>2</i>	

Всего баллов: 14

Подпись учащегося:

Сучилин

«Декларация» за классную работу

Как выставять оценки? Мы уже говорили, что все задачи, решенные учащимися, а также устные ответы на уроке следует оценивать не по 5-бальной системе, а в условных баллах. Рекомендуются следующие «расценки»: правильно решенная задача группы А – 1 балл, Б – 2 балла, В – 3 балла, Г – 5 баллов, Д – 20 баллов (возможны и другие пропорции по усмотрению учителя).

Таким образом, каждый ученик по завершении каждого урока, сдав учителю «декларацию» за самостоятельную работу в классе и за выполненную домашнюю работу набирает определенное число баллов. Возникает вопрос: как «конвертировать» эти баллы в оценки в классном журнале? Тут возможны варианты. Например, можно в начале четверти объявить, что все, кто наберут к концу четверти меньше 100 баллов, получат оценку «два», набравшие от 100 до 200 баллов – оценку «три», от 300 до 400 – «четыре», а более 400 баллов – «пять». Можно ввести соответствующие расценки и на более короткий срок, например, на месяц или на 2 недели. Но в любом случае у учителя в руках будет достаточно информации, чтобы обоснованно выставить оценку хоть в каждую клеточку классного журнала.

*Отчет по решению домашних заданий по физике
ученика 8 класса «Б»
Белозерова Кирилла
за период с 01.10 по 07.10 1999 г.*

Мною решены следующие задачи:

*5: A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, B16, B15, B14,
B1, B3, B4*

6: A1, B12, B13, B14, B15, B16, A10, A9, A11, A12

8: A1, A2, B4, B5, П, D2

9: B6

Общее число баллов за эти задачи составляет:

A: 1×18 18

B: 2×13 26

B: 3×1 3

П: 5×1 5

D: 20×1 20

Всего: 72 балла

Подпись учащегося: Белозеров

«Декларация» о домашних работах

Прежде чем мы перейдем к подробным рекомендациям по изучению каждого параграфа, я отвечу на некоторые вопросы, которые обычно возникают у учителей, впервые познакомившихся с этой методикой.

Вопрос: По данной методике устных опросов учащихся у доски вообще не предусмотрено. Правильно ли это?

Ответ: Автор абсолютно убежден, что правильно. Давайте проведем несложный арифметический подсчет. Допустим, в Вашем классе 30 учеников, причем каждого из них необходимо 5 раз в полугодие опросить у доски. Допустим, каждый опрос занимает 5 минут. Значит, за полугодие это составляет: $5 \text{ мин.} \times 30 \text{ уч-ся} \times 5 \text{ раз} = 750 \text{ мин.} = 12,5 \text{ уроков}$. В течение этих 12,5 уроков дети не получают *никакой* новой информации, а будут выступать в роли пассивных слушателей пересказов текста учебника. Причем пересказы эти будут, с точки зрения лекторского мастерства, достаточно слабыми, а то и просто безграмотными.

Ясно, что уровень знаний по физике от таких «слушаний» не повышается, а вот драгоценного времени, которого нам всегда так катастрофически не хватает, тратится очень много. Кроме того, вызов к доске – болезненно неприятное событие для ученика. Само ожидание такого вызова зачастую превращает урок, а значит, и предмет, в нечто нежелательное.

Вопрос: Вы предлагаете учителю *читать* текст учебника. А не лучше ли изложить своими словами?

Ответ: Нет, не лучше! Текст, написанный в учебнике, тщательно выверен автором, там учтено все вплоть до интонации и решительно нет ничего лишнего. Поэтому если попытаться *пересказать* этот текст своими словами, получится *хуже*. Автор сам пытался это делать и убедился – не стоит. Не говоря уже о том, что при пересказе легко забыть какую-нибудь важную деталь, пересказ занимает значительно больше времени.

Вопрос: А как быть с фронтальными лабораторными работами?

Ответ: Здесь ничего не надо менять. Проводите лабораторные работы в строгом соответствии с программой.

Вопрос: А имеются ли какие-то предварительные результаты по использованию данной методики?

Ответ: Да. В течение двух лет «испытательным полигоном» этой книги была Всероссийская школа математики и физики «Авангард». Тестирование показало, что качество знаний учащихся в различных разноразрядных классах было стабильно выше 65% (тесты проводились по пособию: Кабардин Ф.Ф. Задания для итогового контроля знаний учащихся по физике 7–11. М.: Просвещение, 1994).

Вопрос: А нельзя ли воспользоваться данной методикой не полностью, а частично?

Ответ: Можно! Здесь работает принцип: «маслом кашу не испортишь». Но учтите, при частичном использовании методики результат тоже будет «частичным».

Поурочное планирование. Сразу оговоримся, что строгое «централизованное» планирование каждого урока я считаю нецелесообразным хотя бы потому, что материал в данном учебнике дан по сравнению с традиционным учебником с запасом и полное его прохождение не является строго обязательным. Есть и еще одно соображение: практика показала, что более эффективно работать по данной методике на «сдвоенных» уроках. А при планировании «пары» все несколько иначе, чем при планировании двух «одинарных» уроков. Поэтому приводимые ниже рекомендации более правильно было бы назвать не поурочным, а «попараграфовым» планированием. А конкретные поурочные планы лучше составить учителю самостоятельно с учетом данных рекомендаций и специфики того класса, в котором ведется преподавание.

§ 1. УРАВНЕНИЯ, В КОТОРЫХ ОДНИ ТОЛЬКО БУКВЫ, А ЧИСЛА ПОЧТИ СОВСЕМ НЕТ. Этот параграф *чрезвычайно* важен для успешного изучения курса физики 8 класса. Ни в коем случае не следует его пропускать или выносить на самостоятельную работу дома. Ведь одной из бед школьной физики является неумение ребят решать физические уравнения, т.е. уравнения «с буквами». Спрашивается: а почему дети не умеют решать такие уравнения? Да потому, что в школе их этому *не учат!* Ни на физике, ни на математике. Пора решить эту проблему. Для этого и дается §1.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст с начала по Пример 2. Разбирается на доске задание А1. Учащиеся решают самостоятельно: А2, А3, А4 (а), А5 (3 минуты).

Читается текст по Пример 3. Разбирается у доски задание А7 (а). Учащиеся решают самостоятельно: А7 (б), Б1, Б3 (а, б), Б5 (а, б, в), Б13 (а, б), Б14 (а, б) (примерно 7 минут).

Читается текст по Пример 4. Разбираются у доски задания Б2 и Б15. Учащиеся решают самостоятельно: Б6, В1, В2 (а, б, в), В3, В6, В12 (10 минут).

Читается текст по Пример 7. Разбор у доски задания Б23. Учащиеся решают самостоятельно: Б24, Б25, Б26, В15, В16 (3–5 минут).

Читается текст по Пример 11. Разбирается у доски задание В22. Учащиеся решают самостоятельно: А8, А9, В17, В18, В19, В20 (7–10 минут).

Читается текст по Пример 12. Разбирается у доски задание В21. Учащиеся решают самостоятельно: В22, В23, В24, Г1 (7–10 минут).

Читается текст по Пример 15. Разбирается у доски задание В27. Учащиеся решают самостоятельно: В28, В29, В30, В31 (5–10 минут).

Читается текст по Пример 17. Разбирается у доски задание Г9. Учащиеся решают самостоятельно: Г10, Г11, Д2 (10–15 минут).

Читается текст по Пример 20. Разбирается у доски задание Д1. Учащиеся решают самостоятельно: Д4, Д6, Д7 (10–15 минут).

Отметим, что полностью этот параграф имеет смысл проходить только в сильном классе. В среднем классе разумно закончить классную работу Примером 15, а в слабом – Примером 12, предложив желающим разобраться с остальным материалом дома самостоятельно. Обычно на изучение этого параграфа уходят 3 урока.

§2. О ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ. Этот же параграф дословно приведен в учебнике для 7 класса (часть 1), поэтому проходить его следует только тем, кто начал работу над учебниками данного автора с 8 класса. Цель параграфа: во-первых, научить детей правильно округлять результаты вычислений при решении физических задач, а во-вторых, научить их работать с представлениями чисел с помощью степени числа 10. Практика показывает, что на математике этим вопросам не уделяется достаточного внимания.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст с начала до подзаголовка: «Запись чисел с помощью степени числа 10». Разбирается у доски задание А1 (г). Учащиеся решают самостоятельно: А1 (а, б, в) (3 минуты).

Читается текст до подзаголовка: «Примеры решения задач». Разбираются у доски задания: А2 (б), А2 (п), Б2 (г), Б2 (л). Учащиеся решают самостоятельно: А2 (а, в, г, д, е, ж, з, и, к, л), Б2 (а–в), Б2 (д–к) (10 минут).

Читается текст по задаче 2.2. Разбирается у доски задание: Б1(а). Учащиеся решают самостоятельно: Б1 (б–е).

Читается текст до задачи 2.4. Разбирается у доски задание В1 (а). Учащиеся решают самостоятельно: В1 (б–ж).

Читается текст задачи 2.4. Разбирается у доски задание А3 (е). Учащиеся решают самостоятельно: А3 (а–д).

Для прохождения этого параграфа требуется 1,5–2 урока. В слабом классе задачу 2.4 можно опустить.

§3. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст с начала до подзаголовка «Удельная теплоемкость». Это довольно длительное чтение – около 20 минут. Но поскольку материал изложен достаточно интересно, учащиеся обычно спокойно дослу-

шивают текст до конца. Затем читается задача 3.1. Разбирается на доске задача А1. Учащиеся решают самостоятельно: А2, А3 (3 минуты).

Читается текст по задаче 3.2. Разбирается у доски задача А5. Учащиеся решают самостоятельно: А4, А6, А8, Б6, В13 (5–7 минут).

Читается текст по задаче 3.3. Разбирается у доски задача А11. Учащиеся решают самостоятельно: А12, А13, Б7, В16 (5–7 минут).

Читается текст по задаче 3.4. Разбирается у доски задача В8. Учащиеся решают самостоятельно: В9, В10, В11 (5–7 минут).

Читается текст по задаче 3.5. Разбирается у доски задача В14. Учащиеся решают самостоятельно: В15, В16.

Заметим, что в слабом классе задачи 3.4 и 3.5 можно не разбирать. Изучение параграфа занимает 2-3 урока.

§4. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА. КАЛОРИМЕТР.

Это важный и трудный для ребят параграф. Главная трудность – это решение большого числа уравнений с буквами. Уровень усвоения материала параграфа очень сильно зависит от того, насколько хорошо учащиеся усвоили курс алгебры, а также насколько хорошо они прорешали задания §1 данного учебника. На изучение данного параграфа целесообразно обвести 3-4 урока.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст с начала до слов «Способ 2» (в тексте задачи 4.1).

Разбирается у доски задача А1 (первым способом).

Учащиеся решают самостоятельно (первым способом из описанных в тексте задачи 4.1) задачи: А2, В1, В4 (3–5 минут).

Читается текст до слов «Способ 3». Разбирается у доски уже разобранная ранее задача А1, но вторым способом. Учащиеся решают самостоятельно вторым способом задачи: А2 (еще раз), В2, В1 (3-5 минут).

Читается текст до слов: «Как измерить удельную теплоемкость вещества?» Разбирается у доски снова задача А1, но уже третьим способом. Учащиеся решают самостоятельно: В2 (еще раз), В2, В3 третьим способом (3–5 минут).

Читается текст до подзаголовка: «Как определить теплоемкость калориметра?» Разбирается у доски задача В3 способом №2. Учащиеся решают самостоятельно: В10, В8, В9 (5–7 минут).

Читается текст до задачи 4.4. Разбирается у доски задача В6. Учащиеся решают самостоятельно: В7, В5, В9, В10 (7–10 минут). Читается текст задачи 4.4.

Разбирается у доски задача В6. Учащиеся решают самостоятельно: В7, В8, В13 (7–10 минут).

В слабых классах задачу 4.4 можно опустить, а при разборе задачи 4.1 ограничиться лишь первым способом.

§5. ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ. ПЕРЕОХЛАЖДЕННАЯ ЖИДКОСТЬ. Это достаточно большой, насыщенный теорией и задачами параграф. Его изучение потребует 3–4 урока.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст с начала до задачи 5.1. Таблицы температур плавления и удельных теплот плавления рекомендуется прочитать не спеша. Как ни странно, подобная справочная информация воспринимается с интересом. Затем, ничего не разбирая у доски, следует предложить учащимся самостоятельно решить следующие качественные задачи: А1, А2, А3, А4, А5, А6, А7, А8, Б1, Б4, Б5, Б7, Б9. Несмотря на то, что задач много, их решение должно занять 10–15 минут. После этого следует провести устный разбор всех этих задач. Это займет 10–15 минут.

Читается текст задачи 5.1. Разбирается у доски задача Б12. Учащиеся решают самостоятельно: А9, Б13, Б14, Б18 (5–7 минут).

Читается текст до подзаголовка: «Как объяснить плавление и кристаллизацию с молекулярной точки зрения?» Разбирается у доски задача Б14. Учащиеся решают самостоятельно: Б15, Б17, Б12 (3–5 минут).

Читается текст до задачи 5.4. Разбирается у доски задача А10. Учащиеся решают самостоятельно: А11, А12, Б25, Б23, В4 (5–6 минут).

Читается текст до задачи 5.5. Разбирается у доски задача В6. Учащиеся решают самостоятельно: В7, В8, В9 (5–7 минут).

Читается текст до задачи 5.6. Разбирается у доски задача Г3. Учащиеся решают самостоятельно: Г4, Г5, Г6 (10–15 минут).

Читается текст до конца параграфа. Разбирается у доски задача Г13. Учащиеся решают самостоятельно: Г14, Г15, Г16 (10–20 минут).

Заметим, что задачу 5.5 имеет смысл разбирать только в сильном, а задачу 5.6 – в очень сильном классе. В слабом классе можно не разбирать даже задачу 5.4, а ограничиться задачами 5.1, 5.2 и 5.3. Отметим также, что материал, связанный с молекулярным строением твердых, жидких и газообразных «тел» является повторительным: эти вопросы уже обсуждались в курсе 7 класса (часть 1).

§6. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ. КИПЕНИЕ. ПЕРЕГРЕТАЯ ЖИДКОСТЬ. На изучение этого параграфа потребуется 2–3 урока.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст сначала до слов «Примеры, решения задач». Рекомендуется подробно остановиться на таблицах температур кипения и удельных теплот парообразования. Чтение займет около 20 минут.

Учащиеся самостоятельно решают следующие качественные задачи: А1, А2, А3, А4, А5, А6, А7, Б1, Б2, Б3, Б7, В1, Г1 (10–15 минут). Устный разбор задач учащимися.

Читается текст задачи 6.1. Разбирается у доски задача А8. Учащиеся решают самостоятельно: Б10, Б11, Б4 (3–5 минут).

Читается текст задачи 6.2. Разбирается у доски задача А9. Учащиеся решают самостоятельно: А10, А11, Б13, В7 (7–10 минут).

Читается текст задачи 6.3. Разбирается у доски задача В10. Самостоятельно учащиеся решают: В11, В12 (7–10 минут).

Читается текст задачи 6.4. Разбирается у доски задача Г4. Учащиеся решают самостоятельно: Г6, Г12, Г9 (10–15 минут).

Читается текст задачи 6.5. Разбирается у доски задача Г13. Учащиеся решают самостоятельно: Г14, Г15, Д1 (15–20 минут).

Заметим, что задачу 6.5 есть смысл разбирать только в очень сильном классе. В слабом классе можно ограничиться только задачами 6.1 и 6.2. В среднем классе стоит разобрать задачи 6.3 и 6.4.

§7. ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ НАГРЕВАТЕЛЯ. ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ. Этот параграф содержит много необязательного, но очень полезного в плане пропедевтики материала. Поэтому при нехватке времени изучение данного параграфа можно существенно ограничить, не рассматривая материал после подзаголовка «Коэффициент полезного действия нагревательных приборов». В этом случае параграф проходит за 1 урок.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст до слов «Коэффициент полезного действия или теплоотдача нагревательных приборов». Разбирается у доски задача А4. Учащиеся решают самостоятельно: А6, А5, Б3 (а, б), Б4 (5–7 минут).

Читается текст до подзаголовка «Тепловая мощность нагревателя». Разбирается у доски задача Б7. Учащиеся решают самостоятельно: Б8, В4, В5 (5–7 минут).

Читается текст до подзаголовка: «Примеры решения задач». Разбирается у доски задача В10. Учащиеся решают самостоятельно: В11, В12, В13 (7–10 минут).

Читается текст задачи 7.4. Разбирается у доски задача В6. Учащиеся решают самостоятельно: Б9, В7, В8 (7–10 минут).

Читается текст задачи 7.5. Разбирается у доски задача В15. Учащиеся решают самостоятельно: В16, Г2, Г3.

Читается текст задачи 7.6. Разбирается у доски задача В17. Учащиеся решают самостоятельно задачи: Д1, Д2 (15–20 минут).

Заметим, что задачи 7.5 и 7.6 имеет смысл разбирать только в очень сильных классах.

§ 8. *ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ*. Сразу оговоримся, что материал этого параграфа значительно превосходит материал традиционного школьного курса физики для 8 класса. Вводится коэффициент теплопроводности материала и понятие теплового потока. Практика показала, что в среднем классе этот материал не вызывает серьезных затруднений, но в слабом классе можно ограничиться рассмотрением только качественных задач. В этом случае параграф можно изучить за 1 урок.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст с начала до слов «Примеры решения задач». Учащиеся самостоятельно решают качественные задачи: А1–А8, Б2, Б4, Б6, Б8, В13, В2 (15 минут). Устный разбор задач учащимися.

Читается текст до задачи 11.2. Разбирается у доски задача В15. Учащиеся решают самостоятельно: В16, В13, В14 (10–12 минут). Разбор у доски задачи В17. Учащиеся решают самостоятельно: В18, В12 (7–10 минут).

Читается задача 8.2. Разбирается у доски задача В19. Учащиеся решают самостоятельно: В20, В21 (7–10 минут).

Читается текст задачи 8.3. Разбирается у доски задача Г6. Учащиеся решают самостоятельно: Г7, Д4 (15–20 минут).

Заметим, что в слабом классе задачу 8.3 разбирать нецелесообразно.

§9. *КОНВЕКЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ*. Этот параграф содержит только качественные задачи, поэтому его изучение обычно не вызывает затруднений. При необходимости весь материал можно пройти за 1 урок.

Порядок изучения параграфа..

Читается текст с начала до подзаголовка «Излучение». Учащиеся решают самостоятельно: А1, А2, А3, Б1, Б4, Б5, Б6, В12, В6 (7–10 минут). Устный разбор решенных задач учащимися.

Читается текст до конца параграфа. Учащиеся решают самостоятельно: А6, А8, В13, В14, В9, Г5. Устный разбор учащимися решенных задач.

§10. *ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ*. Главная задача параграфа – познакомиться ребят с устройством двигателя внутреннего сгорания и особенностями его работы. Для технически грамотных ребят параграф простой, для технически безграмотных – сложный. На изучение параграфа разумно отвести 2 урока.

Порядок изучения параграфа.

Читается текст до подзаголовка: «Устройство бензинового двигателя внутреннего сгорания». Учащиеся решают самостоятельно: А1, А2, А3, А4, Б1, Б2, Б3, Б4 (7 минут). Устный разбор решенных задач.

Читается текст до подзаголовка: «Сколько цилиндров нужно двигателю?» Учащиеся решают самостоятельно: Б5, Б6, Б7, В1, В2, В3 (5–7 минут). Устный разбор задач учащимися.

Читается текст до задачи 10.1. Учащиеся решают самостоятельно: Б8, Б10, В4, В5, В7, В8, В9 (5–7 минут). Устный разбор задач учащимися.

Читается текст задачи 10.1. Учащиеся решают самостоятельно: Б9, В10, В11 (3–5 минут).

Читается текст до конца параграфа. Разбор у доски задачи Б12. Учащиеся решают самостоятельно: А5, Б13, В12, В15, В16.

В заключение отметим, что учебное время на изучение темы «Тепловые явления» немного превышает отведенное официальной программой. Этот «перерасход» будет компенсирован при прохождении темы «Электричество», поскольку на электричество расчетные задачи, как правило, значительно проще в математическом смысле.

Необходимо также иметь в виду, что рекомендованное число часов на каждый параграф и номера рекомендованных для разбора на уроке задач – не более чем рекомендации. Поэтому учитель вправе вносить любые разумные коррективы в предложенное поурочное планирование.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ: УРАВНЕНИЯ, В КОТОРЫХ ОДНИ ТОЛЬКО БУКВЫ, А ЧИСЕЛ ПОЧТИ СОВСЕМ НЕТ

Вы уже имеете определенный опыт решения уравнений в курсе математики. Физические уравнения, с которыми мы уже немного поработали в 7 классе, отличаются от привычных математических уравнений тем, что состоят они практически только из букв, одни из которых обозначают известные величины, а другие – неизвестные. Решить такое уравнение – означает выразить неизвестную искомую величину через известные величины.

В данном параграфе мы потренируемся в решении физических уравнений, которые потом будут появляться у нас в процессе решения физических задач.

Прежде всего отметим, что в физических уравнениях используются как большие (прописные), так и малые (строчные) латинские буквы, а также некоторые буквы греческого алфавита (главным образом малые). Кроме того, часто используются буквы с индексами как вверх, так и вниз, например: C_0 , C^k , m_1 , m_2 и т.д. Ясно, что буквы m_1 и m_2 обозначают разные величины.

Буквы, которые будут использоваться в данной главе

1. Латинские прописные: C (цэ), D (дэ), H (аш), L (эл), M (эм), N (эн), Q (ку), R (эр), T (тэ), V (вэ), W (дубль вэ).

2. Латинские строчные: a (а), b (бэ), c (цэ), d (дэ), h (аш), k (ка), l (эл), m (эм), n (эн), q (ку), r (эр), s (эс), t (тэ), v (вэ), x (икс), y (игрек).

3. Греческие прописные: Δ (дельта), Φ (фи).

4. Греческие строчные: α (альфа), β (бэта), δ (дэльта), λ (ламбда), μ (мю), ν (ню), η (эта), κ (каппа), θ (тэта), ρ (ро), π (пи).

Строчная греческая буква π будет использоваться исключительно для обозначения числа Пи:

$$\pi = 3,141592654\dots,$$

которое равно отношению длины окружности к диаметру.

Особо скажем о прописной греческой букве Δ (дельта). В физике она обычно используется *не для обозначения какой-либо физической величины*, а для обозначения *изменения физической величины*. Например, запись Δa означает:

$$\Delta a = (\text{изменение величины } a) = (\text{конечное значение величины } a) - (\text{начальное значение величины } a),$$

то есть если утром температура воздуха была равна $t^{\text{нач}} = 20^\circ\text{C}$, а днем $t^{\text{кон}} = 30^\circ\text{C}$, то *изменение температуры равно*:

$$\Delta t = t^{\text{кон}} - t^{\text{нач}} = 30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C}.$$

Итак, запомните: две буквы Δa обозначают *не* произведение величины Δ на величину a , а одну величину Δa , точно так же, как два слова «Петя Иванов» обозначают одного человека, а не двух.

Решение физических уравнений

Прежде чем мы приступим к физическим уравнениям, давайте вспомним, как решаются привычные нам математические уравнения первой степени с одним неизвестным.

Пример 1. $2x = 3$.

Читатель: Это уж слишком просто! $x = \frac{3}{2}$.

Автор: А вы уверены, что x равен именно $\frac{3}{2}$, а не $\frac{2}{3}$?

Читатель: Да, в общем-то.

Автор: А на чем основана Ваша уверенность?

Читатель: Честно говоря, я над этим не задумывался...

Автор: Давайте разберемся. Пусть у нас имеется верное числовое равенство, например: $5 = 5$. Если мы разделим обе части этого равенства на одно и то же число, не равное нулю, то равенство не нарушится. Например: $\frac{5}{3} = \frac{5}{3}$ или $\frac{5}{101} = \frac{5}{101}$ и т.д. Наше уравнение $2x = 3$ – это тоже равенство. И если мы разделим обе час-

ти этого равенства на одно и то же число, не равное нулю, то равенство не нарушится. Разделим обе части уравнения на 2 и получим: $\frac{2x}{3} = \frac{3}{2}$. Сокращаем двойки: $\frac{2x}{2} = \frac{3}{2}$ и получаем ответ:

$$\underline{x = \frac{3}{2}}.$$

Пример 2. $ax = b$.

Читатель: Разделим обе части уравнения на a и получим ответ:

$$\frac{ax}{a} = \frac{b}{a} \Rightarrow x = \frac{b}{a}.$$

(Здесь и далее стрелка $\Rightarrow$ будет означать: «отсюда следует».)

Автор: Подождите! Я же не сказал Вам, какую величину надо найти. Это в математике неизвестное всегда обозначают через x или y в крайнем случае через y , а в физике это совершенно необязательно. Пусть x и b – известные величины, а найти надо a .

Читатель: Тогда $\frac{ax}{x} = \frac{b}{x} \Rightarrow a = \frac{b}{x}.$

Автор: Совершенно верно. Замечу лишь, что это справедливо, если $x \neq 0$.

Уравнения, в которых неизвестное содержится только в одной части уравнения

Пример 3. $Q = cm\Delta t$, найти Δt .

Договоримся, что в этом и всех последующих примерах данного параграфа все величины в уравнениях, кроме тех, которые требуется определить, считаются известными.

Разделим обе части уравнения на величину cm . Получим:

$$\frac{Q}{cm} = \frac{cm\Delta t}{cm}. \text{ Дробь в правой части можно сократить: } \frac{Q}{cm} = \frac{cm\Delta t}{cm} \Rightarrow$$

$$\frac{Q}{cm} = \Delta t. \text{ Поменяв местами правую и левую части, получим окон-}$$

чательный ответ $\Delta t = \frac{Q}{cm}.$

Пример 4. $m_1 L = mc(t - t_k)$, найти m .

Разделим обе части уравнения на выражение $c(t - t_k)$. Получим:

$$\frac{m_1 L}{c(t - t_k)} = \frac{mc(t - t_k)}{c(t - t_k)}.$$

Сократим дробь в правой части уравнения и получим ответ:

$$\frac{m_1 L}{c(t - t_k)} = \frac{\cancel{m} \cancel{c} (t - \cancel{t_k})}{\cancel{c} (t - \cancel{t_k})} \Rightarrow \frac{m_1 L}{c(t - t_k)} = m, \quad m = \frac{m_1 L}{c(t - t_k)}.$$

А теперь для разнообразия попробуем решить чисто математическое уравнение.

Пример 5. $2x = \frac{1}{2}$.

Читатель: Это просто: $\frac{2x}{2} = \frac{\frac{1}{2}}{2}$, двойки сокращаются, получаем $x = 1$.

Автор: Значит, разделив $\frac{1}{2}$ на 2, Вы получили 1?

Читатель: Совершенно верно.

Автор: Поздравляю Вас! Вы имеете шанс сказочно разбогатеть! И знаете на чем? На торговле яблоками. В самом деле, берем половину яблока, делим эту половинку пополам и получаем... целое яблоко! Ну а дальше, как говорится, дело техники.

Читатель: Да, что-то здесь не так...

Автор: Надо просто вспомнить правило деления дроби на дробь.

Смотрите сами: $\frac{1}{2} : 2 = \frac{1}{2} : \frac{2}{1} = \frac{1 \cdot 1}{2 \cdot 2} = \frac{1}{4}$. Следовательно,

$x = \frac{1}{2} : 2 = \frac{1}{4}$. И заметьте, результат вполне логичен: разделив

половинку пополам, мы получили четвертинку.

Пример 6. $ax = \frac{b}{c}$, найти x .

Способ 1. Разделим обе части на a , получим: $\frac{ax}{a} = \frac{b}{c} : a \Rightarrow$

$$x = \frac{b}{c} : \frac{a}{1} \Rightarrow x = \frac{b}{ac}.$$

Способ 2.

1. Умножим обе части на c , получим:

$$cax = \cancel{c} \frac{b}{\cancel{c}} \Rightarrow cax = b.$$

2. Разделим обе части уравнения на ca и получим ответ:

$$\frac{\cancel{c}\cancel{a}x}{\cancel{c}\cancel{a}} = \frac{b}{ca} \Rightarrow x = \frac{b}{ca}.$$

Пример 7. $\rho = \frac{m}{v}$, найти v .

1. Домножим обе части на v , получим

$$\rho \cdot v = \frac{m}{\cancel{v}} \Rightarrow \rho v = m.$$

2. Теперь разделим обе части уравнения на ρ и получим от-

вет:
$$\frac{\rho v}{\rho} = \frac{m}{\rho} \Rightarrow v = \frac{m}{\rho}.$$

Пример 8. $x + 2 = 3$.

Читатель: Ну, это пример для первого класса: $x = 3 - 2$, $x = 1$.

Автор: А не могли ли Вы пояснить Ваши действия?

Читатель: А что тут особенно пояснять? Я перенес двойку из левой части уравнения в правую, поменяв ее знак на противоположный. Вот и всё.

Автор: А на каком основании Вы перенесли двойку из левой части уравнения в правую, да еще поменяв ее знак на противоположный?

Читатель: Это такое правило.

Автор: Такое правило, конечно, существует, но важно понимать, на чем это правило основано. Поясним это на конкретном примере. Рассмотрим числовое равенство:

$$2 + 3 = 5. \quad (1)$$

Если мы отнимем от обеих частей этого равенства по тройке, то равенство не нарушится: $2 + 3 - 3 = 5 - 3$. Учитывая, что $3 - 3 = 0$, можем записать:

$$2 = 5 - 3. \quad (2)$$

Итак, мы получили равенство (2) из равенства (1), произведя вычитание из обеих частей одного и того же числа 3. Но если мы сравним равенства (1) и (2), то увидим, что *чисто внешне* получилось так, как *если бы* мы перенесли число 3 из левой части равенства в правую, поменяв у него знак на противоположный.

Пример 9. $m_1 + m_2 = M$, найти m_1 .

Перенесем m_2 в правую часть уравнения, поменяв знак на противоположный, и получим ответ: $\underline{m_1 = M - m_2}$.

Пример 10. $b + ax = c$, найти x .

1. Перенесем b в правую часть уравнения, поменяв у него знак на противоположный: $ax = c - b$.

2. Разделим обе части уравнения на a :

$$\frac{ax}{a} = \frac{c-b}{a} \Rightarrow x = \frac{c-b}{a}.$$

Пример 11. $m_1 L = mc(t - t_1)$, найти t .

Способ 1.

1. Раскроем скобки, получим: $m_1 L = mct - mct_1$.

2. Перенесем член $(-mct_1)$ в левую часть, изменив знак « $-$ » на « $+$ »:

$$\begin{aligned} & \swarrow m_1 L = mct \quad \boxed{-mct_1} \\ & +mct_1 + m_1 L = mct. \end{aligned}$$

3. Разделим обе части на mc и получим:

$$\frac{mct_1 + m_1 L}{mc} = \frac{mct}{mc}.$$

Отсюда ответ: $\frac{mct_1 + m_1 L}{mc} = t$ или $t = \frac{mct_1 + m_1 L}{mc}.$

Способ 2.

1. Разделим обе части уравнения на mc :

$$\frac{m_1 L}{mc} = \frac{\cancel{mc}(t_1 - t)}{\cancel{mc}} \Rightarrow \frac{m_1 L}{mc} = t - t_1.$$

2. Перенесем $(-t_1)$ в левую часть, поменяв знак « $-$ » на « $+$ » и получим ответ:

$$\swarrow \frac{m_1 L}{mc} = t \quad \boxed{-t_1} \Rightarrow +t_1 + \frac{m_1 L}{mc} = t \Rightarrow$$

$$t = t_1 + \frac{m_1 L}{mc}. \quad (1)$$

Читатель: При решении первым способом мы, вроде бы, получили другой ответ...

Автор: Тот же самый! Чтобы убедиться в этом, достаточно привести выражение (1) к общему знаменателю:

$$t = t_1^{mc} + \frac{m_1 L}{mc} = \frac{mct_1 + m_1 L}{mc}.$$

Получилось то же значение t , что и при решении способом 1.

Пример 12. $\rho_2 = \rho_1 (1 - \beta \Delta t)$, найти β .

1. Разделим обе части уравнения на ρ_1 :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\rho_1(1 - \beta \Delta t)}{\rho_1} \Rightarrow \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 - \beta \Delta t.$$

2. Перенесем $(-\beta \Delta t)$ в левую часть, а $\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) -$ в правую часть

уравнения, поменяв у них знаки на противоположные:

$$\boxed{\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 - \beta \Delta t} + \beta \Delta t = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

3. Разделим обе части уравнения на Δt и получим ответ:

$$\frac{\beta \Delta t}{\Delta t} = \frac{\left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}{\Delta t} \Rightarrow \beta = \frac{1}{\Delta t} \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right). \quad (1)$$

Читатель: А почему $\frac{\left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$?

Автор: Потому что для произвольного числа a справедливо

$$\frac{a}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \cdot a, \text{ так как по правилу умножения дробей}$$

$$\frac{1}{\Delta t} \cdot a = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{a}{1} = \frac{1 \cdot a}{\Delta t \cdot 1} = \frac{a}{\Delta t}.$$

То есть разделить число a на Δt или умножить его на дробь $\frac{1}{\Delta t}$ — это одно и то же.

Полученное нами выражение (1) для β можно (при желании) преобразовать:

$$\beta = \frac{1}{\Delta t} \left(1^{\rho_1} - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \right) = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\Delta t \rho_1}.$$

Уравнения, в которых неизвестное содержится в обеих частях уравнения

Пример 13. $3x + 2 = 2x + 4$.

Основная идея решения таких уравнений состоит в том, чтобы собрать все члены, содержащие неизвестную величину, в одной части уравнения, а не содержащие — в другой:

$$\begin{aligned} & \downarrow 3x + \boxed{2} = \boxed{2x} + 4 \nearrow \\ & -2x + 3x = +4 - 2 \Rightarrow \underline{x = 2}. \end{aligned}$$

Пример 14. $ax + b = cx + d$, найти x .

$$\begin{aligned} & \downarrow \boxed{ax} + b = \boxed{cx} + d \nearrow \Rightarrow -cx + ax = +d - b. \end{aligned}$$

Вынесем за скобку x : $x(a - c) = d - b$. Разделим обе части на $(a - c)$ и получим:

$$\frac{x(\cancel{a-c})}{(\cancel{a-c})} = \frac{(d-b)}{(a-c)} \Rightarrow x = \underline{\underline{\frac{d-b}{a-c}}}.$$

Пример 15. $c_1 m_1 t_1 + C t_2 = (c_1 m_1 + C) \theta$, найти C .

1. Раскроем скобки в правой части уравнения:

$$c_1 m_1 t_1 + C t_2 = c_1 m_1 \theta + C \theta.$$

2. Перенесем $C \theta$ в левую часть уравнения, а $c_1 m_1 t_1$ — в правую:

$$\begin{aligned} & \downarrow \boxed{c_1 m_1 t_1} + C t_2 = c_1 m_1 \theta + \boxed{C \theta} \nearrow \Rightarrow -C \theta + C t_2 = c_1 m_1 \theta - c_1 m_1 t_1. \end{aligned}$$

3. Вынесем в левой части C за скобки:

$$C(t_2 - \theta) = c_1 m_1 \theta - c_1 m_1 t_1.$$

4. Разделим обе части уравнения на $(t_2 - \theta)$, получим:

$$\frac{C(\cancel{t_2 - \theta})}{(\cancel{t_2 - \theta})} = \frac{c_1 m_1 \theta - c_1 m_1 t_1}{(t_2 - \theta)} \Rightarrow C = \frac{c_1 m_1 \theta - c_1 m_1 t_1}{t_2 - \theta}.$$

Ответ получен, но «для красоты» можно еще в числителе вынести за скобки $c_1 m_1$: $C = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_1)}{t_2 - \theta}.$

Системы уравнений

Пример 16.
$$\begin{cases} 3x = 9; & (1) \\ yx = 15. & (2) \end{cases}$$

Уравнение (1) содержит только одно неизвестное x , поэтому решить его не представляет труда: $x = \frac{9}{3} \Rightarrow x = 3$. Зная значение x , мы можем подставить его в уравнение (2) и найти y :

$$y \cdot 3 = 15 \Rightarrow y = \frac{15}{3} \Rightarrow y = 5.$$

Запишем ответ:
$$\begin{cases} x = 3; \\ y = 5. \end{cases}$$

Пример 17.
$$\begin{cases} lk = L; & (1) \\ V k^3 = V_0. & (2) \end{cases}$$
 Найти k и V .

1. Из уравнения (1), которое содержит только одно неизвестное k , найдем k : $k = \frac{L}{l}.$

2. Подставим значение k в уравнение (2): $V \left(\frac{L}{l} \right)^3 = V_0.$

3. Умножим обе части на дробь $\frac{l^3}{L^3}$:

$$V \frac{L^3}{l^3} \cdot \frac{l^3}{L^3} = V_0 \frac{l^3}{L^3} \Rightarrow V = V_0 \frac{l^3}{L^3}.$$

Запишем ответ:
$$\begin{cases} k = \frac{L}{l}; \\ V = V_0 \frac{l^3}{L^3}. \end{cases}$$

Пример 18.
$$\begin{cases} \Delta l = l_0 \alpha \Delta t; & (1) \\ Q = c\rho V \Delta t. & (2) \end{cases}$$

В этой системе неизвестны Δt и Δl , требуется найти *только* Δl . Поскольку величину Δt с нас не спрашивают, то и не будем ее искать. Приступим сразу к поиску Δl . Для этого разделим левую часть уравнения (1) на левую часть уравнения (2), а правую часть уравнения (1) на правую часть уравнения (2) и приравняем полученные отношения. (Равенство при этом не нарушится, так как если, например, $5=5$ и $3=3$, то $5/3 = 5/3$.)

$$\frac{\Delta l}{Q} = \frac{l_0 \alpha \cancel{\Delta t}}{c\rho V \cancel{\Delta t}}.$$

Неизвестная нам величина Δt сократилась. Теперь умножим обе части уравнения на Q и получим ответ:

$$\frac{\Delta l}{Q} Q = \frac{l_0 \alpha}{c\rho V} Q \Rightarrow \Delta l = \frac{l_0 \alpha Q}{c\rho V}.$$

Пример 19.
$$\begin{cases} x + y = 3; & (1) \\ x + 2y = 5. & (2) \end{cases}$$

Такую систему можно решить несколькими методами, из которых наиболее простой *метод подстановки*.

Выразим из уравнения (1) неизвестное x через неизвестное y :

$$x = 3 - y, \quad (3)$$

а теперь *подставим* это значение x в уравнение (2):

$$(3 - y) + 2y = 5 \Rightarrow 3 - y + 2y = 5 \Rightarrow 3 + y = 5 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y = 5 - 3 \Rightarrow y = 2.$$

Значение y мы нашли. Подставим это значение в (3) и получим значение x : $x = 3 - y = 3 - 2 = 1$.

Запишем окончательный ответ: $\begin{cases} x = 1; \\ y = 2. \end{cases}$

Пример 20. $\begin{cases} (L + c_B \Delta t)m_x = \lambda m; & (1) \\ m_B = m + m_x. & (2) \end{cases}$ Найти m и m_x .

1. Из уравнения (2) выразим m через m_x :

$$m = m_B - m_x. \quad (3)$$

2. Подставим значение m в уравнение (1):

$$(L + c_B \Delta t)m_x = \lambda(m_B - m_x) \Rightarrow (L + c_B \Delta t)m_x = \lambda m_B - \lambda m_x.$$

3. Перенесем $(-\lambda m_x)$ в левую часть:

$$\checkmark \quad (L + c_B \Delta t)m_x = \lambda m_B \quad \boxed{-\lambda m_x} \Rightarrow +\lambda m_x + (L + c_B \Delta t)m_x = \lambda m_B.$$

4. Вынесем m_x за скобки как общий множитель:

$$m_x(\lambda + L + c_B \Delta t) = \lambda m_B.$$

5. Разделим обе части уравнения на $(\lambda + L + c_B \Delta t)$ и получим значение m_x :

$$\frac{m_x(\lambda + L + c_B \Delta t)}{(\lambda + L + c_B \Delta t)} = \frac{\lambda m_B}{(\lambda + L + c_B \Delta t)} \Rightarrow m_x = \frac{\lambda m_B}{\lambda + L + c_B \Delta t}.$$

6. Значение неизвестной величины m_x найдено. Подставим это значение в выражение (3) и найдем значение m :

$$m = m_B - m_x = m_B - \frac{\lambda m_B}{\lambda + L + c_B \Delta t}.$$

Ответ получен, но «для красоты» последнее выражение можно преобразовать:

$$\begin{aligned} m &= m_B^{\lambda + L + c_B \Delta t} - \frac{\lambda m_B^{\lambda}}{\lambda + L + c_B \Delta t} = \frac{m_B \lambda + m_B L + m_B c_B \Delta t - \lambda m_B}{\lambda + L + c_B \Delta t} = \\ &= \frac{m_B L + m_B c_B \Delta t}{\lambda + L + c_B \Delta t} = \frac{m_B (L + c_B \Delta t)}{\lambda + L + c_B \Delta t}. \end{aligned}$$

Запишем окончательный ответ:

$$\begin{cases} m_x = \frac{\lambda m_B}{\lambda + L + c_B \Delta t}; \\ m = \frac{m_B (L + c_B \Delta t)}{\lambda + L + c_B \Delta t}. \end{cases}$$

Задания для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- A1.** $Q = Lm$, найти m .
A2. $\Delta U = Lm$, найти L .
A3. $Q = \lambda m$, найти λ .
A4. а) $m_1 = \rho_1 V$, найти ρ_1 ;
 б) $m_1 = \rho_1 V$, найти V .
A5. $Q = c\Delta t$, найти Δt .
A6. $Q = qm$, найти m .
A7. а) $V = V_0\beta$, найти V_0 ;
 б) $V = V_0\beta$, найти β .
A8. $m_{\text{л}} + m_{\text{в}} = M$, найти $m_{\text{л}}$.
A9. $v_1 + v_2 = V$, найти v_2 .
A10. $x + y = m_2$, найти y .
A11. $m_{\text{с}} + m_{\text{а}} = M$, найти $m_{\text{с}}$.

Задачи легкие

- Б1.** $\lambda m_x = Lm$, найти L .
Б2. $xL = Q_2 - Q_1$, найти x .
Б3. а) $\lambda m = cm_a \Delta t$, найти λ ;
 б) $\lambda m = cm_a \Delta t$, найти c .
Б4. $Q = c(t_1 - t_2)$, найти c .
Б5. а) $\Delta l = l_0 \alpha t$, найти l_0 ;
 б) $\Delta l = l_0 \alpha t$, найти α ;
 с) $\Delta l = l_0 \alpha t$, найти t .
Б6. $M = \rho(V - v)$, найти ρ .
Б7. а) $Q = mc\Delta t$, найти c ;
 б) $Q = mc\Delta t$, найти m .
Б8. а) $Q = m\rho V\Delta t$, найти ρ ;
 б) $Q = m\rho V\Delta t$, найти V .

- Б9.** а) $c\rho\Delta V = \beta Q$, найти ρ ;
 б) $c\rho\Delta V = \beta Q$, найти ΔV .
Б10. а) $\eta qm = Mc\Delta t$, найти η ;
 б) $\eta qm = Mc\Delta t$, найти q ;
 в) $\eta qm = Mc\Delta t$, найти m .
Б11. а) $d\Phi = \kappa S\Delta t$, найти S ;
 б) $d\Phi = \kappa S\Delta t$, найти Δt .
Б12. а) $\beta_1 V_1 \Delta t_1 = \beta_2 V_2 t_2$, найти β_1 ;
 б) $\beta_1 V_1 \Delta t_1 = \beta_2 V_2 t_2$, найти V_1 .
Б13. а) $m = \rho nabc$, найти n ;
 б) $m = \rho nabc$, найти ρ .
Б14. а) $\Delta\rho = -\beta\rho_0\Delta t$, найти ρ_0 ;
 б) $\Delta\rho = -\beta\rho_0\Delta t$, найти Δt .
Б15. $(m_1 - m_0)\lambda = c_2 m_2 t_2$, найти λ .
Б16. $m_{\text{с}}(t - t_0) = m_1 \lambda$, найти m .

Задачи средней сложности

- В1.** $(m_1 - m_2)\lambda = c_2 m_2 t_2$, найти m_2 .
В2. а) $\rho Vc(t_1 - t_0) = \rho_1 V_1 \lambda$,
 найти ρ ;
 б) $\rho Vc(t_1 - t_0) = \rho_1 V_1 \lambda$, найти V ;
 в) $\rho Vc(t_1 - t_0) = \rho_1 V_1 \lambda$, найти c ;
 г) $\rho Vc(t_1 - t_0) = \rho_1 V_1 \lambda$, найти ρ_1 ;
 д) $\rho Vc(t_1 - t_0) = \rho_1 V_1 \lambda$, найти V_1 ;
 е) $\rho Vc(t_1 - t_0) = \rho_1 V_1 \lambda$, найти λ .
В17. а) $Q = m(c\Delta t + \lambda)$, найти Δt ;
 б) $Q = m(c\Delta t + \lambda)$, найти λ .

Б18. $\lambda m_{\text{в}} = cm(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$, найти $t_{\text{к}}$.

Б19. $Q = mc(t_2 - t_1)$, найти t_2 .

Б20. $Q = C(t_1 - t_2)$, найти t_1 .

Б21. $\Delta m = V(\rho - \rho_1)$, найти ρ .

Б22. $M = \rho(V_{\text{н}} - V_{\text{к}})$, найти $t_{\text{к}}$.

Б23. $\frac{Q}{m} = q$, найти m .

Б24. $\frac{m}{v} = \rho$, найти v .

Б25. $\frac{Q}{m_1} = \lambda$, найти m_1 .

Б26. $\frac{Q}{M} = L$, найти M .

Б27. $v = \frac{S}{t}$, найти t .

В3. $Q = m(c\Delta t + \lambda)$, найти m .

В4. а) $Q = \rho abc(c_1 \Delta t + \lambda)$,
найти ρ ;

б) $Q = \rho abc(c_1 \Delta t + \lambda)$,
найти a .

В5. а) $Q = mc(\theta - t_1)$, найти m ;

б) $Q = mc(\theta - t_1)$, найти c .

В6. $l = l_0(1 - \alpha t)$, найти l_0 .

В7. а) $\Delta l = \alpha l_0(t_2 - t_1)$, найти α ;

б) $\Delta l = \alpha l_0(t_2 - t_1)$, найти l_0 .

В8. $S = S_0(1 - 2\alpha t)$, найти S_0 .

В9. $\Delta V = \frac{\pi d^2}{4} \Delta h$, найти Δh .

В10. $m = \rho \pi D^2 h$, найти h .

В11. $V_2 = V_1(1 + \beta t)$, найти V_1 .

В12. $\rho_2 = \rho_1(1 - \beta t)$, найти ρ_1 .

В13. $Q = \rho V abc \Delta t$, найти a .

В14. $c_1 m_1 \Delta t_1 = c_2 m_2 \Delta t_2$, найти m_2 .

В15. $\Phi = \frac{S(t_2 - t_1)}{d}$, найти d .

В16. $\rho = -\frac{\Delta \rho}{\beta \Delta t}$, найти β .

В17. $(L + c_{\text{в}} \Delta t) m_{\text{х}} = \lambda m$, найти L .

В18. $c_{\text{в}}(\theta - t_1) = x(L + c_{\text{в}}(t_2 - \theta))$,
найти t_1 .

В19. $Q = \rho abc(c_{\text{в}} \Delta t + \lambda)$, найти λ .

В20. $c_{\text{в}} \rho Sh(t_1 - t_0) = \lambda \rho Sh$, найти t_1 .

В21. $l_1 = l_0(1 + \alpha t_1)$, найти t_1 .

В22. $\Delta l = \alpha l_1(t_2 - t_1)$, найти t_2 .

В23. $S = S_0(1 + 2\alpha t)$, найти t .

В24. $\rho_2 = \rho_1(1 + \beta \Delta t)$, найти Δt .

В25. $Q = nmc_{\text{уд}}(t_{\text{н}} - t_{\text{к}})$, найти $t_{\text{к}}$.

В26. $\eta q \rho V = c(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$, найти $t_{\text{н}}$.

В27. $c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 =$
 $= (c_1 m_1 + c_2 m_2) \theta$, найти m_1 .

В28. $c_3 m_3(t_3 - \theta) =$
 $= (c_1 m_1 + c_2 m_2)(\theta - t_1)$, найти θ .

В29. $m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2 =$
 $= (m_1 + m_2) c t$, найти m_1 .

В30. $c_{\text{в}} m_{\text{в}} t_{\text{в}} + c_{\text{л}} m_{\text{л}} t_{\text{л}} =$
 $= (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{л}} m_{\text{л}}) \theta$, найти $c_{\text{в}}$.

В31. $m_1 t_1 + m_2 t_2 =$
 $= (m_1 + m_2) \theta$, найти m_1 .

В32. $V_1 t_1 + V_2 t_2 = (V_1 + V_2) t$,
найти V_2 .

В33. $c_1 m_1 t_1 + C t_2 = (c_1 m_1 + C) \theta$,
найти C .

В34. $c_{\text{в}} t_1 + c_{\text{т}} t_2 = (c_{\text{в}} + c_{\text{т}}) \theta$,
найти $c_{\text{в}}$.

В35. $c_{\text{в}} m_{\text{л}} t_{\text{к}} + m_{\text{л}} \lambda = m_{\text{в}} c_{\text{в}}(t_{\text{н}} - t_{\text{к}})$,
найти $t_{\text{к}}$.

Задачи трудные

Г1. $\eta = \frac{m(c\Delta t + \lambda)}{qM}$, найти Δt .

Г2. $c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 + C t_1 =$
 $= (c_1 m_1 + c_2 m_2 + C) \theta$, найти C .

Г3. $\rho_{\text{в}} V_{\text{в}} c_{\text{в}} t_{\text{в}} + C t_2 = (\rho_{\text{в}} V_{\text{в}} c_{\text{в}} + C) t_1$,
найти ρ .

Г4. $m_{\text{в}}c_{\text{в}}(t_{\text{в}} - \theta) = m_{\text{л}}(c_{\text{л}}t_{\text{л}} + \lambda + c_{\text{в}}\theta)$, найти $c_{\text{в}}$.

Г5. $(C + c_1m_1)(t_1 - \theta) = \lambda(m_2 - y) + m_2c_1\theta$, найти θ .

Г6. $q_1L + cq_1(t_1 - t_2) = cq_2(t - t_2)$, найти t_2 .

Г7. $Lm_n + c_{\text{в}}m_n(t_{\text{к}} - \theta) = m_{\text{в}}c_{\text{в}}(\theta - t_1)$, найти θ .

Г8. $Lm_n + c_{\text{в}}m_n(t_2 - \theta) = c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_1) + \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}}m_{\text{л}}(\theta - t_0)$, найти θ .

Г9. $\begin{cases} (L + c_{\text{в}}\Delta t)m_{\text{x}} = \lambda m; \\ m_{\text{в}} = m + m_{\text{x}}, \end{cases}$ найти λ, m_{x} .

Г10. $\begin{cases} m_{\text{в}}(t_1 - \theta) = y\lambda + cm_n(\theta - t_n); \\ x + y = m_n, \end{cases}$ найти x, y .

Г11. $\begin{cases} c_1m_1\Delta t = \lambda(m_2 - x) + cm_2(t_1 - \Delta t); \\ x + y = m_2, \end{cases}$ найти x, y .

Задачи очень трудные

Д1. $\begin{cases} m_n + m_{\text{л}} = M; \\ Lm_n + c_{\text{в}}m_n(t_2 - \theta) = c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_1) + \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}}m_{\text{л}}(\theta - t_0), \end{cases}$ найти $m_{\text{л}}, m_n$.

Д2. $\begin{cases} c_{\text{в}}(\theta - t_1) = x(L + c_{\text{в}}t_2); \\ y = \frac{x}{x+1}, \end{cases}$ найти x, y .

Д3. $\begin{cases} c_{\text{в}}t_1 + c_{\text{т}}t_2 = (c_{\text{в}} + c_{\text{т}})\theta; \\ y = \frac{c_{\text{в}}}{c_{\text{т}}}, \end{cases}$ $y, c_{\text{в}}$ и $c_{\text{т}}$ — неизвестные величины, найти только y .

Д4. $\begin{cases} (c_{\text{с}}m_{\text{с}} + c_{\text{а}}m_{\text{а}})t_1 + c_{\text{в}}m_{\text{в}}t_2 + C_{\text{к}}t_2 = (c_{\text{с}}m_{\text{с}} + c_{\text{а}}m_{\text{а}} + c_{\text{в}}m_{\text{в}} + C_{\text{к}})\theta; \\ m_{\text{с}} + m_{\text{а}} = m, \end{cases}$
найти $m_{\text{с}}$ и $m_{\text{а}}$.

Д5. $\begin{cases} m_1 = m_n + \rho_{\text{в}}v; \\ m_2 = m_n + \rho_{\text{в}}(v - v_{\text{с}}); \\ \rho_{\text{с}}v_{\text{с}} = m_{\text{с}}, \end{cases}$ найти $v, v_{\text{с}}, \rho$.

Д6. $\begin{cases} \frac{M}{\rho} = \frac{m_{\text{к}}}{\rho_1} + \frac{m_3}{\rho_2}; \\ M = m_3 + m_{\text{к}}, \end{cases}$ найти $m_3, m_{\text{к}}$. Д7. $\begin{cases} m_1 = V(\rho - \rho_1); \\ m_2 = V(\rho - \rho_2), \end{cases}$ найти V, ρ .

2. О ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Автор: Рассмотрим такую задачу: дан чертеж прямоугольника. Как с помощью измерительной линейки определить его площадь?

Читатель: Извините меня, но эта задача для первого класса! Измеряем сначала одну сторону, потом другую...

Автор (перебивая): Допустим, одна сторона оказалась равной $a = 3,1$ см, а вторая $b = 2,1$ см.

Читатель: А дальше находим площадь по формуле:

$$S = a \cdot b = 3,1 \text{ см} \times 2,1 \text{ см} = 6,51 \text{ см}^2.$$

Автор: А Вы уверены, что площадь равна *точно* $6,51 \text{ см}^2$, а не $6,52$ или, скажем, $6,45 \text{ см}^2$?

Читатель: Конечно, уверен! А какие тут могут быть сомнения?

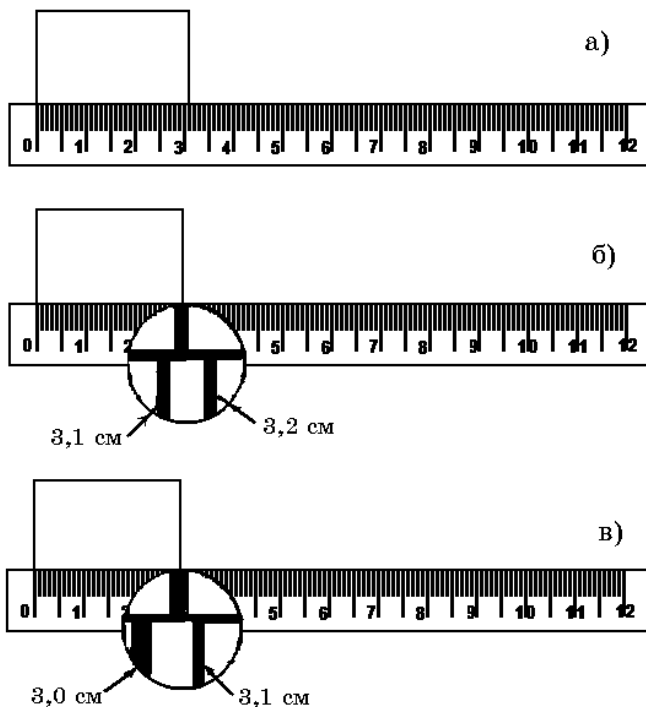


Рис. 2.1

Автор: Давайте немного задумаемся над словами: «одна сторона оказалась равной 3,1 см». Что это значит? Это значит, что, приложив линейку к стороне прямоугольника, мы увидим примерно то, что показано на рис. 2.1,а.

Но если мы воспользуемся лупой, то увидим, что деление, соответствующее длине 3,1 см, либо немного не доходит до конца стороны прямоугольника (рис. 2.1,б), либо, наоборот, заходит за него (рис. 2.1,в). Кроме того, и линия, которая изображает на чертеже сторону прямоугольника, и штрихи, обозначающие деления линейки, имеют определенную толщину. Поэтому, я думаю, Вы согласитесь, что значение длины стороны прямоугольника – приближенная величина.

Возникает вопрос: какова же точность наших измерений? «На глазок» измерить длину с точностью до десятых долей миллиметра мы не сможем, но утверждать, что полученное нами значение длины отличается от настоящей не более чем на полмиллиметра, – можно. Ведь полмиллиметра – это половина деления линейки. Поэтому, утверждая, что длина стороны прямоугольника $a = 3,1$ см, мы имеем в виду, что на самом деле

$$3,05 \text{ см} \leq a \leq 3,15 \text{ см}.$$

Точно так же утверждая, что сторона $b = 2,1$ см, мы имеем в виду, что на самом деле

$$2,05 \text{ см} \leq b \leq 2,15 \text{ см}.$$

Большую точность с помощью обычной измерительной линейки получить нельзя.

Читатель: Согласен.

Автор: Но в таком случае придется поставить под сомнение правильность полученного Вами значения площади $S = 6,51 \text{ см}^2$. Ведь при вычислении Вы использовали *точные* значения 3,1 см и 2,1 см, а на самом деле (как мы с Вами выяснили) эти значения приближенные.

Читатель: Как же тогда быть?

Автор: Сначала предположим, что a и b принимают свои минимально возможные значения, тогда $a = 3,05$ см, $b = 2,05$ см. Отсюда $S = 3,05 \text{ см} \cdot 2,05 \text{ см} = 6,2525 \text{ см}^2$.

Теперь давайте предположим, что a и b принимают свои максимальные значения: $a = 3,15$ см, $b = 2,15$ см. Тогда площадь $S = 3,15$ см $\cdot$ $2,15$ см = $6,7725$ см². Таким образом, истинное значение площади прямоугольника лежит в интервале:

$$6,5525 \text{ см}^2 \leq S \leq 6,7725 \text{ см}^2.$$

Читатель: Выходит, на вопрос, чему равна площадь прямоугольника, надо отвечать, что значение площади лежит в таких-то пределах?

Автор: Именно так и поступают физики, когда приводят результаты эксперимента. Более того, существует целая теория расчета погрешностей... Но всему свое время.

При решении задач по физике мы будем пользоваться одним достаточно простым (хоть и не очень строгим с точки зрения теории погрешностей) правилом:

Полученный после вычислений результат необходимо округлить так, чтобы в нем осталось столько же значащих цифр, сколько значащих цифр содержалось в исходных данных.

Например, в нашей задаче каждая из сторон была задана с точностью до двух значащих цифр: 3,1 см и 4,1 см. Значит, и полученный результат надо округлить до двух значащих цифр: $6,56 \text{ см}^2 \approx 6,6 \text{ см}^2$, то есть в качестве ответа надо писать не $S = 6,56 \text{ см}^2$, а $S \approx 6,6 \text{ см}^2$.

Читатель: А если одна сторона известна до двух значащих цифр, а вторая – до трех? Например, $a = 11,3$ см, а $b = 6,1$ см.

Автор: В этом случае будем «ориентироваться» на наименее точное данное, то есть на $b = 6,1$ см. И ответ будем округлять до двух значащих цифр:

$$S = 11,3 \text{ см} \cdot 6,1 \text{ см} = 68,93 \text{ см}^2 \approx 69 \text{ см}^2.$$

Читатель: А как быть, если $a = 0,9$ см, а $b = 60,1$ см? В этом случае $S = 0,9 \text{ см} \cdot 60,1 \text{ см} = 54,09 \text{ см}^2$. Так как наименее точное данное $a = 0,9$ см имеет только одну значащую цифру, то полученное значение площади мы должны округлить до одной значащей цифры. Но как это сделать? Записать $S \approx 50 \text{ см}^2$?

Автор: Нет, запись $S \approx 50 \text{ см}^2$ означает, что у нас две значащие цифры: 5 и 0. В данном случае ответ следует записать в следующем виде: $S \approx 5 \cdot 10 \text{ см}^2$.

Читатель: А разве 50 и $5 \cdot 10$ не одно и то же?

Автор: В математике, конечно, одно и то же, но в физике эти записи имеют различный смысл. Запись $S \approx 50 \text{ см}^2$ означает, что величина S лежит в интервале от 49,5 до 50,5 см^2 , а запись $S \approx 5 \cdot 10 \text{ см}^2$ означает, что величина S лежит в интервале от 45 до 55 см^2 . Поговорим на эту тему подробнее.

Запись чисел с помощью степени числа 10

Степень числа 10 с натуральным показателем

Из курса математики мы знаем, что $a^n = \underbrace{a \cdot a \cdot a \dots a}_n$,

где a – любое число, а n – натуральное число, т.е. 1, 2, 3... При этом a^1 по определению полагается равным a . Например,

$$\begin{aligned} 10^1 &= 10, 10^2 = 10 \cdot 10 = 100, 10^3 = 10 \cdot 10 \cdot 10 = \\ &= 1000, 10^n = 10 \cdot 10 \cdot \dots \cdot 10 = \underbrace{100\dots 0}_n \text{ нулей} \end{aligned}$$

Итак, 10^n – это число, которое записывается в виде единицы, за которой стоят n нулей. Это обстоятельство, с одной стороны, позволяет нам кратко записывать достаточно большие числа, а с другой – с помощью 10^n мы сможем оставлять в больших числах столько значащих цифр, сколько нам нужно. Покажем это на конкретных примерах:

$$\begin{aligned} 20 &= 2 \cdot 10; \\ 120 &= 1,2 \cdot 10^2; \\ 1300 &= 1,3 \cdot 10^3; \\ 12300 &= 1,23 \cdot 10^4; \\ 123000 &= 1,23 \cdot 10^5; \\ 1234000 &= 1,234 \cdot 10^6 \text{ и т.д.} \end{aligned}$$

(При перемножении десятичной дроби на 10^n запятая переносится на n позиций вправо.)

Допустим, в результате вычислений мы получили результат $R = 123456$, который необходимо округлить: а) до четырех значащих цифр; б) до двух значащих цифр; в) до одной значащей цифр.

Представим R в виде: $R = 1,23456 \cdot 10^5$. Теперь округляем:

а) $R \approx 1,235 \cdot 10^5$;

б) $R \approx 1,2 \cdot 10^5$;

в) $R \approx 1 \cdot 10^5$.

(Заметим, что именно так мы округлили до одной значащей цифры значение $S = 54,09 \text{ см}^2$: $S = 5,409 \cdot 10 \text{ см}^2 \approx 5 \cdot 10 \text{ см}^2$.)

Степень числа 10 с целым отрицательным показателем

Напомним (для тех, кто знает) и сообщим впервые (для неосведомленных), что в общем случае *по определению* $a^{-n} = \frac{1}{a^n}$, где n – целое. Например:

$$10^{-1} = \frac{1}{10^1} = \frac{1}{10} = 0,1;$$

$$10^{-2} = \frac{1}{10^2} = \frac{1}{100} = 0,01;$$

$$10^{-3} = \frac{1}{10^3} = \frac{1}{1000} = 0,001;$$

$$10^{-n} = \frac{1}{10^n} = \frac{1}{\underbrace{100\dots0}_n} = 0,\underbrace{00\dots1}_n.$$

Приведем несколько примеров представлений чисел с помощью 10^{-n} :

$$0,12 = 1,2 \cdot 10^{-1};$$

$$0,0123 = 1,23 \cdot 10^{-2};$$

$$0,00123 = 1,23 \cdot 10^{-3};$$

$$0,000123 = 1,23 \cdot 10^{-4};$$

$$0,0000123 = 1,23 \cdot 10^{-5}.$$

(В каждом случае мы сначала переносили запятую на n позиций вправо, то есть умножали число на 10^n , а затем, чтобы наше число не изменилось, домножали его на 10^{-n} . Ведь умножить на 10^{-n} – все равно, что разделить на 10^n .)

Допустим, что в результате вычислений мы получили результат $R = 0,00012345$, который надо округлить: а) до четырех значащих цифр; б) до двух значащих цифр; в) до одной значащей цифры.

Представим R в виде $R = 1,2345 \cdot 10^{-4}$ и проведем округление:

а) $R \approx 1,235 \cdot 10^{-4}$;

б) $R \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$;

в) $R \approx 1 \cdot 10^{-4}$.

Примеры решения задач

Задача 2.1. Стороны прямоугольника соответственно равны: $a = 3,1 \cdot 10^{-2}$ м, $b = 6,1 \cdot 10^{-2}$ м. Вычислить площадь прямоугольника.

$$a = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$b = 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$S = ?$$

Решение. Так как a и b заданы двумя значащими цифрами, то и ответ надо округлить до двух значащих цифр:

$$\begin{aligned} S = a \cdot b &= 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 0,001891 \text{ м}^2 = \\ &= 1,891 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \approx 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Ответ: $S = a \cdot b \approx 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Задача 2.2. Стороны прямоугольника соответственно равны: $a = 3,1$ м, $b = 6,1$ мм. Вычислить площадь прямоугольника.

$$a = 3,1 \text{ м}$$

$$b = 6,1 \text{ мм}$$

$$S = ?$$

Решение. Заметим, что значение a дано в метрах, а значение b – в миллиметрах. Чтобы произвести вычисления по формуле $S = a \cdot b$, необходимо, чтобы значения a и b

были выражены в одних и тех же единицах: либо в метрах, либо в миллиметрах. Сделаем вычисления двумя способами: сначала в метрах, а потом в миллиметрах.

Поскольку данные задачи даны с точностью до двух значащих цифр, то и ответ будем округлять до двух значащих цифр:

1. $a = 3,1 \text{ м} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ мм}$. Тогда

$$S = a \cdot b = 3,1 \cdot 10^3 \text{ мм} \cdot 6,1 \text{ мм} = 18910 \text{ мм}^2 = \\ = 1,891 \cdot 10^4 \text{ мм}^2 \approx 1,9 \cdot 10^4 \text{ мм}^2.$$

2. $b = 6,1 \text{ мм} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Тогда

$$S = a \cdot b = 3,1 \text{ м} \cdot 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,01891 \text{ м}^2 = \\ = 1,891 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \approx 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Ответ: $S = a \cdot b \approx 1,9 \cdot 10^4 \text{ мм}^2 = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Задача 2.3. Вычислить объем прямоугольного параллелепипеда, если его ребра соответственно равны: $a = 3,1 \text{ м}$, $b = 6,12 \text{ см}$, $c = 32,4 \text{ мм}$.

$$a = 3,1 \text{ м}$$

$$b = 6,12 \text{ мм}$$

$$c = 32,4 \text{ мм}$$

$S = ?$

Решение. Чтобы произвести вычисления по формуле $V = a \cdot b \cdot c$, необходимо выразить все данные задачи в одних и тех же единицах: либо в метрах, либо в сантиметрах, либо в миллиметрах.

Поскольку наименее точно задано значение $a = 3,1 \text{ м}$ (две значащие цифры), то и ответ надо будет округлить до двух значащих цифр. Решим задачу тремя способами.

1. Вычислим объем в кубических миллиметрах:

$$a = 3,1 \text{ м} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ мм};$$

$$b = 6,12 \text{ см} = 6,12 \cdot 10 \text{ мм};$$

$$c = 32,4 \text{ мм}.$$

$$V = a \cdot b \cdot c = 3,1 \cdot 10^3 \text{ мм} \cdot 6,12 \cdot 10 \text{ мм} \cdot 32,4 \text{ мм} = \\ = 6146928 \text{ мм}^3 = 6,146928 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 \approx 6,1 \cdot 10^6 \text{ мм}^3.$$

2. Вычислим объем в кубических сантиметрах:

$$a = 3,1 \text{ м} = 3,1 \cdot 10^2 \text{ см};$$

$$b = 6,12 \text{ см};$$

$$c = 32,4 \text{ мм} = 32,4 \cdot 10^{-1} \text{ см}.$$

$$V = a \cdot b \cdot c = 3,1 \cdot 10^2 \text{ см} \cdot 6,12 \text{ см} \cdot 32,4 \cdot 10^{-1} \text{ см} = \\ = 6146,928 \text{ см}^3 = 6,146928 \cdot 10^3 \text{ см}^3 \approx 6,1 \cdot 10^3 \text{ см}^3.$$

3. Вычислим объем в кубических метрах:

$$a = 3,1 \text{ м};$$

$$b = 6,12 \text{ см} = 6,12 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$c = 32,4 \text{ мм} = 32,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$V = a \cdot b \cdot c = 3,1 \text{ м} \cdot 6,12 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 32,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = \\ = 0,006146928 \text{ м}^3 = 6,146928 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \approx 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Ответ: $V = a \cdot b \cdot c \approx 6,1 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 = 6,1 \cdot 10^3 \text{ см}^3 = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Задача 2.4. Сторона прямоугольника равна 7 см, а площадь – 1 см^2 . Найти вторую сторону.

$$\begin{array}{l} a = 7 \text{ см} \\ S = 1 \text{ см}^2 \\ b = ? \end{array}$$

Решение. Так как данные задачи содержат одну значащую цифру, то и ответ надо округлить до одной значащей цифры.

$$S = a \cdot b.$$

$$\begin{aligned} \text{Следовательно: } b &= \frac{S}{a} = \frac{1 \text{ см}^2}{7 \text{ см}} = 0,142857142 \text{ см} = \\ &= 1,42857142 \cdot 10^{-1} \text{ см} \approx 1 \cdot 10^{-1} \text{ см}. \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } b = \frac{S}{a} \approx 1 \cdot 10^{-1} \text{ см}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

A1. По данным сторонам a и b прямоугольника вычислить его площадь S :

а) $a = 6,9 \text{ см}$, $b = 8,7 \text{ см}$; б) $a = 0,16 \text{ м}$, $b = 1,12 \text{ м}$;

в) $a = 78 \text{ мм}$, $b = 0,48 \text{ мм}$; г) $a = 1,01 \text{ м}$, $b = 2,02 \text{ м}$.

A2. Представить указанные числа с помощью 10^n (перед запятой оставлять одну значащую цифру, например: $120 = 1,2 \cdot 10^2$):

а) 200; б) 3000; в) 60000; г) 700000;

д) 8000000; е) 90000000000; ж) 90; з) 210; и) 3100;

к) 62000; л) 760000; м) 95; н) 210,3; о) 3112,5; п) 1956,46.

A3. По стороне a и площади S прямоугольника найти другую его сторону:

а) $S = 4 \text{ см}^2$, $a = 2,0 \text{ см}$; б) $S = 9,1 \text{ см}^2$, $a = 3,1 \text{ см}$;

в) $S = 80 \text{ см}^2$, $a = 2,1 \text{ см}$; г) $S = 2,12 \text{ м}^2$, $a = 2,9 \text{ м}$;

д) $S = 8180 \text{ мм}^2$, $a = 90 \text{ мм}$; е) $S = 0,22 \text{ м}^2$, $a = 0,118 \text{ м}$.

Задачи легкие

B1. По данным сторонам a и b прямоугольника вычислить его площадь S (в квадратных сантиметрах):

а) $a = 2,1 \text{ см}$, $b = 0,12 \text{ м}$;

б) $a = 22 \text{ мм}$, $b = 4,61 \text{ см}$;

в) $a = 212 \text{ мм}$, $b = 1,2 \text{ м}$;

г) $a = 2,61 \cdot 10^3 \text{ мм}$, $b = 0,12 \text{ м}$;

д) $a = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $b = 23,1 \text{ см}$;

е) $a = 0,62 \text{ м}$, $b = 2,3 \cdot 10^4 \text{ мм}$.

- Б2.** Представить указанные числа с помощью 10^n или 10^{-n} так, чтобы перед запятой стояла *одна* значащая цифра (например: $12,2 = 1,22 \cdot 10$; $0,0922 = 9,22 \cdot 10^{-2}$; $12 \cdot 10^2 = 1,2 \cdot 10^3$; $0,95 \cdot 10^{-1} = 9,5 \cdot 10^{-2}$ и т.д.):
- а) 95,5; б) 0,955; в) $936 \cdot 10^2$; г) $0,936 \cdot 10^{-1}$; д) 0,00123;
 е) $123000,1 \cdot 10^3$; ж) $0,012 \cdot 10^6$; з) $230 \cdot 10^{-4}$; и) $14,06 \cdot 10^{-2}$;
 к) $14,06 \cdot 10^2$; л) $140,4 \cdot 10^{-6}$; м) $140,4 \cdot 10^6$.
- Б3.** По данным сторонам треугольника вычислить его периметр:
- а) $a = 12,3$ см, $b = 12$ см, $c = 10$ см;
 б) $a = 1$ см, $b = 1,5$ см, $c = 1,15$ см;
 в) $a = 1$ км, $b = 1,1$ км, $c = 200$ м;
 г) $a = 1,21 \cdot 10^3$ мм, $b = 1,31 \cdot 10^2$ см, $c = 1,41$ м;
 д) $a = 1,22 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 1,3 \cdot 10^{-2}$ м, $c = 13$ мм;
 е) $a = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 2,52 \cdot 10^{-2}$ м, $c = 15,1$ мм.
- Б4.** По стороне a и площади S прямоугольника найти другую его сторону:
- а) $S = 26 \cdot 10^{-4}$ м², $a = 0,21$ м; б) $S = 24 \cdot 10^{-3}$ м², $a = 120$ мм;
 в) $S = 1$ м², $a = 13$ см; г) $S = 0,10$ м², $a = 0,471$ м;
 д) $S = 24 \cdot 10^3$ км², $a = 1,21 \cdot 10^6$ мм; е) $S = 1246$ мм², $a = 12,4$ мм.

Задачи средней трудности

- В1.** По трем ребрам a , b и c прямоугольного параллелепипеда вычислить его объем (ответ дать в кубических миллиметрах):
- а) $a = 2,1$ мм, $b = 3,1$ см, $c = 0,12$ м;
 б) $a = 2,1 \cdot 10^3$ мм, $b = 34 \cdot 10^2$ см, $c = 2$ м;
 в) $a = 0,12$ м, $b = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, $c = 121$ мм;
 г) $a = 2,1 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 0,13 \cdot 10^{-2}$ м, $c = 1,12$ мм;
 д) $a = 65 \cdot 10^3$ мм, $b = 6,50 \cdot 10^3$ мм, $c = 70$ м;
 е) $a = 124$ мм, $b = 256$ мм, $c = 36$ мм;
 ж) $a = 0,121$ м, $b = 0,15$ м, $c = 0,17$ м;
 з) $a = 7,3 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 6,3 \cdot 10^{-3}$ м, $c = 2,31$ см;
 и) $a = 15$ м, $b = 15$ см, $c = 1 \cdot 10$ мм.
- В2.** По площади квадрата определить его сторону:
- а) $S = 22$ мм²; б) $S = 234$ м²; в) $S = 3$ см²;
 г) $S = 2,1 \cdot 10^3$ см²; д) $S = 77,4 \cdot 10^6$ мм².
- В3.** По данному объему куба определить его ребро:
- а) $V = 8,1$ м³; в) $V = 1,1 \cdot 10^3$ см³;
 б) $V = 111$ см³; г) $V = 0,121 \cdot 10^{-5}$ м³.

3. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Что такое энергия?

В 7 классе мы уже обсуждали вопрос об энергии. Поговорим на эту тему подробнее.

В жизни мы довольно часто слышим это слово «энергия»: электроЭНЕРГИЯ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ кризис, ЭНЕРГОносители, ЭНЕРГИЧНЫЕ люди и т. д.

Что же мы понимаем под энергией в самом общем смысле этого слова?

Вообще говоря, *энергия – это возможность совершения каких-либо действий.*

Энергичный человек, например, употребив свою энергию в мирных целях, может сделать много хорошего.

Атомная энергия, заключенная в атомной бомбе, может произвести страшные разрушения.

Электроэнергия, выработанная на атомной электростанции и переданная в вашу квартиру, может обеспечить горение электрической лампочки. А с лампочкой, согласитесь, читать эту книгу по вечерам будет значительно удобнее (при наличии, конечно, необходимой для подобного чтения *умственной энергии*).

Короче говоря, существуют разные формы энергии, наиболее простая из которых – механическая.

Что такое механическая энергия?

Как Вы знаете из курса 7 класса, механическая энергия бывает двух видов: кинетическая и потенциальная.

Кинетической называется энергия, которой обладает тело вследствие своего движения. Так, летящий мяч обладает возможностью совершить определённые действия, например, разбить

стекло, а летящий кирпич – тем более. Ясно, что «возможности» летящего тела тем больше, чем больше его масса и скорость.

Потенциальной называется энергия, которая характеризует возможность тел совершать какие-либо действия в результате их *взаимодействия*, т. е. притяжения или отталкивания.

Наиболее наглядный пример – кирпич на крыше: притяжение к земле даёт ему «возможность» при падении причинить гуляющим внизу определённые неприятности. Ясно, что неприятности эти будут тем значительнее, чем выше дом и тяжелее кирпич.

Другой пример: сожмём небольшую пружинку и положим на неё сверху шарик для настольного тенниса. Пока пружинка сжата, в ней «спрятана возможность» совершить над шариком действие (рис. 3.1,*а*). Если мы отпустим пружинку, то эта возможность реализуется (рис. 3.1,*б*). Ясно, что чем «жестче» пружинка и чем сильнее мы её сожмём, тем сильнее будет эффект от реализации указанной возможности.

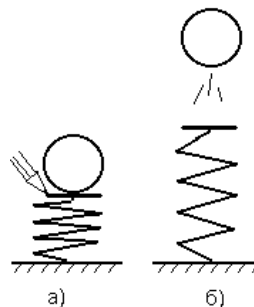


Рис. 3.1

Читатель: Насколько мне известно, *энергия*

должна сохраняться. Однако в Вашем примере с кирпичом, упавшим с крыши, это не так. Ведь на крыше кирпич обладал потенциальной энергией, а на земле, после падения – уже нет! Выходит, его энергия бесследно исчезла?

Автор: Закон сохранения энергии, который Вы, видимо, имеете в виду, гласит: «Энергия не исчезает и не приходит вновь, она лишь из одного вида переходит в другой». Так что исчезнуть бесследно потенциальная энергия никак не могла: сначала (в процессе падения) она постепенно перешла в кинетическую энергию, а в момент удара – вся кинетическая энергия перешла во *внутреннюю энергию*.

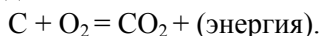
Что такое внутренняя энергия?

Автор: Все вещества, как мы знаем, состоят из молекул, которые находятся в непрерывном движении. Поэтому каждая молекула

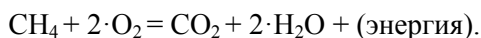
обладает *кинетической энергией*. Это во-первых. Во-вторых, молекулы *взаимодействуют* друг с другом: на близких расстояниях отталкиваются, на дальних – притягиваются. Поэтому молекулы обладают ещё и *потенциальной энергией*. Общая кинетическая и потенциальная энергия молекул тела образуют его *внутреннюю энергию*.

Читатель: А химическая энергия? Она тоже внутренняя?

Автор: Да, но она «спрятана» внутри молекул. Для её выделения необходимо превращение одних молекул в другие, то есть *химическая реакция*. При сгорании угля, например, энергия выделяется в результате того, что атом углерода присоединяет к себе два атома кислорода:



При сгорании природного газа метана (CH_4) реакция более сложная:



А при сгорании бензина химическая реакция и того сложнее. Детали этих процессов предоставим изучать химикам, а для себя отметим главное: внутренняя энергия, выделяющаяся в химических реакциях, обусловлена превращением одних молекул в другие. Атомы при этом никак не изменяются.

Читатель: А при выделении *атомной энергии* изменяются сами атомы?

Автор: Да. И заметим, что атомная энергия тоже является внутренней. Например, в атомных реакторах (чаще их называют ядерными) энергия выделяется в результате того, что атом урана или плутония распадается как бы на две половинки, т. е. на два других атома меньших размеров. Причём, при каждом таком распаде энергии выделяется в *миллионы раз больше*, чем при «сгорании» одного атома углерода. Но при этом, заметим, элементарные частицы, из которых состоят атомы: электроны, протоны, нейтроны – никак не изменяются.

Читатель: А я вот читал, что элементарные частицы – протоны, например, не такие уж и элементарные. Оказывается, они состоят из кварков! Может быть, со временем протоны тоже удастся разделить, и при этом будет выделяться энергия?

Автор: Это покажет будущее. А пока лишь заметим, что, если под внутренней энергией понимать все нереализованные возможности, «спрятанные» внутри тела, то вычислить эту энергию будет практически невозможно. Поэтому в практических задачах рассчитывают обычно не саму внутреннюю энергию, а лишь *изменения этой энергии*.

Прежде чем мы рассмотрим, *как* может изменяться внутренняя энергия, попробуем ответить на один очень важный вопрос:

Что такое температура?

Надо сказать, что долгое время учёные определяли температуру несколько туманно: говорили примерно так: «Температура есть мера нагретости тела». Иными словами, чем горячее тело на ощупь, тем выше его температура.

На первый взгляд, вроде бы логично, но... ведь не всякое тело можно потрогать руками. Как вы знаете, ситуация прояснилась только после открытия молекулярного строения вещества. Оказалось, что температура *есть мера средней кинетической энергии молекул*, то есть чем быстрее движутся молекулы в данном теле, тем выше его температура. Значит, чем выше температура тела, тем больше его внутренняя энергия.

Как может изменяться внутренняя энергия?

1. *Внутренняя энергия может увеличиваться за счёт уменьшения механической энергии.* Это как раз случай падения кирпича с крыши: механическая энергия кирпича, как целого, при ударе о землю переходит в кинетическую энергию составляющих его молекул – они начинают двигаться быстрее. То же происходит при ударе молотка по шляпке гвоздя или при торможении автомобиля. Температура при этом повышается: шляпка гвоздя даже на ощупь становится горячей, а покрышки автомобиля при резком торможении могут даже задымиться.

2. *Механическая энергия может увеличиваться за счёт уменьшения внутренней энергии.* Так происходит, например, при разгоне паровоза. Внутренняя энергия пара, нагретого до высокой температуры, переходит в кинетическую энергию паровоза: пар толкает паровоз, а сам при этом охлаждается.

Разгон автомобиля осуществляется за счёт внутренней энергии, выделяющейся при сгорании паров бензина: нагретые до высокой температуры пары бензина толкают поршень двигателя, а сами при этом охлаждаются.

3. *Внутренняя энергия одного тела может увеличиваться за счёт уменьшения внутренней энергии другого тела без каких-либо механических действий.* Такой процесс называется ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕЙ. Например, печка, остывая, нагревает воздух в комнате; в чайнике, поставленном на плиту, нагревается вода; раскалённый утюг нагревает металлическую подставку и т.д.

Далее в этом параграфе мы будем говорить только о процессах теплопередачи.

Каким образом происходит теплопередача?

1. Если холодное и горячее тело привести в непосредственное соприкосновение, например, налив горячую воду в холодную кастрюлю или поставив горячий утюг на холодную подставку, то холодное тело начнёт нагреваться, а горячее – охлаждаться. Это происходит потому, что более «энергичные» молекулы горячего тела, соударяясь с менее «энергичными» молекулами холодного тела, отдают им часть своей кинетической энергии. Такой процесс называется ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ.

2. В жидкостях и газах, кроме теплопроводности, теплопередача часто осуществляется КОНВЕКЦИЕЙ, то есть механическим перемешиванием нагретых частей. Почти всегда при соприкосновении жидкости или газа с твёрдыми стенками, имеющими более высокую температуру, в жидкости возникают течения: нагревшаяся жидкость (или газ) поднимается вверх, а охладившаяся опускается вниз. На рис. 3.2 показаны конвекционные струи жидкости.

Заметим, что воздух в комнате, обогреваемой батареями парового отопления, также нагревается конвекцией.

3. Теплопередача производится также посредством ИСПУСКАНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ. Поднося руку к нагретому утюгу, мы даже снизу (где поднимается холодный воздух) чувствуем «жар». Утюг испускает лучи и поэтому охлаждается, а рука поглощает лучи и поэтому нагревается. Эти лучи есть не что иное, как электромагнитные волны, о которых речь пойдёт дальше.

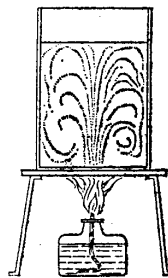


Рис. 3.2

Заметим, что передача теплоты через пространство, в котором отсутствует вещество, (например, от Солнца к Земле) осуществляется исключительно посредством испускания и поглощения излучения.

Главная особенность теплопередачи: экспериментально установлено, что теплопередача всегда идёт в определённом направлении: внутренняя энергия горячего тела уменьшается, а внутренняя энергия холодного тела увеличивается.

Если температуры тел равны, то теплопередачи между ними не происходит.

Количество теплоты

Количеством теплоты, полученным телом, называется изменение внутренней энергии тела при теплопередаче:

$$\begin{aligned} (\text{КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ}) &= (\text{КОНЕЧНАЯ ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ}) - \\ &- (\text{НАЧАЛЬНАЯ ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ}) \end{aligned}$$

или

$$Q = U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}} \quad (3.1)$$

или ещё короче

$$Q = \Delta U \quad (3.2)$$

(здесь и далее буквой Q мы будем обозначать количество теплоты, а буквой U – внутреннюю энергию).

За *единицу измерения количества теплоты* принимается КАЛОРИЯ (кал) – величина, равная количеству теплоты, которое необходимо для нагревания одного грамма чистой воды от 19,5 до 20,5 °C:

$$[Q] = \text{кал.}$$

Замечание 1. Наряду с калорией для измерения количества теплоты используется ещё джоуль (Дж). Между джоулем и калорией существует следующее соотношение:

$$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж.}$$

Замечание 2. Для удобства вычислений, наряду с калорией используют ещё килокалорию (ккал) и мегакалорию (Мкал):

$$1 \text{ ккал} = 1000 \text{ кал,}$$

$$1 \text{ Мкал} = 1000000 \text{ кал,}$$

а наряду с джоулем – килоджоуль (кДж) и мегаджоуль (МДж):

$$1 \text{ кДж} = 100 \text{ Дж,}$$

$$1 \text{ МДж} = 1\,000\,000 \text{ Дж.}$$

Теплоёмкость тела

Экспериментально установлено, что для того чтобы нагреть путём теплопередачи тело от начальной температуры t_n до конечной температуры t_k , необходимо передать ему количество теплоты, равное:

$$Q = C(t_k - t_n) \quad (3.3)$$

или

$$Q = C\Delta t, \quad (3.3a)$$

где C – величина, называемая ТЕПЛОЁМКОСТЬЮ ТЕЛА.

Замечание 3. Когда мы говорим о нагреве *путём теплопередачи*, мы имеем в виду, что никаких механических действий при этом не совершается.

Единицы измерения теплоёмкости тела:

$$[Q] = [C] \cdot [\Delta t] \Rightarrow [C] = \frac{[Q]}{[\Delta t]} = \text{кал/град}$$

или

$$[C] = \frac{[Q]}{[\Delta t]} = \text{Дж/град.}$$

Физический смысл теплоёмкости тела. Если нагреть тело на 1°C ($\Delta t = 1^\circ$), то согласно формуле (3.3а), тело получит количество теплоты: $Q = C \cdot 1^\circ$.

Следовательно, теплоёмкость тела численно равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить телу, чтобы повысить его температуру на 1°C .

Задача 3.1. Найти теплоёмкость утюга, если известно, что при нагревании на 100°C ему сообщили количество теплоты, равное 550 ккал.

$$\begin{aligned} \Delta t &= 100^\circ\text{C} \\ Q &= 550 \text{ ккал} = \\ &= 550 \cdot 10^3 \text{ кал} \\ C &= ? \end{aligned}$$

Решение. Согласно формуле (3.3а)
 $Q = C\Delta t$, отсюда

$$C = \frac{Q}{\Delta t}.$$

Проверим размерность:

$$[C] = \frac{[Q]}{[\Delta t]} = \text{кал/град.}$$

Подставим численные значения:

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q}{\Delta t} = \frac{550 \cdot 10^3 \text{ кал}}{100^\circ\text{C}} = 5500 \text{ кал/град} = \\ &= 5,50 \cdot 10^3 \text{ кал/град} \end{aligned}$$

(оставляем три значащие цифры).

Ответ: $C = \frac{Q}{\Delta t} = 5,50 \cdot 10^3 \text{ кал/град.}$

Удельная теплоёмкость

Экспериментально установлено: для того чтобы тело массой m , изготовленное из определённого вещества, нагреть путём теплопередачи от начальной температуры t_n до конечной температуры t_k , необходимо сообщить ему количество теплоты, равное

$$Q = c_{\text{уд}} m(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) \quad (3.4)$$

или более кратко

$$Q = c_{\text{уд}} m \Delta t. \quad (3.4a)$$

Величина $c_{\text{уд}}$ называется *удельной теплоёмкостью* вещества и зависит от физических свойств данного вещества.

Определим *единицы измерения удельной теплоёмкости*.

Из формулы (3.4a) имеем:

$$[Q] = [c_{\text{уд}}][m][\Delta t],$$

отсюда

$$[c_{\text{уд}}] = \frac{[Q]}{[m][\Delta t]}.$$

Следовательно:

$$[c_{\text{уд}}] = \text{кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \quad \text{или} \quad [c_{\text{уд}}] = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}).$$

Физический смысл удельной теплоемкости. Если нагреть $m = 1$ кг данного вещества на 1°C , то согласно формуле (3.4a) полученное количество теплоты

$$Q = c_{\text{уд}} \cdot 1 \text{ кг} \cdot 1^\circ\text{C}.$$

Следовательно, удельная теплоемкость численно равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг данного вещества, чтобы повысить его температуру на 1°C .

В таблице 3.1 приведены значения удельных теплоёмкостей некоторых твёрдых и жидких веществ. О теплоёмкости газов мы пока говорить не будем.

Замечание 4. Значения удельных теплоёмкостей в первой и второй колонках таблицы 3.1 отличаются множителем 4,19, так как $1 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) = 4,19 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Замечание 5. Для большинства веществ удельная теплоёмкость хотя и изменяется с температурой, но изменения эти незначительны, и при решении задач мы будем считать удельные теплоёмкости постоянными.

Т а б л и ц а 3.1

Удельные теплоёмкости некоторых веществ (при 20 °С)

Вещество	$c_{уд}, 10^3 \cdot \text{кал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$	$c_{уд}, 10^3 \cdot \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$
Платина (Pt)	0,0279	0,117
Свинец (Pb)	0,0310	0,130
Золото (Au)	0,0320	0,134
Ртуть (Hg)	0,0329	0,138
Вольфрам (W)	0,0349	0,146
Асбест	0,0501	0,210
Серебро (Ag)	0,0558	0,234
Олово (Sn)	0,0597	0,250
Цинк (Zn)	0,0907	0,380
Латунь	0,0916	0,384
Медь (Cu)	0,0940	0,394
Никель (Ni)	0,110	0,460
Сталь	0,110	0,460
Железо (Fe)	0,119	0,498
Чугун	0,120	0,503
Сера (S)	0,169	0,710
Калий (K)	0,190	0,795
Расплавленное железо (1530°–3000°)	0,198	0,830
Стекло	0,200	0,840
Песок	0,220	0,920
Кирпич	0,220	0,920
Алюминий (Al)	0,220	0,920
Магний (Mg)	0,251	1,05
Бензол (C ₆ H ₆)	0,406	1,70
Лёд (при 0°С) (H ₂ O)	0,500	2,09
Масло машинное	0,501	2,10
Керосин	0,501	2,10
Ацетон (C ₃ H ₆ O)	0,520	2,18
Эфир этиловый (C ₂ H ₅) ₂ O	0,558	2,34
Дерево (сосна, ель)	0,573	2,40
Глицерин (C ₃ H ₈ O ₃)	0,578	2,42
Спирт этиловый (C ₂ H ₅ OH)	0,578	2,42
Вода (H ₂ O)	1,000	4,190

Задача 3.2. Какое количество теплоты пойдёт на нагревание кирпичной печи массой 1,5 т от 10 до 20 °С?

$$\begin{aligned} m &= 1,5 \text{ т} = \\ &= 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг} \\ t_n &= 10 \text{ °С} \\ t_k &= 20 \text{ °С} \\ Q &= ? \end{aligned}$$

Решение. Удельную теплоёмкость кирпича находим в таблице 3.1:

$$c_{уд} = 0,220 \cdot 10^3 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}).$$

Согласно формуле (3.4), количество теплоты, которое пойдёт на нагревание печи, равно:

$$Q = c_{уд} m (t_k - t_n).$$

Проверим размерность:

$$[Q] = [c_{уд}][m][t] = \frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} = \text{кал}.$$

Подставим численные значения:

$$\begin{aligned} Q &= c_{уд} m (t_k - t_n) = \\ &= 0,220 \cdot 10^3 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot (20 \text{ °С} - 10 \text{ °С}) = \\ &= 3300000 \text{ кал} \approx 3,3 \cdot 10^6 \text{ кал} = 3,3 \text{ Мкал}. \end{aligned}$$

Ответ: $Q = c_{уд} m (t_k - t_n) \approx 3,3 \text{ Мкал}.$

Читатель: А как найти количество теплоты, которое ОТДАЁТ тело при остывании от начальной температуры t_n до конечной температуры t_k ($t_n > t_k$)?

Автор: Тело при остывании от t_n до t_k отдаёт *ровно столько тепла, сколько оно получило бы при нагревании* от t_k до t_n , поэтому количество отданной теплоты равно:

$$Q_{отд} = c_{уд} m (t_n - t_k). \quad (3.5)$$

Читатель: А почему при охлаждении тело отдает *ровно столько же* тепла, сколько получило бы при нагревании?

Автор: Давайте представим себе ситуацию, при которой при нагревании на Δt тело получило бы количество теплоты $Q_{пол}$, а при охлаждении на Δt отдало бы количество теплоты $Q_{отд} > Q_{пол}$. Найди мы такое тело – и у нас в руках вечный двигатель! Ведь охладив и нагрев это тело, мы получили бы «чистую прибыль» в энергии:

$$Q_{отд} - Q_{пол} > 0,$$

которую можно было бы использовать для нужд народного хозяйства.

Читатель: А если бы оказалось $Q_{\text{отд}} < Q_{\text{пол}}$?

Автор: Это значило бы, что энергия бесследно исчезает в недрах нашего таинственного тела. Ведь нагревание и охлаждение этого тела на Δt приводят к пропаже энергии: $Q_{\text{пол}} - Q_{\text{отд}} > 0$. Так что остается единственный вариант: $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}$.

Примеры решения задач

Замечание 6. Во всех задачах мы можем брать значения удельной теплоёмкости из таблицы 3.1 как в кал/(кг·град), так и в Дж/(кг·град) по своему усмотрению.

Замечание 7. В дальнейших выкладках для обозначения удельной теплоёмкости будем использовать малую букву «с», опуская индекс «уд». Для обозначения теплоёмкости тела будем использовать большую букву «С».

Задача 3.3. Термос, ёмкость которого 3,0 л, заполнили кипятком. Через сутки температура воды в термосе стала равна 77°C. Определите потери внутренней энергии воды за это время.

$$\begin{aligned} V &= 3,0 \text{ л} = \\ &= 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ t_{\text{к}} &= 77^\circ \text{C} \end{aligned}$$

$$Q_{\text{отд}} = ?$$

Решение. Потери внутренней энергии равны количеству теплоты, ОТДАННОЙ водой за сутки. Согласно формуле (3.5) имеем:

$$Q_{\text{отд}} = cm(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}),$$

где m – масса воды в термосе; $t_{\text{н}} = 100^\circ \text{C}$, так как кипяток имеет температуру 100°C . Для нахождения массы воды воспользуемся формулой $m = \rho V$, где ρ – плотность воды. Подставляя данное значение массы в формулу (3.5), получим:

$$Q_{\text{отд}} = c\rho V(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}).$$

Проверим размерность:

$$[Q_{\text{отд}}] = [c][\rho][V]([t_{\text{н}}] - [t_{\text{к}}]) = \frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{град} = \text{кал}.$$

Значение плотности воды возьмём из табл. П2 (см. приложение в конце учебника): $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, удельную теплоёмкость воды – из табл. 3.1: $c = 1000 \text{ кал/(кг·град)}$.

Подставим численные значения:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{отд}} &= c\rho V(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}) = \\
 &= 1000 \text{ кал}/(\text{кг}\cdot\text{град}) \cdot 1000 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot (100^\circ\text{C} - 77^\circ\text{C}) = \\
 &= 69000 \text{ кал} \approx 69 \cdot 10^3 \text{ кал} = 69 \text{ ккал}.
 \end{aligned}$$

Ответ: $Q_{\text{отд}} = c\rho V(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}) \approx 69 \text{ ккал}.$

Задача 3.4. Воду массой 200 г нагрели в стальном стакане, масса которого равна 100 г, от 20 до 70 °С. Какое потребовалось для этого количество теплоты?

$$m_{\text{в}} = 200 \text{ г} = 0,200 \text{ кг}$$

$$m_{\text{ст}} = 100 \text{ г} = 0,100 \text{ кг}$$

$$t_{\text{н}} = 20^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{к}} = 70^\circ\text{C}$$

$$Q = ?$$

Решение. Удельные теплоёмкости воды и железа находим в табл. 3.1:

$$c_{\text{в}} = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град}),$$

$$c_{\text{ст}} = 460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град}).$$

По формуле (3.4) найдем количество теплоты, которое потребуется для нагревания воды и стали:

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}}m_{\text{в}}(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}),$$

$$Q_{\text{ст}} = c_{\text{ст}}m_{\text{ст}}(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}).$$

Тогда общее количество теплоты, которое надо найти:

$$\begin{aligned}
 Q &= Q_{\text{в}} + Q_{\text{ст}} = c_{\text{в}}m_{\text{в}}(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) + c_{\text{ст}}m_{\text{ст}}(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = \\
 &= (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) \cdot (c_{\text{в}}m_{\text{в}} + c_{\text{ст}}m_{\text{ст}}) = \\
 &= (70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \cdot (4190 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град}) \cdot 0,200 \text{ кг} + \\
 &\quad + 460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град}) \cdot 0,100 \text{ кг}) = 44200 \text{ Дж} \approx \\
 &\approx 44 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 44 \text{ кДж}.
 \end{aligned}$$

Ответ: $Q = (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) \cdot (c_{\text{в}}m_{\text{в}} + c_{\text{ст}}m_{\text{ст}}) \approx 44 \text{ кДж}.$

Задача 3.5. На какую температуру нагреется 2,0 кг ртути, если ей сообщить такое же количество теплоты, какое необходимо сообщить 1,0 кг воды для её нагрева на 1,0 °С?

$$m_{\text{рт}} = 2,0 \text{ кг}$$

$$m_{\text{в}} = 1,0 \text{ кг}$$

$$\Delta t_{\text{в}} = 1,0^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{рт}} = ?$$

Решение. Из табл. 3.1 имеем:

$$c_{\text{в}} = 1000 \text{ кал}/(\text{кг}\cdot\text{град}),$$

$$c_{\text{рт}} = 32,9 \text{ кал}/(\text{кг}\cdot\text{град}).$$

Пусть Q – количество теплоты, которое необходимо для нагревания $m_{\text{в}} = 1,0 \text{ кг}$ воды на $\Delta t_{\text{в}} = 1,0^\circ\text{C}$. Тогда согласно формуле (3.4) получим:

$$Q = c_{\text{в}}m_{\text{в}}\Delta t_{\text{в}}. \quad (1)$$

Поскольку по условию задачи для нагревания $m_{\text{рт}} = 2,0$ кг ртути на неизвестную пока нам величину $\Delta t_{\text{рт}}$ требуется ТАКОЕ ЖЕ количество теплоты, то согласно формуле (3.4) можем записать:

$$Q = c_{\text{рт}} m_{\text{рт}} \Delta t_{\text{рт}}. \quad (2)$$

Приравняв правые части равенств (1) и (2), получим:

$$c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}} = c_{\text{рт}} m_{\text{рт}} \Delta t_{\text{рт}},$$

отсюда

$$\Delta t_{\text{рт}} = \frac{c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}}}{c_{\text{рт}} m_{\text{рт}}}.$$

Проверим размерность:

$$[\Delta t_{\text{рт}}] = \frac{[c_{\text{в}}][m_{\text{в}}][\Delta t_{\text{в}}]}{[c_{\text{рт}}][m_{\text{рт}}]} = \frac{\frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град}}{\frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг}} = \text{град}.$$

Подставим численные значения:

$$\Delta t_{\text{рт}} = \frac{c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}}}{c_{\text{рт}} m_{\text{рт}}} = \frac{1000 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 1,0 \text{ кг} \cdot 1,0^{\circ}\text{C}}{32,9 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 2,0 \text{ кг}} =$$

$$= 15,198^{\circ}\text{C} \approx 15^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Ответ: } \Delta t_{\text{рт}} = \frac{c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}}}{c_{\text{рт}} m_{\text{рт}}} \approx 15^{\circ}\text{C}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- A1. Какое количество теплоты потребуется для нагревания на 100°C металлической детали, теплоёмкость которой $C = 1000$ Дж/град?
- A2. Какое количество теплоты потребуется для нагревания чайника от 10 до 20°C , если его теплоёмкость $C = 100$ кал/град?
- A3. Какова теплоёмкость стального зубила, если при нагреве на 100°C ему сообщили количество теплоты 50 кДж?
- A4. Какое количество теплоты требуется для нагревания 1 кг воды от 10 до 11°C ?

- A5.** Перед горячей штамповкой латунную болванку массой 15 кг нагрели от 15 до 750 °С. Какое количество теплоты для этого потребовалось?
- A6.** Какое количество теплоты пошло на нагревание железной заклёпки массой 110 г от 20 до 920 °С?
- A7.** При скоростной обработке металла минералокерамическая пластинка, которой оснащена режущая часть резца, нагрелась от 20 до 1120 °С. Какое количество теплоты пошло на нагревание пластинки массой 15 г? Удельную теплоёмкость принять равной 140 кал/(кг·град).
- A8.** Какое количество теплоты нужно затратить, чтобы нагреть медный утюг массой 5,0 кг от 20 до 300 °С?
- A9.** Какое количество теплоты пошло на нагревание от 20 до 1220 °С стальной заготовки для коленчатого вала компрессора массой 35 кг?
- A10.** Для ускорения отвердевания железобетонные сборные детали пропаривают в автоклавах, где доводят температуру деталей до 175 °С. Какое количество теплоты пойдёт на нагревание плиты лестницы массой 105 кг, начальная температура которой равна 15 °С? Удельную теплоёмкость бетона принять равной 200 кал/(кг·град).
- A11.** При закалке стального зубила его сначала нагрели до 650 °С, потом опустили в масло, где оно остыло до 50 °С. Какое при этом выделилось количество теплоты, если масса зубила 500 г?
- A12.** Горячей штамповкой можно обрабатывать стальные детали массой до 300 кг. Какое количество теплоты выделится при охлаждении такой детали от 1200 до 20 °С?
- A13.** Какое количество теплоты отдаёт кирпичная печь массой 0,35 т, остывая на 40 °С?
- A14.** Какое количество теплоты выделилось при охлаждении чугунной болванки массой 32 кг от 1115 до 15 °С?

Задачи легкие

- B1.** На что больше расходуется количества теплоты: на нагревание чугунного горшка или воды, налитой в него, если их массы одинаковы?
- B2.** Алюминиевую и серебряную ложки одинаковой массы опустили в кипяток. Одинаковое ли количество теплоты получают они от воды?
- B3.** На что больше потребуется теплоты: на нагревание 100 г воды на 1 °С или на нагревание 100 г льда от –1 до 0 °С?
- B4.** При работе примуса температура керосина в нём повысилась от 10 до 50 °С. Определите, какое количество теплоты пошло на нагревание 0,50 л керосина, налитого в примус.

- Б5.** Какое количество теплоты пойдёт на нагревание воды от 13 до 25 °С в бассейне, длина которого 100 м, ширина 6 м и глубина 2 м?
- Б6.** Какое количество теплоты пойдёт на нагревание от 20 до 100 °С медного бруска, размеры которого 10×5×2 см?
- Б7.** Какое количество теплоты отдаст стакан кипятку (250 см³), остывая до комнатной температуры (14 °С)?
- Б8.** Рассчитайте, какое количество теплоты передаст свинцовая пластинка размером 10×5×2 см окружающим телам при охлаждении от 327 до 27 °С.
- Б9.** Какое количество теплоты отдаёт кирпич, остывая после обжига от 987 °С до температуры окружающего воздуха, равной 17 °С? Размеры кирпича принять равными: 25×12×6,5 см.
- Б10.** Рассчитайте, какое количество теплоты отдаст кирпичная печь, сложенная из 300 кирпичей, при остывании от 70 до 20 °С. Массу одного кирпича принять равной 5,6 кг.
- Б11.** Сколько воды можно нагреть от 15 °С до кипения, если сообщить ей 34 ккал?
- Б12.** Для нагревания 100 г металла от 20 до 40 °С потребовалось 62 кал. Определите удельную теплоёмкость металла.
- Б13.** Слитку золота массой 1,0 кг сообщили количество теплоты 320 кал. На какую температуру нагрелся слиток?
- Б14.** При остывании ртути от 50 до 0 °С выделилось 100 кал теплоты. Какова масса ртути?
- Б15.** При остывании стеклянного стакана от 100 до 20 °С выделилось 3,2 ккал тепла. Найдите удельную теплоёмкость стекла, если масса стакана 200 г.
- Б16.** При охлаждении соснового полена массой 5,0 кг выделилось 360 кДж тепла. На какую температуру охладилось полено?

Задачи средней трудности

- В1.** На рис. 3.3 представлены два графика зависимости температуры некоторых тел одинаковой массы от количества тепла, полученного ими от нагревателя. Какое из тел обладает большей удельной теплоёмкостью?
- В2.** В алюминиевом чайнике нагревалась вода. Построили графики зависимости полученной теплоты от времени для чайника и воды. Какой из графиков (рис. 3.4) построен для воды и какой – для чайника?

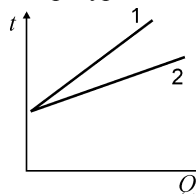


Рис. 3.3

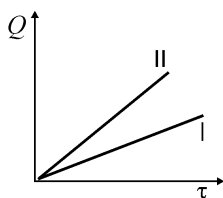


Рис. 3.4

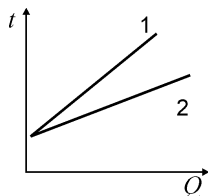


Рис. 3.5

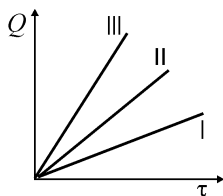


Рис. 3.6

В3. На рис. 3.5 представлены два графика зависимости температуры воды от количества теплоты, полученной ею от нагревателя. Какой из графиков соответствует большей массе воды?

В4. На горелках, дающих в равные промежутки времени одинаковое количество теплоты, нагревались равной массы вещества: вода, медь и железо. Укажите, какой из графиков (рис 3.6) построен для воды, какой – для меди и какой – для железа.

В5. При охлаждении куска олова массой 100 г до 32,0 °С выделилось 1,8 кал. Определите температуру олова до охлаждения.

В6. До какой температуры остынет 4,0 л кипятку в кастрюле, отдав в окружающее пространство 320 ккал?

В7. При охлаждении до 20 °С медного паяльника, масса которого 200 г, выделилось 7,2 ккал. До какой температуры был нагрет паяльник?

В8. Определите количество теплоты, которое потребуются, чтобы в алюминиевом котелке массой 200 г нагреть 1,5 л воды от 20 °С до кипения?

В9. В алюминиевой кастрюле, масса которой 800 г, нагревается 5 л воды от 10 °С до кипения. Какое количество теплоты пойдёт на нагревание кастрюли и воды?

В10. В железный душевой бак, масса которого 65 кг, налили 200 л холодной колодезной воды. В результате нагревания солнечными лучами температура воды повысилась от 4 до 29 °С. Какое количество теплоты получили бак и вода?

В11. Серебряный стакан массой 100 г заполнили спиртом массой 200 г и нагрели, сообщив количество теплоты 1 кДж. На какую температуру нагреется стакан со спиртом?

В12. В золотой кувшин налили немного воды и нагрели на 10 °С, сообщив количество теплоты 10 кДж. Какова масса воды, если масса кувшина 1 кг?

В13. В цинковом сосуде нагревали неизвестную жидкость, масса которой 0,10 кг. При нагревании на 10 °С стакану с жидкостью сообщили количество теплоты: 760 кал. Какова удельная теплоёмкость жидкости, если масса сосуда 200 г?

- В14.** На сколько градусов нагреется кусок алюминия массой 2,0 кг, если ему сообщить такое же количество теплоты, какое идёт на нагревание 880 г воды от 0 до 100 °С?
- В15.** На нагревание кирпича массой 4,0 кг на 60°С затрачено такое же количество теплоты, как и для нагревания 4,0 кг воды на 13,2 °С. Определите удельную теплоёмкость кирпича.
- В16.** При нагревании платинового слитка от 0 до 100 °С уходит такое же количество теплоты, какое требуется на нагревание 1,0 л воды от 0 до 10 °С. Определите массу слитка.
-

4. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА. КАЛОРИМЕТР

Если два тела, имеющие различные температуры, привести в соприкосновение, то между ними начнется *процесс теплопередачи*: более горячее тело, остывая, будет отдавать часть своей внутренней энергии более холодному, а более холодное тело, нагреваясь, будет эту энергию получать. Процесс будет длиться до тех пор, пока не установится общая для обоих тел температура.

Если система теплоизолирована, то есть никакие другие тела в процессе теплопередачи не участвуют, то общая внутренняя энергия двух тел должна сохраняться:

$$U^{\text{нач}} = U^{\text{кон}}, \quad (4.1)$$

или

$$U^{\text{кон}} - U^{\text{нач}} = 0,$$

или

$$\Delta U = U^{\text{кон}} - U^{\text{нач}} = 0. \quad (4.2)$$

В то же время внутренняя энергия *каждого отдельного тела* в процессе теплопередачи меняется: у горячего тела уменьшается, а у холодного увеличивается, но в *сумме* эти изменения равны нулю:

$$\begin{aligned} U^{\text{кон}} - U^{\text{нач}} &= (U_{\text{гор}}^{\text{кон}} + U_{\text{хол}}^{\text{кон}}) - (U_{\text{гор}}^{\text{нач}} + U_{\text{хол}}^{\text{нач}}) = \\ &= (U_{\text{гор}}^{\text{кон}} - U_{\text{гор}}^{\text{нач}}) + (U_{\text{хол}}^{\text{кон}} - U_{\text{хол}}^{\text{нач}}) = 0 \end{aligned}$$

или более кратко:

$$\Delta U = \Delta U_{\text{гор}} + \Delta U_{\text{хол}} = 0. \quad (4.3)$$

Понятно, что изменение внутренней энергии холодного тела положительно: $U_{\text{хол}}^{\text{кон}} - U_{\text{хол}}^{\text{нач}} = \Delta U_{\text{хол}} > 0$, так как $U_{\text{хол}}^{\text{кон}} > U_{\text{хол}}^{\text{нач}}$, а изменение внутренней энергии горячего тела отрицательно: $U_{\text{гор}}^{\text{кон}} - U_{\text{гор}}^{\text{нач}} = \Delta U_{\text{гор}} < 0$, так как $U_{\text{гор}}^{\text{кон}} < U_{\text{гор}}^{\text{нач}}$.

Количество теплоты, полученное холодным телом, равно *изменению* его внутренней энергии:

$$Q_{\text{пол}} = U_{\text{хол}}^{\text{кон}} - U_{\text{хол}}^{\text{нач}} = \Delta U_{\text{хол}}.$$

Количество теплоты, отданное горячим телом, равно *убыли* его внутренней энергии:

$$Q_{\text{отд}} = U_{\text{гор}}^{\text{нач}} - U_{\text{гор}}^{\text{кон}} = -(U_{\text{гор}}^{\text{кон}} - U_{\text{гор}}^{\text{нач}}) = -\Delta U_{\text{гор}}.$$

Отсюда $\Delta U_{\text{гор}} = -Q_{\text{отд}}$.

Подставив значения $\Delta U_{\text{хол}} = Q_{\text{пол}}$ и $\Delta U_{\text{гор}} = -Q_{\text{отд}}$ в (4.3), получим:

$$-Q_{\text{отд}} + Q_{\text{пол}} = 0$$

или

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}. \quad (4.4)$$

Равенства (4.1), (4.2), (4.3) и (4.4) представляют собой разные формы записи одного и того же закона: ***если в изолированной от окружающих тел системе происходит только процесс теплопередачи, то внутренняя энергия этой системы сохраняется.*** А указанные равенства называются ***уравнениями теплового баланса***. С их помощью можно решить большое число практических задач.

Задача 4.1. В сосуд, в котором находилось $m_1 = 100$ г подсолнечного масла при $t_1 = 20$ °С, долили $m_2 = 20$ г подсолнечного масла при температуре $t_2 = 120$ °С. Найти установившуюся температуру. Теплоемкостью сосуда пренебречь.

$$m_1 = 100 \text{ г}$$

$$t_1 = 20 \text{ °С}$$

$$m_2 = 20 \text{ г}$$

$$t_2 = 120 \text{ °С}$$

$$\theta = ?$$

Решение. Решим эту задачу *тремя способами*.

Способ 1. Воспользуемся уравнением теплового баланса (4.4) $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}$. Пусть c – удельная теплоемкость подсолнечного масла (неизвестная нам величина), а θ^1 – установившаяся температура. Тогда:

$$Q_{\text{пол}} = cm_2(\theta - t_1) \quad (\text{по формуле (3.4)}),$$

$$Q_{\text{отд}} = cm_1(t_2 - \theta) \quad (\text{по формуле (3.5)}).$$

Отсюда $cm_2(\theta - t_1) = cm_1(t_2 - \theta)$. Неизвестная нам удельная теплоемкость благополучно сокращается, далее раскрываем скобки и решаем это уравнение относительно неизвестной θ :

$$m_2 t_2 - m_2 \theta = m_1 \theta - m_1 t_1$$

¹ Напомним: θ – греческая буква тэта.

$$m_1 t_1 + m_2 t_2 = m_1 \theta + m_2 \theta;$$

$$m_1 t_1 + m_2 t_2 = \theta(m_1 + m_2);$$

$$\frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} = \theta \text{ или } \theta = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}.$$

Проверим размерность: $[\theta] = \frac{[m][t]}{[m]} = \frac{\cancel{г} \cdot \text{град}}{\cancel{г}} = \text{град}.$

Подставим численные значения:

$$\theta = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} = \frac{100 \text{ г} \cdot 20^\circ\text{C} + 20 \text{ г} \cdot 120^\circ\text{C}}{100 \text{ г} + 20 \text{ г}} = 36,7^\circ\text{C} \approx 37^\circ\text{C}.$$

Способ 2. Запишем уравнение теплового баланса (4.3):

$$\Delta U = (\Delta U_{\text{гор}} + \Delta U_{\text{хол}}) = 0,$$

где U – полная внутренняя энергия системы, состоящей из холодного и горячего масла; ΔU – изменение внутренней энергии системы.

$\Delta U_{\text{хол}} = Q_{\text{пол}} = cm_1(\theta - t_1)$ – изменение внутренней энергии холодного масла;

$\Delta U_{\text{гор}} = -Q_{\text{отд}} = -cm_2(t_2 - \theta) = cm_2(\theta - t_2)$ – изменение внутренней энергии горячего масла.

(Заметим, что $\Delta U_{\text{хол}} > 0$, так как энергия холодного масла при нагревании увеличивается, а $\Delta U_{\text{гор}} < 0$, так как при остывании энергия горячего масла уменьшается.)

Тогда

$$\Delta U = (\Delta U_{\text{гор}} + \Delta U_{\text{хол}}) = cm_1(\theta - t_1) + cm_2(\theta - t_2) = 0,$$

откуда находим искомую температуру θ :

$$cm_1\theta - cm_1t_1 + cm_2\theta - cm_2t_2 = 0$$

$$cm_1\theta + cm_2\theta = cm_1t_1 + cm_2t_2;$$

$$\cancel{\theta} (m_1 + m_2) = \cancel{\theta} (m_1t_1 + m_2t_2);$$

$$\theta = \frac{m_1t_1 + m_2t_2}{m_1 + m_2}$$

– это та же формула, что и при решении первым способом.

Способ 3. Сначала немного теории. Рассмотрим некоторое тело при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Пусть абсолютное значение его внутренней энергии равно U_0 .

Читатель: Но мы же никогда не сможем определить это значение!

Автор: А оно нам и не понадобится. Теперь с помощью теплопередачи изменим (увеличим или уменьшим) температуру нашего тела до некоторой величины t .

Пусть внутренняя энергия тела при этой температуре равна $U(t)$. Тогда $U(t) = U_0 + \Delta U$, где ΔU – это количество теплоты, полученное телом. Если теплоемкость тела равна C , то

$$\Delta U = C \cdot \Delta t = C(t - 0)^\circ\text{C} = Ct.$$

Заметим, что если $t < 0^\circ\text{C}$, то и $\Delta U < 0$. Это значит, что внутренняя энергия тела уменьшилась, или можно сказать, что тело получило отрицательное количество теплоты. Итак:

$$U(t) = U_0 + Ct. \quad (4.5)$$

Теперь рассмотрим два тела с теплоемкостями C_1 и C_2 и начальными температурами t_1 и t_2 .

Пусть между телами начался процесс теплообмена, в результате которого температура обоих тел стала равной θ . Запишем уравнения теплового баланса в виде (4.1):

$$U^{\text{нач}} = U^{\text{кон}}.$$

Пусть U_{10} и U_{20} – внутренние энергии тел при температуре 0°C . Тогда согласно формуле (4.5):

$$U^{\text{нач}} = U_1(t_1) + U_2(t_2) = (U_{10} + C_1 t_1) + (U_{20} + C_2 t_2),$$

$$U^{\text{кон}} = U_1(\theta) + U_2(\theta) = (U_{10} + C_1 \theta) + (U_{20} + C_2 \theta).$$

Приравняв $U^{\text{нач}}$ и $U^{\text{кон}}$, получим

$$(U_{10} + C_1 t_1) + (U_{20} + C_2 t_2) = (U_{10} + C_1 \theta) + (U_{20} + C_2 \theta).$$

Как видим, неизвестные нам величины U_{10} и U_{20} благополучно сокращаются, а уравнение теплового баланса принимает вид:

$$C_1 t_1 + C_2 t_2 = C_1 \theta + C_2 \theta = \theta(C_1 + C_2). \quad (4.6)$$

Если в теплообмене принимают участие не два, а три или больше тел, то проводя аналогичные рассуждения, нетрудно получить уравнение теплового баланса в следующем виде:

$$C_1 t_1 + C_2 t_2 + \dots + C_n t_n = \theta(C_1 + C_2 + \dots + C_n), \quad (4.7)$$

где n – число тел, участвующих в теплообмене; $C_1, C_2, \dots, C_n$ – их теплоемкости, $t_1, t_2, \dots, t_n$ – их начальные температуры, а θ – установившаяся температура.

Теперь вернемся к нашей задаче.

Первое «тело» у нас – это масло массой m_1 , первоначально находившееся при t_1 , а второе «тело» – это масло массой m_2 , первоначально находившееся при температуре t_2 . Теплоемкости этих тел соответственно равны: $C_1 = cm_1$, $C_2 = cm_2$. Согласно формуле (4.6) можем записать:

$$cm_1t_1 + cm_2t_2 = (cm_1 + cm_2)\theta.$$

Отсюда

$$\theta = \frac{c(m_1t_1 + m_2t_2)}{c(m_1 + m_2)} = \frac{m_1t_1 + m_2t_2}{m_1 + m_2}.$$

Как видите, мы получили тот же результат, что и при решении задачи первыми двумя способами.

Ответ: $\theta = \frac{m_1t_1 + m_2t_2}{m_1 + m_2} \approx 37^\circ\text{C}.$

Читатель: Так, каким же из трех способов *надо* решать эту задачу?

Автор: Каким хотите. С точки зрения математики, пожалуй, наиболее предпочтительней третий способ, так как в этом случае минимум алгебраических преобразований, а с точки зрения физики, в данном случае наиболее понятен, на мой взгляд, первый способ.

Как измерить удельную теплоемкость вещества?

Для измерения теплоемкостей тел, а также удельных теплоемкостей веществ пользуются КАЛОРИМЕТРОМ. Калориметр представляет собой металлический сосуд с крышкой, имеющий форму стакана. Сосуд ставят на пробки, помещенные в другой, больший сосуд так, что между обоими сосудами остается слой воздуха (рис. 4.1). Все эти предосторожности уменьшают отдачу теплоты окружающим телам.

Сосуд наполняют известным количеством воды, температура которой до опыта измеряется (пусть она равна t_1). Затем берут тело, теплоёмкость которого хотят измерить, и нагревают до известной температуры t_2 (например, помещают в пары кипящей воды, так что температура $t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$).

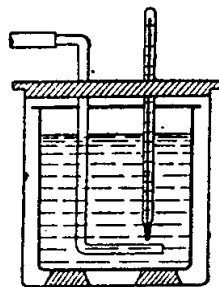


Рис. 4.1

Нагретое тело опускают в воду калориметра, закрывают крышкой и, помешивая мешалкой, ждут, пока температура в калориметре установится (это будет, когда вода и тело примут одинаковую температуру). Тогда отмечают эту температуру. Обозначим её греческой буквой θ .

Теперь, зная t_1 , t_2 , θ , массу воды m_1 и её удельную теплоёмкость c_1 , а также массу тела m_2 , можно рассчитать теплоёмкость тела, а также удельную теплоёмкость материала, из которого изготовлено тело.

Читатель: А как это сделать?

Автор: Давайте рассмотрим конкретную задачу.

Задача 4.2. В калориметр налили $m_1 = 200\text{ г}$ воды при температуре $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и опустили тело массой $m_2 = 50\text{ г}$ при температуре $t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$. После этого в калориметре установилась температура $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$. Определить теплоёмкость тела, а также удельную теплоёмкость материала, из которого изготовлено тело. Теплоёмкостью калориметра пренебречь.

$$m_1 = 200\text{ г} = 0,200\text{ кг}$$

$$t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$$

$$m_2 = 50\text{ г} = 0,050\text{ кг}$$

$$t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$$

$$c_2 = ? \quad C = ?$$

Решение. Обозначим искомую теплоёмкость тела буквой C , а удельную теплоёмкость материала, из которого изготовлено тело, буквой c_2 . Удельная теплоёмкость воды – табличная величина:

$$c_1 = 1000\text{ кал/}(\text{кг}\cdot\text{град}).$$

Тело в процессе теплопередачи отдаёт тепло, а вода это тепло получает. Если пренебречь потерями тепла на нагрев окружающей среды, а также мешалки, градусника и самого калориметра, то ко-

личество теплоты, отданное телом, равно количеству теплоты, полученному водой: $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}$.

1. Согласно формуле (3.4): $Q_{\text{пол}} = c_1 m_1 (\theta - t_1)$.

2. Согласно формуле (3.5): $Q_{\text{отд}} = c_2 m_2 (t_2 - \theta)$.

Приравнявая правые части этих равенств, получим:

$$c_2 m_2 (t_2 - \theta) = c_1 m_1 (\theta - t_1).$$

Отсюда $c_2 = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_1)}{m_2 (t_2 - \theta)}$. Проверим размерность:

$$[c_2] = \frac{[c_1][m_1][t]}{[m_2][t]} = \frac{\text{кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot \text{кг} \cdot \text{град}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = \text{кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}).$$

Подставляя численные значения, получим:

$$\begin{aligned} c_2 &= \frac{c_1 m_1 (\theta - t_1)}{m_2 (t_2 - \theta)} = \\ &= \frac{1000 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,200 \text{ кг} \cdot (25^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{0,050 \text{ кг} \cdot (100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})} = \\ &= 266,7 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \approx 2,7 \cdot 10^2 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}). \end{aligned}$$

Зная удельную теплоёмкость, легко найти теплоёмкость тела

$$\begin{aligned} C &= c_2 m_2 = 2,7 \cdot 10^2 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,050 \text{ кг} = \\ &= 13,5 \text{ кал}/\text{кг} \approx 14 \text{ кал}/\text{кг}. \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } c_2 = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_1)}{m_2 (t_2 - \theta)} \approx 2,7 \cdot 10^2 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}),$$

$$C = c_2 m_2 \approx 14 \text{ кал}/\text{кг}.$$

Как определить теплоёмкость калориметра?

Читатель: Мы пренебрегли теплоёмкостью калориметра... А нельзя ли и её определить экспериментально?

Автор: Рассмотрим задачу.

Задача 4.3. В калориметр налили $m_1 = 200$ г воды при температуре $t_1 = 100^\circ\text{C}$. При этом установившаяся температура оказалась равной $\theta = 98^\circ\text{C}$. Какова теплоёмкость калориметра, если его начальная температура $t_2 = 20^\circ\text{C}$?

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 200 \text{ г} = 0,200 \text{ кг} \\
 c_1 &= 1000 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \\
 t_1 &= 100 \text{ }^\circ\text{C} \\
 t_2 &= 20 \text{ }^\circ\text{C} \\
 \theta &= 98 \text{ }^\circ\text{C} \\
 C &= ?
 \end{aligned}$$

Решение. В данном случае калориметр получает тепло, а вода отдаёт, поэтому: $Q_{\text{пол}} = C(\theta - t_2)$, $Q_{\text{отд}} = c_1 m_1 (t_1 - \theta)$. Отсюда

$$\begin{aligned}
 C(\theta - t_2) &= c_1 m_1 (t_1 - \theta), \\
 C &= \frac{c_1 m_1 (t_1 - \theta)}{\theta - t_2}.
 \end{aligned}$$

Проверим размерность:

$$[C] = \frac{[c_1][m_1][t]}{[t]} = \frac{\frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град}}{\text{град}} = \frac{\text{кал}}{\text{град}}.$$

Подставляя численные значения, получим:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1000 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,200 \text{ кг} \cdot (100 - 98)^\circ\text{C}}{(98 - 20)^\circ\text{C}} = \\
 &= 5,13 \text{ кал/град} \approx 5,1 \text{ кал/град}.
 \end{aligned}$$

Ответ: $C = \frac{c_1 m_1 (t_1 - \theta)}{\theta - t_2} \approx 5,1 \text{ кал/град}.$

Читатель: По-моему, теплоёмкость калориметра неправдоподобно мала. Ведь если взять всего $m = 5,1 \text{ г}$ воды, удельная теплоемкость которой $c = 1000 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град})$, то *теплоемкость* этого количества воды будет равна:

$$C = cm = 1000 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 5,1 \text{ кал/град},$$

то есть такая же, как у нашего калориметра! Разве это возможно?

Автор: Хороший калориметр как раз и должен иметь маленькую теплоемкость. Допустим, калориметр сделан из меди ($c = 94 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град})$) и имеет массу $m = 50 \text{ г}$. Тогда его теплоемкость равна:

$$C = cm = 94 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 50 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 4,7 \text{ кал/град}.$$

Даже меньше, чем у нас. Не забывайте, что по сравнению с металлами удельная теплоемкость воды больше примерно в 10 раз! А теперь давайте посмотрим, можно ли хотя бы для грубых расчетов при экспериментальном определении теплоёмкости тела пренебрегать теплоёмкостью калориметра. Для этого ещё раз вычислим удельную теплоёмкость тела из задачи 4.2, но уже с

учетом теплоемкости калориметра, значение которой мы получили в задаче 4.3.

Задача 4.4. В калориметр налили $m_1 = 200$ г воды при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и опустили тело из неизвестного материала массой $m_2 = 50$ г при температуре $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Теплоёмкость калориметра $C = 5,1$ кал/град. Определите удельную теплоёмкость материала, из которого изготовлено тело, если установившаяся температура в калориметре $\theta = 25^\circ\text{C}$. Начальная температура калориметра $t_1 = 20^\circ\text{C}$.

$$m_1 = 200 \text{ г} = 0,200 \text{ кг}$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$c_1 = 1000 \text{ кал/}(\text{кг}\cdot\text{град})$$

$$C = 5,1 \text{ кал/град}$$

$$m_2 = 50 \text{ г} = 0,050 \text{ кг}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$\theta = 25^\circ\text{C}$$

$$c_2 = ?$$

Решение. Воспользуемся уравнением теплового баланса в виде (4.2): $\Delta U = 0$. В нашем случае

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3,$$

где $\Delta U_1 = C(\theta - t_1)$ – изменение внутренней энергии калориметра;

$\Delta U_2 = c_1 m_1 (\theta - t_1)$ – изменение внутренней энергии воды;

$\Delta U_3 = c_2 m_2 (\theta - t_2)$ – изменение внутренней энергии тела.

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = 0,$$

$$C(\theta - t_1) + c_1 m_1 (\theta - t_1) + c_2 m_2 (\theta - t_2) = 0,$$

$$C(\theta - t_1) + c_1 m_1 (\theta - t_1) = -c_2 m_2 (\theta - t_2),$$

$$C(\theta - t_1) + c_1 m_1 (\theta - t_1) = +c_2 m_2 (t_2 - \theta),$$

$$c_2 = \frac{C(\theta - t_1) + c_1 m_1 (\theta - t_1)}{m_2 (t_2 - \theta)}.$$

Можно еще «для красоты» вынести в числителе за скобки общий множитель $(\theta - t_1)$:

$$c_2 = \frac{(C + c_1 m_1)(\theta - t_1)}{m_2 (t_2 - \theta)}.$$

Проверим размерность:

$$[c_2] = \frac{([C] + [c_1][m_1])[t]}{[m_2][t]} = \frac{\left(\frac{\text{кал}}{\text{град}} + \frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \cancel{\text{кг}} \right) \cdot \cancel{\text{град}}}{\cancel{\text{кг}} \cdot \cancel{\text{град}}} =$$

$$= \frac{\frac{\text{кал}}{\text{град}}}{\text{кг}} = \frac{\text{кал}}{\text{град}} \cdot \frac{\text{кг}}{1} = \frac{\text{кал} \cdot 1}{\text{град} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{кал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Подставим численные значения:

$$c_2 = \frac{(C + c_1 m_1)(\theta - t_1)}{m_2(t_2 - \theta)} =$$

$$= \frac{\left(5,1 \frac{\text{кал}}{\text{град}} + 1000 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,200 \text{ кг} \right) \cdot (25 - 20)^\circ \text{C}}{0,050 \text{ кг} \cdot (100 - 25)^\circ \text{C}} =$$

$$= 273,467 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \approx 2,7 \cdot 10^2 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}).$$

$$\text{Ответ: } c_2 = \frac{(C + c_1 m_1)(\theta - t_1)}{m_2(t_2 - \theta)} \approx 2,7 \cdot 10^2 \text{ кал}/(\text{кг} \cdot \text{град}).$$

Как видите, при нашей точности вычислений (до двух значащих цифр) учет теплоемкости калориметра вообще никак не повлиял на численный ответ.

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- A1.** На свиноводческой ферме смешали 100 кг воды при температуре 90°C и 200 кг воды из водопровода, температура которой 6 °C. Определите температуру смеси.
- A2.** В ванну залили 100 кг воды при температуре 12 °C, после чего добавили 50 кг горячей воды при температуре 86 °C. Чему равна температура смеси? Теплоту, которая пошла на нагревание ванны, не учитывать.

Задачи легкие

- Б1.** В сосуд, в котором содержится $m = 150$ г воды при температуре $t_1 = 16$ °С, добавили некоторое количество воды при температуре $t_2 = 80$ °С. Какую массу воды добавили, если температура смеси стала $\theta = 32$ °С?
- Б2.** В ванну налили $m_1 = 100$ кг воды при некоторой температуре, после чего добавили $m_2 = 50$ кг горячей воды при температуре $t_2 = 86$ °С. Температура смеси оказалась равной $\theta = 36,7$ °С. Какова начальная температура воды в ванной?
- Б3.** В сосуд с этиловым спиртом, температура которого $t_1 = 20$ °С, положили кусочек серы массой $m_2 = 10$ г при температуре $t_2 = 0$ °С, в результате чего температура спирта понизилась до $\theta = 19$ °С. Какова масса спирта?
- Б4.** В воду массой $m_1 = 1,0$ кг при температуре $t_1 = 100$ °С опустили медный брусок массой $m_2 = 0,50$ кг при температуре $t_2 = 0$ °С. Найдите установившуюся температуру.
- Б5.** В машинное масло массой $m_1 = 2,0$ кг при температуре $t_1 = 0$ °С опустили чугунную болванку массой $m_2 = 1,0$ кг при температуре $t_2 = 100$ °С. Найдите установившуюся температуру.
- Б6.** В сосуд с керосином, масса которого $m_1 = 100$ г, находящийся при температуре $t_1 = 20$ °С, положили стальную деталь массой $m_2 = 10$ г при температуре $t_2 = -20$ °С. Найдите установившуюся температуру. Теплоёмкость сосуда не учитывать.
- Б7.** В калориметр теплоёмкостью $C = 20$ Дж/град, находящийся при температуре $t_2 = 0$ °С, налили $m_1 = 100$ г неизвестной жидкости при температуре $t_1 = 50$ °С, после чего в калориметре установилась температура $\theta = 45$ °С. Найдите удельную теплоёмкость жидкости.
- Б8.** В калориметр теплоёмкостью $C = 30$ Дж/град, находящийся при температуре $t_2 = 0$ °С, налили ртуть при температуре $t_1 = 100$ °С, после чего в калориметре установилась температура $\theta = 50$ °С. Найдите массу налитой ртути.
- Б9.** В калориметр теплоёмкостью $C = 45$ Дж/град, находящийся при температуре $t_1 = 20$ °С, налили $m_1 = 200$ г воды при температуре $t_2 = 100$ °С. Найдите установившуюся температуру.
- Б10.** В калориметр теплоёмкостью $C = 20$ Дж/град, находящийся при температуре $t_1 = 25$ °С, налили $m_2 = 150$ г машинного масла при температуре $t_2 = 80$ °С. Найдите установившуюся температуру.

Задачи средней трудности

- В1.** В ванну, в которой находилось 80 л воды, долили ещё 16 л воды при температуре 100 °С, после чего в ванне установилась температура 25 °С. Какова была начальная температура воды в ванне? Теплоёмкость ванны не учитывать.
- В2.** Мальчик наполнил стакан, ёмкость которого 200 см³, на 3/4 кипятком и дополнил его холодной водой. Определите, какая установилась температура воды, если температура холодной воды равна 20 °С. Потери теплоты на нагревание сосуда не учитывать.
- В3.** В каком отношении следует смешать две массы воды, взятые при температурах 50 и 0 °С, чтобы температура смеси была 20 °С?
- В4.** Сколько нужно добавить холодной воды при температуре 10 °С в 50 л воды, имеющей температуру 100 °С, для получения смеси с температурой 45 °С?
- В5.** Для ванны нужно приготовить 350 л воды при температуре 36 °С. В колонке температура нагретой воды 76 °С, а из водопровода идёт вода при температуре 6 °С. Сколько надо взять горячей и холодной воды для приготовления ванны?
- В6.** В стакан теплоёмкостью $C = 50$ Дж/град налили $m_1 = 200$ г спирта при температуре $t_1 = 20$ °С и бросили оловянный шарик массой $m_2 = 20$ г. Какой была температура шарика, если температура смеси $\theta = 21$ °С? Начальные температуры спирта и стакана равны.
- В7.** В калориметре теплоёмкостью $C = 25$ Дж/град при температуре $t_1 = -10$ °С находится $m_1 = 200$ г машинного масла. В калориметр положили кусочек льда массой $m_2 = 20$ г при температуре $t_2 = -30$ °С. Какова установившаяся температура?
- В8.** В стакан теплоёмкостью $C = 50$ Дж/град налили $m_1 = 100$ г этилового эфира. После этого в стакан положили кусочек цинка массой $m_2 = 50$ г при температуре $t_2 = 0$ °С. Какова была начальная температура эфира, если установившаяся температура смеси $\theta = 10$ °С? Начальная температура стакана такая же, как у эфира.
- В9.** До какой температуры нагрелась во время работы стальная фреза массой 1,00 кг, если после опускания ее в калориметр температура 1,00 л воды повысилась от 11,3 до 30,0 °С? Теплоёмкость калориметра не учитывать.
- В10.** В фарфоровую чашку массой 100 г при температуре 20 °С влили 200 см³ кипятку. Окончательная температура оказалась равной 93 °С. Определите теплоёмкость чашки и ее удельную теплоёмкость.

- В11.** Для измерения температуры воды массой $m = 66$ г в неё погрузили термометр, который показал температуру $t_1 = 32,4$ °С. Какова действительная температура θ воды, если теплоёмкость термометра $C_t = 1,9$ Дж/град, и перед погружением в воду он показывал температуру помещения $t_2 = 17,8$ °С? Удельная теплоёмкость воды составляет $c = 4,2$ кДж/(кг·град).
- В12.** В стакане содержится 250 см^3 воды. Опущенный в стакан термометр показал 78 °С. Какова действительная температура воды, если теплоёмкость термометра 20 Дж/град, а до опускания в воду он показывал 20 °С? Теплоёмкостью стакана пренебречь.
- В13.** В чашку теплоёмкостью $C = 100$ Дж/град налили $m_1 = 100$ г глицерина при температуре $t_1 = 20,0$ °С и положили кусочек никеля при температуре $t_2 = 100$ °С. Установившаяся температура смеси $\theta = 21,0$ °С. Начальная температура чашки $20,0$ °С. Какова масса никеля?
- В14.** В латунный калориметр массой 128 г, содержащий 240 г воды при $8,4$ °С, опущено металлическое тело массой 192 г, нагретое до 100 °С. Окончательная температура, установившаяся в калориметре, $21,5$ °С. Определите удельную теплоёмкость испытуемого тела.
- В15.** В стеклянный стакан налили $m_1 = 200$ г ацетона при температуре $t_1 = 20$ °С и насыпали $m_2 = 50$ г песка при температуре $t_2 = 100$ °С, после чего установилась температура $\theta = 25$ °С. Найдите теплоёмкость стакана.
- В16.** В стакан с горячим чаем первый раз опустили серебряную ложку, а во второй раз – алюминиевую такого же объёма. В каком случае понижение температуры в стакане оказалось более значительным?

Задачи трудные

- Г1.** Смешано 24 л воды при 12 °С и 40 л воды при 80 °С. Определите установившуюся температуру, если во время смешения тепловые потери составляли 420 кДж.
- Г2.** В сосуде смешиваются три химически не взаимодействующих жидкости, имеющие: массы $m_1 = 1,0$ кг, $m_2 = 10,0$ кг, $m_3 = 5,0$ кг, температуры $t_1 = 6,0$ °С, $t_2 = -40$ °С, $t_3 = 60$ °С; удельные теплоёмкости $c_1 = 2,0$ кДж/(кг·град), $c_2 = 4,0$ кДж/(кг·град), $c_3 = 2,0$ кДж/(кг·град). Найдите температуру θ смеси и количество теплоты, необходимое для последующего нагревания смеси до $t = 6$ °С. Теплоёмкость сосуда не учитывать.
- Г3.** Для определения удельной теплоёмкости масла в калориметр с теплоёмкостью 15 кал/град налили 250 г масла при температуре 12 °С, а за-

тем опустили туда медное тело массой 500 г при 100 °С. Общая температура смеси стала равной 33 °С. Какова удельная теплоёмкость масла?

- Г4 Для определения температуры нагревателя в него поместили стальной шарик массой 20 г. После этого шарик опустили в алюминиевый калориметр массой 60 г, содержащий 200 г воды при температуре 18 °С. В результате этого температура воды в калориметре повысилась до 26 °С. Определите температуру нагревателя. Потерями теплоты пренебречь.

Задачи очень трудные

- Д1. После опускания в воду, имеющую температуру 10 °С, тела, нагретого до 100 °С, через некоторое время установилась общая температура 40 °С. Какой станет температура воды, если, не вынимая первого тела, в неё опустить ещё одно такое же тело, нагретое до 100 °С?
- Д2. Смесь из свинцовых и алюминиевых опилок с общей массой 150 г и температурой 100 °С погружена в калориметр с водой, температура которой 15 °С, а масса 230 г. Окончательная температура установилась 20 °С. Теплоёмкость калориметра 42 Дж/град. Сколько свинца и алюминия было в смеси?
- Д3. В два одинаковых сосуда, содержащих воду (в одном масса воды $m_1 = 0,10$ кг при температуре $t_1 = 45$ °С, в другом масса воды $m_2 = 0,50$ кг при температуре $t_2 = 24$ °С), налили поровну ртути. После установления теплового равновесия в обоих сосудах оказалось, что температура воды в них одна и та же и равна $\theta = 17$ °С. Найдите теплоёмкость C_c сосудов. Удельная теплоёмкость воды $c = 4,2$ кДж/(кг·град).
- Д4. Имеются два теплоизолированных сосуда. В первом из них находится 5,0 л воды при температуре $t_1 = 60$ °С, во втором – 1,0 л воды при температуре $t_2 = 20$ °С. Сначала часть воды перелили из первого сосуда во второй. Затем, когда во втором сосуде установилось тепловое равновесие, из него в первый сосуд отлили столько воды, чтобы её объёмы в сосудах стали равны первоначальным. После этих операций температура воды в первом сосуде стала равной $t = 59$ °С. Сколько воды переливали из первого сосуда во второй и обратно?

5. ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ. ПЕРЕОХЛАЖДЕННАЯ ЖИДКОСТЬ

Плавление и отвердевание

Проведём следующий эксперимент: поставим на огонь банку со снегом, взятым при отрицательной температуре, и проследим за изменением температуры в процессе нагревания (рис. 5.1).

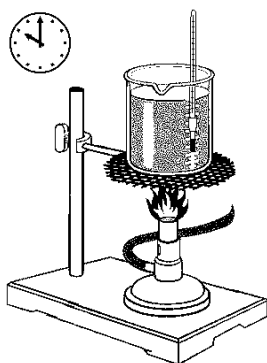


Рис. 5.1

Пусть начальная температура снега $t_n = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сначала мы увидим, что температура растёт, но, достигнув $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура перестанет изменяться, несмотря на то, что горелка продолжает гореть. В это время в банке появляются капельки воды, то есть снег начинает таять (плавиться). Но до тех пор, пока весь снег не превратится в воду, температура не поднимется выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$! И лишь после того, как весь снег растает, температура опять начнёт расти.

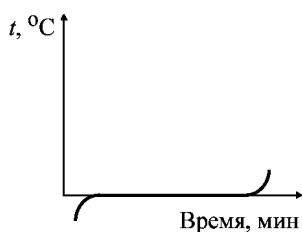


Рис. 5.2

График зависимости температуры от времени представлен на рис. 5.2.

Проделаем второй опыт. Вынесем банку с водой при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на мороз и проследим за изменением её температуры (рис. 5.3).

Сначала температура понизится до 0°C . Потом температура перестанет изменяться, но в воде мы увидим кристаллики льда. Если воду со льдом всё время перемешивать, то температура смеси не понизится ниже нуля до тех пор, пока вся вода не замёрзнет. И лишь после этого лёд начнет охлаждаться до температуры окружающей среды.

График зависимости температуры от времени представлен на рис. 5.4.

Отметим главное: процесс плавления и отвердевания происходит при одной и той же температуре 0°C , которая называется *температурой плавления* льда.

Читатель: И что же все вещества имеют свою температуру плавления?

Автор: Не все, но очень многие. Такие вещества называются кристаллическими, а процесс их отвердевания – кристаллизацией. Но существуют ещё вещества, называемые аморфными, у которых нет определённой температуры плавления. Это, например, смола, канифоль, стекло. График зависимости температуры от времени при нагревании у них выглядит, как показано на рис. 5.5.

У кристаллических веществ жидкое состояние (вода) резко отличается по своим свойствам от твёрдого состояния (лёд). У аморфных же эта грань «размыта». Например, при нагревании смолы она *постепенно* размягчается, а при охлаждении *постепенно* густеет. Даже в твёрдом состоянии аморфные тела способны «течь» – очень медленно изменять свою форму.

Читатель: Выходит, что при нагревании все вещества должны расплавиться. Но вот я сколько ни нагревал на костре дрова или бумагу, ни разу не видел ни жидких дров, ни жидкой бумаги.

Автор: В приведённых Вами примерах происходят *химические реакции*, то есть *превращения одних веществ в другие за счет изменения состава их молекул*. При сгорании дров, например, углерод, соединяясь с кислородом, образуют углекислый газ:

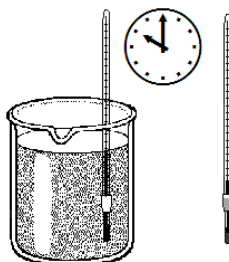
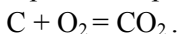


Рис. 5.3

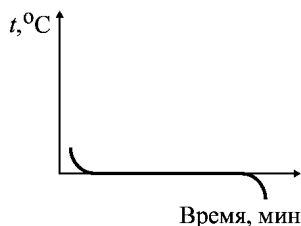


Рис. 5.4

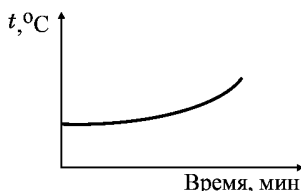


Рис. 5.5

Когда же мы говорим о плавлении вещества, то речь идёт о переходе из твердого состояния в жидкое одного и того же вещества, то есть состав молекул вещества не должен изменяться.

Конечно, надо признать, что есть и такие вещества, которые *вообще не плавятся* при атмосферном давлении. Некоторые вещества, достигнув определенной температуры в твёрдом состоянии, распадаются на более простые, например: гидрокарбонат натрия (NaHCO_3), карбонат кальция (CaCO_3), гидрид натрия (NaH) и т.д.

А есть такие вещества, которые в процессе нагревания переходят из твердого состояния сразу в газообразное (этот процесс называется сублимацией). Наиболее наглядный пример: сухой лёд (CO_2), но можно привести и множество других: йод I_2 , AlCl_3 , P_2O_4 , ZnS и др.

В таблице 5.1 приведены значения температур плавления для некоторых веществ.

Удельная теплота плавления

В процессе плавления тело поглощает тепло, которое называется *теплотой плавления*. Экспериментально установлено, что для плавления кристаллического вещества массой m , нагретого до температуры плавления, к нему необходимо подвести количество теплоты:

$$Q = \lambda m, \quad (5.1)$$

где греческой буквой λ (лámбда) обозначена удельная теплота плавления, зависящая от физических свойств данного вещества.

Единицы измерения удельной теплоты плавления $[\lambda] = \frac{[Q]}{[m]}$.

Дж/кг, кал/кг, кДж/кг, ккал/кг, кал/г. Нетрудно установить связь между ними:

$$1 \text{ кал/кг} = \frac{4,19 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 4,19 \text{ Дж/кг};$$

$$1 \text{ кДж/кг} = \frac{1000 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1000 \text{ Дж/кг},$$

$$1 \text{ ккал/кг} = \frac{4,19 \text{ кДж}}{1 \text{ кг}} = 4,19 \text{ кДж/кг};$$

$$1 \text{ ккал/кг} = \frac{1000 \text{ кал}}{1000 \text{ г}} = 1 \text{ кал/г}.$$

Т а б л и ц а 5.1

Температура плавления некоторых веществ

Вещество	Температура плавления, °С	Вещество	Температура плавления, °С
Гелий (He)	-271,4	Сурьма (Sb)	630,5
Водород (H ₂)	-259	Алюминий (Al)	658
Неон (Ne)	-248,6	Германий (Ge)	937
Кислород (O ₂)	-219	Серебро (Ag)	960
Азот (N ₂)	-210	Латунь	1000
Аргон (Ar)	-198,3	Золото (Au)	1063
Криптон (Kr)	-157,4	Медь (Cu)	1083
Эфир((C ₂ H ₅) ₂ O)	-123	Магний (Mg)	1107
Спирт этиловый (C ₂ H ₅ OH)	-114	Стронций (Sr)	1380
Ксенон (Xe)	-111,85	Сталь	1400
Радон (Rn)	-71,15	Кремний (Si)	1415
Ртуть (Hg)	-39	Никель (Ni)	1453
Лед, снег (H ₂ O)	0	Кобальт (Co)	1493
Бензол (C ₆ H ₆)	5,5	Железо (Fe)	1530
Цезий (Cs)	29	Радий (Ra)	1536
Галлий (Ga)	29,8	Палладий (Pd)	1554
Рубидий (Rb)	39	Барий (Ba)	1640
Калий (K)	63	Платина (Pt)	1772
Нафталин (C ₁₀ H ₈)	80	Родий (Rh)	1960
Натрий (Na)	98	Бор (B)	2075
Литий (Li)	179	Рутений (Ru)	2250
Олово (Sn)	232	Иридий (Ir)	2450
Висмут (Bi)	271,3	Бериллий (Be)	2470
Теллур (Tl)	304	Осмий (Os)	3030
Кадмий (Cd)	321	Вольфрам (W)	3387
Свинец (Pb)	327	Карбид гафния (HfC)	3890
Цинк (Zn)	419	Карбид тантала (TaC)	3985

Физический смысл удельной теплоты плавления. Для плавления $m = 1$ кг вещества, имеющего удельную теплоту плавления λ , согласно формуле (5.1) ему требуется сообщить количество теплоты $Q = \lambda \cdot 1$ кг. Следовательно, λ численно равно количеству теплоты, которое необходимо для плавления единицы массы данного вещества, нагретого до температуры плавления.

Например, если удельная теплота плавления алюминия $\lambda = 92$ ккал/кг, то это значит, что для плавления одного грамма алюминия, нагретого до температуры плавления, требуется количество теплоты $Q = 92$ ккал.

Значения удельной теплоты плавления для некоторых веществ приведены в таблице 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

Удельная теплота плавления некоторых веществ

Вещество	λ , ккал/кг, кал/г	λ , кДж/кг
Гелий (He)	0,418	1,75
Ртуть (Hg)	3,00	12,6
Свинец (Pb)	6,00	25,1
Олово (Sn)	14,0	58,7
Золото (Au)	16,0	67,0
Сталь	20,0	83,8
Чугун серый*	23,0	96,4
Серебро (Ag)	24,0	101
Цинк (Zn)	27,0	113
Платина (Pt)	27,0	113
Чугун белый*	33,0	138
Нафталин (C ₁₀ H ₈)	36,0	151
Медь (Cu)	42,0	176
Железо (Fe)	49,0	205
Лед (H ₂ O)	80,0	335
Алюминий (Al)	92,0	386
Литий (Li)	150	628
Сульфид меди (CuS)	790	$3,31 \cdot 10^3$

*Белый чугун – более хрупкий и твердый, поэтому практическое применение имеет в основном серый чугун.

Задача 5.1. Какое количество теплоты необходимо сообщить $m = 10,0$ кг льда при температуре $t = 0$ °С, чтобы он растаял?

$m = 10,0$ кг $Q = ?$	Решение. Значение удельной теплоты плавления льда берем из таблицы 5.2: $\lambda = 80,0$ ккал/кг.
--------------------------	--

Согласно формуле (5.1) $Q = \lambda m$.

Проверим размерность: $[Q] = [\lambda][m] = \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{ккал}$.

Подставим численные значения:

$$Q = \lambda m = 80,0 \text{ ккал/кг} \cdot 10,0 \text{ кг} = 800 \text{ ккал}.$$

Ответ: $Q = \lambda m = 800$ ккал.

Читатель: То, что при плавлении тела поглощается тепло – это понятно. А вот когда происходит обратный процесс – кристаллизация, тепло, что же, выделяется?

Автор: Конечно. И притом тепла выделяется ровно столько, сколько необходимо для плавления данного тела. Это, в частности, следует из нашего опыта с замерзанием воды. Когда вода замерзает на морозе, температура смеси льда и замерзающей воды все время равна 0 °С, что выше температуры окружающего воздуха. Значит, между смесью воды и льда и воздухом происходит теплообмен: от смеси с более высокой температурой тепло передаётся воздуху с более низкой температурой. Что же получается? Тепло от воды со льдом отводится, а температура не снижается! Это значит, что в процессе кристаллизации льда выделяется тепло, которое называется **теплотой кристаллизации**.

Читатель: Согласен. Но из нашего опыта не следует, что при кристаллизации выделяется РОВНО СТОЛЬКО ЖЕ ТЕПЛА, сколько необходимо для плавления.

Автор: А давайте ПРЕДПОЛОЖИМ, что существует такое вещество, при кристаллизации которого выделяется БОЛЬШЕ тепла, чем при плавлении такой же массы этого вещества. Найдя такое вещество, мы очень легко решим все энергетические проблемы человечества!

В самом деле, пусть некоторое количество нашего вещества кристаллизуется, и при этом выделится теплота кристаллизации $Q_{\text{кр}}$. Часть этой теплоты мы тут же потратим на плавление на-

шего вещества, а вот ОСТАТОК: $\Delta Q = Q_{\text{кр}} - Q_{\text{пл}}$ пустим на нужды народного хозяйства! Потом наше вещество опять кристаллизуется, опять выделится $Q_{\text{кр}}$ и т.д. Процесс, как говорится, пошел. Налицо очень несложный в эксплуатации ВЕЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ.

Читатель: Но ведь теплота кристаллизации может быть и МЕНЬШЕ теплоты плавления.

Автор: Тогда плохо наше дело. Ведь в каждом цикле «плавление–кристаллизация» будет безвозвратно исчезать энергия (которая, как известно, на самом деле сохраняется). В результате через некоторое (хорошо еще, если длительное) время все, что может замерзнуть – замерзнет, и делу конец!

Завершим наши рассуждения важным выводом: *при кристаллизации вещества массой m выделяется количество теплоты: $Q = \lambda m$, где λ – удельная теплота плавления данного вещества.*

Задача 5.2. Какое количество теплоты выделится при кристаллизации 100 г алюминия?

$m = 100 \text{ г} = 0,100 \text{ кг}$	Решение. Для алюминия значение λ
$Q = ?$	берем из таблицы 5.2: $\lambda = 386 \text{ кДж/кг}$.

По формуле (5.1) $Q = \lambda m$.

Проверим размерность: $[Q] = [\lambda][m] = \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{кДж}$.

Подставим численные значения:

$$Q = \lambda m = 386 \text{ кДж/кг} \cdot 0,100 \text{ кг} = 38,6 \text{ кДж}.$$

Ответ: $Q = \lambda m = 38,6 \text{ кДж}$.

Как объяснить плавление и кристаллизацию с молекулярной точки зрения?

Сначала вспомним основные особенности молекулярного строения газов, жидкостей и твёрдых тел.

1. В *газах* среднее расстояние между молекулами значительно (раз в 10 при нормальных условиях¹) больше размера молекул. При

¹ Нормальными условиями в физике называется давление 760 мм рт. ст. и температура 0 °С.

таких расстояниях силами молекулярного взаимодействия можно пренебречь, кроме моментов, когда молекулы сталкиваются. Молекулы в газах движутся практически независимо друг от друга. Поэтому-то газы не имеют собственной формы и постоянного объёма. Нельзя наполнить газом, например, половину бутылки, так как двигаясь во всех направлениях и почти не притягиваясь друг к другу, молекулы быстро заполняют весь сосуд.

2. Частицы (молекулы или атомы) **твёрдых кристаллических веществ** расположены в определённом порядке. Эти частицы находятся в непрерывном *колебательном движении* около определённых точек, которые называются *узлами кристаллической решетки*. Свободно перемещаться с места на место частицы не могут, поэтому твёрдое тело сохраняет свою форму и свой объём.

На рис. 5.6 показана внутренняя структура некоторых кристаллических веществ:

а) кристаллическая решетка льда. Молекулы располагаются в вершинах правильных шестиугольников;

б) элементарная ячейка поваренной соли (NaCl) представляет собой кубик, в вершинах которого и центрах его граней расположены атомы Na, а на середине ребер и в центрах ячеек расположены атомы Cl;

в) решетка графита, для которой характерна ярко выраженная слоистая структура. Связи между атомами разных слоев существенно слабее, чем в пределах, одного и того же слоя. Графит, как и алмаз, состоит только из атомов углерода C;

г) решетка алмаза. Каждый атом углерода является центром тетраэдра, в вершинах которого находятся четыре ближайших соседа данного атома.

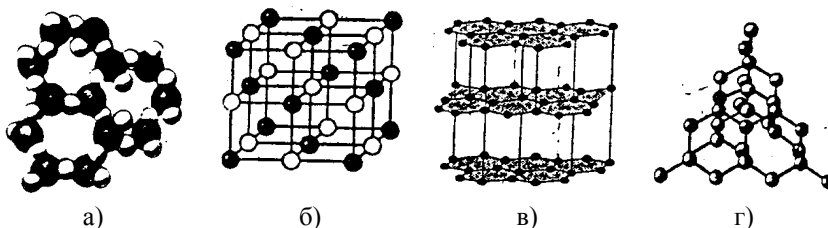


Рис. 5.6

3. **Жидкости** по своему строению занимают промежуточное положение между газами и твёрдыми телами. Молекулы в жидкостях расположены вплотную друг к другу (рис. 5.7), но уже без особого порядка (как муравьи, целиком заполнившие спичечную коробку).



Рис. 5.7

Если в газах «образ жизни» молекул можно назвать «кочевым», а в твёрдых «оседлым», то в жидкостях они ведут «оседло-кочевой» образ жизни. Это значит, что, совершив ряд колебаний возле одной какой-нибудь точки, молекула внезапно перескакивает в новое место и т.д. (Длительность «оседлого» состояния составляет в среднем одну стомиллиардную долю секунды.) Поэтому жидкость сохраняет свой объём, но не имеет определённой формы.

Заметим, что **аморфные вещества** по своему строению похожи на жидкости, с той лишь разницей, что время «оседлого» образа «жизни» молекул у них значительно больше, чем у жидкостей.

Читатель: Мне вот что непонятно. Допустим, мы расплавили графит – получили жидкий графит. Потом мы расплавили алмаз – получили жидкий алмаз. Но ведь при плавлении все молекулы перемешаются, и никакого порядка среди них не будет. А молекулы (точнее – атомы), из которых состоят и графит, и алмаз – одни и те же: С. Чем же тогда жидкий графит будет отличаться от жидкого алмаза?

Автор: Абсолютно ничем. Будет просто жидкий углерод. Алмаз и графит являются разными веществами исключительно в твердом состоянии благодаря различию в кристаллической решетки. В жидком состоянии между ними никакой разницы нет. Другое дело, что расплавить как графит, так и алмаз – очень непростая техническая задача, так как вещества эти очень тугоплавкие и к тому же при нагревании могут вступить в реакцию с кислородом, то есть попросту сгореть.

Что же происходит при плавлении?

При нагревании твёрдого тела кинетическая энергия его молекул, а значит, и их скорость увеличиваются. Соответственно, рас-

тёт и размах колебаний молекул относительно узлов кристаллической решетки. Наконец, при определённой для данного вещества температуре размах колебаний становится настолько большим, что сил молекулярного притяжения становится недостаточно, чтобы удержать молекулы в узлах кристаллической решетки. Начинается массовое «бегство» молекул из узлов кристаллической решетки на «свободу», кристаллическая структура разрушается, и вещество переходит в жидкое состояние.

Читатель: Но если температура вещества при этом не изменяется, значит, не изменяется и внутренняя энергия?

Автор: Нет! Внутренняя энергия тела при плавлении увеличивается как раз на величину теплоты плавления. Другое дело, что увеличивается *не кинетическая*, а *потенциальная* энергия молекул.

Читатель: Честно говоря, это не очень понятно.

Автор: Допустим, мы решили забросить на крышу кирпич. При броске мы сообщаем ему скорость, а значит, и кинетическую энергию. Для этого, правда, придётся потратить немного своей собственной, биологической энергии, полученной нами при «сгорании» в организме съеденной за завтраком манной каши. В процессе полёта сила тяжести будет уменьшать скорость кирпича, а значит, будет уменьшаться и его кинетическая энергия, но потенциальная энергия будет при этом расти (рис. 5.8,*а*). Если кто-нибудь теперь «вернёт» нам кирпич с крыши обратно, его кинетическая энергия у поверхности земли будет такой же, как в момент броска (если пренебречь потерями энергии, связанными с трением кирпича о воздух) (рис. 5.8,*б*).

Точно также и молекула, вырываясь из узла кристаллической решетки, преодолевает силы притяжения своих «соседей» и теряет при этом

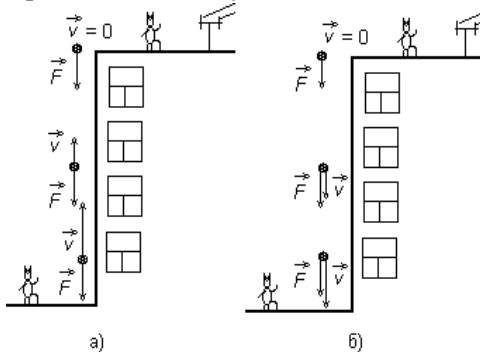


Рис. 5.8

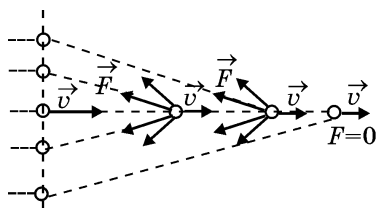


Рис. 5.9

кинетическую энергию, но приобретает потенциальную (рис. 5.9). Поскольку молекулы вырываются на «свободу» «обессиленными» (как кирпичи, заброшенные на крышу), то необходимо постоянно подводить тепло, чтобы средняя

кинетическая энергия молекул «на воле» была такой же, как у молекул, ещё находящихся в решетке.

Читатель: А если тепло НЕ ПОДВОДИТЬ, температура, что же уменьшится?

Автор: Нет, просто процесс плавления остановится. Например, если воду со льдом поместить в холодильник, в котором поддерживается температура $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то ни вода не замерзнет, ни лёд не растает.

Читатель: Почему?

Автор: Дело в том, что некоторые молекулы будут по-прежнему «вырываться на свободу», но ровно столько же «обессиленных», то есть медленных молекул будут возвращаться обратно в кристаллическую решетку. В таких случаях говорят, что установилось *термодинамическое равновесие*.

Читатель: А почему, подводя тепло, нельзя повысить температуру вещества, если идёт процесс плавления?

Автор: Потому что избыток тепла тут же «разбирают» только что «освободившиеся» молекулы – им ведь надо восполнить потраченную при «побеге» кинетическую энергию. Поэтому пока вся решетка не будет разрушена, температура не повысится.

Что же происходит при кристаллизации?

Читатель: Если я правильно понял, то при обратном процессе кристаллизации молекула, вернувшись в кристаллическую решетку, «обменяет» свою потенциальную энергию на кинетическую, как кирпич, «вернувшийся» с крыши.

Автор: Совершенно верно. И эта кинетическая энергия, полученная в «обмен» на «сданную» потенциальную, *добавится* к той

кинетической энергии, которую молекула имела «на свободе». Ясно, что по этой причине молекулы возвращаются в решетку достаточно «разгоряченными», и если их маленько не остудить, то они, того гляди, опять вырвутся «на волю». Поэтому-то, чтобы процесс кристаллизации не остановился, от «замерзающего» тела надо всё время отводить тепло – теплоту кристаллизации.

Итак, *при плавлении* твёрдого кристаллического тела массой m его *внутренняя энергия увеличивается* на величину *подводимой* к нему *теплоты плавления* $Q_{\text{пл}} = \lambda m$, а *при кристаллизации* *внутренняя энергия тела уменьшается* на величину *отводимой* от тела *теплоты кристаллизации*, равной по величине теплоте плавления: $Q_{\text{кр}} = \lambda m$.

Переохлажденная жидкость

Иногда удаётся охладить жидкость на несколько градусов НИЖЕ температуры плавления без того, чтобы она затвердела. Очень подходящим веществом для наблюдения этого явления является гипосульфит ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Гипосульфит плавится при 48°C . Между тем легко удаётся охладить чистый гипосульфит, расплавленный в пробирке, до комнатной температуры, и он остаётся жидким. Стоит, однако, бросить в него кристаллик гипосульфита, или резко встряхнуть пробирку, чтобы часть гипосульфита очень быстро перешла в твёрдое состояние, и получилась смесь жидкого и кристаллического гипосульфита. Причём температура такой смеси равняется температуре плавления гипосульфита, то есть 48°C .

Почему же кристаллизовалась только часть гипосульфита? Да потому, что за счёт выделившейся теплоты кристаллизации температура смеси быстро повысилась до температуры плавления, а при этой температуре кристаллизация без постоянного отвода тепла идти не может.

В каких же случаях жидкости начинают кристаллизоваться тотчас же? Как будет достигнуто охлаждение до температуры плавления, и в каких случаях возможно переохлаждение? Для начала кристаллизации необходимы так называемые «центры кристаллизации». Центрами кристаллизации могут служить мелкие,

иногда невидимые даже в микроскоп кристаллики (затравки) или посторонние пылинки, находящиеся в жидкости. Около центров кристаллизации и начинают группироваться молекулы, постепенно образующие кристалл. Если же центров кристаллизации нет, то может произойти переохлаждение жидкости на несколько градусов.

Заметим, что чистая, без каких-либо примесей вода часто переохлаждается в природе: капельки тумана могут не замёрзнуть даже при морозах, достигающих $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Примеры решения задач

Задача 5.3. Какое количество теплоты необходимо сообщить куску льда массой $m = 2,0\text{ кг}$, находящемуся при температуре $t_1 = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы получить из него воду при температуре $t_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$?

$$\begin{aligned} m &= 2,0\text{ кг} \\ t_1 &= -50\text{ }^{\circ}\text{C} \\ t_2 &= 0\text{ }^{\circ}\text{C} \\ Q &= ? \end{aligned}$$

Решение. Чтобы нагреть лёд от температуры t_1 до температуры t_2 , необходимо сообщить ему количество теплоты $Q_1 = c_{\text{л}}m(t_2 - t_1)$, где (по табл. 3.1)
 $c_{\text{л}} = 0,500 \cdot 10^3\text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) =$
 $= 0,500\text{ ккал/}(\text{кг} \cdot \text{град}).$

Для того чтобы растопить лёд, находящийся при температуре плавления, необходимо сообщить ему количество теплоты $Q_2 = \lambda m$, где $\lambda = 80,0\text{ ккал/кг}$ (по табл. 5.2).

Таким образом, всего льду нужно передать количество теплоты: $Q = Q_1 + Q_2 = c_{\text{л}}m(t_2 - t_1) + \lambda m$.

Проверим размерность:

$$\begin{aligned} [Q] &= [c_{\text{л}}][m][t] + [\lambda][m] = \\ &= \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} + \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{ккал} + \text{ккал} = \text{ккал}. \end{aligned}$$

Подставляя численные значения, получим:

$$\begin{aligned} Q &= 0,500\text{ ккал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 2,0\text{ кг} \cdot (0 - (-50))^{\circ}\text{C} + \\ &+ 80,0\text{ ккал/кг} \cdot 2,0\text{ кг} = 210\text{ ккал} \approx 2,1 \cdot 10^2\text{ ккал}. \end{aligned}$$

Ответ: $Q = c_{\text{л}}m(t_2 - t_1) + \lambda m \approx 2,1 \cdot 10^2\text{ ккал}.$

Задача 5.4. Какое количество теплоты надо подвести к куску свинца массой $m = 2,0$ кг, находящемуся при температуре $t_1 = 27$ °С, чтобы нагреть его до температуры $t_2 = 427$ °С? Удельная теплоёмкость расплавленного свинца $c_{\text{ж}} = 0,040$ ккал/(кг·град).

$$\begin{aligned} m &= 2,0 \text{ кг} \\ t_1 &= 27 \text{ °С} \\ t_2 &= 427 \text{ °С} \\ c_{\text{ж}} &= 0,040 \\ \text{ккал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \\ Q &= ? \end{aligned}$$

Решение. По таблице 5.1 температура плавления свинца $t_{\text{пл}} = 327$ °С. Значит, до температуры $t_2 = 427$ °С можно нагреть только расплавленный свинец. Твёрдый свинец можно нагреть только до температуры плавления. Для этого потребуется количество теплоты:

$$Q_1 = c_{\text{ТВ}} m (t_{\text{пл}} - t_1),$$

где $c_{\text{ТВ}} = 0,0310$ ккал/(кг·град) – удельная теплоёмкость ТВЁРДОГО свинца (по табл. 3.1).

На плавление свинца, нагретого до температуры плавления, требуется количество теплоты: $Q_2 = \lambda m$, где $\lambda = 6,00$ ккал/кг (по табл. 5.2)

А на нагрев жидкого свинца от температуры плавления до температуры t_2 потребуется количество теплоты:

$$Q_3 = c_{\text{ж}} m (t_2 - t_{\text{пл}}).$$

Общее количество теплоты, которое надо сообщить свинцу, равно:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = c_{\text{ТВ}} m (t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda m + c_{\text{ж}} m (t_2 - t_{\text{пл}}).$$

Проверим размерность:

$$\begin{aligned} [Q] &= [c_{\text{ТВ}}][m][t] + [\lambda][m] + [c_{\text{ж}}][m][t] = \\ &= \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} + \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} + \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} = \text{ккал}. \end{aligned}$$

Подставляя численные значения, получим:

$$\begin{aligned} Q &= 0,0310 \text{ ккал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 2,0 \text{ кг} \cdot (327 - 27) \text{ °С} + \\ &+ 6,00 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot 2,0 \text{ кг} + 0,040 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 2,0 \text{ кг} \cdot (427 - 327) \text{ °С} = \\ &= 38,6 \text{ ккал} \approx 39 \text{ ккал}. \end{aligned}$$

Ответ: $Q = c_{\text{ТВ}} m (t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda m + c_{\text{ж}} m (t_2 - t_{\text{пл}}) \approx 39$ ккал.

Задача 5.5. В сосуд с мокрым снегом долили $m = 1,0$ кг горячей воды при температуре $t_1 = 40$ °С. В результате весь снег растаял, и в сосуде оказалось $M = 2,0$ кг воды при температуре $\theta = 0$ °С. Сколько снега и сколько воды было в сосуде вначале? Теплоёмкостью сосуда пренебречь.

$$m = 1,0 \text{ кг}$$

$$t_1 = 40 \text{ °С}$$

$$M = 2,0 \text{ кг}$$

$$\theta = 0 \text{ °С}$$

$$m_c = ? \quad m_b = ?$$

Решение. Сначала отметим, что мокрый снег – это снег, который уже начал таять, но ещё не растаял, поэтому он может иметь температуру только 0 °С. Пусть m_c и m_b – массы снега и воды в сосуде вначале. Тогда очевидно, что

$$m_c + m_b = M - m. \quad (1)$$

Запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}, \quad Q_{\text{отд}} = m_c(t_1 - \theta), \quad Q_{\text{пол}} = m_c\lambda,$$

отсюда $m_c\lambda = m_c(t_1 - \theta)$.

Решив последнее уравнение относительно неизвестной m_c , получим

$$m_c = \frac{m_c(t_1 - \theta)}{\lambda}.$$

Проверим размерность:

$$\begin{aligned} [m_c] &= \frac{[m][c_b]([t])}{[\lambda]} = \frac{\cancel{\text{кг}} \cdot \frac{\text{ккал}}{\cancel{\text{кг}} \cdot \cancel{\text{град}}} \cdot \cancel{\text{град}}}{\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}} = \\ &= \text{ккал} : \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = \frac{\text{ккал}}{1} : \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = \frac{\cancel{\text{ккал}} \cdot \text{кг}}{\cancel{\text{ккал}}} = \text{кг}. \end{aligned}$$

Подставим численные значения:

$$\begin{aligned} m_c &= \frac{m_c(t_1 - \theta)}{\lambda} = \\ &= \frac{1,0 \text{ кг} \cdot 1,000 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot (40 - 0) \text{ °С}}{80,0 \text{ ккал}/\text{кг}} = 0,50 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Теперь из уравнения (1) легко находим m_b :

$$m_b = (M - m) - m_c = (2,0 \text{ кг} - 1,0 \text{ кг}) - 0,50 \text{ кг} = 0,50 \text{ кг}.$$

$$\text{Ответ: } m_c = \frac{m_c(t_1 - \theta)}{\lambda} = 0,50 \text{ кг}, \quad m_b = (M - m) - m_c = 0,50 \text{ кг}.$$

Задача 5.6. В калориметре, теплоёмкостью которого можно пренебречь, находится кусок льда массой $m_1 = 1,00$ кг при температуре $t_1 = -10$ °С. Сколько воды и (или) льда будет в сосуде и какой будет установившаяся температура, если в сосуд долить при температуре $t_2 = 100$ °С: а) 2,00 кг воды, б) 10 г воды, в) 200 г воды, г) 40 г воды?

$m_1 = 1,00$ кг
 $t_1 = -10$ °С
 $t_2 = 100$ °С
 а) $m_2 = 2,00$ кг
 б) $m_2 = 10$ г =
 =0,010 кг
 в) $m_2 = 200$ г =
 =0,200 кг
 г) $m_2 = 40$ г =
 =0,040 кг

Решение.

Читатель: По-моему, чисто интуитивно ясно, что в случае а) весь лёд растает, а в случае б) вся вода замерзнет.

Автор: Пожалуй, Вы правы, хотя интуиция может и подвести.

Читатель: Запишем уравнение теплового баланса: $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}$ для случая а):

$$Q_{\text{отд}} = c_{\text{в}} m_2 (t_2 - \theta),$$

где θ – установившаяся температура.

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{л}} m_1 (0 - t_1) + \lambda m_1 + c_{\text{в}} m_1 (\theta - 0);$$

$$c_{\text{в}} m_2 (t_2 - \theta) = c_{\text{л}} m_1 (0 - t_1) + \lambda m_1 + c_{\text{в}} m_1 (\theta - 0).$$

Решив это уравнение относительно θ , получим:

$$\theta = \frac{c_{\text{л}} m_2 t_2 + c_{\text{л}} m_1 t_1 - \lambda m_1}{c_{\text{в}} m_2 + c_{\text{в}} m_1}.$$

Подстановку численных значений и проверку размерности я (для краткости) проведу одновременно:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 2,00 \text{ кг} \cdot 100^\circ \text{С} + 0,500 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,00 \text{ кг} \cdot (-10^\circ \text{С}) - 80,0 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot 1,00 \text{ кг}}{1,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 2,00 \text{ кг} + 1,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,00 \text{ кг}} = \\ &= 38,33^\circ \text{С} \approx 38,3^\circ \text{С}. \end{aligned}$$

Автор: Интуиция не подвела Вас. Раз Вы, предположив, что весь лед растает, в ходе вычислений получили положительную установившуюся температуру θ , значит, действительно в случае а) весь лёд растает. Следовательно, масса льда равна нулю: $m_{\text{л}} = 0$, а масса воды $m_{\text{в}} = m_1 + m_2 = 1,00$ кг + 2,00 кг = 3,00 кг. Но замечу, что если бы значение θ получилось отрицательным, это означало бы, что Ваше предположение о том, что весь лёд рас-

тает, ошибочно, и уравнение теплового баланса будет иметь другой вид. Теперь попробуйте решить пункт б).

Читатель: В случае б) мы налили очень мало воды. Сначала она охладится до температуры плавления льда $t_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}$ и отдаст при этом количество теплоты $Q_1 = c_в m_2 (t_2 - 0)$. Потом вода замерзнет и отдаст при этом льду всю теплоту кристаллизации $Q_2 = \lambda m_2$. И, наконец, получившийся из воды лёд охладится до конечной температуры θ и отдаст при этом количество теплоты $Q_3 = = c_л m_2 (0 - \theta)$. Итак, общее количество отданной теплоты

$$\begin{aligned} Q_{\text{отд}} &= c_в m_2 (t_2 - 0) + \lambda m_2 + c_л m_2 (0 - \theta) = \\ &= c_в m_2 t_2 + \lambda m_2 - c_л m_2 \theta. \end{aligned}$$

Количество полученной льдом теплоты

$$Q_{\text{пол}} = c_л m_1 (\theta - t_1).$$

Запишем уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} Q_{\text{отд}} &= Q_{\text{пол}}; \\ c_в m_2 t_2 + \lambda m_2 - c_л m_2 \theta &= c_л m_1 (\theta - t_1). \end{aligned}$$

Отсюда

$$\theta = \frac{c_в m_2 t_2 + \lambda m_2 + c_л m_1 t_1}{c_л (m_1 + m_2)}.$$

Подставляя численные значения и одновременно проверяя разность, получим:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 0,010 \text{ кг} \cdot 100^\circ\text{C} + 80,0 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \cdot 0,010 \text{ кг} + 0,500 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,00 \text{ кг} \cdot (-10^\circ\text{C})}{0,500 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (1,00 \text{ кг} + 0,010 \text{ кг})} = \\ &= -6,3366^\circ\text{C} \approx \underline{-6,3^\circ\text{C}}. \end{aligned}$$

Так как $-6,3^\circ\text{C} < 0^\circ\text{C}$, то действительно вся вода замерзнет и в сосуде будет только лёд при температуре $\theta = -6,3^\circ\text{C}$. Масса воды равна $m_в = 0$. Масса льда равна

$$m_л = m_1 + m_2 = 1 \text{ кг} + 0,01 \text{ кг} = \underline{1,01 \text{ кг}}.$$

Автор: Верно. Теперь случай в).

Читатель: Здесь трудно сказать, какой будет состав смеси после того, как наступит тепловое равновесие...

Автор: Давайте не будем гадать, а попробуем ВЫЧИСЛИТЬ, что же будет в сосуде при установившейся температуре. Для этого давайте выясним, хватит ли у воды тепла, чтобы, самой охладившись до нуля, нагреть весь лёд до температуры плавления, то есть тоже до нуля градусов?

Читатель: Вода, охладившись до 0°C , отдаст тепло:

$$Q_{\text{отд}} = c_{\text{в}} m_2 (t_2 - 0) = \\ = 1,000 \text{ ккал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,2 \text{ кг} \cdot 100^\circ\text{C} = 20,0 \text{ ккал.}$$

А льду для того, чтобы нагреться до 0°C , надо получить количество теплоты

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{л}} m_1 (0 - t_1) = \\ = 0,5 \text{ ккал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 1 \text{ кг} \cdot (0 - (-10)^\circ\text{C}) = 5 \text{ ккал.}$$

Ясно, что для нагревания льда до 0°C тепла у воды хватит и ещё останется.

Автор: На что же пойдёт оставшееся тепло?

Читатель: На то, чтобы растопить лёд. Если не весь, то хотя бы какую-то его часть.

Автор: А хватит ли у воды тепла, чтобы растопить весь лёд?

Читатель: Сейчас проверим. На «растопку» льда нужно:

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m_1 = 80 \text{ ккал/кг} \cdot 1 \text{ кг} = 80 \text{ ккал.}$$

А у воды всего 20 ккал, причем 5 из них уйдут на нагрев льда до 0°C . Значит, вода сможет растопить только часть льда!

Автор: Вот мы с Вами и выяснили состав смеси: весь лёд нагреется до 0°C и некоторая его часть растает. А вся вода охладится до 0°C . Кстати, считайте, что установившуюся температуру мы уже нашли: $\theta = 0^\circ\text{C}$. Теперь остаётся найти массу воды и массу льда. Давайте обозначим через x массу растаявшего льда и запишем уравнение теплового баланса.

Читатель: $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}$, где $Q_{\text{отд}} = m_2 c_{\text{в}} (t_1 - 0)$, $Q_{\text{пол}} = c_{\text{л}} m_1 (0 - t_1) + \lambda x$, тогда $m_2 c_{\text{в}} (t_1 - 0) = c_{\text{л}} m_1 (0 - t_1) + \lambda x$, отсюда

$$x = \frac{c_{\text{в}} m_2 t_2 + c_{\text{л}} m_1 t_1}{\lambda} = \\ = \frac{1,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 0,200 \text{ кг} \cdot 100^\circ\text{C} + 0,500 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,00 \text{ кг} \cdot (-10^\circ\text{C})}{80,0 \text{ ккал/кг}} =$$

$$= 0,1875 \text{ кг} \approx \underline{0,19 \text{ кг}}.$$

Масса льда в сосуде будет равна:

$$m_{\text{л}} = m_1 - x = 1,00 \text{ кг} - 0,19 \text{ кг} = 0,81 \text{ кг},$$

а масса воды:

$$m_{\text{в}} = m_2 + x = 0,200 \text{ кг} + 0,19 \text{ кг} = \underline{0,39 \text{ кг}}.$$

Автор: Всё верно. Попробуйте теперь решить пункт г) самостоятельно.

Читатель: Сначала выясним, хватит ли у воды ($m_2 = 40 \text{ г}$) тепла, чтобы нагреть до 0°C весь лёд, самой при этом охладившись до 0°C :

$$\begin{aligned} Q_{\text{отд}} &= c_{\text{в}} m_2 (t_2 - 0) = \\ &= 1,000 \text{ ккал/}(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,040 \text{ кг} \cdot 100^\circ\text{C} = 4,0 \text{ ккал}. \end{aligned}$$

А для нагрева льда до 0°C нужно, как мы уже выяснили в пункте в), 5 ккал. Значит, после того, как вся вода охладится до 0°C , лёд немного нагреется, но его температура будет ещё ниже нуля. Дальше вода будет, видимо, замерзать и НАГРЕВАТЬ ЛЁД своей теплотой кристаллизации. Выясним, хватит ли у воды тепла, чтобы, полностью замёрзнув, нагреть лёд до 0°C :

$$Q_{\text{кр}} = \lambda m_2 = 80 \text{ ккал/кг} \cdot 0,040 \text{ кг} = 3,2 \text{ ккал}.$$

Да ещё 4,0 ккал мы имеем от охлаждения воды. Всего получается $4,0 + 3,2 = 7,2 \text{ ккал}$. А для того чтобы весь лёд нагреть до 0°C , надо только 5 ккал. Значит, чтобы нагреть весь лёд до 0°C , достаточно замёрзнуть лишь части воды. Ясно, что поскольку у нас в конечном счете получится смесь льда и воды, то температура этой смеси будет $\theta = 0^\circ\text{C}$.

Обозначим через x массу замерзшей воды и запишем уравнение теплового баланса: $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}$, тогда

$$Q_{\text{отд}} = c_{\text{в}} m_2 (t_2 - 0^\circ) + \lambda x = c_{\text{в}} m_2 t_2 + \lambda x,$$

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{л}} m_1 (0^\circ - t_1) = -c_{\text{л}} m_1 t_1,$$

$$c_{\text{в}} m_2 t_2 + \lambda x = -c_{\text{л}} m_1 t_1,$$

$$x = \frac{-c_{\text{л}} m_1 t_1 - c_{\text{в}} m_2 t_2}{\lambda}.$$

$$x = \frac{-0,500 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,00 \text{ кг} \cdot (-10^\circ\text{C}) - 1,000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 0,040 \text{ кг} \cdot 100^\circ\text{C}}{80 \text{ ккал/кг}} =$$

$$= 0,0125 \text{ кг} \approx 0,013 \text{ кг} = \underline{13 \text{ г}}.$$

Следовательно, масса льда в сосуде равна:

$$m_{\text{л}} = x + m_1 \approx 1,00 \text{ кг} + 0,013 \text{ кг} = 1,013 \text{ кг} \approx 1,01 \text{ кг}.$$

Масса воды равна: $m_{\text{в}} = m_2 - x \approx 40 \text{ г} - 13 \text{ г} = \underline{27 \text{ г}}.$

Автор: Всё верно. Запишем окончательный ответ.

Ответ: а) $\theta \approx 38,3^\circ\text{C}$, $m_{\text{л}} = 0$, $m_{\text{в}} = 3 \text{ кг}$;

б) $\theta \approx -6,3^\circ\text{C}$, $m_{\text{л}} \approx 1,01 \text{ кг}$, $m_{\text{в}} = 0$;

в) $\theta = 0^\circ\text{C}$, $m_{\text{л}} \approx 0,81 \text{ кг}$, $m_{\text{в}} \approx 0,39 \text{ кг}$;

г) $\theta = 0^\circ\text{C}$, $m_{\text{л}} \approx 1,01 \text{ кг}$, $m_{\text{в}} \approx 27 \text{ г}$.

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень лёгкие

- A1.** Можно ли расплавить серебро в алюминиевом тигле?
- A2.** В каком агрегатном состоянии находятся при температуре 1000°C следующие вещества: алюминий, вольфрам, железо, золото, свинец, серебро? Обоснуйте ответ.
- A3.** Одну свинцовую проволочку поместили в расплавленное олово, а другую – в расплавленный цинк. В каком состоянии они будут находиться через некоторое время? Почему?
- A4.** Почему на Крайнем Севере для измерения температуры используют спиртовые термометры, а не ртутные?
- A5.** На рис. 5.10 приведены графики зависимости температуры от количества теплоты, полученной от нагревателя, для нафталина и смолы. Известно, что точка *A* графиков соответствует состоянию, когда вещества полностью расплавились. Как можно объяснить различный ход графиков? Какой из них соответствует нафталину, а какой – смоле?

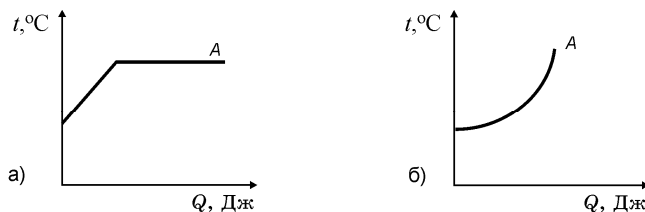


Рис. 5.10

- А6.** Почему лёд не сразу начинает таять, если его внести с мороза в натопленную комнату?
- А7.** Ученик на вопрос учителя, что означает, что удельная теплота плавления свинца равна 25 кДж/кг , ответил: «Это значит, что для плавления свинца ему надо передать 25 кДж теплоты». Правильен ли ответ?
- А8.** Возможно ли такое физическое явление: тело отдаёт некоторое количество теплоты окружающим телам, но при этом не охлаждается?
- А9.** Какое количество теплоты потребуется для плавления 100 г олова, взятого при температуре его плавления?
- А10.** Какое количество теплоты необходимо для плавления $0,50 \text{ кг}$ свинца, взятого при температуре 27°C ?
- А11.** Какое количество теплоты необходимо для плавления 4000 кг железа? Начальную температуру железа принять равной 30°C ?
- А12.** Какое количество теплоты взял из окружающей среды кусок льда массой 270 г при плавлении, если начальная температура его была равна -5°C ?
- А13.** Сколько килокалорий потребуется для обращения в воду $2,0 \text{ кг}$ льда, взятого при 0°C , и нагревании образовавшейся воды до 30°C ?

Задачи лёгкие

- Б1.** Можно ли расплавленным металлом заморозить воду?
- Б2.** Какие вещества можно расплавить в кипящей воде? (При атмосферном давлении).
- Б3.** Почему в смотровые окошечки больших заводских печей, служащих для плавления стали и других металлов, вмонтированы не обычные стекла, а специальные – из кварцевого стекла?
- Б4.** На рис. 5.11 показано, как со временем изменяется температура при нагревании и охлаждении свинца.

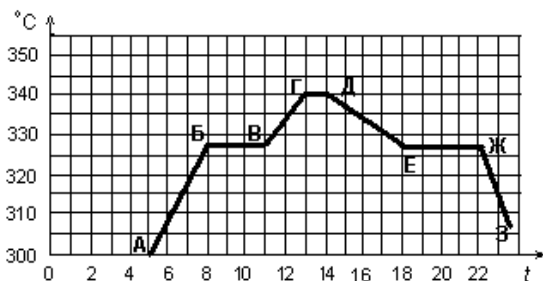


Рис. 5.11

1. Твёрдому или жидкому состоянию соответствуют участки графика АБ, БВ, ВГ, ЖЗ?
2. Что может быть причиной того, что участок ЖЗ круто идёт вниз?
3. Чему равны точки плавления и отвердевания свинца?

- Б5.** В сосуде был лёд при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем сосуд поставили на горелку, которая даёт в равные промежутки времени одинаковые количества теплоты. Укажите, какой из графиков изменения температуры со временем, построенный для этого случая (рис. 5.12), верный и в чем ошибочны остальные графики.

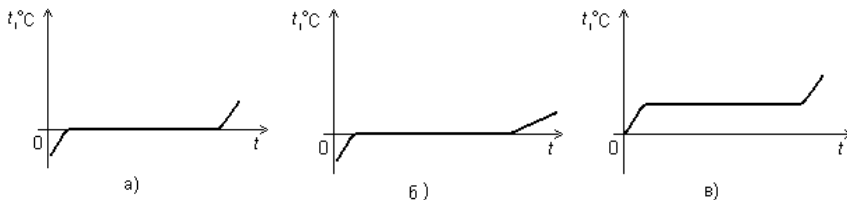


Рис. 5.12

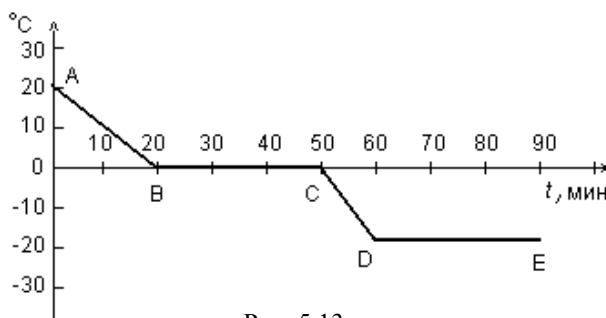


Рис. 5.13

- Б6.** Внимательно рассмотрев график охлаждения и отвердевания вещества (рис. 5.13), дайте ответы на вопросы: а) Для какого вещества составлен график? б) Сколько времени охлаждалось вещество от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры затвердевания? в) Сколько времени длился процесс затвердевания? г) О чем говорит участок графика DE? д) Как приблизительно расположились бы точки A, B, C относительно друг друга и точки 0, если бы при той же температуре окружающей среды был бы составлен график для того же вещества, но в большем количестве?
- Б7.** Лёд внесли с улицы в подвал, температура воздуха в котором $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Будет ли лёд таять в подвале?
- Б8.** Два одинаковых сосуда из полиэтилена заполнили водой при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Один сосуд поместили в воду при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, другой – в измельченный лёд при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Замерзнет ли вода в каком-нибудь из этих сосудов?
- Б9.** Какое тело обладает большей внутренней энергией: кусок льда при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ или полученная из этого куска вода при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- Б10.** Почему весной во время ледохода вблизи рек становится холоднее?

- Б11.** Что происходило бы весной, если бы удельная теплота плавления льда была так же мала, как у ртути?
- Б12.** При плавлении нафталина потребовалось количество теплоты $Q = 360$ кал. Какова масса нафталина?
- Б13.** Для плавления металла массой $m = 10$ кг потребовалось количество теплоты $Q = 270$ ккал. Какова удельная теплота плавления этого металла?
- Б14.** При кристаллизации золота выделилось количество теплоты $Q = 320$ кал. Какова масса золота?
- Б15.** При кристаллизации металла массой $m = 20$ г выделилось количество теплоты $Q = 660$ кал. Какова удельная теплота плавления металла?
- Б16.** Куски алюминия и меди массой по 1,0 кг нагреты до температуры их плавления. Плавление которого из них потребует большего количества теплоты? На сколько?
- Б17.** Медный, железный и свинцовый шарики одинаковой массы были опущены в кипяток, а затем вынуты и положены на куски воска. Под каким из шариков расплавится больше воска?
- Б18.** Кусочки льда и свинца массой по 1 г нагреты до температуры их плавления. На плавление какого из этих тел потребует большее количество теплоты? Во сколько раз?
- Б19.** Во сколько раз больше калорий идёт на плавление 1 г льда, чем на нагревание его на 1°C ?
- Б20.** Коленчатый вал из стали, масса которого 50,0 кг, после отливки остыл до 0°C . Какое количество теплоты от начала затвердевания стали отдал он окружающим телам?
- Б21.** Охотник заполнил свинцом консервную банку с отверстиями в дне, пробитыми гвоздем, и поместил её над ведром, в котором поджёт нефть. Какое количество теплоты отдаёт 1,5 кг дрови, полученной таким образом, затвердевая и охлаждаясь на дне ведра до 27°C ?
- Б22.** Какое количество теплоты выделилось при затвердевании и охлаждении до 25°C махового колеса массой 80,0 кг, отлитого из белого чугуна? Удельную теплоёмкость принять равной удельной теплоёмкости железа. Температура плавления чугуна 1165°C .
- Б23.** При затвердевании и охлаждении кусочка серебра, взятого при температуре плавления, выделилось количество теплоты $Q = 780$ кал. Какова масса кусочка серебра, если конечная температура 60°C ?
- Б24.** Для плавления куска цинка, взятого при начальной температуре $t_1 = 19^\circ\text{C}$, потребовалось количество теплоты $Q = 94,5$ ккал. Какова масса цинка?

- Б25.** Для плавления куска цинка массой $m = 0,50$ кг потребовалось количество теплоты $Q = 31,5$ ккал. Какова удельная теплота плавления цинка, если его начальная температура $t_n = 19$ °С?
- Б26.** Для плавления куска олова массой $m = 0,20$ кг потребовалось количество теплоты $Q = 5,2$ ккал. Какова была начальная температура куска олова?

Задачи средней трудности

- В1.** По графику зависимости температуры свинца от количества теплоты, полученного от нагревателя, изображенному на рис. 5.14, ответьте на следующие вопросы.

1. Какому процессу соответствует участок I графика?
2. Какому процессу соответствует участок II графика?
3. Какова начальная температура свинца?
4. Какова температура плавления свинца?
5. Какова температура свинца в конце процесса плавления?
6. Какое количество теплоты пошло на нагревание свинца?
7. Какова масса свинца?
8. Какое количество теплоты было израсходовано на процесс плавления?
9. Сколько свинца расплавлено?
10. Сколько ещё теплоты потребу-

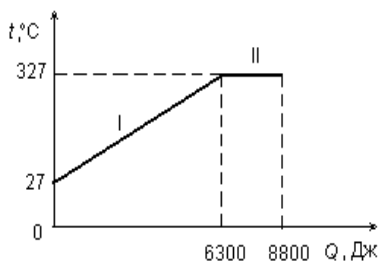


Рис. 5.14

- ется, чтобы завершить процесс плавления?
 11. Что произойдёт, если полностью расплавленный свинец поместить в термостат (устройство, в котором поддерживается постоянная температура, в данном случае 327 °С)?
 12. Что произойдёт, если полностью расплавленный свинец оставить в помещении с температурой воздуха 27 °С?
 13. Изобразите график этого (см. пункт 12) процесса, то есть зависимость температуры от времени.
- В2.** В калориметре находилась вода при температуре 10 °С. Во время первого опыта туда бросили 100 г льда с температурой 0 °С, а во время второго – 200 г льда с температурой 0 °С. При этом в обоих случаях в калориметре установилась одна и та же температура. Какая?
- В3.** Болванки алюминия и серого чугуна одинаковой массы нагреты до температуры их плавления. Для плавления какого из этих тел потребуется большее количество теплоты? Во сколько раз?

- В4.** Какое количество теплоты выделится при отвердевании и охлаждении от температуры плавления до $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ свинцовой пластинки размерами $2,0 \times 5,0 \times 10,0\text{ см}$?
- В5.** Кусок свинца массы $m = 1,00\text{ кг}$ расплавился наполовину при сообщении ему количества теплоты $Q = 54,5\text{ кДж}$. Какова была начальная температура t свинца?
- В6.** Какое количество теплоты потребуется, чтобы расплавить 100 г льда, взятого при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, и затем воду нагреть до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- В7.** В холодильнике изготовили 750 см^3 льда при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сколько энергии было отведено от воды и льда при этом, если начальная температура воды $15\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- В8.** На приготовление в полярных условиях питьевой воды из льда, взятого при температуре $t_1 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, потребовалось количество теплоты $Q = 1050\text{ ккал}$. Какова масса льда, если температура воды должна быть равна $t_2 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- В9.** 100 г свинца при $427\text{ }^{\circ}\text{C}$ охлаждаются до точки плавления, кристаллизуются и охлаждаются до некоторой температуры. Какова конечная температура свинца, если свинец передаёт окружающим телам количество теплоты $Q = 1,9\text{ ккал}$? Удельную теплоёмкость расплавленного свинца принять равной $c_{\text{ж}} = 0,040\text{ кал/(кг}\cdot\text{град)}$.
- В10.** Какой массы железная заготовка, охлаждаясь от $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, могла растопить $3,0\text{ кг}$ льда, взятого при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$? (Другими потерями теплоты пренебречь.)
- В11.** В калориметр со снегом массой $m_1 = 0,10\text{ кг}$, находившемся при температуре $t_1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, положили кусок кирпича массой $m_2 = 0,40\text{ кг}$, нагретый до температуры $t_2 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате лед растаял. Пренебрегая теплоемкостью калориметра, найдите установившуюся температуру.
- В12.** В калориметр, теплоёмкостью которого можно пренебречь, брошен кусок льда массой 20 г при температуре $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем в калориметр наливают воду при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Окончательная температура, которая устанавливается в калориметре, равна $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сколько воды было налито в калориметр?

Задачи трудные

- Г1.** Предложите способ определения массы воды в кастрюле, если в вашем распоряжении имеются только термометр и кусок льда известной массы и температуры.

- Г2. Ученикам предложили задание: опытным путем определить удельную теплоту плавления льда. Какие приборы и оборудование понадобятся для этого? Как выполнить задание? Можно ли таким способом получить достаточно точное значение искомой величины? Какие факторы снижают точность измерений?
- Г3. В калориметр с 1,0 л воды при 20 °С опущено 250 г мокрого снега. После плавления снега температура воды в калориметре стала равной 5 °С. Сколько воды содержалось в снегу? (Потерями теплоты пренебречь.)
- Г4. В калориметр, содержащий $m_1 = 250$ г воды при $t_1 = 15$ °С, брошено $m_2 = 20$ г мокрого снега. Температура в калориметре понизилась на $\Delta t = 5$ °С. Сколько воды было в снегу? Теплоёмкостью калориметра пренебречь.
- Г5. В калориметре находится смесь снега и воды. В него наливают 200 г воды при температуре 20 °С, при этом весь снег тает и превращается в воду при 0 °С. Общая масса воды в калориметре оказалась равной 500 г. Определите процентное содержание снега в воде. Потерями в калориметре пренебречь.
- Г6. В стальной сосуд массой 300 г налили 1,5 л воды при 17 °С. В воду опустили кусок мокрого снега массой 200 г. Когда снег растаял, установилась температура 7 °С. Какое количество воды было в комке снега?
- Г7. При 0 °С почва покрыта слоем снега толщиной 10 см и плотностью 500 кг/м³. Какой слой дождевой воды при 4 °С расплавит весь слой снега?
- Г8. Ванну объёма $V = 100$ л необходимо заполнить водой, имеющей температуру $\theta = 30$ °С, используя воду с температурой $t = 80$ °С и лёд с температурой $t_{\text{л}} = -20$ °С. Найдите массу $m_{\text{л}}$ льда, который придётся положить в ванну. Теплоёмкостью ванны и потерями тепла пренебречь.
- Г9. а) В углубление, сделанное во льду, взятом при температуре 0 °С, положили кусок олова массой 66 г при температуре 110 °С. Какая масса льда растает?
 б) Когда в лёд, температура которого 0 °С, положили кусок металла массой 3,0 кг, прогретый в кипящей воде, под ним расплавилось 360 г льда. Какова удельная теплоёмкость металла?
- Г10. До какой температуры надо нагреть алюминиевый куб, чтобы он, будучи положен на лёд, полностью в него погрузился? Температура льда 0 °С.

- Г11.** Раскаленный алюминиевый куб, положенный на лёд, температура которого $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, полностью в него погрузился. Определите начальную температуру куба. Изменением объёма куба при его охлаждении пренебречь.
- Г12.** Пробирка, содержащая $M = 12\text{ г}$ воды, помещается в охлаждающую смесь, где вода переохлаждается до $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем пробирка вынимается и встряхивается, причем часть воды замерзает. Сколько воды должно обратиться в лёд, если считать, что между водой и стенками пробирки не происходит теплообмена?
- Г13.** В калориметре, теплоёмкостью которого можно пренебречь, находится 200 г воды при $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. В воду бросают кусок льда массой 15 г при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какая температура установится в калориметре?
- Г14.** В сосуд, содержащий $m_1 = 1,0\text{ кг}$ льда при $t_1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, налили $m_2 = 10\text{ г}$ воды при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти установившуюся температуру. Сколько воды и (или) льда будет в сосуде?
- Г15.** В сосуд, содержащий массу $m = 10,0\text{ кг}$ воды при температуре $t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, положили лёд, имеющий температуру $t_{\text{л}} = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего температура образовавшейся смеси оказалась равной $\theta = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какая масса $m_{\text{л}}$ льда была положена в сосуд?
- Г16.** В сосуд, содержащий $m_1 = 1,0\text{ кг}$ льда при температуре $t_1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, влили $m_2 = 2,0\text{ кг}$ воды при температуре $t_2 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате чего часть льда растаяла. Найти массу растаявшего льда.
- Г17.** В термос с 400 г воды при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ поместили 100 г льда при температуре $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какая установится общая температура?
- Г18.** В сосуд с водой с общей теплоёмкостью $C = 1670\text{ Дж/град}$ при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ поместили $m_1 = 100\text{ г}$ льда при $t_1 = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какая установится температура?
- Г19.** В сосуд, содержащий 10 кг льда при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, влили $3,0\text{ кг}$ воды при $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какая установится температура? Расплавится ли весь лёд? Если нет, то какая его часть останется в твердом состоянии? Теплоёмкость сосуда не учитывать.
- Г20.** В чашке содержится 500 г льда. Что будет находиться в чашке после того, как в неё влили 100 г воды при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, если температура окружающей среды равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- Г21.** Смешиваются равные по массе вода при температуре $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и лёд при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какова будет окончательная температура смеси?
- Г22.** Кусок льда массой 725 г поместили в калориметр с $2,5\text{ л}$ воды при температуре $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Когда температура воды в калориметре перестала

изменяться, нашли, что лёд весит на 64 г больше, чем в начале опыта. Определите начальную температуру льда. (Обменом теплоты с окружающей средой пренебречь.)

- Г23.** В сосуд, содержащий массу $m = 2,0$ кг воды при температуре $t = 5$ °С, положен кусок льда массы $m_{\text{л}} = 5,0$ кг, имеющий температуру $t_{\text{л}} = -40$ °С. Найти температуру θ и объём V смеси после установления теплового равновесия. Теплоёмкостью сосуда и потерями тепла пренебречь.

Задачи очень трудные

- Д1.** Железный шарик радиусом 1,0 см, нагретый до 120 °С, положили на лёд. На какую глубину погрузился шарик в лёд? Теплопроводностью льда и нагревом воды пренебречь.
- Д2.** В калориметре находится лёд. Определите теплоёмкость калориметра, если для нагревания его от $-3,0$ °С до $-1,0$ °С требуется 700 кал, а от $-1,0$ °С до $1,0$ °С требуется 17800 кал.
-

6. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ. КИПЕНИЕ. ПЕРЕГРЕТАЯ ЖИДКОСТЬ

Испарение, парообразование, конденсация

Вещество может переходить из жидкого состояния в газообразное. Этот процесс называется *испарением* или *парообразованием*. Испарение жидкостей происходит *при любой температуре*, но чем выше температура, тем быстрее испаряется жидкость.

С точки зрения молекулярной теории, испарение объясняется тем, что наиболее быстрые молекулы жидкости способны преодолеть притяжение своих соседей и вылететь наружу. Чем выше температура, тем больше доля молекул, обладающих нужной для вылета энергией.

Из опыта известно, что скорость испарения различных жидкостей различна: бензин, например, испаряется довольно быстро, вода значительно медленнее, а испарение ртути или подсолнечного масла «на глазок» вообще незаметно. Дело здесь в величине сил притяжения между молекулами жидкости: чем больше эти силы, тем труднее молекулам их преодолеть, а значит, тем медленнее идёт процесс испарения.

При испарении *жидкость охлаждается*. Действительно, в мокрой одежде всегда холоднее, чем в сухой. Некоторые «летучие» (то есть быстро испаряющиеся) жидкости, например эфир, при испарении охлаждаются до отрицательных температур. Этим свойством пользуются врачи, когда им нужно заморозить кожу больного, чтобы сделать её нечувствительной к боли. Заметим также, что именно на эффекте охлаждения жидкости при её испарении основано устройство домашнего холодильника. Этот эффект можно объяснить тем, что при испарении жидкость покидают *наиболее быстрые* молекулы. Поэтому средняя кинетическая энергия оставшихся молекул, а значит, и температура жидкости уменьшаются.

Испарение можно ускорить, если быстро удалять вылетающие из жидкости молекулы подальше от испаряющей поверхности, лишая их тем самым возможности «вернуться» обратно в жидкость. Мы часто пользуемся этим, когда дуем, например, на ложку с горячим супом, ускоряя испарение, а значит, и охлаждение супа. На этом же эффекте основано действие комнатных вентиляторов: создаваемый ими «ветер» ускоряет испарение пота с поверхности кожи, благодаря чему возникает ощущение прохлады.

Читатель: Вы говорите, что при испарении все жидкости охлаждаются. Почему же если на длительное время оставить открытый стакан с водой в комнате, температура воды в нём изменяться не будет?

Автор: Да, через ДЛИТЕЛЬНОЕ время температура действительно изменяться не будет, но эта температура будет НИЖЕ, чем температура воздуха в комнате. Ваш вопрос, видимо, в том, почему температура воды понижается лишь на определённую величину, а затем остаётся постоянной? Здесь всё дело в ТЕПЛООБМЕНЕ.

Пусть в начальный момент температура воды в стакане равнялась температуре воздуха в комнате. Как только мы откроем наш стакан, температура воды в нём за счёт испарения начнёт понижаться. Окружающий стакан воздух, как более горячее «тело», начнёт отдавать воде своё тепло, сам при этом охлаждаясь. (Кстати, именно поэтому от водоёмов веет прохладой.) Причём, чем больше разность температур между водой и воздухом, тем интенсивнее идёт теплообмен. При какой-то определённой разности температур между водой и воздухом потери тепла на испарение будут полностью компенсироваться притоком тепла за счёт теплообмена, и температура воды перестанет уменьшаться.

Читатель: Значит, для того чтобы испарение жидкости проходило при постоянной температуре, к ней надо постоянно подводить тепло?

Автор: Совершенно верно! Это тепло называется *теплотой парообразования*.

Экспериментально установлено, что для испарения жидкости массой m при постоянной температуре и постоянном атмосферном давлении к ней необходимо подвести количество теплоты

$$Q = Lm, \quad (6.1)$$

где L – удельная теплота парообразования, которая зависит от физических свойств жидкости, температуры, при которой происходит парообразование, и атмосферного давления.

Единицы измерения: $[L] = \frac{[Q]}{[m]}$, т.е. удельная теплота паро-

образования имеет такую же размерность, как и удельная теплота плавления, и измеряется в тех же единицах: Дж/кг, кДж/кг, ккал/кг, кал/г.

Физический смысл L . Что означает: удельная теплота парообразования воды при 100 °С и давлении воздуха 760 мм рт. ст. равна 2260 кДж/кг? Это означает, что для того, чтобы 1 кг воды превратить в пар при температуре 100 °С и давлении воздуха 760 мм рт. ст., воде необходимо передать количество теплоты $Q = 2260$ кДж.

Читатель: А разве удельная теплота парообразования зависит от температуры и давления воздуха?

Автор: Конечно! Чем ниже температура, тем больше L , так как чем холоднее жидкость, тем меньше средняя кинетическая энергия её молекул, и тем больше теплоты надо им передать, чтобы они смогли преодолеть силы притяжения своих «соседей». При испарении пар вытесняет «со своего места» воздух. Ясно, что чем больше давление воздуха, тем труднее «попросить» его «освободить местечко». Поэтому с ростом атмосферного давления величина L растёт.

Отметим два существенных отличия между процессами плавления и испарения.

1. Плавление всегда происходит при определённой для данного вещества температуре, а испарение – при любой температуре.

2. Плавление может идти только при постоянном подводе тепла извне (как сказали бы экономисты – за счёт иностранных инвестиций), испарение же может происходить и БЕЗ ПОДВОДА тепла извне, за счёт охлаждения жидкости (то есть этот процесс может «финансироваться» из внутренних резервов).

Читатель: Если при испарении жидкость покидают наиболее быстрые молекулы, то температура пара должна быть выше температуры жидкости?

Автор: Нет. Эти молекулы БЫЛИ БЫСТРЫМИ, пока они находились в жидкости. После того, как они вырвались «на свободу», их «прыть» заметно поубавилась: ведь им пришлось преодолеть силы межмолекулярного притяжения «соседей». Поэтому подобно кирпичу, прилетевшему на крышу, молекулы пара имеют скорость, меньшую той, что была у них в жидкости.

Читатель: Но тогда можно предположить, что температура пара будет даже меньше температуры жидкости...

Автор: Температуры пара и жидкости равны. Чтобы понять, почему это так, рассмотрим более подробно, что происходит с молекулами после того, как они вырываются «на свободу». Прежде всего, отметим, что скорости молекул при нормальных условиях очень велики. Например, средняя скорость молекул водяного пара при 0 °C равна 570 м/с. А расстояние, которое в среднем пролетает молекула между двумя столкновениями очень мало – около 10^{-9} м. Из этого следует, что в секунду молекула испытывает СОТНИ МИЛЛИАРДОВ столкновений. Столько же раз молекула меняет направление своего движения. Ясно, что шанс отскочить после очередного столкновения обратно в жидкость у только что «освободившейся» молекулы достаточно велик.

Читатель: Но в таком случае молекула просто вернётся в жидкость.

Автор: Необязательно. Может вернуться, а может, испытав «лобовое» столкновение, опять отскочить «вверх». И при каждом таком отскоке происходит «обмен» кинетическими энергиями: более быстрые молекулы замедляются, а более медленные разгоняются. А в среднем из-за огромного числа столкновений средние кинетические энергии молекул пара и жидкости выравниваются. Поэтому пар, жидкость, а также прилегающий к жидкости слой воздуха имеют одинаковую температуру. Конечно, на достаточном удалении от поверхности жидкости температура пара будет равна температуре окружающего воздуха.

Читатель: Но если средние кинетические энергии молекул пара и жидкости равны, на что же расходуется теплота парообразования?

Автор: На увеличение *потенциальной* энергии молекул, аналогично тому, как это происходит в процессе плавления. Поэтому при испарении жидкости массы m при постоянной температуре внутренняя энергия вещества увеличивается на величину теплоты парообразования:

$$U^{\text{пара}}(t) = U^{\text{жидкости}}(t) + Lm. \quad (6.2)$$

Читатель: Если при превращении жидкости в пар тепло поглощается, значит, в обратном процессе – превращении пара в жидкость – тепло должно выделяться?

Автор: Совершенно верно! Процесс перехода вещества из газообразного состояния в жидкое называется **конденсацией**, а теплота, которая при этом выделяется, называется **теплотой конденсации**. Заметим, что теплота конденсации данной массы вещества при данной температуре и давлении в точности равна по величине теплоте парообразования. Если бы это было не так, то осуществив для данной массы вещества цикл: «испарение–конденсация», мы либо безвозвратно теряли бы энергию, либо получали её «из ничего». Закон сохранения энергии этого, конечно, не позволит.

Кипение

Каждый из нас едва ли не каждый день наблюдает этот процесс. Подробно мы поговорим об этом интересном явлении позднее, а сейчас лишь кратко отметим основные особенности кипения.

1. При кипении по всему объёму жидкости образуются пузырьки, состоящие из пара, внутрь которых идёт испарение. Пузырьки всплывают на поверхность жидкости и лопаются с характерным «бульканьем», выпуская «на свободу» весь содержащийся в них пар. Из-за того, что пузырьков очень много, общая площадь поверхности раздела «жидкость–пар» значительно увеличивается и процесс парообразования резко ускоряется. Не случайно чайник со свистком начинает свистеть (а значит, интенсивно «производить» пар) в момент закипания воды.

2. При кипении температура жидкости НЕ МЕНЯЕТСЯ. Все мы хорошо знаем, что у воды при нормальном атмосферном давлении температура кипения 100 °С, а с уменьшением давления, например, в горах температура кипения уменьшается.

Значения температур кипения для некоторых жидкостей при давлении 760 мм рт. ст. приведены в таблице 6.1.

Т а б л и ц а 6.1

Температуры кипения некоторых веществ

Вещество	°С	Вещество	°С
Гелий (He)	-268,9	Калий (K)	760
Водород (H ₂)	-253	Натрий (Na)	900
Неон (Ne)	-246	Цинк (Zn)	907
Азот (N ₂)	-195,8	Свинец (Pb)	1745
Кислород (O ₂)	-181	Серебро (Ag)	2170
Хлор (Cl ₂)	-34	Алюминий (Al)	2330
Аммиак (NH ₃)	-33	Медь (Cu)	2540
Эфир ((C ₂ H ₅) ₂ O)	+35	Олово (Sn)	2620
Ацетон (C ₃ H ₆ O)	+56	Железо (Fe)	2870
Спирт этиловый (C ₂ H ₅ OH)	+78	Золото (Au)	2880
Бензол (C ₆ H ₆)	+80	Платина (Pt)	3800
Вода (H ₂ O)	+100	Иридий (Ir)	4400
Нафталин (C ₁₀ H ₈)	+216	Осмий (Os)	5000
Ртуть (Hg)	+357	Карбид вольфрама (WC)	6000
Цезий (Cs)	+666		

Сразу оговоримся, что как не всякое твёрдое тело можно расплавить, так и не всякую жидкость можно вскипятить. Нельзя вскипятить, например, при атмосферном давлении жидкий кварц (SiO₂), так как при температуре 1997 °С он разлагается на кремний и кислород.

В таблице 6.2 приведены значения удельной теплоты парообразования для некоторых веществ при температуре кипения и нормальном атмосферном давлении.

Удельная теплота парообразования некоторых веществ

Вещество	L , кДж/кг	L , ккал/кг	Вещество	L , кДж/кг	L , ккал/кг
Гелий (He)	34,2	8,16	Спирт этило- вый	922	220
Азот (N ₂)	199	47,5	Аммиак (NH ₃)	$1,36 \cdot 10^3$	325
Кислород (O ₂)	212	50,6	Вода (H ₂ O)	$2,26 \cdot 10^3$	539
Ртуть (Hg)	285	68,0	Олово (Sn)	$3,02 \cdot 10^3$	721
Эфир((C ₂ H ₅) ₂ O)	350	83,5	Медь (Cu)	$5,40 \cdot 10^3$	$1,29 \cdot 10^3$
Бензол (C ₆ H ₆)	394	94,0	Железо (Fe)	$6,37 \cdot 10^3$	$1,52 \cdot 10^3$
Водород (H ₂)	453	108	Бор (B)	$47,3 \cdot 10^3$	$11,3 \cdot 10^3$
Ацетон (C ₃ H ₆ O)	524	125			

Перегретая жидкость

Читатель: Значит, максимальная температура, которую может иметь жидкость при данном атмосферном давлении – это температура кипения?

Автор: Не совсем так. При определённых условиях можно получить жидкость с температурой выше температуры кипения. Такая жидкость называется *перегретой*. Подробнее о перегретой жидкости мы поговорим позднее, а сейчас лишь отметим, что для того, чтобы жидкость «перегрелась», в ней не должно быть пузырьков воздуха и пыли.

Примеры решения задач

Задача 6.1. Найти количество теплоты, которое необходимо сообщить $m = 2,0$ кг меди при температуре кипения, чтобы она полностью испарилась.

$$m = 2,0 \text{ кг}$$

$$Q = ?$$

Решение. $Q = mL$. Проверим размерность:

$$[Q] = [m][L] = \text{кг} \cdot \text{Дж/кг} = \text{Дж}.$$

По табл. 6.2 находим удельную теплоту парообразования меди: $L = 5,40 \cdot 10^3$ кДж/кг. Подставим в формулу численные значения:

$$Q = mL = 2,0 \text{ кг} \cdot 5,40 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг} = \\ = 10800 \text{ кДж} \approx 1,08 \cdot 10^4 \text{ кДж}.$$

Ответ: $Q = mL \approx 1,08 \cdot 10^4$ кДж.

Задача 6.2. Какое количество теплоты необходимо подвести к ртути массой $m = 0,50$ кг при температуре $t_1 = 0$ °С, чтобы нагреть её до температуры кипения и полностью испарить?

$t_1 = 0$ °С $m = 0,50$ кг $Q = ?$	Решение. По табл. 3.1 удельная теплоёмкость ртути $c = 0,0329$ ккал/(кг·град). Из табл. 6.1 находим температуру кипения ртути: $t_k = 357$ °С.
--	---

Из табл. 6.2 находим удельную теплоту парообразования ртути: $L = 68,0$ ккал/кг.

Количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагреть ртуть от температуры t_1 до температуры t_k , равно:

$$Q_1 = mc(t_k - t_1).$$

Количество теплоты, необходимое для того, чтобы испарить ртуть при температуре кипения, равно:

$$Q_2 = mL.$$

Общее количество теплоты

$$Q = Q_1 + Q_2 = mc(t_k - t_1) + mL.$$

Проверим размерность:

$$[Q] = [m][c][t] + [m][L] = \\ = \cancel{\text{кг}} \cdot \frac{\text{ккал}}{\cancel{\text{кг}} \cdot \cancel{\text{град}}} \cdot \cancel{\text{град}} + \cancel{\text{кг}} \cdot \frac{\text{ккал}}{\cancel{\text{кг}}} = \text{ккал}.$$

Подставим численные значения:

$$Q = mc(t_k - t_1) + mL = 0,50 \text{ кг} \cdot 0,0329 \text{ ккал/(\cancel{\text{кг}} \cdot \cancel{\text{град}})} \times \\ \times (357 - 0)^\circ\text{C} + 0,50 \text{ кг} \cdot 68,0 \text{ ккал/\cancel{\text{кг}}} = \\ = 39,872 \text{ ккал} \approx 40 \text{ ккал}.$$

Ответ: $Q = mc(t_k - t_1) + mL \approx 40$ ккал.

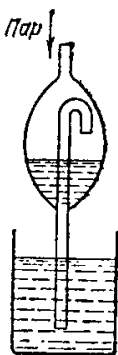


Рис. 6.1

Задача 6.3. Как определить удельную теплоту парообразования? В калориметр, содержащий воду массой $m_{\text{в}}$ при температуре $t_{\text{в}}$, впустили водяной пар массой $m_{\text{п}}$ при температуре $t_{\text{п}}$. Для того чтобы в воду попадал только пар без водяных капелек, пар пропустили через сухопарник (рис. 6.1). Через некоторое время температура воды в калориметре стала равна θ . Определить по этим данным удельную теплоту парообразования воды, считая, что весь пар сконденсировался при температуре $t_{\text{п}}$. Теплоёмкостью калориметра пренебречь.

$m_{\text{п}}$

$m_{\text{в}}$

$t_{\text{в}}$

$t_{\text{п}}$

θ

$L = ?$

Решение. Запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}},$$

$$Q_{\text{отд}} = Lm_{\text{п}} + c_{\text{в}} m_{\text{п}}(t_{\text{п}} - \theta),$$

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{в}} m_{\text{в}}(\theta - t_{\text{в}}),$$

$$Lm_{\text{п}} + c_{\text{в}} m_{\text{п}}(t_{\text{п}} - \theta) = c_{\text{в}} m_{\text{в}}(\theta - t_{\text{в}}).$$

Проведя элементарные преобразования, получаем ответ.

$$\text{Ответ: } L = \frac{c_{\text{в}}[m_{\text{в}}(\theta - t_{\text{в}}) - m_{\text{п}}(t_{\text{п}} - \theta)]}{m_{\text{п}}}.$$

Задача 6.4. Лёд массой $m_1 = 100$ г при температуре $t_1 = 0$ °С находится в калориметре. Теплоёмкость калориметра $C = 25$ Дж/град. Какую массу стогоградусного пара надо впустить в калориметр, чтобы установилась температура $\theta = 25$ °С? Начальная температура калориметра 0 °С.

$C = 25$ Дж/град

$m_1 = 0,100$ кг

$t_1 = 0$ °С

$t_2 = 100$ °С

$\theta = 25$ °С

$m_2 = ?$

Решение. Удельная теплоёмкость воды:

$$c = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)} =$$

$$= 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}.$$

Удельная теплота плавления льда:

$$\lambda = 335 \text{ кДж/кг} = 335 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}.$$

Удельная теплота парообразования воды (по табл. 6.2):

$$L = 2,26 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг} = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

Воспользуемся уравнением теплового баланса:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}; \quad Q_{\text{отд}} = Lm_2 + c m_2(t_2 - \theta);$$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{пол}} &= \lambda m_l + c m_1(\theta - t_1) + C(\theta - t_1); \\
L m_2 + c m_2(t_2 - \theta) &= \lambda m_l + c m_1(\theta - t_1) + C(\theta - t_1); \\
m_2 [L + c(t_2 - \theta)] &= \lambda m_l + c m_1(\theta - t_1) + C(\theta - t_1); \\
m_2 &= \frac{\lambda m_l + c m_1(\theta - t_1) + C(\theta - t_1)}{L + c(t_2 - \theta)}.
\end{aligned}$$

Проверим размерность:

$$\begin{aligned}
[m_2] &= \frac{[\lambda][m_l] + [c][m_1][t] + [C][t]}{[L] + [c][t]} = \\
&= \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} + \frac{\text{Дж}}{\text{град}} \cdot \text{град}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{град}} = \text{Дж} : \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \text{кг}.
\end{aligned}$$

Подставляя численные значения, получим:

$$\begin{aligned}
m_2 &= \frac{335 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,100 \text{ кг} + 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 0,100 \text{ кг} \cdot (25 - 0)^\circ\text{C} + 25 \frac{\text{Дж}}{\text{град}} \cdot (25 - 0)^\circ\text{C}}{2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} + 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} (100 - 25)^\circ\text{C}} = \\
&= 0,0173 \text{ кг} = 17,3 \text{ г} \approx 17 \text{ г}.
\end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } m_2 = \frac{\lambda m_l + c m_1(\theta - t_1) + C(\theta - t_1)}{L + c(t_2 - \theta)} \approx 17 \text{ г}.$$

Задача 6.5. Лёд массой $m_1 = 0,100$ кг находится в калориметре при температуре $t_1 = -40^\circ\text{C}$. В калориметр впускают $m_2 = 10$ г водяного пара при температуре $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Определить состав смеси и её температуру после установления теплового равновесия. Теплоёмкость калориметра не учитывать.

$$m_1 = 0,100 \text{ кг}$$

$$t_1 = -40^\circ\text{C}$$

$$m_2 = 10 \text{ г} = 0,010 \text{ кг}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$\theta = ?$$

Решение. В таблицах найдем значения следующих величин:

$$c_{\text{л}} = 2,09 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$c_{\text{в}} = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$\lambda = 335 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$L = 2,26 \cdot 10^3 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

В данном случае нам неизвестно, что будет в калориметре после установления теплового равновесия. Возможны следующие варианты:

1) лёд нагреется до температуры $\theta < 0^\circ\text{C}$, а пар сконденсируется, вся образовавшаяся в процессе конденсации пара вода охладится до 0°C , замёрзнет, а образовавшийся из этой воды лёд охладится до температуры θ ;

2) лёд нагреется до температуры 0°C и частично растает, а пар сконденсируется в воду, и получившаяся вода остынет до 0°C ;

3) лёд нагреется до 0°C , полностью растает, а получившаяся от таяния льда вода нагреется до некоторой температуры $\theta > 0^\circ\text{C}$. Пар сконденсируется в воду и получившаяся в результате конденсации пара вода охладится до некоторой температуры $\theta > 0^\circ\text{C}$;

4) лёд нагреется до 0°C , полностью растает, получившаяся вода нагреется до 100°C , а пар частично сконденсируется в воду при 100°C .

Итак, в калориметре могут находиться: 1) только лёд; 2) лёд и вода при 0°C ; 3) только вода; 4) вода и пар при 100°C .

Читатель: Но ведь возможен ещё вариант, когда лёд нагреется до 0°C , но таять при этом не будет.

Автор: Будем считать это частным случаем п. 2, то есть это случай, когда масса растаявшего льда равна нулю. Теперь произведём некоторые предварительные вычисления. Вычислим:

1) количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагреть весь лёд до 0°C :

$$\begin{aligned} Q_1 &= c_{\text{л}} m_1 (t_{\text{пл}} - t_1) = \\ &= 2,09 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,100 \text{ кг} \cdot (0 - (-40))^\circ\text{C} = 8,36 \text{ кДж}; \end{aligned}$$

2) количество теплоты, необходимое для того, чтобы растопить весь лёд при температуре 0°C :

$$Q_2 = \lambda m_1 = 335 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot 0,100 \text{ кг} = 33,5 \text{ кДж};$$

3) количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагреть воду, получившуюся в результате таяния льда от 0°C до 100°C :

$$\begin{aligned} Q_3 &= c_{\text{в}} m_1 (t_{\text{к}} - t_{\text{пл}}) = \\ &= 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,100 \text{ кг} \cdot (100 - 0)^\circ\text{C} = 41,9 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

4) количество теплоты, которое выделится при конденсации пара массой m_2 :

$$Q_4 = Lm_2 = 22,6 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг} \cdot 0,010 \text{ кг} = 22,6 \text{ кДж};$$

5) количество теплоты, которое выделится при остывании пара от 100°C до 0°C :

$$\begin{aligned} Q_5 &= c_в m_2 (t_k - t_{пл}) = \\ &= 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)} \cdot 0,010 \text{ кг} \cdot (100 - 0)^\circ\text{C} = 4,19 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Поскольку $Q_4 = 22,6 \text{ кДж} > Q_1 = 8,36 \text{ кДж}$, то у пара при его конденсации в воду вполне хватит тепла на то, чтобы нагреть весь лёд до 0°C , и еще останется в запасе.

Теперь выясним, хватит ли у пара тепла, чтобы *растопить весь лёд*. Если пар сконденсируется в воду, которая затем охладится до 0°C , то в этих двух процессах выделится количество теплоты:

$$Q_4 + Q_5 = 22,6 \text{ кДж} + 4,19 \text{ кДж} = 26,79 \text{ кДж} \approx 26,8 \text{ кДж}.$$

А для того чтобы нагреть лёд до 0°C и полностью растопить его, требуется количество теплоты:

$$\begin{aligned} Q_1 + Q_2 &= 8,4 \text{ кДж} + 33,5 \text{ кДж} = 41,9 \text{ кДж}, \\ Q_4 + Q_5 &= 26,8 \text{ кДж} < Q_1 + Q_2 = 41,9 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Значит, у пара не хватит энергии на то, чтобы растопить весь лёд. Следовательно, реализуется п. 2: лёд нагреется до 0°C и частично растает, а пар сконденсируется в жидкость, которая охладится до 0°C . Итак, температура смеси: $\theta = 0^\circ\text{C}$.

Осталось определить состав смеси, которая состоит из воды и льда. Пусть x – масса растаявшего льда. Запишем уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} Q_{отд} &= Q_{пол}; \\ Q_{отд} &= Lm_2 + c_в m_2 (t_k - t_{пл}); \\ Q_{пол} &= c_л m_1 (t_{пл} - t_1) + \lambda x; \\ c_л m_1 (t_{пл} - t_1) + \lambda x &= Lm_2 + c_в m_2 (t_k - t_{пл}); \\ \lambda x &= Lm_2 + c_в m_2 (t_k - t_{пл}) - c_л m_1 (t_{пл} - t_1); \\ x &= \frac{Lm_2 + c_в m_2 (t_k - t_{пл}) - c_л m_1 (t_{пл} - t_1)}{\lambda}. \end{aligned}$$

Проверим размерность:

$$[x] = \frac{\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} + \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} - \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град}}{\text{кДж/кг}} =$$

$$= \text{кДж} : \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = \text{кг}.$$

Подставляя численные значения, получим:

$$x = \frac{2,26 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 0,010 \text{ кг} + 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 0,010 \text{ кг} \cdot (100 - 40)^\circ\text{С}}{335 \text{ кДж/кг}} -$$

$$- \frac{2,09 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 0,100 \text{ кг} \cdot (0 - (-40))^\circ\text{С}}{335 \text{ кДж/кг}} =$$

$$= 0,05501 \text{ кг} \approx 55 \text{ г}.$$

Итак, растаяло 55 г льда. Значит, осталось льда:

$$m_{\text{л}} = m_1 - x \approx 100 \text{ г} - 55 \text{ г} = 45 \text{ г}.$$

Масса воды складывается из массы растаявшего льда и массы сконденсировавшегося пара:

$$m_{\text{в}} = m_2 + x \approx 10 \text{ г} + 55 \text{ г} = 65 \text{ г}.$$

Ответ: температура смеси 0°С , смесь состоит из 45 г льда и 65 г воды.

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- A1.** Зачем вспотевшую на морозе лошадь после езды покрывают попоной или шубой?
- A2.** Почему мы ощущаем холод при выходе из реки после купания даже при слабом ветре?
- A3.** Почему скошенная трава быстрее высыхает в ветреную, чем в тихую погоду?
- A4.** В двух одинаковых тарелках поровну налиты жирные и постные щи. Какие щи быстрее остынут? Почему?

A5. На рис. 6.2 изображены графики нагревания и кипения воды, спирта и эфира, взятых в равных количествах. Определите, какой из графиков построен для каждой из этих жидкостей.

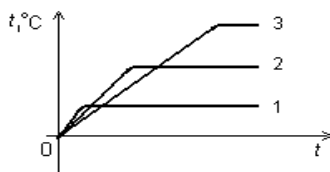


Рис. 6.2

A6. На рис. 6.3 показано, как со временем изменяется температура нагревания, кипения и охлаждения воды. Какому состоянию соответствует часть графика AB ? BC ? Объясните, почему часть графика BC параллельна оси времени.

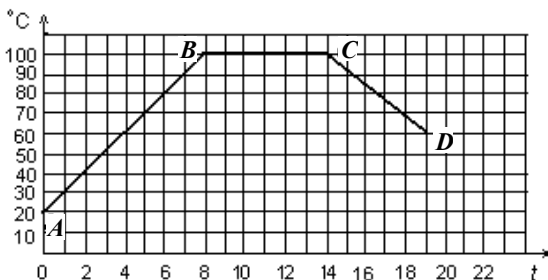


Рис. 6.3

- A7.** Почему сырые дрова горят хуже, чем сухие?
- A8.** Какое количество теплоты выделяется при конденсации 2,5 кг водяного пара, имеющего температуру 100 °С?
- A9.** Какое количество теплоты необходимо сообщить 10 г воды, взятой при температуре 0 °С, для того чтобы нагреть их до точки кипения и испарить?
- A10.** Какое количество теплоты необходимо, чтобы 2,0 кг спирта при перегонке нагреть до кипения и испарить? Начальную температуру спирта принять равной 8 °С.
- A11.** Какое количество теплоты потребуется для того, чтобы нагреть от 20 °С до температуры кипения и полностью испарить $m = 0,50$ кг эфира?

Задачи легкие

- Б1.** Почему температура воды в открытых водоёмах почти всегда в летнюю погоду ниже температуры окружающего воздуха?
- Б2.** Один ученик на вопрос учителя, что означает, если удельная теплота парообразования воды равна 2,3 МДж/кг, ответил: «Это значит, что для полного выкипания воды при температуре 100 °С потребуется 2,3

МДж теплоты». Другой ученик его ответ уточнил: «Такое количество теплоты надо, чтобы испарить при кипении 1 л воды». Кто из учеников прав?

- Б3.** Одинакова ли внутренняя энергия 1 кг воды и 1 кг пара при температуре 100 °С, 80 °С, 0 °С? Дайте обоснованный ответ.
- Б4.** На сколько внутренняя энергия паров эфира при температуре 35 °С и нормальном атмосферном давлении больше внутренней энергии жидкого эфира при той же температуре? (Масса эфира 1 кг.)
- Б5.** В кастрюле кипит вода и в ней варится картофель. Чтобы ускорить варку, девочка увеличила подачу газа в газовую горелку в 4 раза. Быстрее ли сварится картофель?
- Б6.** Почему кастрюля прогорает лишь после того, как вся вода выкипит?
- Б7.** Почему конденсация пара в атмосфере в капельки дождя или снежинки ведёт к потеплению воздуха?
- Б8.** Почему 100-градусный пар обжигает сильнее воды такой же температуры?
- Б9.** Вывешенное зимой на дворе выстиранное бельё замерзает. Как можно объяснить, что бельё даже при сильных морозах через некоторое время высыхает?
- Б10.** Найдите массу спирта, для испарения которого при температуре кипения требуется количество теплоты $Q = 7376$ кДж.
- Б11.** Известно, что для испарения 50,0 г ртути, нагретой до температуры кипения, потребовалось 15,0 кДж тепла. Определите по этим данным удельную теплоту парообразования ртути.
- Б12.** Сколько расплавится льда, взятого при 0 °С, если ему сообщить такое количество теплоты, которое выделится при конденсации 8,0 кг водяного пара при 100 °С и нормальном давлении?
- Б13.** Какое количество теплоты необходимо сообщить 1,0 л спирта при 0 °С, чтобы при перегонке нагреть его до кипения и испарить?
- Б14.** Какое количество теплоты выделяется при конденсации 10 кг водяного пара при температуре 100 °С и охлаждении образовавшейся воды до 20 °С?
- Б15.** Для нагревания воды от 20 до 100 °С и её последующего испарения потребовалось количество теплоты, равное $Q = 5190,4$ кДж. Найдите массу воды.

Задачи средней трудности

- В1.** Вода, имеющая такую же температуру, что и окружающий воздух, испаряется. Откуда берётся теплота испарения?

- В2.** Какое количество теплоты потребовалось для получения 5,0 л дистиллированной воды, если вода в перегонный аппарат поступала при температуре 14 °С?
- В3.** При температуре 10 °С в четырёх сосудах находятся по 100 см³ воды, спирта, эфира и ртути. Какое количество теплоты потребуется для того, чтобы каждую из этих жидкостей нагреть до температуры её кипения (при нормальном давлении) и обратить в пар?
- В4.** Какое количество теплоты израсходовано на нагревание 10,0 кг воды от 5 до 100 °С, если при кипении обратилось в пар 400 г воды?
- В5.** Кофейник ёмкостью 1,2 л заполнили водой при температуре 15 °С. Какое количество теплоты пошло на нагревание и кипение воды в нём, если учитывать, что после снятия с плиты в результате испарения кипятка в нём осталось на 50 см³ воды меньше? (Изменение плотности воды с изменением температуры не учитывать.)
- В6.** К сосуду, в котором находилось 2,0 л воды при 20 °С, было подведено 1050 кДж теплоты. Определить массу пара, образовавшегося при кипении воды. Теплоёмкостью сосуда пренебречь.
- В7.** Какое количество теплоты необходимо для плавления 1,0 кг льда, начальная температура которого 0 °С, нагревания образовавшейся воды и её испарения при 100 °С?
- В8.** Какое количество теплоты необходимо для расплавления 2,0 кг льда, взятого при –10 °С, нагревания и превращения в пар полученной воды?
- В9.** Требуется пропусканием пара нагреть 80 л воды, взятой при температуре 6 °С, до 35 °С. Какое количество 100-градусного пара потребуется для этого?
- В10.** В сосуд с водой, взятой при 0 °С, впустили 1,0 кг пара при 100 °С. Спустя некоторое время в сосуде установилась температура 20 °С. Сколько воды было в сосуде? Теплообмен с окружающей средой отсутствует.
- В11.** Сколько 100-градусного пара необходимо для нагревания стального радиатора массой 12 кг от 15 °С до 85 °С?
- В12.** В парниковых хозяйствах для уничтожения личинок вредителей грунт обрабатывают горячим водяным паром. Определите расход пара на 1,0 м³ грунта, если его надо нагреть от 15 до 95 °С. Плотность грунта в среднем равна 1,8 г/см³, удельная теплоёмкость грунта 800 Дж/(кг·°С), температура пара 100 °С.
- В13.** Пробирку с перегретой водой массой $m_1 = 100$ г встряхивают, в результате чего вода закипает, а часть ее обращается в пар. Какой была начальная температура воды, если ее выкипело $m_2 = 1,0$ г?

- В14.** При соблюдении некоторых условий можно нагреть воду при нормальном атмосферном давлении до температуры выше $t_k = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ без того, чтобы вода закипела (перегретая вода). Пробирку, содержащую $m = 100\text{ г}$ перегретой воды при $t = 111\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении, слегка встряхивают, отчего происходит бурное вскипание воды. Найти массу выкипевшей воды m' . Удельная теплоёмкость воды в указанном интервале температур $c = 2,3\text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$, удельная теплота парообразования $L = 2,2\text{ МДж/кг}$.

Задачи трудные

- Г1.** Для охлаждения резца (фрезы) в процессе обработки детали его поливают специальной охлаждающей жидкостью. В каком случае охлаждение более эффективно: когда жидкость течет струей или когда предварительно разбрызгивается струей воздуха в мелкие капли?
- Г2.** Какая вода будет быстрее охлаждать раскаленный металл: холодная ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) или горячая ($t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)? Объясните.
- Г3.** Для опытного определения удельной теплоты парообразования воды сухой пар при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ пропустили через 400 г воды, налитой в медный калориметр массой 200 г . После чего масса воды в калориметре стала равной 421 г , а температура воды повысилась от 10 до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какое значение удельной теплоты парообразования было получено во время опыта? (Потери теплоты при излучении не учитывать.)
- Г4.** Смесь, состоящую из $m_1 = 5,0\text{ кг}$ льда и $m_2 = 15,0\text{ кг}$ воды при общей температуре $t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, нужно нагреть до температуры $\theta = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ пропусканием водяного пара при $t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить необходимое количество пара.
- Г5.** В калориметр с $m_1 = 100\text{ г}$ льда при $t_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ впущен пар при $t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сколько воды окажется в калориметре непосредственно после того, как весь лёд растает?
- Г6.** В алюминиевый калориметр массой 300 г опустили кусок льда. Температура калориметра и льда $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем пропустили через калориметр водяной пар при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. После того как температура смеси оказалась равной $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, измерили массу смеси, она оказалась равной 500 г . Какое количество пара сконденсировалось и сколько льда находилось в начале опыта в калориметре?
- Г7.** В алюминиевом калориметре массой 50 г находится 100 г воды при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. От электроплитки калориметр с водой получил $161,6\text{ кДж}$ теплоты. Какие процессы происходили с водой и калориметром? Сколько воды испарилось?

Г8. На рис. 6.4 приведён график зависимости температуры воды от количества теплоты, полученной от нагревателя. Найдите по графику массу воды. Вся ли вода испарилась? Если не вся, то сколько воды испарилось? Сколько ещё теплоты понадобится, чтобы испарить всю воду?

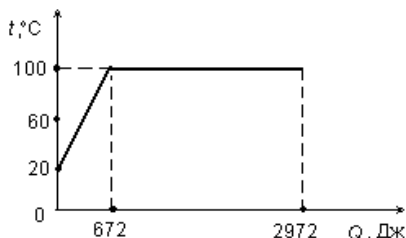


Рис. 6.4

Г9. Найдите массу воды, превратившейся в пар, если в сосуд, содержащий 1,0 кг воды при 20 °С, влить 10 кг расплавленного свинца при температуре плавления. Сосуд латунный, его масса 0,50 кг. Потерями теплоты пренебречь.

Г10. В сосуд, содержащий 2,8 л воды при 20 °С, бросают кусок стали массой 3,0 кг, нагретый до 460 °С. Вода нагревается до 60 °С, а часть её обращается в пар. Найдите массу воды, обратившейся в пар. Теплоёмкостью сосуда пренебречь.

Г11. Теплообменник представляет собой трубу, внутри которой находится змеевик. В змеевик в 1,0 с поступает 1,0 кг водяного пара, то есть расход пара $q_1 = 1,0$ кг/с при температуре $t_1 = 100$ °С. Навстречу пару движется вода, расход которой $q_2 = 10$ кг/с (рис. 6.5). Определить температуру воды на выходе из теплообменника, если на входе температура воды $t_2 = 20$ °С.



Рис. 6.5

Г12. В сосуд, содержащий 1,5 кг воды при 15 °С, впускают 200 г водяного пара при 100 °С. Какая общая температура установится после конденсации пара?

Г13. В сосуде содержится смесь воды массы $m = 500$ г и льда массы $m_{\text{л}} = 54,4$ г при температуре $t_0 = 0$ °С. В сосуд вводится сухой пар массы $m_{\text{п}} = 6,60$ г при температуре $t = 100$ °С. Какой будет температура θ после установления теплового равновесия?

Г14. В сосуд положили кусок льда массы $m_{\text{л}} = 10$ кг, имеющий температуру $t_{\text{л}} = -10$ °С. Найти массу m воды в сосуде после того, как его содержимому сообщили количество теплоты $Q = 20$ МДж.

Г15. В сосуде, теплоёмкость которого 0,63 кДж/град, находится 0,50 л воды и 250 г льда при 0 °С. Какая установится температура после впуска в воду 90 г водяного пара при температуре 100 °С?

Задачи очень трудные

- Д1. В закрытом медном калориметре массой 600 г находится 1,0 кг измельченного льда при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В калориметр впустили 200 г пара при температуре $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Считая, что удельная теплоёмкость водяного пара в пределах от 100 до $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $0,40\text{ кал}/(\text{г}\cdot\text{град})$, определите, какая температура установится в калориметре. (Потерями теплоты пренебречь.)
- Д2. В калориметр, содержащий 100 г сухого снега при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, впустили 13 г водяного пара при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите установившуюся в калориметре температуру. В каком состоянии находится вещество в калориметре? Как изменится ответ, если учесть теплоёмкость калориметра? Решите эту задачу для случая, когда масса пара равна 25 г.
- Д3. Через воду, имеющую температуру $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, пропускают водяной пар при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сколько процентов составит масса воды, образовавшейся из пара, от массы всей воды в сосуде в момент, когда её температура равна $50\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- Д4. Найти массу m воды, которая может быть превращена в лёд испарением эфира, имеющего массу $m_{\text{э}} = 0,10\text{ кг}$ и температуру $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Начальная температура воды также $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Д5. В прямоугольную кювету длины $a = 24\text{ см}$ и ширины $b = 20\text{ см}$, содержащую воду при температуре $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, налили жидкий азот, взятый при температуре его кипения $t_{\text{а}} = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$. После испарения азота вода охладилась до температуры $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и покрылась корочкой льда при той же температуре. Найдите толщину h ледяной корочки, считая, что пар азота уходит от поверхности льда, нагревшись до его температуры, а половина всего полученного паром количества теплоты отдано водой. Объём воды в кювете был $V = 1\text{ л}$, масса азота $m_{\text{а}} = 0,8\text{ кг}$. Удельные теплоёмкости газообразного азота и воды соответственно $c_{\text{а}} = 1,05\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ и $c = 4,2\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$. Плотности воды и льда $\rho = 1000\text{ кг}/\text{м}^3$ и $\rho_{\text{л}} = 0,92 \cdot 10^3\text{ кг}/\text{м}^3$. Удельная теплота плавления льда $\lambda = 0,33\text{ МДж}/\text{кг}$, удельная теплота парообразования азота $L = 0,2\text{ МДж}/\text{кг}$.
-

7. ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ

Теплота сгорания

При сгорании топлива (угля, нефти, природного газа и т.д.) выделяется тепло. Экспериментально установлено, что при сгорании топлива массой m выделяется ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ, равная:

$$Q = qm, \quad (7.1)$$

где q – *удельная теплота сгорания* (или *теплотворность*) топлива, зависящая от свойств самого топлива.

Единицы измерения: $[q] = \frac{[Q]}{[m]}$; таким образом, q измеряется в

тех же единицах, что и удельная теплота плавления и удельная теплота парообразования: Дж/кг, кал/кг, кДж/кг, ккал/кг и т.д.

Физический смысл удельной теплоты сгорания. Величина q показывает, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании единицы массы данного топлива. Например, если удельная теплота сгорания дров равна 3000 ккал/кг, то это значит, что при сгорании 1 кг дров выделится количество теплоты: $Q = 3000$ ккал.

Значения удельной теплоты сгорания для некоторых видов топлива приведены в таблице 7.1.

Заметим, что удельная теплота сгорания практически всех видов топлива значительно превосходит удельную теплоту парообразования большинства веществ. Например, у керосина $q = 46$ МДж/кг, а у воды $L = 2,26 \cdot 10^3$ кДж/кг или 2,26 МДж/кг, то есть удельная теплота сгорания керосина более чем в 20 раз превосходит удельную теплоту парообразования воды! Это значит, что для испарения 20 кг воды, взятой при температуре кипения, достаточно сжечь 1 кг керосина.

Т а б л и ц а 7.1

**Удельная теплота сгорания (теплотворность)
некоторых видов топлива**

Вещество	q , МДж/кг	q , Мкал/кг
Порох	3,8	0,90
Дрова сухие	10	2,4
Бурый уголь подмосковный	13	3,1
Торф	14	3,3
Каменный уголь	27	6,4
Спирт этиловый (C_2H_5OH)	27	6,4
Антрацит	30	7,2
Древесный уголь	34	8,1
Природный газ (CH_4)	44,1	10,5
Нефть	44,1	10,5
Бензин	46	11
Керосин	46	11
Водород (H_2)	120	28,6

Задача 7.1 Какое количество теплоты выделится при полном сгорании антрацита массой $m = 5$ кг?

$$m = 5,0 \text{ кг}$$

$$Q = ?$$

Решение. Теплотворность антрацита находим в табл. 7.1: $q = 30$ МДж/кг. Согласно формуле (7.1), теплота сгорания равна: $Q = qm$. Проверим размерность: $[Q] = [q][m] = (\text{МДж/кг}) \cdot \text{кг} = \text{МДж}$.

Подставим численные значения:

$$Q = qm = 30 \text{ МДж/кг} \cdot 5,0 \text{ кг} = 150 \text{ МДж} \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

$$\text{Ответ: } Q = qm \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

Коэффициент полезного действия (или теплоотдача) нагревательных приборов

При нагревании чайника на газовой плите часть энергии, полученной от сгорания газа, идёт на нагрев чайника, а часть – на нагрев воздуха на кухне и всех находящихся там предметов. Поэтому можно сказать, что «с пользой» расходуется только часть энергии,

полученной от сгорания газа, а часть этой энергии тратится впустую.

Для того чтобы знать, какая доля энергии, полученной от сгорания топлива, расходуется «с пользой», вводится специальная величина, называемая **коэффициентом полезного действия (КПД)** или **теплоотдачей** нагревательного прибора (газовой горелки, плавильной печи, примуса и т.д.).

$$\text{КПД} = \frac{\text{КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ, ИЗРАСХОДОВАННОЕ ПО НАЗНАЧЕНИЮ (С ПОЛЬЗОЙ)}}{\text{ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ЗАТРАЧЕННОГО ТЕПЛА}}$$

или кратко:

$$\eta = \frac{Q_{\text{полезное}}}{Q_{\text{затраченное}}} . \quad (7.2)$$

(η – греческая буква «эта», которой обычно обозначают КПД).

Максимально возможное значение КПД равно 1 (когда всё затраченное тепло расходуется ТОЛЬКО по назначению: $Q_{\text{полезн}} = Q_{\text{затр}}$).

Минимальное значение КПД равно нулю (например, когда плита горит, а чайник на неё поставить забыли: $Q_{\text{затр}} > 0$, $Q_{\text{полезн}} = 0$).

Задача 7.2. При нагревании на спиртовке воды массой $m_1 = 300$ г от температуры $t_1 = 18^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 68^\circ\text{C}$ сожгли массу спирта $m_2 = 7,0$ г. Найти КПД спиртовки.

$m_1 = 300 \text{ г} = 0,300 \text{ кг}$ $t_1 = 18^\circ\text{C}$ $m_2 = 7,0 \text{ г} = 0,0070 \text{ кг}$ $t_2 = 68^\circ\text{C}$ $\eta = ?$	Решение. Из табл. 7.1 находим теплопроводность спирта $q = 27 \text{ МДж/кг} = 2,7 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$. Количество затраченного тепла – это теплота сгорания спирта: $Q_{\text{затр}} = qm_2.$
---	---

Количество теплоты, израсходованное «с пользой», – это количество теплоты, полученное водой:

$$Q_{\text{полезн}} = cm_1(t_2 - t_1),$$

где $c = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$.

$$\eta = \frac{Q_{\text{полезн}}}{Q_{\text{затр}}} = \frac{cm_1(t_2 - t_1)}{qm_2};$$

$$\eta = \frac{\frac{[c][m_1][t]}{[q][m_2]} = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}} = 1;$$

$$\eta = \frac{4,190 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot 0,300 \text{ кг} \cdot (68 - 18)^\circ\text{C}}{2,7 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot 0,0070 \text{ кг}} =$$

$$= 0,3325 \approx 33\%.$$

Ответ: $\eta = \frac{cm_1(t_2 - t_1)}{qm_2} \approx 33\%.$

Тепловая мощность нагревателя

Все нагреватели выделяют тепло, но по-разному. Одно дело – примус, и совсем другое – доменная печь. Для того чтобы количественно охарактеризовать энергетические «возможности» нагревателя, физики ввели специальную величину – ТЕПЛОВУЮ МОЩНОСТЬ.

Тепловой мощностью нагревателя N называется отношение количества теплоты $Q_{\text{затр}}$, выделенного нагревателем, ко времени τ , в течение которого выделилось это количество теплоты:

$$N = Q_{\text{затр}}/\tau.$$

Единицы измерения: $[N] = \frac{[Q]}{[\tau]}$, таким образом, N измеря-

ется в Дж/с или кал/с. Заметим, что для единицы измерения тепловой мощности Дж/с существует специальное название – ватт¹ (Вт): 1 Дж/с = 1 Вт.

Физический смысл N . Тепловая мощность показывает, какое количество теплоты выделяется нагревателем в единицу времени. Например, если тепловая мощность примуса 100 Вт, это значит, что за одну секунду примус выделяет 100 Дж тепла.

¹ Единицы измерения джоуль и ватт получили свои названия от фамилий знаменитых английских ученых Джеймса Прескотта Джоуля (Joule) (1818–1889) и Джеймса Уатта (Watt) (1736–1819).

Автор: Прежде, чем мы приступим к решению следующей задачи, обсудим один, казалось бы, очевидный вопрос. Допустим, некоторый источник тепла, например, электроплитка имеет постоянную тепловую мощность N . Можно ли утверждать, что количество теплоты, *получаемое от плитки чайником* *ежесекундно*, также не меняется со временем?

Читатель: Конечно!

Автор: Допустим температура плитки $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поставим на неё чайник, имеющий температуру $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Будет ли чайник вообще получать от плитки хоть какое-то тепло?

Читатель: Нет... Если температуры соприкасающихся тел равны, теплообмен между ними не происходит.

Автор: Вот видите! Значит, *количество получаемого чайником тепла за единицу времени*, зависит не только от тепловой мощности нагревателя, но и от разности температур между нагревателем и чайником, поэтому, вообще говоря, эта величина в процессе нагревания *меняется*. Подробнее мы поговорим об этом в следующем параграфе, а сейчас лишь заметим, что разность температур между чайником и пламенем горелки очень велика (больше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), поэтому изменением скорости теплопередачи из-за изменения разности температур между чайником и пламенем горелки можно пренебречь.

Мощность теплопередачи

Введём ещё одну физическую величину – **мощность теплопередачи** (W), равную отношению количества теплоты, *переданной нагреваемому телу*, ко времени нагревания: $W = Q_{\text{полезн}}/\tau$.

Нетрудно видеть, что мощность теплопередачи измеряется в тех же единицах, что и тепловая мощность:

$$[W] = [Q] / [\tau] = \text{Дж/с} = \text{Вт}.$$

Мощность теплопередачи показывает, какое количество теплоты передаётся нагреваемому телу в единицу времени.

Во всех задачах этого параграфа мощность теплопередачи будем считать величиной постоянной, а потерями тепла из-за тепло-

обмена между нагреваемым телом и окружающим воздухом будем пренебрегать. Ну, а теперь приступим к решению задачи.

Задача 7.3. Кусок льда нагревается на газовой горелке от -10 до 0 °C в течение 60 с. Через какое время лёд полностью растает?

$t_1 = -10$ °C $t_2 = 0$ °C $\tau_1 = 60$ с $\tau_2 = ?$	Решение. Пусть W – мощность теплопередачи, постоянная величина; m – масса льда. Удельная теплоёмкость льда $c_{\text{л}} = 2,09 \cdot 10^3$ Дж/(кг·град), удельная теплота плавления льда $\lambda = 335 \cdot 10^3$ Дж/кг – известные табличные значения. Количество теплоты, полученное льдом при его нагревании от температуры t_1 до температуры t_2, равно:
---	--

$$Q_1 = W\tau_1 = c_{\text{л}}m(t_2 - t_1). \quad (1)$$

Количество теплоты, полученное льдом при его плавлении, равно:

$$Q_2 = W\tau_2 = m\lambda. \quad (2)$$

Разделим уравнение (1) на уравнение (2). Получим:

$$\frac{W\tau_1}{W\tau_2} = \frac{c_{\text{л}}m(t_2 - t_1)}{m\lambda}.$$

Неизвестные величины W и m сокращаются, и мы легко получаем ответ:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{c_{\text{л}}(t_2 - t_1)}{\lambda} \Rightarrow \tau_2 = \tau_1 \frac{\lambda}{c_{\text{л}}(t_2 - t_1)}.$$

$$[\tau_2] = [\tau_1] \frac{[\lambda]}{[c_{\text{л}}][t]} = \frac{\text{с} \cdot \text{Дж/кг}}{\text{Дж/(кг} \cdot \text{град)} \cdot \text{град}} = \frac{\text{с} \cdot \cancel{\text{Дж/кг}}}{\cancel{\text{Дж/кг}}} = \text{с}.$$

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \frac{60 \text{ с} \cdot 335 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}}{2,09 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)} \cdot (0 - (-10))^\circ\text{C}} = 961,7 \text{ с} \approx \\ &\approx 9,6 \cdot 10^2 \text{ с} \approx 16 \text{ мин.} \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } \tau_2 = \tau_1 \frac{\lambda}{c_{\text{л}}(t_2 - t_1)} \approx 16 \text{ мин.}$$

Примеры решения задач

Задача 7.4. Определите КПД плавильной печи, в которой для плавления стали массой $m_c = 500$ кг расходуется $m_y = 30,6$ кг каменного угля. Начальную температуру железа принять равной $t_1 = 30^\circ\text{C}$.

$$\begin{array}{l} m_c = 500 \text{ кг} \\ m_y = 30,6 \text{ кг} \\ t_1 = 30^\circ\text{C} \end{array}$$

$$\eta = ?$$

Решение. Теплотворность каменного угля (по таблице 7.1): $q = 27$ МДж/кг. Температура плавления стали (по таблице 5.1) $t_{\text{пл}} = 1400^\circ\text{C}$.

Удельная теплоёмкость стали (по табл. 3.1): $c = 460$ Дж/(кг·град).

Удельная теплота плавления стали (по табл. 5.2):

$$\lambda = 83,8 \text{ кДж/кг} = 8,38 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}.$$

Согласно формуле (7.2) КПД печи равен

$$\eta = Q_{\text{полезн}} / Q_{\text{затр}}; \quad (1)$$

$$Q_{\text{полезн}} = c_c m_c (t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda m_c. \quad (2)$$

$$Q_{\text{затр}} = q m_y. \quad (3)$$

Подставляя выражения для $Q_{\text{полезн}}$ (2) и $Q_{\text{затр}}$ (3) в формулу (1), получим:

$$\eta = \frac{c_c m_c (t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda m_c}{q m_y}.$$

Проверим размерность:

$$\begin{aligned} [\eta] &= \frac{[c_c][m_c][t] + [\lambda][m_c]}{[q][m_y]} = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг}} = \\ &= \text{Дж/Дж} = 1. \end{aligned}$$

Подставим численные значения:

$$\begin{aligned} [\eta] &= \frac{460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 500 \text{ кг} \cdot (1400 - 0)^\circ\text{C} + 8,38 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг} \cdot 500 \text{ кг}}{2,7 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг} \cdot 30,6 \text{ кг}} = \\ &= 0,440 \approx 44\%. \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } \eta = \frac{c_c m_c (t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda m_c}{q m_y} \approx 44\%.$$

Задача 7.5. На примусе, тепловая отдача которого 40%, в медной кастрюле массой 5,0 кг нагрели воду от 12 до 100 °С. Найти массу воды, если расход керосина составил 110 г.

$$\begin{aligned} m_{\text{м}} &= 5,0 \text{ кг} \\ m_{\text{к}} &= 110 \text{ г} = \\ &= 0,110 \text{ кг} \\ t_1 &= 12 \text{ °С} \\ t_2 &= 100 \text{ °С} \\ \eta &= 0,40 \\ m_{\text{в}} &= ? \end{aligned}$$

Решение. Выпишем необходимые нам табличные значения:

$$q = 46 \text{ МДж/кг} = 4,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг (табл. 7.1);}$$

$$c_{\text{м}} = 394 \text{ Дж/(кг·град),}$$

$$c_{\text{в}} = 4190 \text{ Дж/(кг·град) (табл. 3.1).}$$

Согласно формуле (7.2)

$$\eta = Q_{\text{полезн}} / Q_{\text{затр}}; \quad (1)$$

$$Q_{\text{полезн}} = c_{\text{м}} m_{\text{м}} (t_2 - t_1) + c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_2 - t_1); \quad (2)$$

$$Q_{\text{затр}} = q m_{\text{к}}. \quad (3)$$

Подставим значения $Q_{\text{полезн}}$ (2) и $Q_{\text{затр}}$ (3) в формулу (1). Получим:

$$\eta = \frac{c_{\text{м}} m_{\text{м}} (t_2 - t_1) + c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_2 - t_1)}{q m_{\text{к}}}.$$

Решим это уравнение относительно искомой величины $m_{\text{в}}$:

$$\checkmark \quad \eta q m_{\text{к}} = \boxed{c_{\text{м}} m_{\text{м}} (t_2 - t_1)} + c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_2 - t_1),$$

$$\eta q m_{\text{к}} - c_{\text{м}} m_{\text{м}} (t_2 - t_1) = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_2 - t_1),$$

$$m_{\text{в}} = \frac{\eta q m_{\text{к}} - c_{\text{м}} m_{\text{м}} (t_2 - t_1)}{c_{\text{в}} (t_2 - t_1)}.$$

$$[m_{\text{в}}] = \frac{[\eta][q][m_{\text{к}}] - [c_{\text{м}}][m_{\text{м}}][t]}{[c_{\text{в}}][t]} =$$

$$= \frac{1 \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} - \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{град}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж/кг}} = \text{кг}.$$

Подставим численные значения:

$$m_B = \frac{0,40 \cdot 4,6 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,110 \text{ кг} - 394 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 5,0 \text{ кг} \cdot (100 - 12)^\circ\text{C}}{4190 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{град})} \cdot (100 - 12)^\circ\text{C}} =$$

$$= 5,019 \text{ кг} \approx 5,0 \text{ кг}$$

$$\text{Ответ: } m_B = \frac{\eta q m_K - c_M m_M (t_2 - t_1)}{c_B (t_2 - t_1)} \approx 5,0 \text{ кг}.$$

Задача 7.6. На электроплитке с тепловой мощностью $N = 600$ Вт с КПД $\eta = 45\%$ нагрели до кипения $m = 1,5$ кг воды с начальной температурой $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и часть воды $\alpha = 5,0\%$ превратили в пар. Сколько времени длился этот процесс?

$$N = 600 \text{ Вт}$$

$$\eta = 45\% = 0,45$$

$$m = 1,5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 5,0\% = 0,050$$

$$\tau = ?$$

Решение. Удельная теплоемкость воды $c = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$. Удельная теплота парообразования воды $L = 2,26 \cdot 10^3 \text{ кДж}/\text{кг} = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$.

Согласно формуле (7.2)

$$\eta = Q_{\text{полезн}} / Q_{\text{затр}}. \quad (1)$$

Масса испарившейся воды равна λm .

$$Q_{\text{полезн}} = cm(t_2 - t_1) + (\alpha m)L; \quad (2)$$

$$N = Q_{\text{затр}} / \tau; \quad Q_{\text{затр}} = N\tau. \quad (3)$$

Подставив значения $Q_{\text{полезн}}$ из (2) и $Q_{\text{затр}}$ из (3), в (1) получим:

$$\eta = \frac{cm(t_2 - t_1) + (\alpha m)L}{N\tau}. \quad (4)$$

В уравнении (4) неизвестной является только искомая величина τ . Найдём её:

$$\tau N = cm(t_2 - t_1) + (\alpha m)L;$$

$$\tau = \frac{cm(t_2 - t_1) + (\alpha m)L}{\eta N};$$

$$[\tau] = \frac{[c][m][t] + [\alpha][m][L]}{[\eta][N]} =$$

$$= \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} + 1 \cdot \text{кг} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}}{1 \cdot \text{Вт}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Вт}} = \text{Дж} : \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{с}.$$

Подставим численные значения:

$$\tau = \frac{4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,5 \text{ кг} \cdot (100 - 20)^\circ\text{C} + (0,050 \cdot 1,5 \text{ кг}) \cdot 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}}{0,45 \cdot 600 \text{ Вт}} = 2490 \text{ с} \approx 2,5 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 42 \text{ мин.}$$

$$\text{Ответ: } \tau = \frac{cm(t_2 - t_1) + (\alpha m)L}{\eta N} \approx 42 \text{ мин.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- A1.** На вопрос учителя, что означает, что удельная теплота сгорания водорода равна $1,2 \cdot 10^8$ Дж/кг, ученик ответил: «Это значит, что при сгорании некоторого количества водорода выделяется $1,2 \cdot 10^8$ Дж теплоты». Найдите ошибки в ответе ученика.
- A2.** На вопрос учителя, что означает, что удельная теплота сгорания керосина равна 46 МДж/кг, ученик ответил: «Это значит, что при полном сгорании 1 л керосина выделяется $46 \cdot 10^6$ Дж теплоты». Правильный ли ответ дал ученик?
- A3.** Сколько килокалорий выделится при сгорании 15 кг древесного угля?
- A4.** При сгорании 3,0 кг пороха выделилось 2700 ккал. Найдите теплотворность пороха.
- A5.** Сколько надо сжечь каменного угля, чтобы при этом выделилось 42000 ккал?
- A6.** При полном сгорании 1 кг природного газа выделяется 44 МДж теплоты. Какова удельная теплота сгорания газа?

Задачи легкие

- B1.** Почему рачительный хозяин предпочитает покупать березовые дрова, а не сосновые? Цена дров одинакова. Теплотворности березы и сосны одинаковы.
- B2.** Удельная теплота сгорания водорода больше, чем у газа бутана. Чем же тогда можно объяснить то, что при сгорании баллона бутана выделилось больше тепла, чем при сгорании такого же объема водорода? Давление газов одинаково.

- Б3.** Для питания котла водяного отопления требуется в день 35 МДж энергии. Сколько нужно ежедневно сжигать для питания котла: а) дров; б) нефти; в) каменного угля; г) природного газа?
- Б4.** На сколько больше килокалорий выделится при полном сгорании 2,0 кг бензина, чем 2,0 кг сухих дров?
- Б5.** В топке котла парового двигателя за некоторое время сожгли 20 т торфа. Каким количеством угля можно было бы заменить это количество торфа? (Теплотворность торфа принять равной 3500 ккал/кг; угля – 6400 ккал/кг.)
- Б6.** Сколько тонн каменного угля нужно сжечь, чтобы получить количество теплоты, равное теплоте, выделяемой при сгорании 5,0 м³ бензина?
- Б7.** В плавильной печи для нагревания 300 кг меди от 13 до 1083 °С (температура плавления) израсходовали 43,1 кг каменного угля. Определите КПД плавильной печи.
- Б8.** Какова тепловая отдача примуса, если для нагревания 2,0 л воды от 12 °С до кипения при нормальном давлении сожгли 40 г керосина?
- Б9.** Чему равен КПД плавильной печи, в которой на плавление 1,0 кг меди (начальная температура 83 °С) расходуется 36 г каменного угля?

Задачи средней трудности

- В1.** Сколько теплоты выделяется при сгорании 200 г спирта? Сколько воды можно нагреть до 80 °С этим теплом? Начальная температура воды 30 °С, $\eta = 1$.
- В2.** Какое количество воды можно вскипятить, затратив 0,50 кг дров, теплотворность которых 3000 ккал/кг, если тепловая отдача кипятивника 30%, начальная температура воды 10 °С?
- В3.** В резервуар примуса, тепловая отдача которого 40%, налито 625 см³ керосина. Какое количество воды можно вскипятить, если сжечь весь керосин? (Начальная температура воды 20 °С.)
- В4.** Сколько дров понадобится, чтобы истопить кирпичную русскую печь? КПД печи равен 25%, масса печи 1,5 т, в процессе протапливания температура печи меняется от 10 °С до 70 °С.
- В5.** При нагревании в котле 3000 л воды сожгли 40 кг каменного угля. До какой температуры нагрелась вода, если её начальная температура была 10 °С, а тепловая отдача топки 60 %?
- В6.** Определите тепловую отдачу нагревателя, на котором для плавления и доведения до кипения 2,0 кг льда, взятого при 0°С, расходуется 80 г керосина.

- В7.** Сколько потребуется каменного угля, чтобы расплавить 1000 кг серого чугуна, взятого при температуре $50\text{ }^{\circ}\text{C}$? Тепловая отдача вагранки 60 %. Температура плавления чугуна $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- В8.** Сколько стали, взятой при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, можно расплавить в печи с КПД, равным 50 %, сжигая 2,0 т каменного угля? Температура плавления стали $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- В9.** Сколько дров надо сжечь в печке с КПД, равным 40%, чтобы получить из 200 кг снега, взятого при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, воду при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- В10.** Кусок свинца, имеющий начальную температуру $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагревают до температуры плавления за 10 мин. Через какое время он весь расплавится?
- В11.** Кусок льда растаял через 30 мин. Сколько времени он нагревался на этой же горелке от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры плавления?
- В12.** Воду при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ наливают в электрический чайник. Через 15 мин вода закипела. Через какое время она вся выкипит?
- В13.** Известно, что вода из чайника вся выкипела за 40 мин. Сколько времени она нагревалась в этом чайнике от $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до кипения?
- В14.** Чтобы нагреть котёл водяного отопления требуется 810000 ккал в сутки. Сколько потребуется кубометров дров, теплотворность которых 3000 ккал/кг, для отопления здания в течение месяца? (Плотность дров принять равной $0,81\text{ г/см}^3$. В месяце 30 суток.)
- В15.** Сколько дров необходимо для того, чтобы нагреть 50 л воды в железном котле массой 10 кг от 15 до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$? Потерями тепла пренебречь.
- В16.** В алюминиевом тигле массой 500 г находится 200 г цинка при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какое количество теплоты будет отдано окружающей среде при охлаждении тигля с цинком до комнатной температуры ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)? Сколько спирта надо сжечь, чтобы получить такое же количество теплоты?
- В17.** В электрическом чайнике мощности $N = 800\text{ Вт}$ можно вскипятить объём $V = 1,5\text{ л}$ воды, имеющей температуру $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, за время $\tau = 20\text{ мин}$. Найдите КПД чайника.

Задачи трудные

- Г1.** Зимой река Нева покрывается льдом, толщина слоя которого около 60 см. Сколько вагонов угля понадобится для того, чтобы растопить этот лёд? Принять среднюю ширину реки равной 300 м, длину –

65 км. Вагон вмещает 50 т угля; $q = 2,7 \cdot 10^7$ Дж/кг. Откуда поступает тепло, когда лёд тает в естественных условиях?

- Г2. Ученикам предложили опытным путем определить величину удельной теплоты сгорания спирта и выдали им следующее оборудование: спиртовку со спиртом, весы с разновесом, мензурку, калориметр, колбу с водой и термометр. Можно ли с помощью указанных приборов выполнить задание? Каким образом? Почему можно лишь оценить, а не определить точно величину удельной теплоты сгорания в таком опыте? Меньшее или большее по сравнению с табличным получится в опыте значение указанной величины?
- Г3. Ученики провели опыт для оценки величины удельной теплоты сгорания спирта (см. задачу Г2). Какое значение величины они получили, если масса спиртовки до начала опыта была равна 155 г, после опыта 153 г, в алюминиевом калориметре массой 50 г было 100 г воды, и она в процессе опыта нагрелась до 80°C . Можно ли по результатам этого опыта найти КПД спиртовки? Каким образом? Найдите его. Начальная температура воды $t_1 = 0^\circ\text{C}$.
- Г4. Алюминиевый чайник массой 400 г, в котором находится 2,0 кг воды при 10°C , помещают на газовую горелку с КПД 40%. Какова мощность горелки, если через 10 мин вода закипела, причем 20 г воды выкипело?
- Г5. Какое количество теплоты потребуется для того, чтобы получить 10 л дистиллированной воды, если первоначально в перегонном аппарате находилось 15 л воды при температуре 20°C ? Сколько газа было при этом израсходовано, если КПД газовой горелки равен 30 %?
- Г6. Сколько потребуется древесного угля, чтобы расплавить и превратить в пар 2,0 кг льда при нормальном давлении, если начальная температура его -10°C , а КПД установки 12,5 %?
- Г7. Алюминиевый чайник массой 1,2 кг содержит 2,0 л воды при 15°C . При нагревании чайника с водой на примусе с КПД 50% сгорело 55 г керосина, причем вода в чайнике закипела, и часть её испарилась. Сколько воды испарилось?
- Г8. Девочка налила в чайник 3,0 л воды, начальная температура которой 20°C , и поставила его на газовую горелку. Через некоторое время она обнаружила, что вода в чайнике уже кипит, причем треть воды выкипела. Во сколько раз израсходованное количество теплоты больше того, что необходимо было для доведения воды до кипения? Сколько газа было израсходовано напрасно? (Считать, что всё тепло, выделяющееся при сгорании газа, пошло на нагревание и испарение воды.)

- Г9. Двигатель расходует 25 кг бензина в час и охлаждается водой, разность температур которой при входе в охлаждающее устройство и выходе из него $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить секундный расход воды, если на её нагревание затрачивается 30% энергии, выделившейся при сгорании бензина.
- Г8. На газовой плите за 15 мин вскипятили в чайнике воду. Сколько газа сгорает за 1,0 с, если в чайнике находилось 3,0 л воды при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$? Теплоёмкостью чайника и другими потерями тепла пренебречь.

Задачи очень трудные

- Д1. Для приближенного определения удельной теплоты парообразования воды ученик проделал следующий опыт. На электроплитке он нагрел воду, причем оказалось, что на нагревание её от 10 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ потребовалось 18 мин, а для обращения $0,20$ её массы в пар – 23 мин. Какова удельная теплота парообразования воды по данным опыта?
- Д2. Тигель, содержащий некоторую массу олова, нагревается электрическим током. Выделяемое в единицу времени количество теплоты постоянно. За время $\tau_0 = 10$ мин температура олова повышается от $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Спустя еще время $\tau = 83$ мин олово полностью расплавилось. Найти удельную теплоёмкость c олова. Удельная теплота плавления олова $58,5\text{ кДж/кг}$, его температура плавления $t_{\text{пл}} = 232\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплоёмкостью тигля и потерями тепла пренебречь.
- Д3. Колбу с 600 г воды при 10°C нагревают на спиртовке с КПД 35%. Через какое время вода закипит, и какая масса воды при кипении будет обращаться в пар за каждую секунду, если за 1,0 мин сгорает 2,0 г спирта? Теплоёмкость колбы 100 Дж/град .
- Д4. В стеклянный сосуд, имеющий массу $m_c = 120\text{ г}$ и температуру $t_c = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, налили горячую воду, масса которой $m_v = 200\text{ г}$ и температура $t_v = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Спустя время $\tau = 5,0$ мин температура сосуда с водой стала равной $\theta = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теряемое в единицу времени количество теплоты постоянно. Какое количество теплоты терялось в единицу времени?
- Удельные теплоёмкости: стекла $c_c = 840\text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$ и воды $c_v = 4,2\text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$.
- Д5. Кастрюлю, в которую налит 1,0 л воды, никак не удастся довести до кипения при помощи нагревателя мощностью 100 Вт . Определить, за

какое время вода остынет на 1°C , если отключить нагреватель. Считать, что КПД нагревателя равен 1.

- Д6. В небольшой чайник налита доверху теплая вода ($t_1 = 30^{\circ}\text{C}$). Чайник остывает на 1°C за время $\tau = 5$ мин. Для того чтобы чайник не остыл, в него капают горячую воду ($t_2 = 45^{\circ}\text{C}$). Масса одной капли $m_k = 0,2$ г. Сколько капель в минуту должно капать в чайник, чтобы температура поддерживалась равной 30°C ? Насколько подогреется вода за одну минуту, если начать капать вдвое чаще? Считать, что температура воды в чайнике выравнивается очень быстро. Лишняя вода выливается из носика. В чайник входит 0,3 л воды. Температура окружающего воздуха $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$.
-

8. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Теплопроводность можно наблюдать на следующем опыте. Закрепим один конец толстой медной проволоки в штативе, а к самой проволоке прикрепим воском несколько гвоздиков (рис. 8.1).

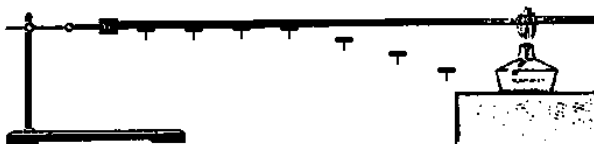


Рис. 8.1

Начнем нагревать свободный конец проволоки пламенем спиртовки. Через некоторое время гвоздики один за другим упадут, то есть тепло, полученное свободным концом проволоки от пламени спиртовки, «прошло» вдоль проволоки. В результате этого проволока нагрелась, и воск, которым гвоздики прикреплялись к проволоке, растаял.

Каков же в данном случае «механизм» передачи тепла?

Молекулы меди, оказавшиеся в пламени спиртовки, начали быстрее колебаться около своих положений равновесия и активно «толкать в бок» своих менее энергичных «соседей», отдавая им часть полученной энергии. А те по цепочке – своих соседей и т.д. В результате энергия стала распространяться вдоль проволоки. Заметим, что сами молекулы при этом остались на своих местах – они лишь увеличили размах колебаний.

У различных веществ различные «способности» проводить тепло: у одних лучше, у других – хуже. В этом легко убедиться, например, с помощью опыта, показанного на рис. 8.2. Видно, что сталь явно уступает меди.

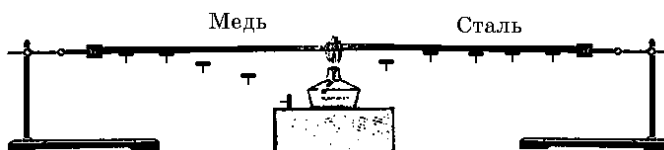


Рис. 8.2

Читатель: А какой величиной измеряют теплопроводность материала?

Автор: Немного терпения. Сначала введем еще одну новую величину: *тепловой поток*.

Тепловым потоком (Φ) называется величина, равная отношению количества теплоты, переносимого через данную поверхность ($Q_{\text{пер}}$), ко времени (τ), в течение которого происходил перенос тепла:

$$\Phi = \frac{\text{КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ, ПЕРЕНОСИМОЕ ЧЕРЕЗ ДАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ}}{\text{ВРЕМЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА}} \quad \text{или} \quad \Phi = \frac{Q_{\text{пер}}}{\tau}.$$

Единица измерения теплового потока:

$$[\Phi] = \frac{[Q]}{[\tau]} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Физический смысл теплового потока очевиден: это количество теплоты, переносимое через данную поверхность в единицу времени.

Читатель: Я не совсем понял, что это за «данная поверхность»?

Автор: Если мы не укажем, *через какую конкретно поверхность* переносится тепло, то будет просто непонятно, о чем идет речь. Поэтому, говоря о потоке тепла, надо всегда четко указывать поверхность, через которую это тепло «течет». Например, при расчете потока тепла по проволоке, нагреваемой с одного конца, в качестве «данной поверхности» удобно взять поперечное сечение проволоки (рис. 8.3). В случае расчета теплового потока через стену дома разумно взять плоскость (рис. 8.4). Вообще, выбор «данной поверхности» определяется условиями конкретной задачи.

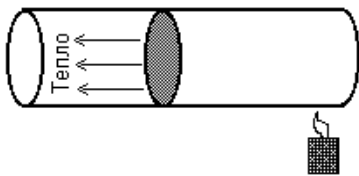


Рис. 8.3

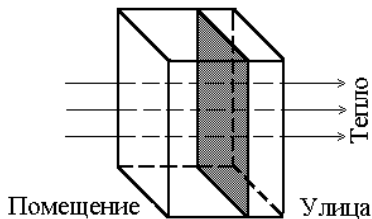


Рис. 8.4

От чего зависит тепловой поток?

Возьмем бесконечную плоскую пластину толщиной d , изготовленную из определенного материала...

Читатель: А почему бесконечную? Бесконечных пластин не бывает.

Автор: Говоря «бесконечную», я имел в виду настолько большую, что ее длину и ширину можно считать много большими толщины. В этом случае утечкой тепла через боковые грани пластины можно пренебречь, то есть можно считать, что все тепло, вошедшее в пластину с одной стороны, полностью выйдет с другой стороны. Тогда формула для теплового потока достаточно простая.

Будем поддерживать по обе стороны от нашей пластины постоянные температуры $t_{\text{гор}}$ и $t_{\text{хол}}$ ($t_{\text{гор}} > t_{\text{хол}}$).

Заметим, что для того, чтобы температура краев пластины не менялась со временем, к «горячей» стороне надо все время подводить тепло (например, с помощью газовой горелки), а от «холодной» тепло нужно отводить (например, с помощью холодной проточной воды). По закону теплообмена тепловая энергия будет перетекать от «горячей» стороны пластины к «холодной».

Мысленно рассечем нашу пластину плоскостью, параллельной ее основаниям, и на этой плоскости выделим площадку площадью S (рис. 8.5). Пусть эта площадка и будет нашей «данной поверхностью», через которую мы хотим найти тепловой поток.

Экспериментально установлено, что в этом случае величина теплового потока равна:

$$\Phi = \alpha S \frac{t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}}{d}, \quad (8.1)$$

где греческой буквой α (каппа) обозначен коэффициент теплопро-

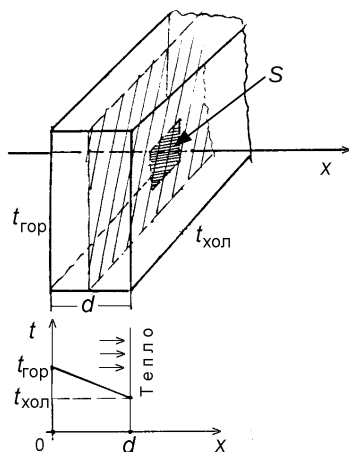


Рис. 8.5

водности материала пластины, зависящий от его физических свойств.

Из формулы (8.1) видно, что тепловой поток тем больше, чем больше площадь S и чем больше разность температур ($t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}$), и тем меньше, чем больше толщина пластины d . Отсюда сами собой напрашиваются два очевидных вывода по строительству жилых домов. Чтобы жилые помещения в холодную погоду напрасно не теряли тепло, надо строить дома из материалов, у которых коэффициент теплопроводности α поменьше, а стены домов делать потолще. (Заметим, между прочим, что призывать строителей к уменьшению площади стен S , то есть к строительству *тесных* квартир, как-то неудобно, а требовать уменьшения разности температур и вовсе глупо: температуру на улице ($t_{\text{хол}}$) строители повышать пока не умеют, а понижать температуру в квартирах ($t_{\text{гор}}$) – это уж извините!)

Единица измерения коэффициента теплопроводности: из формулы (8.1)

$$\alpha = \frac{\Phi d}{S(t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}})},$$

$$[\alpha] = \frac{[\Phi][d]}{[S][t]} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}.$$

Итак, $[\alpha] = \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$.

Физический смысл α . Положим в формуле (8.1):

$$S = 1 \text{ м}^2, \quad d = 1 \text{ м}, \quad t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}} = 1^\circ\text{C}.$$

Тогда

$$\Phi = \alpha \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot \frac{1^\circ\text{C}}{1 \text{ м}},$$

то есть коэффициент теплопроводности материала численно равен тепловому потоку через каждый квадратный метр бесконечной плоской пластины из данного материала толщиной 1 м при разности температур на краях пластины 1°C .

В таблице 8.1 приведены значения коэффициентов теплопроводности для некоторых материалов.

Т а б л и ц а 8.1

**Коэффициенты теплопроводности при 20 °С
и нормальном атмосферном давлении**

Материал	α , Вт/(м·град)	Материал	α , Вт/(м·град)
Серебро (Ag)	418	Кирпич	
Медь (Cu)	385	Стекло	1,25
Золото (Au)	313	Вода (H ₂ O)	0,85
Алюминий (Al)	210	Дерево сухое	0,63
Латунь	110	Пенобетон	0,347
Чугун	62	Шлак котельный сухой	0,28
Железо (Fe)	60	Бумага сухая	0,23
Сталь	45	Водород (H ₂), газ	0,20
Свинец (Pb)	34	Пенопласт	0,18
Ртуть (Hg)	29	Пробковые плиты	0,043
Гранит	2,2	Воздух	0,041
Железобетон	1,54		0,025

Ощущение тепла и холода человеком

Мы знаем из опыта, что если на улице 20 °С, то это довольно тепло. Но если мы отважимся искупаться в реке при температуре воды 20 °С, то нам будет весьма прохладно. Казалось бы, почему? Ведь если температуры одинаковы и ощущения вроде бы должны быть одинаковы...

Оказывается, нет! Человеческое тело реагирует *не* на температуру окружающей среды, а на скорость подвода (или отвода) тепла, то есть на тепловой поток через поверхность тела. Поскольку коэффициент теплопроводности воздуха достаточно мал и равен $\alpha_{\text{возд}} = 0,025$ Вт/(м·град), то при разности температур между человеческим телом и воздухом $\Delta t = 36 - 20 = 16$ °С поток тепла от тела также невелик. Коэффициент теплопроводности воды $\alpha_{\text{воды}} = 0,63$ Вт/(м·град). Это, конечно, не так много, но в 25 раз больше, чем у воздуха. Поэтому, входя в воду, мы чувствуем, что отток тепла от нашего тела резко возрастает.

Читатель: Значит, если бы температура воды была бы равна температуре человеческого тела, мы бы не ощущали никакого холода?

Автор: Совершенно верно. Поэтому когда хотят принять ванну, температуру воды в ней стараются сделать равной температуре собственного тела: иначе будет либо жарко, либо холодно.

Примеры решения задач

Задача 8.1. *Утечка тепла сквозь стену.* Стена дома сделана из железобетона и имеет толщину $d = 0,50$ м. Площадь стены $S = 10$ м². Определить тепловой поток из помещения наружу, если температура воздуха в помещении $t_{\text{гор}} = 20$ °С, а на улице $t_{\text{хол}} = 0$ °С. Какую массу газа нужно сжечь на газовой горелке с КПД, равным 100%, чтобы компенсировать потери тепла за сутки?

$d = 0,50$ м
 $S = 10$ м²
 $t_{\text{гор}} = 20$ °С
 $t_{\text{хол}} = 0$ °С
 $\eta = 100\% = 1$
 $\tau = 24$ ч
 $\Phi = ?$ $m_r = ?$

Решение. Коэффициент теплопроводности железобетона (по табл. 8.1): $\alpha = 1,54$ Вт/(м·град). Тепловой поток согласно формуле (8.1)

$$\Phi = \alpha S \frac{t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}}{d}.$$

Проверим размерность:

$$[\Phi] = [\alpha] \frac{[S][t]}{[d]} = \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \cancel{\text{град}}} \cdot \frac{\text{м}^2 \cdot \cancel{\text{град}}}{\cancel{\text{м}}} = \text{Вт}.$$

Подставим числовые значения:

$$\begin{aligned} \Phi &= \alpha S \frac{t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}}{d} = 1,54 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град}) \cdot 10 \text{ м}^2 \cdot \frac{(20 - 0)^\circ\text{С}}{0,50 \text{ м}} = \\ &= 616 \text{ Вт} \approx 0,62 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Заметим, что если мы включим в помещении электронагреватель тепловой мощностью 0,62 кВт, то он полностью компенсирует потери тепла.

Теперь определим массу газа, сжигание которой позволит сохранить постоянной температуру в помещении.

За время $\tau = 24$ ч = 24·3600 с = 86400 с уйдет из помещения сквозь стену количество теплоты

$$Q = \Phi \tau. \quad (1)$$

Чтобы скомпенсировать потери тепла, необходимо, чтобы от сгорания газа выделилось такое же количество теплоты (поскольку $\eta = 100\%$, то все полученное от сгорания тепло идет только на нагревание воздуха в помещении):

$$Q = q m_r, \quad (2)$$

где $q = 44 \text{ МДж/кг} = 4,4 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$ – теплотворность газа (по табл. 7.1), а m_r – искомая масса газа.

Приравнявая правые части равенств (1) и (2), получим:

$$\Phi \tau = q m_r, \quad m_r = \frac{\Phi \tau}{q}.$$

$$[m_r] = \frac{[\Phi][\tau]}{[q]} = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{Дж/кг}} = \frac{\text{Дж/с} \cdot \text{с}}{\text{Дж/кг}} = \text{Дж} : \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \text{кг}.$$

Подставим численные значения:

$$m_r = \frac{\Phi \tau}{q} = \frac{0,62 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 86400 \text{ с}}{4,4 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}} = 1,217 \text{ кг} \approx 1,2 \text{ кг}.$$

$$\text{Ответ: } \Phi = \alpha S \frac{t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}}{d} \approx 0,62 \text{ кВт}; \quad m_r = \frac{\Phi \tau}{q} \approx 1,2 \text{ кг}.$$

Автор: Как Вы думаете, можно ли вскипятить воду в бумажном стаканчике на газовой плите?

Читатель: Я думаю – нет, так как бумага загорится сразу же, как только ее коснется пламя газовой горелки.

Автор: А как Вы думаете, *почему* загорится бумага: потому что ее коснулось пламя или потому что она в этом пламени нагрелась до определенной температуры – температуры возгорания?

Читатель: Я думаю, что дело в температуре.

Автор: Правильно. Значит, для того чтобы ответить на вопрос, можно или нельзя вскипятить воду в бумажном стаканчике на газовой плите, надо выяснить, достигнет ли температура бумаги, из которой сделан стаканчик, температуры возгорания. Давайте рассмотрим конкретную задачу.

Задача 8.2. *Бумажный стаканчик на газовой плите.* Бумажный стаканчик, площадь дна которого $S = 50 \text{ см}^2$, наполнили водой и поставили на маленький огонь на газовой плите. Определить тем-

пературу наружной поверхности дна бумажного стаканчика $t_{\text{гор}}$, если температура воды в стаканчике $t_{\text{хол}} = 100^\circ\text{C}$. Толщина стаканчика $d = 0,40$ мм. Считать, что теплообмен происходит только через дно стаканчика. Тепловой поток через дно равен $\Phi = 100$ Вт.

$S = 50 \text{ см}^2 =$ $= 50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ $t_{\text{хол}} = 100^\circ\text{C}$ $d = 0,40 \text{ мм}$ $\Phi = 100 \text{ Вт}$ $t_{\text{гор}} = ?$	Решение. Коэффициент теплопроводности бумаги $\alpha = 0,20 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ (по табл. 8.1). Так как температура воды $t_{\text{хол}} = 100^\circ\text{C}$, то температуру внутренней поверхности дна стаканчика будем также считать равной 100°C. Согласно формуле $(8.1) \quad \Phi = \alpha \frac{t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}}{d} S.$
---	--

В этом уравнении нам известны все величины, кроме искомой величины $t_{\text{гор}}$. Найдем ее:

$$\Phi d = \alpha (t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) S,$$

$$t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}} = \Phi d / \alpha S,$$

$$t_{\text{гор}} = t_{\text{хол}} + \Phi d / \alpha S.$$

Проверим размерность:

$$\begin{aligned} [t_{\text{гор}}] &= [t_{\text{хол}}] + [\Phi][d] / [\alpha][S] = \text{град} + \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \cdot \text{м}^2} = \\ &= \text{град} + \frac{\cancel{\text{Вт}} \cdot \cancel{\text{м}} \cdot \cancel{\text{м}} \cdot \text{град}}{\cancel{\text{Вт}} \cdot \cancel{\text{м}}^2} = \text{град}. \end{aligned}$$

Подставим численные значения:

$$t_{\text{гор}} = 100^\circ\text{C} + \frac{100 \text{ Вт} \cdot 0,40 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{0,20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)} \cdot 50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 140^\circ\text{C}.$$

Бумага же загорается при температуре около 300°C . Значит, в условиях данной задачи можно вскипятить воду в бумажном стаканчике! Не верите? Проверьте экспериментально.

Ответ: $t_{\text{гор}} = t_{\text{хол}} + \Phi d / \alpha S = 140^\circ\text{C}.$

Задача 8.3. Двойная стенка (или много ли проку от пенопласта?). Стена дома площадью $S = 10 \text{ м}^2$ состоит из слоя кирпича толщиной $d_1 = 50$ см и утеплена изнутри слоем пенопласта толщиной $d_2 = 10$ см. Температура воздуха в помещении $t_{\text{гор}} = 20^\circ\text{C}$, на

улице $t_{\text{хол}} = 0^\circ\text{C}$. Определить: 1) температуру в месте соприкосновения кирпичной стенки со слоем пенопласта; 2) тепловой поток из помещения наружу; 3) массу каменного угля, которую надо сжечь за сутки в печи с КПД $\eta = 100\%$, чтобы поддерживать в комнате постоянную температуру.

$$S = 10 \text{ м}^2$$

$$d_1 = 50 \text{ см} = 0,50 \text{ м}$$

$$d_2 = 10 \text{ см} = 0,10 \text{ м}$$

$$t_{\text{хол}} = 0^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{гор}} = 20^\circ\text{C}$$

$$\eta = 100\% = 1$$

$$t_x = ? \quad \Phi = ? \quad m_y = ?$$

Решение. В табл. 8.1 находим коэффициенты теплопроводности кирпича и пенопласта:

$$\alpha_{\text{к}} = 1,25 \text{ Вт/(м·град)},$$

$$\alpha_{\text{п}} = 0,043 \text{ Вт/(м·град)}.$$

В табл. 7.1 находим теплотворность каменного угля:

$$q = 27 \text{ МДж/кг} = 2,7 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}.$$

Сделаем чертеж (рис. 8.6). Пусть ось x направлена перпендикулярно плоскости стены из помещения наружу.

Автор: Как, по вашему мнению, изменяется величина теплового потока в зависимости от координаты x : возрастает или убывает?

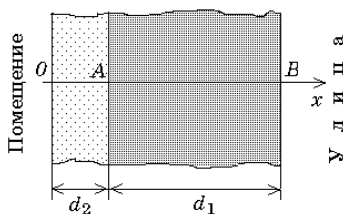


Рис. 8.6

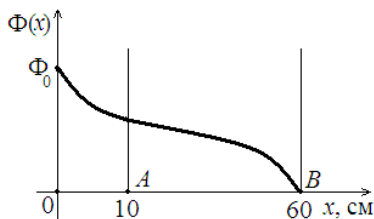


Рис. 8.7

Читатель: Я думаю, что тепловой поток постепенно убывает: в точке 0 он наибольший, а в точке B равен нулю. Примерный график $\Phi(x)$ изображен на рис. 8.7.

Автор: Значит, из помещения в пенопласт за некоторое время τ «входит» количество теплоты $Q = \Phi_0 \tau$. А наружу из кирпичной стены *ничего не «выходит»!* Значит, все тепло остается в стене. Стало быть, стена должна все время нагреваться, а потом и плавиться. Хотя до плавления дело вряд ли дойдет: просто будет пожар и все! И заметьте: без малейших нарушений правил пожарной безопасности!

Читатель: Да, что-то здесь не так... Но ведь и возрастая тепловой поток тоже не может: это означало бы, что стена постоянно охлаждается...

Автор: Вы совершенно правы. Значит, остается единственный вариант...

Читатель: Тепловой поток в любой точке x постоянен!

Автор: Что полностью соответствует закону сохранения энергии: сколько тепла в стену вошло, столько и вышло, так как температура, а значит, и внутренняя энергия стены со временем не меняется. График зависимости теплового потока от координаты x $\Phi(x)$ имеет вид, показанный на рис. 8.8.

Теперь вычислим температуру t_x в точке A – на границе между пенопластом и кирпичом. Запишем с помощью формулы (8.1) значение теплового потока в пенопласте и кирпичной кладке:

$$\Phi_{\text{п}} = \alpha_{\text{п}} S \frac{t_{\text{гор}} - t_x}{d_2}; \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} S \frac{t_x - t_{\text{хол}}}{d_1}. \quad (2)$$

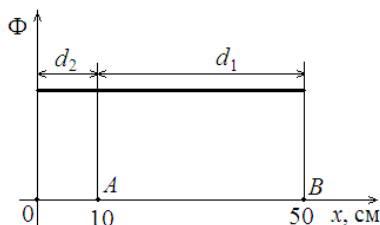


Рис. 8.8

Поскольку в любых точках x потоки одинаковы, приравняем правые части этих уравнений:

$$\alpha_{\text{п}} S \frac{t_{\text{гор}} - t_x}{d_2} = \alpha_{\text{к}} S \frac{t_x - t_{\text{хол}}}{d_1}.$$

Теперь решим данное уравнение относительно величины t_x :

$$\begin{aligned} \nearrow (\alpha_{\text{п}}/d_2)t_{\text{гор}} - (\alpha_{\text{п}}/d_2)t_x &= (\alpha_{\text{к}}/d_1)t_x - (\alpha_{\text{к}}/d_1)t_{\text{хол}} \searrow \\ (\alpha_{\text{к}}/d_1)t_{\text{хол}} + (\alpha_{\text{п}}/d_2)t_{\text{гор}} &= t_x[(\alpha_{\text{к}}/d_1) + (\alpha_{\text{п}}/d_2)]; \end{aligned}$$

$$t_x = \frac{(\alpha_{\text{к}}/d_1)t_{\text{хол}} + (\alpha_{\text{п}}/d_2)t_{\text{гор}}}{(\alpha_{\text{к}}/d_1) + (\alpha_{\text{п}}/d_2)}.$$

$$[t_x] = \frac{(\alpha/[d]) \cdot [t]}{[\alpha]/[d]} = [t] = \text{град.}$$

Подставим численные значения:

$$t_x = \frac{\frac{1,25 \text{ Вт/(м·град)}}{0,50 \text{ м}} \cdot 0^\circ \text{C} + \frac{0,043 \text{ Вт/(м·град)}}{0,10 \text{ м}} \cdot 20^\circ \text{C}}{\frac{1,25 \text{ Вт/(м·град)}}{0,50 \text{ м}} + \frac{0,43 \text{ Вт/(м·град)}}{0,10 \text{ м}}} =$$

$$= 2,935^\circ \text{C} \approx 2,9^\circ \text{C}.$$

Теперь, подставив значение t_x в уравнение (8.1), найдем значение Φ :

$$\Phi = \alpha_{\text{п}} S \frac{t_{\text{гор}} - t_x}{d_2} = 0,043 \text{ Вт/(м·град)} \cdot 10 \text{ м}^2 \cdot \frac{(20 - 2,9)^\circ \text{C}}{0,10 \text{ м}} =$$

$$= 73,4 \text{ Вт} \approx 73 \text{ Вт}.$$

Заметьте, что по сравнению с железобетонной стеной такой же толщины (см. задачу 8.1) наша двойная стена снизила потери тепла почти в 10 раз! И все благодаря пенопласту.

Найдем массу каменного угля, который надо сжечь, чтобы компенсировать потери тепла, аналогично тому, как мы это делали в задаче 8.1: $qm_y = \Phi \tau$, где $\tau = 86400$ с, тогда

$$m_y = \frac{\Phi \tau}{q} = \frac{73 \text{ Вт} \cdot 86400 \text{ с}}{2,7 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}} = 0,2336 \text{ кг} \approx 0,23 \text{ кг}.$$

$$\text{Ответ: } t_x = \frac{(\alpha_{\text{к}}/d_1)t_{\text{хол}} + (\alpha_{\text{п}}/d_2)t_{\text{гор}}}{(\alpha_{\text{к}}/d_1) + (\alpha_{\text{п}}/d_2)} \approx 2,9^\circ \text{C},$$

$$\Phi = \alpha_{\text{п}} S \frac{t_{\text{гор}} - t_x}{d_2} \approx 73 \text{ Вт}, \quad m_y = \frac{\Phi \tau}{q} \approx 0,23 \text{ кг}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- A1.** Зачем канализационные и водопроводные трубы зарывают в землю на значительную глубину?
- A2.** Зачем на зиму приствольные круги земли у плодовых деревьев покрывают слоями торфа, навоза или древесных опилок?

- А3.** Почему снегозадержание, проводимое на полях в засушливых областях, не только хорошее средство накопления влаги в почве, но и средство борьбы с вымерзанием озимых посевов?
- А4.** В комнату внесли два куска льда. Один оставили открытым, а другой укутали ватой. Какой из кусков быстрее растает? Почему?
- А5.** Зачем в пустынях местные жители во время сильной жары носят шапки-папахи и ватные халаты?
- А6.** Какой дом будет теплее: деревянный или кирпичный, если толщина стен одинаковая?
- А7.** Какой из сосудов быстрее примет температуру налитой в него жидкости: медный или стеклянный?
- А8.** Почему алюминиевая кружка с чаем обжигает губы, а фарфоровая нет?
- А9.** Внесите в комнату кусок кирпича и гранита. Проверьте на ощупь, какой кусок будет казаться теплее. Какой из этих строительных материалов обладает лучшей теплопроводностью?

Задачи легкие

Б1. Почему в деревне на зиму ставят двойные рамы?

Б2. Мальчик зарисовал воробья один раз летом, а второй раз – зимой (рис. 8.9). Какой рисунок сделан зимой?

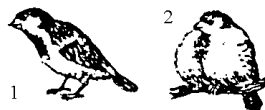


Рис. 8.9

Б3. Почему шерстяная одежда лучше, чем хлопчатобумажная, сохраняет тепло?

Б4. В какой обуви больше мерзнут ноги зимой: в просторной или тесной? Почему?

Б5. Почему все пористые строительные материалы (простой кирпич, пеностекло, пенистый бетон и др.) обладают лучшими теплоизоляционными свойствами, чем плотные стройматериалы?

Б6. Снимая с плиты горячую кастрюлю, хозяйки, чтобы не обжечься, используют матерчатые варежки. Возрастает или уменьшится вероятность ожога, если варежка окажется мокрой?

Б7. Зачем, прежде чем налить в стакан кипятка, в него кладут чайную ложку?

Б8. Зимой на улице металл кажется на ощупь холоднее дерева. Какими будут казаться на ощупь дерево и металл в тридцатиградусную жару? Почему?

Б9. При какой температуре и металл, и дерево будут казаться одинаково нагретыми?

Б10. Почему пальцы рук на сильном морозе примерзают к металлическим ручкам и не примерзают к деревянным?

Б11. На рис. 8.10 изображен график охлаждения воды после кипения.

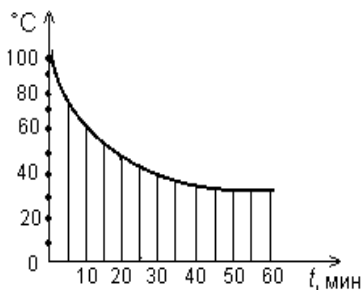


Рис. 8.10

Запишите в тетради примерные ответы на вопросы:

а) Какую температуру имела вода через 25 мин после начала наблюдения?

б) Через сколько минут после начала опыта вода остыла до 50°C ?

в) На сколько градусов остыла вода в первые 10 мин?

г) Когда вода остывала быстрее: в начале или в конце опыта? Почему?

Б12. На рис. 8.11 изображен график нагревания воды по данным, полученным учащимися. Запишите в тетради примерные ответы на во-

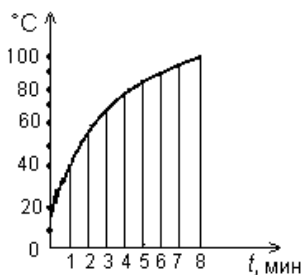


Рис. 8.11

просы:

а) При какой температуре воды учащиеся стали отсчитывать время нагревания?

б) На сколько градусов нагрелась вода за первые 4 минуты?

в) На сколько градусов возросла температура воды за последние 2 минуты?

г) Когда вода нагревалась быстрее: в начале или в конце опыта? Почему?

д) Какую температуру имела вода в конце четвертой минуты?

е) Через сколько минут после начала опыта вода нагрелась до 60°C ?

Б13. Вода нагревается на электроплитке постоянной мощности. Одинаковое ли время потребуется для ее нагревания от 20 до 30°C и от 90 до 100°C ?

Б14. У вас есть два кипяtilьника: один мощностью 1 кВт , другой 300 Вт . Надо вскипятить $0,5\text{ л}$ воды. Каким кипяtilьником надо воспользоваться, чтобы затраты электроэнергии были минимальными?

Б15. Найдите тепловой поток через кирпичную стенку площадью $S = 10\text{ м}^2$ и толщиной $d = 25\text{ см}$, если разность температур по обе стороны стенки равна $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$.

- Б16.** Найдите тепловой поток через деревянную стенку площадью $S = 10 \text{ м}^2$ и толщиной $d = 20 \text{ см}$, если температура в доме $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура снаружи $t_2 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задачи средней трудности

- В1.** Почему калориметры делают из металла, а не из стекла?
- В2.** Почему опытные хозяйки предпочитают жарить на чугунных сковородах, а не на алюминиевых?
- В3.** Почему пища не пригорает, если для ее приготовления используют посуду со специальным тефлоновым покрытием?
- В4.** Половина ледяной поверхности пруда была покрыта с начала зимы толстым слоем снега, а другая половина расчищена для катания на коньках. На какой половине толщина льда больше?
- В5.** Как известно, для кипения жидкости необходимо все время передавать некоторое количество теплоты. Почему же вода в чайнике продолжает кипеть еще несколько секунд после того, как его сняли с плиты?
- В6.** Как вы думаете, где выше температура накаливания спирали электроплитки или электрокипятильника: у ее поверхности или в центре нити? Ответ обоснуйте.
- В7.** В процессе закаливания в воде нагретых до высокой температуры деталей вокруг них часто образуется слой пара, и охлаждение деталей замедляется. Почему?
- В8.** Почему капли воды на раскаленной сковороде «живут» дольше, чем на просто горячей?
- В9.** Зачем поверхность цилиндров двигателей внутреннего сгорания и радиаторов парового отопления делают ребристой? Где еще в технике применяют такие поверхности?
- В10.** Почему в холодную погоду многие животные спят, свернувшись в клубок?
- В11.** Сильная струя воздуха, идущая от вентилятора, создает прохладу. Можно ли этой струей сохранить мороженое в твердом виде?
- В12.** Найти тепловой поток через слой пенопласта толщиной $d = 10 \text{ см}$ и площадью $S = 10 \text{ м}^2$, если разность температур по обе стороны от слоя пенопласта равна $\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Какую массу природного газа следует сжечь на газовой горелке за сутки, чтобы компенсировать эти потери тепла? КПД горелки считать равным 1.

- В13.** Через пробковую плиту площадью $S = 8,0 \text{ м}^2$ при разности температур по обе стороны плиты $\Delta t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ тепловой поток составляет $\Phi = 98,4 \text{ Вт}$. Определить толщину плиты.
- В14.** Тепловой поток через слой сухого котельного шлака площадью $S = 10 \text{ м}^2$ и толщиной $d = 20 \text{ см}$ равен $\Phi = 460 \text{ Вт}$. Какова разность температур по обе стороны слоя?
- В15.** Через стену площадью $S = 5,0 \text{ м}^2$ и толщиной $d = 0,50 \text{ м}$ тепловой поток равен $\Phi = 308 \text{ Вт}$, а разность температур по обе стороны стены равна $\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти коэффициент теплопроводности материала стены.
- В16.** Тепловой поток через стену из пенобетона толщиной $d = 0,30 \text{ м}$ равен $\Phi = 112 \text{ Вт}$. Разность температур по обе стороны стены равна $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова площадь стены?
- В17.** Какую массу керосина необходимо сжечь в примусе за 1 ч (точно), чтобы восполнить потери тепла из комнаты, если тепловой поток через стены, отделяющие комнату от улицы, равен $\Phi = 694 \text{ Вт}$? КПД примуса считать равным 1.
- В18.** Какую массу каменного угля необходимо сжечь в печи за сутки, чтобы поддерживать в помещении постоянную температуру, если через стену, отделяющую помещение от улицы, течет тепловой поток $\Phi = 1,0 \text{ кВт}$? КПД печи $\eta = 30\%$.
- В19.** На электроплитке кипит алюминиевый чайник с водой. Какова температура наружной поверхности дна чайника, если толщина дна $d = 1,0 \text{ мм}$, а площадь $S = 100 \text{ см}^2$, тепловой поток через дно $\Phi = 1000 \text{ Вт}$?
- В20.** На примусе кипятят воду в стеклянном чайнике. Какова температура наружной поверхности дна чайника, если толщина дна $d = 2,0 \text{ мм}$, площадь $S = 50 \text{ см}^2$, тепловой поток через дно $\Phi = 100 \text{ Вт}$?
- В21.** На газовой плите кипит железный чайник с водой. Температура наружной поверхности чайника $t_1 = 101,6 \text{ }^\circ\text{C}$, площадь дна $S = 100 \text{ см}^2$, а тепловой поток через дно $\Phi = 1000 \text{ Вт}$. Какова толщина дна чайника?

Задачи трудные

- Г1.** Сосуд с горячей водой нужно как можно сильнее охладить за 10 мин. Как лучше поступить: сначала положить в воду кусок льда, а потом поставить ее на 10 мин остывать или дать ей остыть в течение 10 мин, а затем положить такую же массу льда?

- Г2. К спутнику, с его теневой стороны, прикреплен термометр. От чего зависят его показания?
- Г3. Известно, что для измерения температуры человека медицинским термометром нужно 5–10 мин, а для того, чтобы сбросить ртуть термометра, когда он вынут, достаточно иногда секунды. Почему это происходит?
- Г4. Если медную или латунную сетку разместить над пламенем газовой горелки, то пламя оказывается как бы срезанным сеткой. Объясните причину этого явления.

Можно зажечь газ над сеткой, пламя снизу гореть не будет. Как объяснить этот факт?

В рудниках, шахтах часто скапливается легко воспламеняющийся и взрывоопасный рудничный газ. Чтобы избежать несчастных случаев, раньше горняки пользовались предохранительными лампами Дэви. Это обыкновенная лампа, пламя которой со всех сторон окружено металлической сеткой. Объясните принцип действия такой лампы. Можно ли зажигать лампу в шахте?

- Г5. Есть два чайника для заварки чая, вмещающие $m_b = 500$ г воды. Один чайник сделан из меди, его масса равна 200 г, другой чайник фарфоровый, его масса равна 300 г. Чай заваривается тем лучше, чем выше температура воды. В каком чайнике лучше заварился бы чай, когда кипяток наливают в чайник, первоначально находящийся при комнатной температуре $t = 20^\circ\text{C}$, если бы наружным охлаждением чайников можно было пренебречь? Что дает предварительное споласкивание чайника кипятком? Какой чайник при этом оказывается выгоднее в действительности при наличии внешнего охлаждения?

Удельная теплоемкость: воды $c_b = 4190$ Дж/(кг·град), меди $c_m = 380$ Дж/(кг·град), фарфора $c_\phi = 830$ Дж/(кг·град).

- Г6. Стена кирпичного дома площадью $S = 10\text{ м}^2$ и толщиной $d_1 = 50$ см изнутри обшита деревом. Какой должна быть толщина деревянной обшивки, чтобы при разности температур $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ внутри и снаружи помещения тепловой поток через стену составлял $\Phi = 300$ Вт? Какой будет при этом температура в месте соприкосновения деревянной обшивки и кирпичной стены? Температура воздуха снаружи $t_1 = 0^\circ\text{C}$.
- Г7. Стена деревянного дома площадью $S = 10\text{ м}^2$ и толщиной $d_1 = 25$ см изнутри обшита слоем теплоизоляционного материала толщиной $d_2 = 5,0$ см. Каков коэффициент теплопроводности этого материала,

если тепловой поток через стену $\Phi = 200$ Вт? Какова температура между слоем теплоизоляционного материала и деревянной стеной? Температура воздуха внутри помещения $t_1 = 20$ °С, снаружи $t_2 = 0$ °С.

Задачи очень трудные

- Д1. Можно ли (а если можно, то как) измерить температуру тела больного медицинским термометром, если в помещении поддерживается температура 42 °С?
- Д2. Для сравнения теплопроводностей различных материалов предлагалось использовать следующий метод. На горячую плиту ставятся два одинаковых цилиндра из исследуемых материалов. На цилиндры кладут по кусочку воска. Где скорее воск начнет таять – тот цилиндр и обладает лучшей теплопроводностью. Верен ли этот метод?
- Д3. Какие термосы выгоднее при одной и той же высоте и вместимости: круглого или квадратного сечения? Подтвердите ответ расчетами.

- Д4. Два цилиндра одинаковых размеров – железный и серебряный – стоят один на другом (рис. 8.12). Верхнее основание железного цилиндра поддерживается при температуре $T_1 = 100$ °С, а нижнее основание серебряного цилиндра поддерживается при температуре $T_3 = 0$ °С. Теплопроводность серебра в 11 раз больше теплопроводности железа: $\kappa_{\text{Ag}} = 11\kappa_{\text{Fe}}$. Чему равняется температура T_2 соприкасающихся оснований, если считать, что теплота через боковые поверхности цилиндров не уходит в окружающую среду?

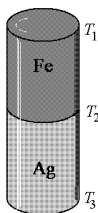


Рис. 8.12

- Д5. Вертикальная длинная кирпичная труба заполнена чугуном. В нижнем конце трубы поддерживается температура $t_1 > t_{\text{пл}}$ ($t_{\text{пл}}$ – температура плавления чугуна), а в верхнем – температура $t_1 < t_{\text{пл}}$. Теплопроводность расплавленного чугуна в k раз больше, чем твердого. Какая часть металла находится в расплавленном состоянии?
- Д6. В дьюаровском сосуде хранится жидкий азот при температуре $t_1 = -195$ °С в количестве 2 л. За сутки испарилась половина этого количества. Определить удельную теплоту испарения азота, если известно, что 40 г льда в том же дьюаре растает в течение 22 ч 30 мин. Скорость подвода тепла внутрь дьюара может считаться пропорциональной разности температур внутри и снаружи дьюара. Температура окружающего воздуха $t = 20$ °С. Плотность жидкого азота при -195 °С равна 800 кг/м^3 .

9. КОНВЕКЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ

Конвекция

Термин «конвекция» происходит от латинского слова *convectio* – перемещение, доставка.

Если в стакан с холодной водой осторожно долить сверху немного кипятка, то довольно длительное время сверху вода будет горячей, а снизу – холодной. Это неудивительно: коэффициент теплопроводности воды мал, поэтому и температура выравнивается медленно. Однако если размешать воду чайной ложкой, очень скоро вода станет одинаково *теплой* по всему объему стакана, то есть процесс теплообмена между горячей и холодной водой при перемешивании резко ускорится.

Заметим, что такое по-житейски нехитрое дело, как перемешивание воды в стакане, по-научному называется ***принудительной конвекцией***.

Нетрудно понять, почему принудительная конвекция ускоряет процесс выравнивания температуры в стакане. Благодаря перемешиванию возрастает число соударений быстрых молекул с медленными, их кинетические энергии быстро выравниваются, и устанавливается общая для всей воды в стакане температура.

Читатель: Раз существует принудительная конвекция, значит, надо полагать, есть еще и добровольная конвекция?

Автор: Да, только не добровольная, а ***естественная***. Как Вы думаете, имеет ли принципиальное значение тот факт, что к чайнику на плите тепло подводится снизу, а не сверху?

Читатель: По-моему, это не принципиально. Важно лишь общее количество теплоты, переданное воде в чайнике.

Автор: Боюсь, что Вы не совсем правы. Если чайник нагревать сверху, то вода на поверхности может закипеть, а на дне – остаться холодной. В правоте моих слов Вы легко можете убедиться экспериментально, проделав опыт, показанный на рис.

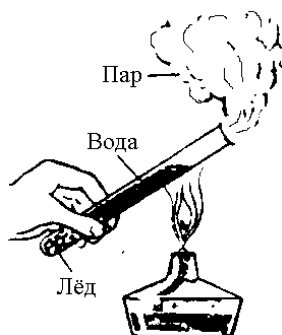


Рис. 9.1

9.1. Если же пробирку, изображенную на этом рисунке, нагревать снизу, то все будет в полном порядке: сначала лед растает, затем *вся* вода нагреется до температуры кипения, а потом опять-таки *вся* вода закипит. В чем же тут дело? В том, что при нагревании жидкости (или газа) *снизу* теплые слои поднимаются вверх, их место занимают холодные слои, которые нагреваются и тоже поднимаются вверх и т.д.

Возникает круговое движение, благодаря которому весь нагреваемый объем жидкости или газа равномерно прогревается. Этот процесс и называется *естественной конвекцией*.

Заметим, что естественная конвекция возникает в комнате при нагревании воздуха батареями парового отопления (рис. 9.2).

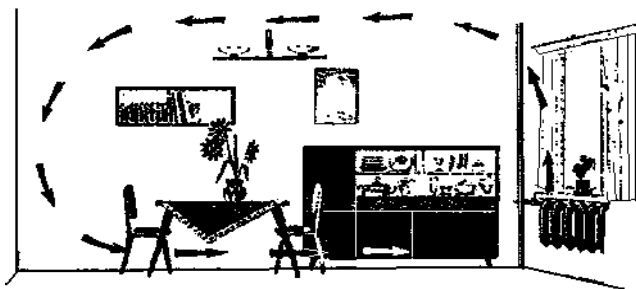


Рис. 9.2

Естественную конвекцию можно наблюдать в следующих несложных опытах.

1. Струи теплого воздуха, поднимающиеся вверх, могут вращать небольшую бумажную вертушку, помещенную над лампой (рис. 9.3)

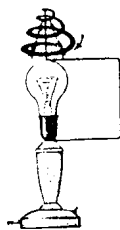


Рис. 9.3

2. Конвекцию в жидкости можно наблюдать, поместив на дно колбы с водой немного марганцевокислого калия (KMnO_4) (рис. 9.4). При нагревании видно, что вода начинает перемещаться по замкнутым ли-

ниям.

Читатель: А почему теплые слои жидкости или газа поднимаются вверх?

Автор: Потому же, почему держатся на плаву корабли и взлетают вверх воздушные шары. Причина – в законе Архимеда. Этот закон, как Вы знаете, гласит: на всякое тело, помещенное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости или газа. Поскольку при нагревании газы (как и жидкости) расширяются, то плотность их уменьшается, и они становятся легче того объема холодного газа, который они вытеснили. В результате выталкивающая (архимедова) сила, действующая на слои теплого газа (или жидкости) со стороны холодных слоев, становится больше, чем их собственный вес, и они поднимаются вверх.

Читатель: А действует ли закон Архимеда в невесомости, например на орбитальных станциях?

Автор: В невесомости вес любого тела равен нулю, и закон Архимеда там не действует. Поэтому в условиях невесомости нет естественной конвекции.

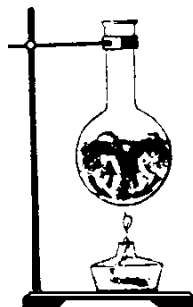


Рис. 9.4

Тяга (зачем нужны трубы?)

Рассмотрим опыт, изображенный на рис. 9.5. Внутри высокого стеклянного сосуда с открытым верхним концом, похожим на печную трубу, находится горящая спиртовка. Рядом с сосудом расположен маленький, но основательно дымящий костерчик в металлической банке. В боковой поверхности стеклянного сосуда (внутри которого спиртовка) сделано небольшое отверстие. Дым от миниатюрного костра вместо того, чтобы расплзаться во все стороны, почему-то *втягивается* в это отверстие и выбрасывается через трубу вверх. Спрашивается: почему?

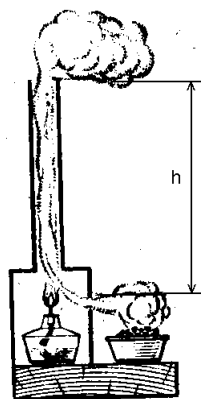


Рис. 9.5

Вспомним, что давление столба жидкости или газа плотностью ρ и высотой h равно:

$$p = \rho gh. \quad (9.1)$$

Плотность воздуха тем меньше, чем воздух горячее, ведь при нагревании воздух расширяется. Значит, давление, оказываемое столбом горячего воздуха (того, что в трубе), будет меньше давления холодного воздуха (того, что снаружи):

$$p_{\text{гор}} = \rho_{\text{гор}} gh < p_{\text{хол}} = \rho_{\text{хол}} gh.$$

Стало быть, давление воздуха снаружи сосуда больше, чем внутри. По этой причине воздух снаружи и *втягивается* (вместе с дымом) в отверстие сосуда, обеспечивая тем самым движение горячего воздуха вверх по трубе. Этим же, кстати, обеспечивается постоянный приток свежего воздуха к пламени спиртовки, обеспечивая ее горение.

Приток свежего воздуха в топку печи называется *тягой*. Поскольку без постоянного притока кислорода горение дров в печи невозможно, то ясно, что без хорошей тяги печь «работать» не будет, поэтому все печи имеют трубы. Заметим, что тяга тем сильнее, чем больше разность давлений в печи и снаружи:

$$\Delta p = p_{\text{снаружи}} - p_{\text{в печи}} = \rho_{\text{хол}} gh - \rho_{\text{гор}} gh. \quad (9.2)$$

Излучение

Всю необходимую для жизни энергию Земля получает от Солнца. Ясно, что способ передачи солнечной энергии не имеет никакого отношения ни к теплопроводности, ни к конвекции: ведь солнечные лучи поступают к нам через безвоздушное пространство. Этот способ теплопередачи называется *излучением*.

О природе этого явления мы подробно поговорим позже, а сейчас отметим лишь его основные свойства.

1. Не только Солнце, но и всякое нагретое тело (раскаленный утюг, нагревшаяся за день почва, человеческое тело) являются источниками излучения.

2. Не все лучи видимы глазом. Лучи, испускаемые не слишком сильно нагретым телом (так называемые тепловые или инфракрасные лучи) невидимы.

3. Лучше поглощают и испускают излучение темные тела, чем светлые (именно поэтому летом люди предпочитают носить одежду светлых тонов).

Теплоприёмник

Излучение удобно наблюдать с помощью специального прибора – теплоприёмника, который представляет собой коробочку, одна сторона которой покрашена в чёрный цвет, а другая отполирована как зеркало. Коробочка с помощью резиновой трубки присоединяется к жидкостному манометру (рис. 9.6). Внутри коробочки находится воздух.

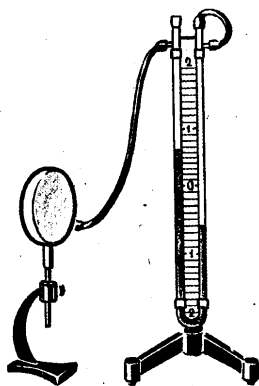


Рис. 9.6

Если рядом с теплоприёмником (сбоку от него) расположить какой-нибудь электронагревательный прибор (электроутюг, электроплитку или уж, на худой конец, просто раскаленный кусок металла) и повернуть к нему коробочку черной стороной, то давление воздуха в коробочке заметно повысится. А это значит, что воздух в коробочке нагрелся, ведь давление воздуха повышается с температурой.

При этом ясно, что ни теплопроводность, ни конвекция обеспечить передачу тепла от горячего предмета воздуху в коробочке не могли. В самом деле, теплопроводность воздуха очень мала, а конвективные потоки воздуха от нагретого тела должны подниматься вверх, а не смещаться вбок. Следовательно, причиной нагрева воздуха в коробочке было излучение. Причем если повернуть коробочку к горячему телу зеркальной стороной, то повышение температуры воздуха в ней будет значительно меньшим. Это доказывает, что лучше всего излучение поглощают черные тела.

Читатель: А чем объяснить «парниковый эффект»? Почему если почву на ночь закрыть стеклянной рамой или полиэтиленовой пленкой, то она не замерзнет ночью?

Автор: Полиэтиленовая пленка так же, как и стекло, обладает способностью пропускать видимые лучи, которыми Солнце нагревает землю днем, и не пропускать тепловые лучи, которые почва, остывая, испускает ночью. В результате получается своеобразная ловушка для тепловой энергии: днем почва энергию получает, а ночью – не отдает. Поэтому почва в парниках остается теплой даже при заморозках.

Термос

Если мы хотим сохранить какое-нибудь тело горячим длительное время (например, пищу) или, наоборот, необходимо какое-то длительное время сохранять его холодным (например, мороженое), то необходимо исключить все виды передачи тепла между этим телом и окружающей средой. Другими словами, необходимо не допустить теплопроводности, конвекции и излучения.

Устройством, позволяющим решить такую задачу, является *термос*.

Термос для жидкости (рис. 9.7) состоит из стеклянного сосуда 3 с двойными стенками. Для того чтобы исключить теплопроводность и конвекцию, в пространстве между стенками выкачан воздух, а чтобы максимально ограничить поглощение излучения, внутренняя поверхность термоса покрыта блестящим металличе-

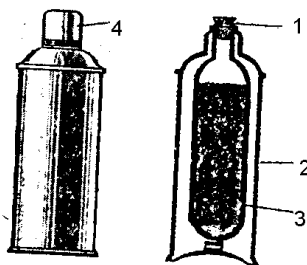


Рис. 9.7

ским слоем, очень плохо поглощающим и испускающим тепловые лучи. Сосуд закрывается пробкой 1, теплопроводность которой также невелика, и помещается (для удобства) в металлический или пластмассовый футляр 2, который сверху имеет закручивающийся колпачок 4. В таком термосе можно сохранить чай горячим часов 8–12.

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- А1.** Почему в холодных помещениях зябнут прежде всего ноги?
- А2.** Почему радиаторы парового отопления располагают внизу под окнами?
- А3.** Почему жидкости и газы нагревают снизу?
- А4.** Чем отличается естественная конвекция от вынужденной?
- А5.** Летом воздух в здании нагревается, получая энергию различными способами: через стены, через открытое окно, в которое входит теплый воздух, через стекло, которое пропускает солнечную энергию. С каким видом теплопередачи мы имеем дело в каждом случае?
- А6.** Какие почвы лучше прогреваются солнечными лучами: черноземные или подзолистые, имеющие более светлую окраску?
- А7.** Почему снег, покрытый сажей или грязью, тает быстрее, чем чистый?
- А8.** Почему холодильники красят преимущественно в белый цвет?

Задачи легкие

- Б1.** Объясните, как и почему происходит перемещение воздуха над нагретой лампой.
- Б2.** Объясните, как происходит нагревание воды в колбе, поставленной на огонь.
- Б3.** Почему форточки для проветривания комнат помещают в верхней части окна?
- Б4.** Почему подвал – самое холодное место в доме?
- Б5.** В промышленных холодильниках воздух охлаждается с помощью труб, по которым течет охлажденная жидкость. Где лучше расположить эти трубы?
- Б6.** Когда скорее остынет чайник с кипятком: когда его поставили на лед или когда лед положили на крышку чайника?
- Б7.** Что остынет быстрее: стакан компота или стакан киселя? Почему?
- Б8.** Почему пламя свечи устанавливается вертикально?
- Б9.** Почему конвекция невозможна в твердых телах?
- Б10.** В каком направлении (вверх или вниз) движется вода в радиаторе при работе двигателя трактора (рис. 9.8)?

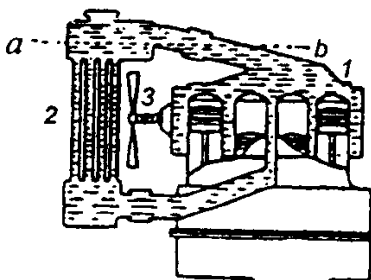


Рис. 9.8:

1 – рубашка двигателя;
2 – радиатор; 3 – трубопроводы

- Б11.** Зачем в верхних и нижних частях корпусов проекционных аппаратов, больших электрических фонарей, киноаппаратов делают отверстия?
- Б12.** Будет ли гореть свеча на борту космического орбитального комплекса?
- Б13.** Почему можно утверждать, что от Солнца к Земле энергия не может передаваться конвекцией и теплопроводностью?
- Б14.** Находясь около костра или открытой печи, мы чувствуем, как нагревается наше тело. Каким способом к нам передается энергия?
- Б15.** Почему лицо человека, сидящего перед открытой топящейся печью, сразу ощущает прохладу, если закрыть дверцу печки?
- Б16.** Зачем оболочку стратостата красят в серебряный цвет?
- Б17.** Зачем в железнодорожных вагонах-ледниках, служащих для перевозки фруктов, мяса, рыбы и других скоропортящихся продуктов, промежутки между двойными стенками заполняются войлоком или несколькими слоями каких-либо пористых веществ, а снаружи вагоны окрашивают в белый или светло-желтый цвет?
- Б18.** Почему тонкая полиэтиленовая пленка или колпак защищает растение от ночного холода?

Задачи средней трудности

- В1.** Чтобы быстрее нагреть кастрюлю с водой, всегда помещают нагреватель внизу (например, кастрюлю ставят на плитку). Желая охладить кастрюлю с водой как можно быстрее до комнатной температуры, хозяйка поставила ее на лед. Правильно ли это?
- В2.** В каком случае кастрюля с горячей водой быстрее остынет: если дать ей плавать по поверхности холодной воды или поставить на дно большого сосуда с водой?
- В3.** Почему летом днем ветер дует с моря к берегу (дневной бриз), а ночью – от суши к морю (ночной бриз)?

- В4.** В каком случае процесс теплообмена произойдет быстрее: если в горячую воду вливать холодную; в холодную наливать горячую той же массы?
- В5.** Возможны ли конвекционные потоки в жидкостях или газах в искусственном спутнике Земли в состоянии невесомости? (Объясните почему.)
- В6.** Почему в печах с высокими трубами тяга больше, чем в печах с низкими трубами?
- В7.** Почему в металлических печных трубах тяга меньше, чем в кирпичных трубах?
- В8.** Приведите примеры, показывающие, что тела с темной поверхностью больше нагреваются излучением, чем со светлой.
- В9.** В каком чайнике – белом или темном – горячая вода дольше сохраняется горячей? В каком чайнике она быстрее остывает?
- В10.** Скафандры, одеваемые космонавтами, обычно окрашены в белый цвет. В то же время некоторые поверхности космических кораблей черные. Чем объяснить выбор цвета?
- В11.** Почему вспаханное поле сильнее нагревается солнечным излучением, чем зеленый луг? Как перемещаются конвекционные потоки воздуха на границе этих участков земли?
- В12.** Объясните назначение стеклянных рам в парниках.

Задачи трудные

- Г1.** Свечу боковой поверхностью прикрепили к стене дома. Зажгли ее. Куда будет стекать стеарин?
- Г2.** Посмотрите на рис. 9.8, где изображена упрощенная схема водяного охлаждения двигателя трактора. Объясните, как осуществляется охлаждение цилиндров двигателя. Что произойдет, если уровень воды в системе охлаждения опустится ниже патрубка верхнего бачка радиатора (уровень $a-b$)?
- Г3.** На подоконнике был оставлен на ночь аквариум с мутной водой. К утру муть оказалась только у той стенки, которая обращена к комнате. В какое время года проведен этот опыт?
- Г4.** Почему тяга в печных трубах зимой больше, чем летом? Ответ поясните.
- Г5.** В каком из трех баков вода под действием солнечных лучей нагреется больше: в открытом, покрытом одним стеклом или покрытом двумя стеклами, между которыми есть воздушный промежуток? Температура воды меньше температуры окружающей среды.

10. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Что такое тепловой двигатель?

Под тепловым двигателем мы понимаем устройство, которое совершает *механическую работу* за счет *внутренней энергии*.

Простейший тепловой двигатель – это обычная пушка: за счет внутренней энергии, которая выделяется при сгорании пороха, пороховые газы толкают снаряд в стволе орудия, совершая над ним механическую работу.

Какие существуют двигатели?

1. Самым древним из тепловых двигателей, допускающих использование в мирных целях, является **паровая поршневая машина** – главный двигатель XIX века.

В настоящее время их уже почти не осталось. Лишь немногие *паровозы* и *пароходы* еще доживают свой век на окраинах цивилизованного мира, поэтому подробно их устройство мы рассматривать не будем. Отметим лишь, что основная идея этих двигателей состоит в том, что горячий водяной *пар* под высоким давлением толкает *поршень*, который приводит в движение соответствующий механизм (например, паровоз).

2. Зато весьма современным и перспективным является **реактивный двигатель**, используемый главным образом в самолетах (как военных, так и гражданских, например, ТУ-154).

Принцип действия реактивного двигателя следующий. Из двигателя с огромной скоростью выбрасывается струя раскаленных газов в направлении, противоположном направлению движения самолета. Эта струя как бы отталкивается от самолета, действуя на него так называемой реактивной силой, которая и обеспечивает движение самолета.

3. Огромное значение в современной технике имеют **паровые турбины**, которые используются в основном на тепловых и атомных электростанциях.

Схема простейшей паровой турбины представлена на рис. 10.1. На вал 5 насажен диск 4, по ободу которого закреплены лопатки 2. Около лопаток расположены сопла 1, в которые поступает предварительно нагретый до высокой температуры (от 200 до 500 °С) водяной пар под высоким давлением (от 15 до 150 атм).

Струи пара, вырывающиеся из сопел, оказывают давление на лопатки и приводят турбину во вращение. При этом пар совершает механическую работу, его температура и давление падают, то есть внутренняя энергия пара расходуется на совершение механической работы по вращению турбины.

На турбинах можно получать огромные мощности – до 1000000 кВт. Серьезным недостатком турбины является ее неспособность дать задний ход, так как вращаться она может только в одном направлении. Кроме того, турбины «предпочитают» вращаться с постоянной скоростью, что очень удобно для электростанций и не очень удобно на транспорте.

4. Наибольшее распространение в XX веке получил **бензиновый двигатель внутреннего сгорания** (сокращенно ДВС). Они устанавливаются на автомобилях, самолетах, тракторах, моторных лодках, мотоциклах и т.д.

Устройство ДВС. Основной частью ДВС (рис. 10.2) является цилиндр, внутри которого происходит сжигание топлива (отсюда и название двигателя).

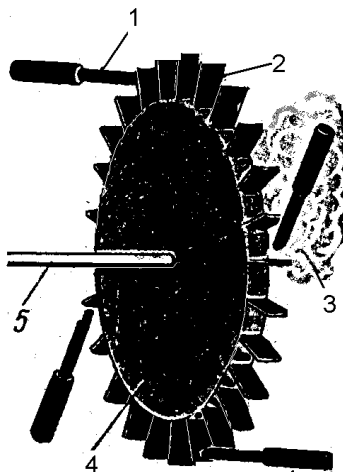


Рис. 10.1

Внутри цилиндра перемещается *поршень*, соединенный с *шатун*ом, который в свою очередь служит для передачи движения *коленчатому валу*. Верхняя часть цилиндра соединена с двумя каналами, закрытыми *клапанами*. Клапаны имеют вид тарелок, прижатых к отверстиям пружинами. Через один из клапанов – *впускной* – подается горючая смесь, через другой – *выпускной* – выбрасываются продукты сгорания.

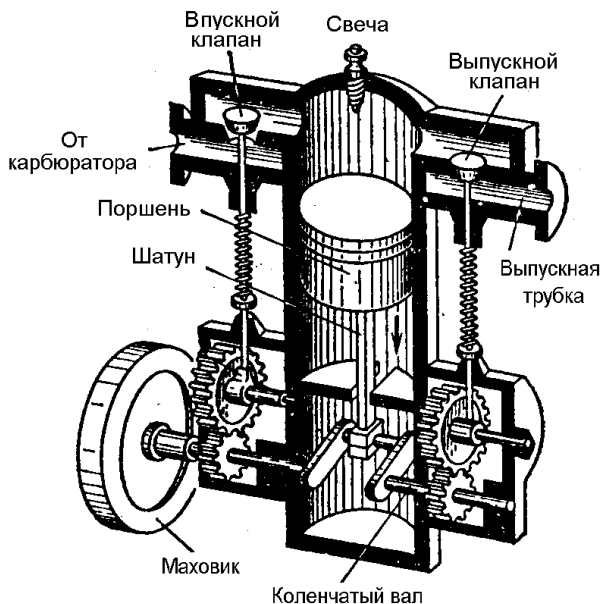


Рис. 10.2

Кроме клапанов, в верхней части цилиндра помещается так называемая *свеча*. Это устройство для зажигания смеси с помощью электрической искры.

Весьма важной частью бензинового двигателя является *карбюратор* – прибор для получения горючей смеси: паров бензина, распыленных в воздухе. Опуская детали устройства этого прибора, отметим, что бензин должен поступать в цилиндр распыленным, в виде мельчайших капель – только в этом случае он полностью сгорает за очень малое время, ведь поверхность контакта

бензина с воздухом за счет такого распыления сильно увеличивается.

Четыре такта ДВС. Работа двигателя состоит из четырех тактов (поэтому такие двигатели еще называются четырехтактными). Разберем их подробно (рис. 10.3).

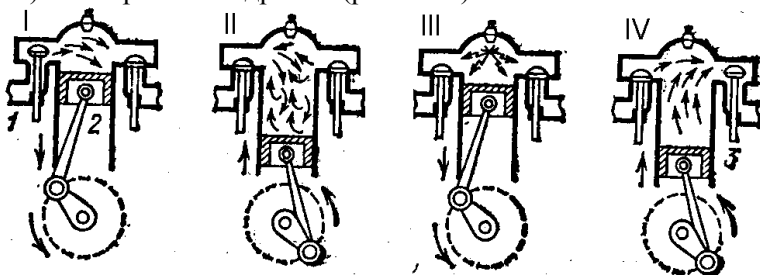


Рис. 10.3

I такт – *всасывание* (или *впуск*) Открывается впускной клапан *I*, и поршень *2*, двигаясь вниз, «засасывает» в цилиндр горючую смесь из карбюратора.

II такт – *сжатие*. Впускной клапан закрывается, и поршень, двигаясь вверх, сжимает горючую смесь. Смесь при сжатии нагревается, так как поршень, совершая над газом (воздухом, в котором распылены пары бензина) *работу*, увеличивает его внутреннюю энергию.

III такт – *сгорание* (или *рабочий ход*). Когда поршень достигает верхнего положения, смесь поджигается электрической искрой, даваемой свечой, бензин сгорает и нагревает до высокой температуры (1000–1800 °С) воздух. В результате над поршнем получается раскаленный газ, состоящий из сильно сжатого воздуха и паров, образовавшихся при сгорании бензина. Сила давления этого газа толкает поршень вниз. Движение поршня передается коленчатому валу, и при этом совершается *полезная работа*. Производя работу, поршень тратит на это свою внутреннюю энергию, поэтому газ охлаждается, его давление падает. К концу третьего такта (рабочего хода) давление в цилиндре падает почти до атмосферного.

IV такт – *выпуск* (или выхлоп). Открывается выпускной клапан 3, и отработанные продукты горения вместе с воздухом выбрасываются в атмосферу.

Сколько цилиндров нужно двигателю? Заметим, что за каждый *ход* поршня (за каждый такт), как видно из рис. 10.2, коленчатый вал совершает половину полного оборота. Причем из четырех тактов только один – третий – рабочий, то есть только в третьем такте поршень передает усилие коленчатому валу.

Спрашивается: а какая же сила будет толкать коленчатый вал в первом, втором и четвертом тактах?

Ответ: да никакая! В «нерабочих» тактах коленчатый вал должен двигаться по *инерции*. Для того чтобы это движение было плавным, на ось коленчатого вала насаживают массивное колесо – *маховик* (см. рис. 10.2). Будучи раскрученным, маховик обладает большим запасом кинетической энергии, которой он и подпитывает движение поршня во время его «нерабочих» ходов.

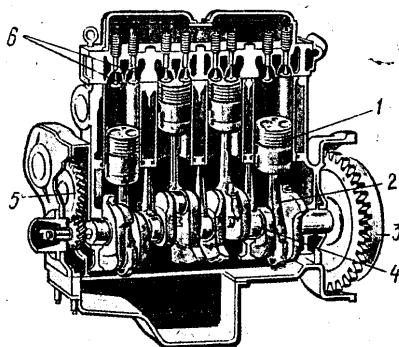


Рис. 10.4

Но, конечно же, было бы лучше, чтобы каждый ход был рабочим, тогда и движение будет более равномерным, и массивный маховик может быть менее массивным. Этого легко достигнуть, если в двигателе будут не один, а 4, 6, 8 и даже 16 цилиндров, которые работают так, чтобы в каждом такте хотя бы у одного цилиндра был рабочий ход.

Разрез четырехцилиндрового ДВС представлен на рис. 10.4: 1 – поршень; 2 – шатун; 3 – маховик; 4 – коленчатый вал; 5 – колеса зубчатой передачи; 6 – впускной и выпускной клапаны.

Ясно, что чем больше в двигателе цилиндров, тем он лучше, а чем лучше, тем дороже.

Запуск двигателя. ДВС устроен так, что начать работать он может только в том случае, если поршень уже всюду бежит вниз

–вверх. Без этого не удастся ни всосать горючую смесь, ни сжать ее. Поэтому сначала поршень (и, соответственно, коленчатый вал с маховиком) приводится в движение внешней силой. В автомобилях это делается с помощью особого электромотора –стартера, питаемого от аккумулятора.

Охлаждение двигателя. Необходимой частью двигателя является приспособление для охлаждения стенок цилиндров. Оно производится проточной водой, отдающей тепло воздуху. Схема устройства водяного охлаждения двигателя автомобиля показана на рис. 10.5.

Вода циркулирует, омывая цилиндры 1. Движение воды вызывается нагреванием ее вблизи цилиндров и охлаждением в радиаторе 2. *Радиатор* – это система медных трубок, по которым протекает вода, охлаждаемая потоком воздуха, засасываемым при движении автомобиля вентилятором 3.

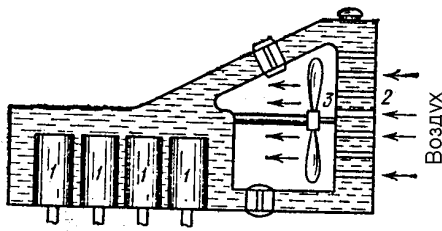


Рис. 10.5

Неприятности, которые иногда возникают при работе ДВС. Если двигатель перегревается, возможны следующие неприятности: *преждевременная* вспышка горючей смеси (т.е. до того момента, когда поршень занял верхнее положение) и *детонация*, т.е. взрыв горючей смеси вместо сгорания при нормальной работе. Ясно, что и то и другое разрушительно действует на двигатель и снижает его мощность.

Возможна еще одна неприятность: *неполное сгорание* горючей смеси. Это приводит к выбросу в атмосферу весьма вредных для человека химических соединений (например, окиси углерода CO) и, кроме того, снижает мощность двигателя.

Задача 10.1. Сколько рабочих ходов происходит в четырехцилиндровом ДВС за время одного полного оборота коленчатого вала?

Решение. За один ход поршня коленчатый вал совершает $\frac{1}{2}$ оборота. Значит, если коленчатый вал совершил полный оборот, в

каждом цилиндре поршни сделали по 2 хода. Так как цилиндров по условию 4, то всего ходов: $4 \times 2 = 8$, а так как на каждые четыре хода только один рабочий, то всего рабочих ходов $8 : 4 = 2$.

Ответ: 2 рабочих хода.

5. Широко распространенный двигатель внутреннего сгорания тяжелого топлива от сжатия – **дизель** – получил свое название от фамилии своего изобретателя – немецкого инженера Рудольфа Дизеля (1858–1913).

Не вдаваясь в детали, отметим лишь главную особенность, которая отличает дизель от бензинового ДВС: в дизеле в такте сжатия сжимается не горючая смесь, а *только воздух*. Поскольку воздух, как бы его не сжимали, воспламениться не может, то сжатие происходит до значительно более высокого давления по сравнению с горючей смесью в ДВС. При этом только за счет сильно го сжатия температура воздуха поднимается до 500–600 °С.

Лишь после того, как воздух сжат, в него с помощью специального устройства под высоким давлением впрыскивается дизельное горючее, которое воспламеняется не от электрической искры (как в бензиновом ДВС), а от высокой температуры сжатого воздуха. После сгорания горючего (которое горит достаточно медленно – в течение всего рабочего хода) достигается значительно более высокая температура, чем в бензиновом ДВС.

Дизель может иметь гораздо бóльшую мощность, чем бензиновый ДВС. Их используют на судах (теплоходах), тепловозах, тракторах, грузовых автомобилях, небольших электростанциях. При этом дизель работает на достаточно дешевом дизельном топливе. Однако в тех случаях, когда требуется минимальный вес двигателя при данной мощности, предпочтительнее все-таки бензиновый двигатель.

КПД теплового двигателя

КПД теплового двигателя – это величина, равная отношению полезной работы, совершенной двигателем, к затраченной энер-

гии (под затраченной энергией мы будем понимать теплоту, выделившуюся при *полном сгорании* израсходованного топлива):

$$\eta = \frac{\text{Полезная работа}}{\text{Затраченная энергия}} = \frac{A}{Q}. \quad (10.1)$$

Теоретически доказано, что чем выше температура *рабочего тела* (сжатого воздуха в ДВС, пара в турбине и т.д.), тем выше КПД тепловой машины. У большинства бензиновых ДВС КПД составляет примерно 25%, что, конечно, не очень много, но все же значительно больше, чем у паровоза (8%).

Температура горючей смеси в цилиндре достигает 1800 °С, и увеличить ее можно было бы за счет более сильного сжатия во втором такте. Но тут есть свое ограничение: попытки повысить давление горючей приводят к тому, что она *детонирует*, то есть взрывается и к тому же раньше, чем нужно. Значительно более высокий КПД (38%) удается достичь в двигателе Дизеля.

Расчет КПД теплового двигателя

Задача 10.2. Определите КПД трактора, который для выполнения работы $A = 3,78 \cdot 10^7$ Дж израсходовал $m = 3,0$ кг топлива с удельной теплотой сгорания $q = 42$ МДж/кг.

$$\begin{aligned} A &= 3,78 \cdot 10^7 \text{ Дж} \\ m &= 3,0 \text{ кг} \\ q &= 42 \text{ МДж/кг} = \\ &= 42 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \end{aligned}$$

$$\eta = ?$$

Решение. Согласно формуле (10.1)

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{A}{mg}. \quad (10.2)$$

Проверим размерность:

$$[\eta] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right)} = 1.$$

Подставим численные значения:

$$\eta = \frac{A}{mg} = \frac{3,78 \cdot 10^7 \text{ Дж}}{3,0 \text{ кг} \cdot 42 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}} = 0,30 = 30\%.$$

$$\text{Ответ: } \eta = \frac{A}{mg} = 30\%.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задачи очень легкие

- А1.** Относится ли огнестрельное оружие к тепловым двигателям?
- А2.** Выполняя домашнее задание, ученик записал: «К машинам с тепловыми двигателями относятся: реактивный самолет, паровая турбина, мопед». Дополните эту запись другими примерами.
- А3.** Выполняя задание, ученик записал: «Двигатель внутреннего сгорания применяется в мотосанях, бензопилах». Дополните эту запись другими примерами.
- А4.** Какой вид механической энергии водяного пара используется в паровых турбинах?
- А5.** В одной паровой турбине для совершения полезной работы используется $\frac{1}{5}$ часть энергии, а в другой — $\frac{1}{3}$ часть. КПД какой турбины больше? Найдите КПД каждой турбины.
- А6.** В одной из паровых турбин для совершения полезной работы используется $\frac{1}{5}$ часть энергии, выделяющейся при сгорании топлива, в другой — $\frac{1}{4}$ часть. КПД какой турбины больше? Ответ обоснуйте.
- А7.** Вычислите КПД турбин, описанных в предыдущей задаче.

Задачи легкие

- Б1.** Можно ли механическую энергию тела целиком превратить во внутреннюю?
- Б2.** Объясните причину вращения колеса (рис. 10.6). Какие преобразования энергии происходят при этом?
- Б3.** Почему температура отработанного газа в газовой турбине меньше температуры газа, подающегося на лопатки турбины?
- Б4.** Почему двигатели внутреннего сгорания не используются в подводной лодке при подводном плавании?
- Б5.** Во время каких тактов закрыты оба клапана в четырехтактном двигателе внутреннего сгорания?
- Б6.** Почему температура газа в двигателе внутреннего сгорания в конце такта «рабочий ход» ниже, чем в начале этого такта?
- Б7.** В каком случае газообразная горючая смесь в цилиндре двигателя внутреннего сгорания обладает большей внутренней энергией: в начале такта «рабочий ход» или в конце его?
- Б8.** Как влияет неполное сгорание топлива на величину КПД теплового двигателя?

- Б9.** Определите число ходов, совершаемых всеми поршнями четырехтактного восьмицилиндрового двигателя за время одного оборота коленчатого вала.
- Б10.** Почему цилиндр двигателя внутреннего сгорания требует во время работы охлаждения, а цилиндр, в который помещают паровую турбину, нет?
- Б11.** В одну из паровых турбин пар при температуре 250 °С, а в другую – при 500 °С. У какой из них КПД больше, если температура отработанного пара одинакова?
- Б12.** Для выполнения работы $1,89 \cdot 10^7$ Дж трактор израсходовал 1,5 кг топлива с удельной теплотой сгорания, равной 42 МДж/кг. Определите КПД трактора.
- Б13.** Двигатель внутреннего сгорания совершил полезную работу, равную $2,3 \cdot 10^5$ кДж, и при этом израсходовал бензин массой 20 кг. Вычислите КПД этого двигателя.

Задачи средней трудности

- В1.** Почему при сжатии воздуха в цилиндре дизеля или горючей смеси в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) его температура увеличивается?
- В2.** Определите, когда газ в цилиндре ДВС обладает большей внутренней энергией: а) в начале или в конце рабочего хода; б) в конце такта всасывания или в конце такта сжатия. Почему?
- В3.** Для чего топливо в цилиндры ДВС подается в распыленном состоянии?
- В4.** Какими недостатками обладает одноцилиндровый двигатель и в чем преимущество многоцилиндровых двигателей?
- В5.** Для чего на ось коленчатого вала помещают массивный маховик?
- В6.** Почему размеры маховика тем меньше, чем больше цилиндров у двигателя внутреннего сгорания?
- В7.** Почему КПД двигателя внутреннего сгорания падает при детонации (взрывном сгорании горючей смеси)?
- В8.** Почему для запуска ДВС необходим стартер?
- В9.** Почему доливать воду в радиатор перегревшегося двигателя трактора следует очень медленно и только при работающем двигателе?
- В10.** В четырехтактном двигателе внутреннего сгорания на каждые 100 оборотов вала приходится 400 рабочих ходов поршней в цилиндрах. Сколько цилиндров имеет двигатель?

- В11.** Сколько вспышек горючей смеси происходит за 1 с в каждом цилиндре четырехтактного двигателя, если его вал совершает 3000 оборотов в минуту?
- В12.** Тепловоз ТЭ-3 в течение 1 ч производит работу 8000000 кДж. За это время он расходует дизельное топливо массой 800 кг, теплота сгорания которого равна $4 \cdot 10^7$ Дж/кг. Определите КПД двигателя тепловоза.
- В13.** Двигатель внутреннего сгорания совершил полезную работу, равную 27,6 МДж, и израсходовал при этом 3 л бензина. Вычислите КПД двигателя.
- В14.** В паровой турбине на производство 1 кВт·ч энергии расходуется 0,35 кг дизельного топлива. Каков КПД паровой турбины? Удельная теплота сгорания дизельного топлива равна 42 МДж/кг.
- В15.** Первый гусеничный трактор конструкции А.Ф. Блинова (1888 г.), имел два паровых двигателя. За 1 ч он расходовал 5 кг топлива, у которого удельная теплота сгорания равна $30 \cdot 10^6$ Дж/кг. Вычислите КПД трактора, если мощность двигателя его была равна около 1,5 кВт.
- В16.** Двигатель внутреннего сгорания мощностью 36 кВт за 1 ч работы израсходовал 14 кг бензина. Определите КПД двигателя.
- В17.** Паровая машина мощностью 14,7 кВт потребляет за 1 ч работы 8,1 кг угля с удельной теплотой сгорания 33 МДж/кг. Найдите КПД паровой машины.
- В18.** Для работы турбины, развивающей мощность 100000 кВт, в топках паровых котлов за сутки сжигается 960 т каменного угля. Определите КПД этой паротурбинной установки.
- В19.** За 3 ч пробега автомобиль, КПД которого равен 25%, израсходовал 24 кг бензина. Какую среднюю мощность развивал двигатель автомобиля при этом пробеге?

Задачи трудные

- Г1.** Автомобиль проехал 100 км, израсходовав 6,9 кг бензина. Средняя мощность, развиваемая двигателем, была равна 13 кВт, а средняя скорость движения – 75 км/ч. Найдите КПД двигателя автомобиля.
- Г2.** Найдите расход бензина двигателем автомобиля «Запорожец» при прохождении пути 100 км при скорости 72 км/ч, считая мощность его равной 23 л.с., а КПД равным 30%. Принять 1 л.с. = 736 Вт.

Приложение

Т а б л и ц а П I

Плотности некоторых веществ, находящихся в твёрдом состоянии при 20 °С

Вещество	$\rho, 10^3$ кг/м ³	$\rho,$ г/см ³	Вещество	$\rho, 10^3$ кг/м ³	$\rho,$ г/см ³
Осмий (Os)	22,6	22,6	Стекло оконное	2,5	2,5
Иридий (Ir)	22,4	22,4	(Na ₂ O·CaO·6SiO ₂)		
Платина (Pt)	21,5	21,5	Мел (CaCO ₃)	2,4	2,4
Золото (Au)	19,3	19,3	Фосфор (P)	2,3	2,3
Вольфрам (W)	19,1	19,1	Бетон	2,3	2,3
Уран (U)	19,0	19,0	Кирпич	1,8	1,8
Свинец (Pb)	11,3	11,3	Графит (C)	1,6	1,6
Серебро (Ag)	10,5	10,5	Сахар-рафинад	1,6	1,6
Молибден (Mo)	10,2	10,2	(C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)		
Кобальт (Co)	8,9	8,9	Песок сухой	1,5	1,5
Медь (Cu)	8,9	8,9	(SiO ₂)		
Никель (Ni)	8,9	8,9	Текстолит	1,4	1,4
Кадмий (Cd)	8,65	8,65	Оргстекло	1,2	1,2
Латунь*	8,5	8,5	Эбонит	1,2	1,2
Сталь**, железо	7,8	7,8	Капрон	1,1	1,1
(Fe)			Натрий (Na)	0,97	0,97
Олово (Sn)	7,3	7,3	Полиэтилен	0,92	0,92
Цинк (Zn)	7,1	7,1	Лёд при 0 °С	0,90	0,90
Чугун***	7,0	7,0	(H ₂ O)		
Титан (Ti)	4,5	4,5	Парафин	0,90	0,90
Корунд	4,0	4,0	Дуб сухой	0,70	0,70
Алмаз (C)	3,5	3,5	Берёза сухая	0,70	0,70
Алюминий (Al)	2,7	2,7	Сосна сухая	0,40	0,40
Гранит	2,7	2,7	Пробка	0,24	0,24
Мрамор (CaCO ₃)	2,7	2,7	Бальса (дерево)	0,13	0,13
			Пенопласт	0,020	0,020

* Латунью называется сплав меди с цинком.

** Сталью называется сплав железа с углеродом при содержании углерода не более 2,14%.

***Чугуном называется сплав железа с углеродом при содержании углерода от 2,14 до 5%.

**Плотности некоторых веществ,
находящихся в жидком состоянии
при температуре 20 °С**

Жидкость	$\rho, 10^3$ кг/м ³	$\rho,$ г/см ³	Жидкость	$\rho, 10^3$ кг/м ³	$\rho,$ г/см ³
Ртуть (Hg)	13,6	13,6	Вода дистиллиров.	1,00	1,00
Олово (Sn)	6,8	6,8	Масло подсолн.	0,93	0,93
(при 400 °С)			Масло машинное	0,90	0,90
Серная кислота	1,8	1,8	Масло касторовое	0,90	0,90
(H ₂ SO ₄)			Бензол (C ₆ H ₆)	0,88	0,88
Мёд	1,35	1,35	Скипидар	0,87	0,87
Глицерин	1,26	1,26	Жидкий воздух	0,86	0,86
(C ₃ H ₈ O ₃)			(при –194 °С)		
Жидкий кислород	1,14	1,14	Керосин	0,80	0,80
(O ₂)			Спирт (C ₂ H ₅ OH)	0,80	0,80
(при –182 °С)			Нефть	0,80	0,80
Тяжелая вода	1,10	1,10	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	0,79	0,79
(D ₂ O)			Эфир ((C ₂ H ₅) ₂ O)	0,71	0,71
Вода морская	1,03	1,03	Бензин	0,71	0,71
Молоко цельное	1,03	1,03			

ПОДСКАЗКИ

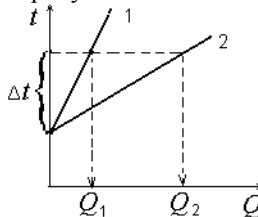
1

- A1–A6.** См пример 2.
A7. См. пример 3.
A8–A11. См. пример 9.
B1–B3. См. пример 3.
B4. См. пример 4.
B5. См. пример 3.
B6. См. пример 4.
B7–B14. См. пример 3.
B15–B16. См. пример 4.
B17–B22. См. пример 11.
B23–B27. См. пример 7.
B1. См. пример 3.
B2. См. примеры 3 и 4.
B3–B8. См. пример 4.
B9. См. пример 6.
B10. См. пример 3.
B11–B12. См. пример 4.
B14. См. пример 3.
B15–B16. См. пример 7.
B17–B20. См. пример 11.
B21. См. пример 12.
B22. См. пример 11.
B23–B24. См. пример 12.
B25–B26. См. B17.
B27–B35. См. пример 15.
Г1. См. примеры 6 и 11.
Г2–Г8. См. пример 15.
Г9. См. пример 20.
Г10–Г11. См. пример 17.
Д1. См. пример 20.
Д2. См. пример 17.
Д3. Выразить из 1-го уравнения неизвестное c_b через неизвестное c_r и подставить в уравнение (2).
Д4. См. Д1.

- Д5.** Из 1-го уравнения найти u , подставить во 2-е уравнение и найти u_c , затем подставить u_c в 3-е уравнение и найти ρ_c .
Д6. См. Д1.
Д7. См. примеры 18 и 20.

3

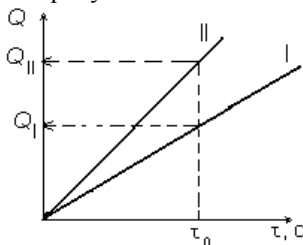
- A1–A3.** См. задачу 3.1.
A4–A10. См. задачу 3.2.
A11–A14. См. задачу 3.3.
B1–B3. См. формулу (3.4a) и табл. 3.1.
B4. См. формулу (3.4); учесть: $m = \rho V$.
B5–B6. См. B4; учесть: $V = abc$, где a , b , c – длина, ширина и глубина бассейна.
B7. См. формулу (3.5); учесть: $m = \rho V$.
B8–B9. См. формулу (3.5); учесть: $m = \rho V$; $V = abc$; где a ; b ; c – размеры пластинки.
B10. См. формулу (3.5); учесть, что масса печи $M = mN$; где N – число кирпичей.
B11–B13. См. формулу (3.4).
B14–B16. См. формулу (3.5).
B1. См. рисунок.



$$Q_1 = c_1 m \Delta t ; \quad Q_2 = c_2 m \Delta t ;$$

$$Q_2 > Q_1 \Rightarrow ?$$

В2. См. рисунок.

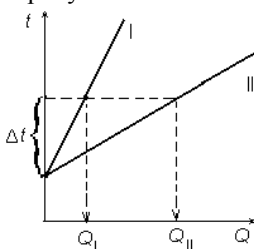


В произвольный момент времени τ_0 температура воды равна температуре чайника.

$$Q_1 = c_1 \Delta t ; \quad Q_2 = c_{II} \Delta t ;$$

$$Q_2 > Q_1 \Rightarrow ? \quad c_{\text{воды}} > c_{\text{чайника}}.$$

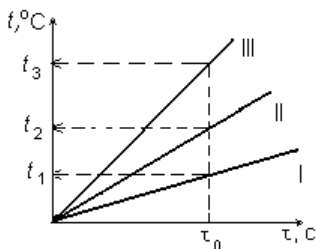
В3. См. рисунок.



$$Q_1 = c m_1 \Delta t ; \quad Q_2 = c m_2 \Delta t$$

$$Q_2 > Q_1 \Rightarrow ?$$

В4. См. рисунок.



В произвольный момент времени количество теплоты, получен-

ное водой, медью и железом равны:

$$c_{\text{в}} m t_1 = c_{\text{с}} m t_2 = c_{\text{ж}} m t_3 .$$

В5–В7. См. формулу (3.5).

В8–В10. См. задачу 3.4; учесть:

$$m = \rho V .$$

В11–В13. Использовать формулу из задачи 3.4:

$$Q = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) .$$

В14. См. задачу 3.5.

В15–В16. См. В14.

4

А1–А2. См. задачу 4.1, способ 3.

Б1. См. задачу 4.1, способ 1.

Б2. См. задачу 4.1, способ 3.

Б3–Б6. См. задачу 4.2.

Б7–Б10. См. задачу 4.3.

В1. См. задачу 4.1, способ 3; учесть $C = c \rho V$.

В2. См. задачу 4.1, способ 3.

Если $\alpha = 3/4$, то $m_1 = \alpha \rho V_0$;

$$m_2 = (\alpha - 1) \rho V_0 .$$

В3. См. задачу 4.1, способ 3. Требуется найти $x = m_1 / m_2$.

$$m_1 t_1 + m_2 t_2 = m_1 \theta + m_2 \theta .$$

Разделив обе части уравнения на m_2 , получим

$$x t_1 + t_2 = x \theta + \theta .$$

В4. См. задачу 4.1, способ 1; учесть: $m = \rho V$.

В5. Воспользуйтесь формулой (4.6); учесть: $V = V_1 + V_2$;

$$C = \rho V c .$$

В6–В7. Воспользуйтесь формулой (4.7); где $n = 3$; учесть: $C = c m$.

В8. Воспользуйтесь формулой (4.7).

В9. См. задачу 4.2.

B10. См. задачу 4.3. В роли калориметра выступает чашка.

B11–B12. См. задачу 4.3. В роли калориметра здесь выступает термометр.

B13. См. задачу 4.4.

B14. См. задачу 4.4; учесть: $C = cm$.

B15. См. B13.

B16. Больше охладится та ложка; у которой больше теплоемкость. Получите соотношение $C_{ал}/C_{сер}$; учтите: $C = \rho Vc$.

Г1. $U^{нач} = U^{кон} + Q_{потерь}$.

См. задачу 4.1, способ 3.

Г2. См. формулу (4.7); учесть:

$$n = 3; C = cm.$$

Г3. См. задачу 4.4.

Г4. См. формулу (4.7), где $n = 3$,

$$C_{кал} = c_{Al} \cdot m_{кал}.$$

Д1. Введём обозначения:

c_v – теплоёмкость воды (неизвестна);

c_t – теплоёмкость тела (неизвестна);

$\theta_1 = 40^\circ\text{C}$ – установившаяся температура после опускания первого тела;

θ_2 – установившаяся температура после опускания второго тела (неизвестна).

Теперь можно записать два уравнения теплового баланса (для опускания первого тела и для опускания второго тела). Получаются два уравнения с тремя неизвестными: c_v , c_t и θ_2 .

Введя обозначение $x = \frac{c_v}{c_t}$ и

разделив обе части обоих урав-

нений на c_t , получим ДВА уравнения с двумя неизвестными: x и θ_2 .

Д2. Пусть m_c – масса свинцовых опилок, а m_a – масса алюминиевых опилок. Тогда можно записать уравнение теплового баланса – формула (4.7); учесть:

$$C = mc;$$

$$m_a + m_c = m = 150 \text{ г.}$$

Д3. Пусть $C_{рт}$ – теплоёмкость налитой ртути, а $t_{рт}$ – ее температура. Тогда можно записать два уравнения теплового баланса по формуле (4.7) (для первого и второго сосудов). В этих двух уравнениях три неизвестных: C_c ; $C_{рт}$; $t_{рт}$. Вычитая из одного уравнения другое, можно избавиться от неизвестных нам $C_{рт}$ и $t_{рт}$. Останется одно уравнение с одним неизвестным C_c .

Д4. В результате двух переливаний масса воды в первом сосуде осталась прежней, а её температура уменьшилась на

$$\Delta t_1 = 1^\circ\text{C}.$$

Следовательно, энергия в первом стакане уменьшилась на

$$\Delta Q = c_v m_1 \Delta t_1.$$

На такую же величину увеличилась энергия во втором стакане. Записав уравнение теплового баланса, найдём изменение температуры Δt_2 во втором сосуде. Температура воды во втором сосуде стала

равной $t'_2 = t_2 + \Delta t_2$. Этого значения она достигла после переливания из первого сосуда во второй некоторой массы воды Δm , имеющей температуру t_1 . Записав уравнение теплового баланса, аналогично тому, как это сделано в задаче 4.1, способ 1, найдём Δm .

5

A1–A3. См. табл. 5.1.

A4. Сравните температуры плавления спирта и ртути.

A5. Нафталин – кристаллическое вещество, а смола – аморфное.

A6. Какова температура льда на морозе?

A7. Каков физический смысл удельной теплоты плавления?

A8. Что происходит с температурой в процессах плавления и кристаллизации?

A9. См. задачу 5.1.

A10–A13. См. задачу 5.3.

B1. См. табл. 5.1.

B2. См. табл. 5.1. Учтите, что некоторые вещества вступают с водой в химическую реакцию!

B3. Обычное стекло – аморфное тело, а кварцевое – кристаллическое, поэтому...

B4. 1) См. рис. 5.2 и 5.4.

2) Чем выше разность температур между телами; тем интенсивнее идет теплообмен.

B5. Удельная теплоемкость воды больше удельной теплоемкости льда; поэтому нагрев воды

должен идти медленнее, чем нагрев льда.

B6. д) Чем больше теплоемкость ($C = cm$), тем медленнее идет нагревание.

B7–B8. Происходит ли теплообмен между телами; имеющими одинаковую температуру?

B9. При плавлении лед *получает* теплоту плавления.

B10. Требуется ли тепло при плавлении льда? Откуда лед может взять тепло?

B11. Чем меньше λ , тем быстрее идет плавление.

B12–B13. См. формулу (5.1).

B14–B15. $Q_{\text{крист}} = Q_{\text{плавл}} = \lambda m$.

B16. См. формулу (5.1); табл. 5.2.

B17. Больше воска растает под тем шариком, теплоемкость которого больше ($C = cm$). Почему?

B18. Требуется найти величину

$$x = \frac{Q_{\text{плавления льда}}}{Q_{\text{плавления свинца}}}.$$

B20–B23. $Q = m\lambda + cm(t_{\text{пл}} - t_{\text{кон}})$.

B24–B26. См. задачу 5.3.

B1. 9) $\lambda x = Q_{\text{пл}}$;

$$10) Q_{\text{доп}} = \lambda m - Q_{\text{пл}}; m = \frac{Q_{\text{нагр}}}{c\Delta t}.$$

B2. Если бы *весь* лед растаял в обоих случаях, температура воды во втором случае была бы меньше.

B3. Пусть m – масса болванки. Требуется найти величину

$$x = \frac{Q_{\text{плавления Al}}}{Q_{\text{плавления чугуна}}}.$$

B4. См. B20; учесть: $m = \rho abc$.

B5. $Q = cm(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) + \frac{m}{2}\lambda.$

B6–B8. См. задачу 5.4.

B9–B10. $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол.}}$

B11. См. задачу 5.4;

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол.}}$$

Г1. Что произойдёт, если кусок льда бросить в воду? Зависит ли установившаяся температура от массы льда?

Г2. Наверное, понадобятся: калориметр известной теплоёмкости C , вода известной массы m с начальной температурой $t_{\text{н}}$, лёд при 0°C ; термометр.

Г3–Г4. См. задачу 5.5.

Г5. См. задачу 5.5; найти

$$x = \frac{\text{масса снега}}{\text{общая масса}}.$$

Г6. См. Г3.

Г7. $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол.}}$ Учсть:

$$m_{\text{в}} = \rho_{\text{в}}Sh_{\text{в}}; m_{\text{с}} = \rho_{\text{с}}Sh_{\text{с}}.$$

Г8. $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол.}}$ Учсть:

$$m_{\text{л}} = \rho_{\text{л}}V - m_{\text{в}}.$$

Г9. Все тепло, отданное металлом при охлаждении; пойдет на плавление льда.

Г10–Г11. Количество теплоты, которое выделит алюминиевый куб, равно количеству теплоты, необходимому для плавления льда в объеме куба.

Г12. Замерзание (кристаллизация) воды происходит до тех пор, пока окружающая среда будет способна поглощать выделяющуюся теплоту кристаллизации. Кристаллизация воды прекращается, когда вся смесь окажется нагретой до температуры плавления, т.е. до 0°C .

Г13. См. задачу 5.6, а)

Г14–Г15. Можно смело предположить, что вся вода замерзнет; см. задачу 5.6, б).

Г16–Г20. См. задачу 5.6, в).

Г21. См. задачу 5.6, в). Предположим, что лёд растаял не весь.

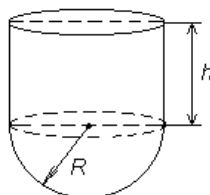
Пусть $m_{\text{л}} = m_{\text{в}} = m$; x – масса растаявшего льда; $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол.}}$ Найдем величину $x/m = \alpha$. Если $\alpha > 0$, значит, получилась смесь льда и воды, т.е. установившаяся температура 0°C .

Г22. См. 5.6, г. Вся вода в калориметре охладится до 0°C , и часть ее замерзнет.

Г23. См. Г22. Если $m_{\text{х}}$ – масса замерзшей воды, то

$$V = \frac{m - m_{\text{х}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{m_{\text{л}} + m_{\text{х}}}{\rho_{\text{л}}}.$$

Д1. Форма воронки – цилиндр с примыкающим к нему полушарием.



Учсть, что объем шара радиуса R равен $V_{\text{ш}} = 4/3\pi R^3$. Объем цилиндра высотой H и площадью основания S равен $V_{\text{ц}} = SH$, где $S = \pi R^2$ – площадь круга радиуса R .

Д2. $Q_1 = (c_{\text{л}}m_{\text{л}} + C)(t_2 - t_1);$

$$Q_2 = (c_{\text{л}}m_{\text{л}} + C)(t_0 - t_2) + \lambda m_{\text{л}} + (c_{\text{в}}m_{\text{л}} + C)(t_3 - t_0).$$

- A1.** Как изменяется температура жидкости при испарении?
- A2.** Как влияет ветер на скорость испарения?
- A3.** См. A2.
- A4.** Пленка жира затрудняет испарение воды.
- A5.** См. табл. 6.1.
- A6.** Изменяется ли температура жидкости в процессе кипения?
- A7.** При горении сухих дров нагреваются только дрова, а при горении сырых...
- A8.** См. задачу 6.1.
- A9–A11.** См. задачу 6.2.
- B1.** Как изменяется температура жидкости при испарении?
- B2.** Каков физический смысл удельной теплоты парообразования?
- B3.** Требуется ли затраты энергии на превращение воды в пар при любой температуре?
- B4.** См. формулу (6.2).
- B5.** Быстрота варки зависит только от температуры воды.
- B6.** Пока в кастрюле есть вода, температура кастрюли почти равна температуре воды.
- B7.** Выделяется ли энергия при конденсации пара?
- B8.** См. B7.
- B9.** Может ли вещество переходить из твердого состояния в газообразное?
- B10–B11.** См. формулу (6.1).
- B12.** $\lambda m_x = LM$.
- B13.** См. задачу 6.2; учесть: $m = \rho V$.

B14. См. задачу 6.2; учесть, что теплота парообразования при любой температуре равна теплоте конденсации.

B15. См. задачу 6.2.

B1. Возможен ли описанный процесс, если к жидкости не подводится тепло?

B2–B3. См. задачу 6.2; учесть: $m = \rho V$.

B4. $Q = cm_1\Delta t + Lm_2$.

B5. См. B4; учесть: $m_2 = \rho V$.

B6. $c_B m \Delta t + xL = Q$.

B7. $Q = \lambda m + cm\Delta t + Lm$.

B8. $Q = c_1 m \Delta t_1 + \lambda m + c_2 m \Delta t_2 + \lambda m$.

B9–B10. См. задачу 6.3.

B11–B12. $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}};$ см. задачу 6.3.

B13–B14. В результате закипания температура воды понизилась до температуры кипения воды, а тепло, выделившееся при остывании, пошло на парообразование.

Г1. Рассмотрите случай, когда маленькая масса воды получает большое количество теплоты. Что с нею происходит? А если это же количество теплоты получает значительная масса воды?

Г2. Что происходит в этом случае с холодной водой? А с водой, нагретой до 100 °С?

Г3. См. задачу 6.3; учесть теплоемкость калориметра.

Г4. См. задачу 6.4.

Г5. См. Г2. Обозначим m_x массу впускаемого пара, тогда

$$Q_{\text{отд}} = (L + c_B \Delta t) m_x.$$

Г6. См. задачу 6.4; учесть:

$$m_{\text{пара}} + m_{\text{льда}} = M = 500 \text{ г.}$$

Г7. $Q_1 = (m_k c_k + m_b c_b)(t_k - t_{\text{пл}});$
 $m_x L = \dots$

Г8. 1. $c_b m \Delta t = Q_1.$

2. $Lx = Q_2 - Q_1.$

3. $\Delta Q = ?$

Г9. Из условия следует, что вся вода нагрелась до 100°C , а часть ее (x) испарилась.

Г10. $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}$. Считать, что испаряемая масса воды x нагрелась до 100°C и испарилась.

$$Q_{\text{пол}} = c_b(m_b - x) \times \\ \times (\theta - t_1) + x c_b(t_k - t_1) + \dots$$

Г11. Рассмотреть теплообмен за некоторое время Δt . За это время массы воды и пара, проходящие через теплообменник, равны соответственно

$$m_{\text{п}} = q_1 \Delta t; \quad m_{\text{в}} = q_2 \Delta t.$$

Г12. См. задачи 6.3; 6.5.

Г13. См. задачу 6.5.

Г14. См. задачу 6.5; учесть, что испарилось $(m_{\text{л}} - m)$ воды.

Г15. См. задачу 6.5; учесть теплоемкость калориметра.

Д1. См. задачу 6.5; учесть теплоемкость пара и теплоемкость калориметра.

Д2. См. задачу 6.5.

Д3. См. задачу 6.3. Введём обозначения: $m_{\text{в}}$ — масса воды в сосуде до пропускания пара; $m_{\text{п}}$ — масса сконденсировавшегося пара. Тогда масса всей воды в сосуде $m = m_{\text{в}} + m_{\text{п}}$. Требуется найти величину

$$x = \frac{m_{\text{п}}}{m}.$$

Д4. Теплота на испарение эфира получена за счет охлаждения эфира и воды до 0°C и замерзания воды.

$$Q_{\text{пол}} = L_{\text{э}} m_{\text{э}}; \quad Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}.$$

Д5. $Q_{\text{отд}} = \frac{1}{2} Q_{\text{пол}};$

$$Q_{\text{пол}} = L m_{\text{а}} + c_{\text{а}} m_{\text{а}} (t_0 - t_{\text{а}}).$$

7

А1–А2. Каков физический смысл удельной теплоты сгорания топлива?

А3. См. задачу 7.1.

А4–А6. См. формулу (7.1).

Б1. Дрова покупают кубометрами, т.е. мерой, которой пользуются при покупке дров, является их объем; см. табл. П1.

Б2. Плотность бутана больше, чем плотность водорода.

Б3–Б4. См. формулу (7.1).

Б5. $q_1 m_1 = q_2 m_2.$

Б6. См. Б5; учесть $m_1 = \rho V.$

Б7. См. задачу 7.2.

Б8. См. задачу 7.2; учесть $m = \rho V.$

Б9. См. задачу 7.4.

В1. См. задачу 7.2;

считать $\eta = 1.$

В2. См. задачу 7.2.

В3. См. задачу 7.2; учесть $m = \rho V.$

В4. См. В2.

В5. См. В3.

В6–В8. См. задачу 7.4.

В9. См. формулу (7.2);

$$Q_{\text{полезн}} = c_{\text{л}} m_{\text{л}} (t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda m_{\text{л}} + \\ + c_{\text{в}} m_{\text{л}} (t_2 - t_{\text{пл}}).$$

B10–B13. См. задачу 7.3.

B14. Мощность теплопередачи

$$W = \frac{Q_1}{\tau_1} = \frac{Q_2}{\tau_2},$$

где $\tau_1 = 1$ сут; $\tau_2 = 30$ сут.

B15. См. задачу 7.5.

B16. См. задачу 7.5; считать $\eta = 1$.

B17. См. задачу 7.6.

Г1. $m_x q = \lambda M$, где $m_x = mN$; $m = 50$ т; N – число вагонов; M – масса льда.

Г2. Надо сжечь некоторое количество спирта и измерить:

- 1) изменение массы спирта;
- 2) изменение температуры воды. Часть тепла уйдет на нагревание воздуха; поэтому...

Г3. См. задачу 7.5. Для оценки q считать $Q_{\text{пол}} = Q_{\text{затр}}$. Для расчета КПД воспользуйтесь табличным значением q для спирта.

Г4. См. задачу 7.4; учесть теплоемкость чайника.

Г5. См. формулу (7.2), где

$$Q_{\text{полезн}} = c\rho V_2(t_k - t_1) + L\rho V_1.$$

Г6. См. формулу (7.2).

Г7. См. формулу (7.2), где

$$Q_{\text{полезн}} = (c_a m_a + c_v \rho v)(t_k - t_1) + Lx,$$

x – искомая величина.

Г8. $x = Q_{\text{затр}}/Q_{\text{необх}}$;

$$Q_{\text{необх}} = cm(t_k - t_1);$$

$$Q_{\text{затр}} = Q_{\text{необх}} + \frac{1}{3} Lm.$$

Г9. Мощность теплопередачи

$$W = \frac{qm_6}{\tau} = \frac{cm_b \Delta t}{\tau_1},$$

где $\tau = 1$ ч; $\tau_1 = 10$ мин.

Д1. Нужно два раза воспользоваться формулой

$$\eta = Q_{\text{полезн}}/Q_{\text{затр}}$$

применительно к 1-му и 2-му процессам; см. задачу 7.6.

Д2. Идея решения та же, что и в

Д1. Учесть $\eta = 1$.

Д3. Мощность теплопередачи

$$W = \frac{\eta qm}{\tau_1} = \frac{(cm + C_k)\Delta t}{\tau_x} = \frac{Lm_x}{\tau_2},$$

где $\tau_1 = 1$ с; τ_x и m_x – искомые величины.

Д4. Мощность теплопередачи

$$W = \frac{Q_x}{\tau_1} = \frac{Q_{\text{отд}}}{\tau_2}, \text{ где } \tau_1 = 1,0 \text{ с;}$$

$\tau_2 = 5,0$ мин; Q_x – искомая величина; $Q_{\text{отд}} = U_{\text{нач}} - U_{\text{кон}}$ – убыль внутренней энергии сосуда с водой за $\tau_2 = 5$ мин.

Д5. Из условия ясно, что мощность нагревателя равна мощности тепловых потерь. После отключения нагревателя количество потерянного за время t тепла будет равно убыли внутренней энергии воды за это время.

Д6. Условие постоянства температуры воды в чайнике: количество потерянного тепла в единицу времени равно количеству полученного тепла. За 1 мин чайник остывает на $0,2^\circ\text{C}$...

- A1.** Как повлияет толщина слоя земли на интенсивность теплообмена между водой в трубах и холодным воздухом?
- A2.** Как повлияет слой опилок на интенсивность теплообмена между почвой и холодным воздухом?
- A3.** Как повлияет слой снега на теплообмен между землей и морозным воздухом?
- A4.** Затруднит или облегчит теплообмен льда с окружающим воздухом слой ваты?
- A5.** Температура воздуха в пустыне летом выше 37°C .
- A6.** Что больше: $\alpha_{\text{дер}}$ или $\alpha_{\text{кирп}}$?
- A7.** Коэффициент теплопроводности какого материала больше?
- A8.** Сравните коэффициенты теплопроводности названных материалов (коэффициент теплопроводности фарфора примерно такой же, как у стекла).
- A9.** См. табл. 8.1.
- B1.** Как повлияет на теплообмен между комнатным и наружным воздухом прослойка воздуха между стеклами?
- B2.** Наохлившийся воробей как бы набрал в перья дополнительный объем воздуха.
- B3.** В какой из названных тканей содержится больше воздуха?
- B4.** Затруднит или облегчит теплообмен между ногой и окружающим воздухом прослойка воздуха между ногой и поверхностью обуви?

- B5.** Сравните коэффициенты теплопроводности воздуха и строительных материалов (табл. 8.1).
- B6.** Плохая теплопроводность тряпки или матерчатой варежки обусловлена низкой теплопроводностью воздуха, находящегося между волокнами ткани.
- B7.** Как повлияет ложка на температуру наливаемой воды?
- B8.** Температура человеческого тела равна примерно $36,5^{\circ}\text{C}$.
- B9.** В каком случае теплообмен между телами отсутствует?
- B10.** Пальцы рук всегда немного влажные. Сравните коэффициенты теплопроводности дерева и металлов.
- B11.** Как зависит величина теплового потока от разности температур?
- B12.** См. B11.
- B13.** Обменивается ли вода теплом с окружающими телами?
- B14.** В каком случае потери на нагревание окружающей среды больше?
- B15–B16.** См. задачу 8.1.
- B1.** Для калориметра важно, чтобы температура внутри него быстро выравнивалась.
- B2.** Чей коэффициент теплопроводности больше: алюминия или чугуна?
- B3.** Тефлон – материал, обладающий низкой теплопроводностью.

- В4.** На какой половине пруда теплообмен между водой под льдом и морозным воздухом идет более интенсивно?
- В5.** Какова температура дна чайника сразу после того, как его сняли с плиты?
- В6.** В каком направлении «течет» тепло: к центру нити или от центра нити?
- В7.** Коэффициент теплопроводности пара меньше коэффициента теплопроводности воды.
- В8.** В месте контакта капли и раскаленной сковороды образуется паровая «подушка».
- В9.** Как изменяется величина теплового потока с ростом площади поверхности, через которую он проходит?
- В10.** В математике доказывается, что из всех тел равного объема наименьшую площадь поверхности имеет шар.
- В11.** Какая температура выше: воздуха от вентилятора или мороженого?
- В12.** См. задачу 8.1.
- В13–В16.** См. формулу (8.1).
- В17–В18.** См. задачу 8.1.
- В19–В21.** См. задачу 8.2.

- Г1.** Остывание нагретого тела происходит тем быстрее, чем больше разность температур между этим телом и окружающей средой.
- Г2.** Температуру какого тела измеряет термометр?
- Г3.** Температура воздуха, как правило, значительно ниже температуры человеческого тела.

Г4. Газ загорается, если его температура достигает температуры возгорания. Какую роль играет металлическая сетка?

Г5. Коэффициент теплопроводности фарфора примерно в 500 раз меньше коэффициента теплопроводности меди.

Г6–Г7. См. задачу 8.3.

Д1. Медицинский термометр устроен так, что без «встряхивания» ртуть в нем опуститься не может. «Рабочее тело» – ртуть – имеет температуру тела, с которым находится в тепловом равновесии.

Д2. Зависит ли время плавления воска от теплоемкости цилиндра?

Д3. Докажите, что при одинаковой высоте и одинаковом объеме площадь поверхности термоса с круглым сечением меньше, чем площадь поверхности термоса с квадратным сечением.

Д4. См. задачу 8.3.

Д5. Идея решения та же, что и в задаче 8.3.

Д6. Количество тепла Q_1 и Q_2 , необходимые для испарения азота и плавления льда, могут быть записаны в следующем виде:

$$Q_1 = \alpha (t - t_1)\tau_1;$$

$$Q_2 = \alpha (t - t_2)\tau_2,$$

где $t_1 = -195^\circ\text{C}$, $t_2 = 0^\circ\text{C}$.

9

А1. Какой воздух тяжелее: теплый или холодный?

- А2.** Как происходит естественная конвекция в отопляемом помещении?
- А3.** Будет ли горячая жидкость подниматься вверх? А будет ли она опускаться вниз, если жидкость нагревать не снизу, а сверху?
- А4.** Естественная конвекция протекает без участия человека — за счет сил Архимеда, а принудительная...
- А5.** Укажите в каждом из случаев вид теплоотдачи: конвекция, теплопроводность или излучение.
- А6–А7.** Тела каких цветов лучше поглощают излучение?
- А8.** Тела каких цветов хуже поглощают излучение?
- Б1.** Понятно, что воздух над нагретой лампой нагревается. И что с ним происходит дальше?
- Б2.** Сначала вода в колбе холодная и имеет одинаковую температуру. Потом те слои воды, которые находятся ближе к огню (т.е. нижние), нагреваются и... Что происходит дальше?
- Б3.** Воздух за окном обычно холоднее, чем в комнате.
- Б4.** В каком направлении (вверх или вниз) перемещается холодный воздух в помещении?
- Б5.** Как будет двигаться холодный воздух?
- Б6.** Холодные струи воды опускаются вниз.
- Б7.** Кисель вязкий, компот жидкий. Влияет ли это на интенсивность конвекции?
- Б8.** Направление язычка пламени соответствует направлению движения воздуха над свечой.
- Б9.** Могут ли молекулы твердых тел свободно перемещаться с места на место?
- Б10.** Горячая вода, нагретая рубашкой двигателя — 1, движется, конечно же, вверх...
- Б11.** Приборам необходимо охлаждение. Когда мы обеспечиваем доступ холодного воздуха (через отверстия) в аппарат, горячий воздух...
- Б12.** Какое вещество поддерживает горение? Будет ли поступать оно к свече в отсутствие конвекции?
- Б13.** См. текст § 9.
- Б14.** Есть три способа теплопередачи: конвекция, излучение и теплопроводность.
- Б15.** Какой способ теплопередачи «пресекает» закрытая дверца?
- Б16.** Нагрев стратостата нежелателен, так как расширяющийся газ может разорвать оболочку.
- Б17.** Какие виды теплопередачи блокируются указанными способами?
- Б18.** Какой вид теплопередачи приводит к ночному охлаждению почвы?
- В1.** Как будут вести себя холодные слои воды на дне кастрюли? Поднимутся ли они вверх?
- В2.** В каком случае возникает естественная конвекция?
- В3.** Днем суша сильнее нагревается, а ночью сильнее охлаждается.

- В4.** Для быстрого теплообмена необходимо перемешивание горячей и холодной воды.
- В5.** В искусственном спутнике Земли силы Архимеда не действуют.
- В6.** См. формулу (9.2).
- В7.** Что лучше проводит тепло: кирпич или металл? Как называется величина разности температур внутри трубы и снаружи на силу тяги?
- В9.** Какой из чайников лучше поглощает тепло? Испускает тепло?
- В10.** Нагревание скафандра солнечными лучами нежелательно. Что является источником энергии на космическом корабле?
- В11.** Что лучше поглощает излучение: трава или земля? Как будут двигаться горячие слои воздуха, если рядом с ними (сбоку и сверху) имеются более холодные массы воздуха?
- В12.** См. текст § 9.
- Г1.** Стеарин будет активнее плавиться и стекать в ту сторону, где будет выше температура воздуха.
- Г2.** Как будет происходить конвекция воды?
- Г3.** Чтобы муть осела, необходимо конвективное движение воды (вместе с мутью) вниз.
- Г4.** См. формулу (9.2).
- Г5.** За счет каких процессов будет нагреваться (охлаждаться) вода в каждом случае?

- А1.** Тепловой двигатель – это устройство, совершающее механическую работу за счет затрат внутренней энергии. Совершается ли при выстреле механическая работа? Если да, то за счет какой энергии?
- А2–А3.** Подумайте самостоятельно.
- А4.** Какие виды механической энергии Вы знаете?
- А5–А7.** См. формулу (10.1).
- Б1.** Попробуйте привести пример.
- Б2.** За счет какой энергии совершается работа по вращению колеса? За счет какой энергии пар приобретает кинетическую энергию?
- Б3.** Совершает ли газ работу?
- Б4.** Может ли ДВС работать без постоянного притока свежего воздуха?
- Б5.** Рассмотрите внимательно четыре такта работы ДВС по тексту § 10
- Б6.** Совершает ли газ работу во время рабочего хода?
- Б7.** Чем выше температура газа, тем больше его внутренняя энергия.
- Б8.** Если затраченная энергия уменьшается, то как изменяется полезная работа? См. формулу (10.1).
- Б9.** См. задачу 10.1.
- Б10.** Сравните температуру пара в турбине и температуру горячей смеси в начале рабочего хода.

Б11. Как зависит КПД от температуры рабочего тела?

Б12–Б13. См. задачу 10.2.

В1. Совершается ли над газом работа?

В2. В каких случаях температура газа выше?

В3. Что сгорит быстрее: маленькая капля бензина или большая?

В4. В каждом ли такте передается усилие коленчатому валу?

В5. За счет какой энергии движется поршень во время «нерабочих» ходов?

В6. Если цилиндров несколько, как это сказывается на равномерности вращения коленчатого вала?

В7. Детонация происходит раньше, чем поршень достигает верхнего положения в такте «сжатие».

В8. Может ли ДВС начать работать, если в начальный момент поршень неподвижен?

В9. Если двигатель не работает, не работает и вентилятор, обеспечивающий приток свежего воздуха в радиатор.

В10–В11. См. задачу 10.1.

В12. В условии есть лишнее данное «1 час», см. задачу 10.2.

В13. См. задачу 10.2, учесть:

$$m = gV.$$

В14. См. задачу 10.2,

$$A = 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с}.$$

В15. См. задачу 10.2, учесть:

$$A = N\tau, \text{ где } N - \text{мощность,} \\ \tau - \text{время.}$$

В16–В18. См. В15.

В19. Воспользуйтесь формулой

$$\eta = \frac{N\tau}{mq}.$$

$$\text{Г1–Г2. } \eta = \frac{A}{mq}, A = N\tau, \tau = \frac{S}{v}.$$

ОТВЕТЫ

1

$$\text{A1. } m = \frac{Q}{L}.$$

$$\text{A2. } L = \frac{\Delta U}{m}.$$

$$\text{A3. } \lambda = \frac{Q}{m}.$$

$$\text{A4. a) } \rho_1 = \frac{m_1}{V};$$

$$\text{б) } V = \frac{m_1}{\rho_1}.$$

$$\text{A5. } \Delta t = \frac{Q}{c}.$$

$$\text{A6. } m = \frac{Q}{q}.$$

$$\text{A7. a) } V_0 = \frac{V}{\beta t};$$

$$\text{б) } \beta = \frac{V}{V_0 t}.$$

$$\text{A8. } m_{\text{л}} = M - m_{\text{в}}.$$

$$\text{A9. } v_2 = V - v_1.$$

$$\text{A10. } y = m_2 - x.$$

$$\text{A11. } m_{\text{с}} = M - m_{\text{а}}.$$

$$\text{Б1. } L = \frac{\lambda m_x}{m}.$$

$$\text{Б3. a) } \lambda = \frac{cm_a \Delta t}{m}; \text{ б) }$$

$$c = \frac{\lambda m}{m_a \Delta t}.$$

$$\text{Б4. } c = \frac{Q}{t_1 - t_2}.$$

$$\text{Б5. a) } l_0 = \frac{\Delta l}{\alpha t};$$

$$\text{б) } \alpha = \frac{\Delta l}{l_0 t}; \text{ в) } t = \frac{\Delta l}{l_0 \alpha}.$$

$$\text{Б6. } \rho = \frac{M}{V - v}.$$

$$\text{Б7. a) } c = \frac{Q}{m \Delta t};$$

$$\text{б) } m = \frac{Q}{c \Delta t}.$$

$$\text{Б8. a) } \rho = \frac{Q}{m V \Delta t};$$

$$\text{б) } V = \frac{Q}{m \rho \Delta t}.$$

$$\text{Б9. a) } \rho = \frac{\beta Q}{c \Delta V};$$

$$\text{б) } \Delta V = \frac{\beta Q}{c \rho}.$$

$$\text{Б10. a) } \eta = \frac{M c \Delta t}{q m};$$

$$\text{б) } q = \frac{M c \Delta t}{\eta m};$$

$$\text{Б11. a) } S = d\Phi / \alpha \Delta t;$$

$$\text{б) } \Delta t = d\Phi / \alpha S.$$

$$\text{Б12. a) } \beta_1 = \frac{\beta_2 V_2 \Delta t_2}{V_1 \Delta t_1};$$

$$\text{б) } V_1 = \frac{\beta_2 V_2 \Delta t_2}{\beta_1 \Delta t_1}.$$

$$\text{Б13. a) } n = \frac{m}{\rho abc};$$

$$\text{б) } \rho = \frac{m}{nabc}.$$

$$\text{Б14. a) } \rho_0 = -\frac{\Delta \rho}{\beta \Delta t};$$

$$\text{б) } \Delta t = -\frac{\Delta \rho}{\beta \rho_0}.$$

$$\text{Б15. } \lambda = \frac{c_2 m_2 t_2}{m_1 - m_0}.$$

$$\text{Б16. } m = \frac{m_1 \lambda}{c(t - t_0)}.$$

$$\text{Б17.}$$

$$\text{a) } \Delta t = (Q - \lambda c) / mc;$$

$$\text{б) } \lambda = (Q/m) - c \Delta t.$$

$$\text{Б18. } t_{\text{к}} = \frac{\lambda m_{\text{в}}}{cm} + t_{\text{н}}.$$

$$\text{Б19. } t_2 = \frac{Q}{mc} + t_1.$$

$$\text{Б20. } t_1 = \frac{Q}{c} + t_2.$$

$$\text{Б21. } \rho = \frac{\Delta m}{V} + \rho_1.$$

$$\text{Б22. } V_{\text{н}} = \frac{M}{\rho} + V_{\text{к}}.$$

$$\text{Б23. } m = Q/q.$$

$$\text{Б24. } v = m/\rho.$$

$$\text{Б25. } m_1 = Q/\lambda.$$

$$\text{Б26. } m = Q/L.$$

$$\text{Б27. } t = S/v.$$

$$\text{Б1. } m_2 = \frac{(m_1 - m_3)\lambda}{c_2 t}$$

$$\text{Б2. a) } \rho = \frac{\rho_1 V_1 \lambda}{V c(t_1 - t_0)};$$

$$\text{б)} V = \frac{\rho_1 V_1 \lambda}{\rho c(t_1 - t_0)};$$

$$\text{в)} c = \frac{\rho_1 V_1 \lambda}{\rho V(t_1 - t_0)};$$

$$\text{г)} \rho_1 = \frac{\rho V c(t_1 - t_0)}{V_1 \lambda};$$

$$\text{д)} V_1 = \frac{\rho V c(t_1 - t_0)}{\rho_1 \lambda};$$

$$\text{е)} \lambda = \frac{\rho V c(t_1 - t_0)}{\rho_1 V_1}.$$

$$\text{B3. } m = \frac{Q}{c\Delta t + \lambda}.$$

B4.

$$\text{а)} \rho = \frac{Q}{abc(c_1\Delta t + \lambda)};$$

$$\text{б)} a = \frac{Q}{\rho bc(c_1\Delta t + \lambda)}.$$

B5.

$$\text{а)} m = \frac{Q}{c(\theta - t_1)};$$

$$\text{б)} c = \frac{Q}{m(\theta - t_1)}.$$

$$\text{B6. } l_0 = \frac{l}{1 + \alpha t}.$$

$$\text{B7. а)} \alpha = \frac{\Delta l}{l_0(t_2 - t_1)};$$

$$\text{б)} l_0 = \frac{\Delta l}{\alpha(t_2 - t_1)}.$$

$$\text{B8. } S_0 = \frac{S}{1 + 2\alpha t}.$$

$$\text{B9. } \Delta h = \frac{4\Delta V}{\pi d^2}.$$

$$\text{B10. } h = \frac{m}{\rho \pi D^2 h}.$$

$$\text{B11. } V_1 = \frac{V_2}{1 + \beta t}.$$

$$\text{B12. } \rho_1 = \frac{\rho_2}{1 - \beta t}.$$

$$\text{B13. } a = \frac{Q}{\rho V b c \Delta t}.$$

$$\text{B14. } m_2 = \frac{c_1 m_1 \Delta t_1}{c_2 \Delta t_2}.$$

$$\text{B15. } d = \frac{\alpha S(t_2 - t_1)}{\Phi}.$$

$$\text{B16. } \beta = -\frac{\Delta \rho}{\rho \Delta t}.$$

$$\text{B17. } L = \frac{\lambda m}{m_x} - c_B \Delta t.$$

$$\text{B18. } t_1 = \theta - \frac{x}{c_B} \times$$

$$\times [L + c_B(t_2 - \theta)].$$

$$\text{B19. } \lambda = \frac{Q}{\rho abc} - c_B \Delta t.$$

$$\text{B20. } t_1 = \frac{\lambda}{c_B} + t_0.$$

$$\text{B21. } t_1 = \frac{l_1 - l_0}{\alpha l_0}.$$

$$\text{B22. } t_2 = \frac{\Delta l}{\alpha l_1} + t_1.$$

$$\text{B23. } t = \frac{S - S_0}{2\alpha S_0}.$$

$$\text{B24. } \Delta t = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\beta \rho_1}.$$

$$\text{B25. } t_K = t_H - \frac{Q}{nm c_{y\lambda}}.$$

$$\text{B26. } t_H = t_K - \frac{\eta q \rho V}{c}.$$

$$\text{B27. } m_1 = \frac{c_2 m_2 (\theta - t_2)}{c_1 (t_1 - \theta)}.$$

$$\text{B28. } \theta = \frac{t_1(c_1 m_1 + c_2 m_2) + c_3 m_3 t_3}{c_3 m_3 + c_1 m_1 + c_2 m_2}.$$

B29.

$$m_1 = \frac{m_2 c t - m_2 c_2 t_2}{c_1 t_1 - c t}.$$

B30.

$$c_B = \frac{c_{\lambda} m_{\lambda} \theta - c_{\lambda} m_{\lambda} t_{\lambda}}{m_B t_B - m_B \theta}.$$

$$\text{B31. } m_1 = \frac{m_2 (\theta - t_2)}{t_1 - \theta}.$$

$$\text{B32. } V_2 = \frac{V_1(t - t_1)}{t_2 - t}.$$

$$\text{B33. } C = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_1)}{t_2 - \theta}.$$

$$\text{B34. } c_B = \frac{c_{\tau} (\theta - t_2)}{t_1 - \theta}.$$

$$\text{B35. } t_K = \frac{m_B c_B t_H - m_{\lambda} \lambda}{c_B m_{\lambda} + c_B m_B}.$$

$$\text{Г1. } \Delta t = \frac{1}{c} \left(\frac{\eta q M}{m} - \lambda \right).$$

$$\text{Г2. } C = \frac{1}{t_1 - \theta} [(c_1 m_1 + c_2 m_2) \theta - (c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2)].$$

$$\text{Г3. } \rho_B = \frac{c}{V_B c_B} \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_B - t_1}.$$

Г4.

$$c_B = \frac{m_{\lambda} (c_{\lambda} t_{\lambda} + \lambda)}{m_B (t_B - \theta) - m_{\lambda} \theta}.$$

$$\Gamma 5. \theta = \frac{(C + m_1 c_1) t_1 - \lambda (m_2 - y)}{C + m_1 c_1 + m_2 c_1}.$$

$$\Gamma 6. t_2 = \frac{c q_2 t - c q_1 t - q_1 L}{c (q_2 - q_1)}.$$

$$\Gamma 7. \theta = \frac{L m_{\Pi} + c_{\text{B}} m_{\Pi} t_{\text{K}} + c_{\text{B}} m_{\text{B}} t_1}{c_{\text{B}} (m_{\Pi} + m_{\text{B}})}.$$

$$\Gamma 8. \theta = \frac{c_{\text{B}} m_{\text{Л}} t_0 + L m_{\Pi} + c_{\text{B}} m_{\Pi} t_2 - c_{\text{Л}} m_{\text{Л}} (t_0 - t_1) - \lambda m_{\text{Л}}}{c_{\text{B}} m_{\Pi} + c_{\text{B}} m_{\text{Л}}}.$$

$$\Gamma 9. \begin{cases} m = m_{\text{B}} - m; \\ \lambda = \frac{(L + c_{\text{B}} \Delta t) (m_{\text{B}} - m)}{m}. \end{cases}$$

$$\Gamma 10. \begin{cases} y = \frac{1}{\lambda} [m_{\text{B}} (t_1 - \theta) - c m_{\Pi} (\theta - t_{\Pi})]; \\ x = m_{\Pi} - \frac{1}{\lambda} [m_{\text{B}} (t_1 - \theta) - c m_{\Pi} (\theta - t_{\Pi})]. \end{cases}$$

$$\Gamma 11. \begin{cases} x = m_2 + \frac{c m_2 (t_1 - \Delta t) - c_1 m_1 \Delta t}{\lambda}; \\ y = \frac{c m_2 (t_1 - \Delta t) - c_1 m_1 \Delta t}{\lambda}. \end{cases}$$

$$\text{Д1.} \begin{cases} m_{\Pi} = \frac{M [L + c_{\text{B}} (t_2 - \theta)]}{c_{\text{Л}} (t_0 - t_1) + \lambda + c_{\text{B}} (\theta - t_0) + L + c_{\text{B}} (t_2 - \theta)}; \\ m_{\Pi} = M - \frac{M [L + c_{\text{B}} (t_2 - \theta)]}{c_{\text{Л}} (t_0 - t_1) + \lambda + c_{\text{B}} (\theta - t_0) + L + c_{\text{B}} (t_2 - \theta)}. \end{cases}$$

$$\text{Д2.} \begin{cases} x = \frac{c_{\text{B}} (\theta - t_1)}{L + c_{\text{B}} t_2}; \\ y = \frac{c_{\text{B}} (\theta - t_1)}{c_{\text{B}} (\theta - t_1) + L + c_{\text{B}} t_2}. \end{cases}$$

$$\text{Д3.} \quad y = \frac{\theta - t_2}{t_1 - \theta}.$$

$$\text{Д4.} \begin{cases} m_{\text{a}} = \frac{(c_{\text{B}} m_{\text{B}} + C_{\text{K}}) \theta - c_{\text{B}} m_{\text{B}} t_2 - C_{\text{K}} t_2}{c_{\text{a}} t_1 - c_{\text{c}} t_1 + c_{\text{c}} \theta - c_{\text{a}} \theta}; \\ m_{\text{c}} = m - \frac{(c_{\text{B}} m_{\text{B}} + C_{\text{K}}) \theta - c_{\text{B}} m_{\text{B}} t_2 - C_{\text{K}} t_2}{c_{\text{a}} t_1 - c_{\text{c}} t_1 + c_{\text{c}} \theta - c_{\text{a}} \theta}. \end{cases}$$

$$\text{Д5.} \begin{cases} v = (m_1 - m_{\Pi}) / \rho_{\text{B}}; \\ v_{\text{c}} = (m_1 - m_2) / \rho_{\text{B}}; \\ \rho_{\text{c}} = (m_{\text{c}} \rho_{\text{B}}) / (m_1 - m_2). \end{cases}$$

$$\text{Д6.} \begin{cases} m_3 = \frac{M \rho_2 (\rho_1 - \rho)}{\rho (\rho_1 - \rho_2)}; \\ m_{\text{K}} = \frac{M \rho_1 (\rho - \rho_2)}{\rho (\rho_1 - \rho_2)}. \end{cases}$$

$$\text{Д7.} \begin{cases} \rho = \frac{m_1 \rho_2 - m_2 \rho_1}{m_1 - m_2}; \\ V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_2 - \rho_1}. \end{cases}$$

- A1.** а) 60 см^2 ; б) $0,18 \text{ м}^2$; в) 37 мм^2 ; г) $2,04 \text{ м}^2$.
A2. а) $2 \cdot 10^2$; б) $3 \cdot 10^3$; в) $6 \cdot 10^4$; г) $7 \cdot 10^5$; д) $8 \cdot 10^6$; е) $9 \cdot 10^9$; ж) $9 \cdot 10$; з) $2,1 \cdot 10^2$; и) $3,1 \cdot 10^3$; к) $6,2 \cdot 10^4$; л) $7,6 \cdot 10^5$; м) $9,5 \cdot 10$; н) $2,103 \cdot 10^2$; о) $3,1125 \cdot 10^3$; п) $1,95646 \cdot 10^3$.
A3. а) 2 см; б) 2,9 см; в) 38 см; г) 0,73 м; д) 91 мм; е) 1,9 м.
Б1. а) 25 см^2 ; б) 10 см^2 ; в) $2,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2$; г) $3,1 \cdot 10^3 \text{ см}^2$; д) $6,0 \text{ см}^2$; е) $1,4 \cdot 10^5 \text{ см}^2$.
Б2. а) $9,55 \cdot 10$; б) $9,55 \cdot 10^{-1}$; в) $9,36 \cdot 10^4$; г) $9,36 \cdot 10^{-2}$; д) $1,23 \cdot 10^{-3}$; е) $1,230001 \cdot 10^8$; ж) $1,2 \cdot 10^{-4}$; з) $2,3 \cdot 10^{-2}$; и) $1,406 \cdot 10^{-1}$; к) $1,406 \cdot 10^3$; л) $1,404 \cdot 10^{-4}$; м) $1,404 \cdot 10^8$.
Б3. а) 34 см; б) 4 см; в) 2 км; г) 3,93 м; д) 27 мм; е) 55 мм.
Б4. а) $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; б) 0,20 м; в) 8 м; г) 0,21 м; д) $2,0 \cdot 10^3 \text{ км}$; е) 100 мм.
В1. а) $7,8 \cdot 10^2 \text{ мм}^3$; б) $1 \cdot 10^{11} \text{ мм}^3$; в) $1,7 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$; г) $3,1 \text{ мм}^3$; д) $3,0 \cdot 10^{13} \text{ мм}^3$; е) $1,1 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$; ж) $3,1 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$; з) $1,1 \cdot 10^3 \text{ мм}^3$; и) $2 \cdot 10^7 \text{ мм}^3$.
В2. а) 4,7 мм; б) 15,3 мм; в) 2 м; г) 46 см; д) $8,80 \cdot 10^3 \text{ мм}$.
В3. а) 2,0 м; б) 4,81 см; в) 10 см; г) $1,07 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

- A1.** 100 кДж. **A2.** 1,0 ккал. **A3.** $5,0 \cdot 10^2 \text{ Дж/град}$. **A4.** 1 ккал.
A5. 4,2 МДж. **A6.** 49,3 кДж. **A7.** 2,3 ккал. **A8.** 0,55 МДж.
A9. 19 МДж. **A10.** 3,36 Мкал. **A11.** 33,0 ккал. **A12.** 38,9 Мкал.
A13. 3,1 Мкал. **A14.** 4,3 Мкал. **Б4.** 34 кДж. **Б5.** $6 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$.
Б6. $3 \cdot 10^4 \text{ Дж}$. **Б7.** 90 кДж. **Б8.** $1 \cdot 10^4 \text{ кал}$. **Б9.** 3,1 МДж.
Б10. 77 МДж. **Б11.** 0,40 кг. **Б12.** 31 кал/(кг·град). **Б13.** 10°C .
Б14. 61 г. **Б15.** $2,0 \cdot 10^2 \text{ кал/(кг·град)}$. **Б16.** 30°C .
В5. $t_{\text{н}} = t_{\text{к}} + \frac{Q}{cm} \approx 32,3^\circ\text{C}$. **В6.** $t_{\text{к}} = t_{\text{н}} - \frac{Q}{cm} \approx 20^\circ\text{C}$. **В7.** $4,0 \cdot 10^2$
 $^\circ\text{C}$.
В8. $Q = (c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} V_{\text{в}} + c_{\text{ал}} m_{\text{ал}}) \Delta t \approx 0,52 \text{ МДж}$. **В9.** 2,0 МДж. **В10.** 22 МДж.
В11. $\Delta t = \frac{Q}{c_1 m_1 + c_2 m_2} \approx 1,97^\circ\text{C}$. **В12.** $m_1 = \frac{1}{c_1} \left(\frac{Q}{\Delta t} - c_2 m_2 \right) \approx 0,21 \text{ кг}$.
В13. $c_1 = \frac{1}{m_1} \left(\frac{Q}{\Delta t} - c_2 m_2 \right) \approx 5,8 \cdot 10^2 \text{ кал/(кг·град)}$.

$$\text{В14. } \Delta t_1 = \frac{c_2 m_2 \Delta t_2}{c_1 m_1} \approx 200^\circ\text{C.} \quad \text{В15. } 220 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град}). \quad \text{В16. } 3,6 \text{ кг.}$$

4

- A1.** 34°C . **A2.** 37°C . **B1.** 50 г. **B2.** 12°C .
B3. 56 г. **B4.** 96°C . **B5.** 11°C . **B6.** 19°C .
B7. $1,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/}(\text{кг} \cdot \text{град})$. **B8.** 0,22 кг. **B9.** 96°C .
B10. 77°C . **B1.** 10°C . **B2.** 80°C . **B3.** $m_{\text{гор}}/m_{\text{хол}} \approx 0,67$.
B4. 79 л. **B5.** $1,5 \cdot 10^2 \text{ л}$. **B6.** $1,3 \cdot 10^2^\circ\text{C}$. **B7.** -12°C .
B8. 11°C . **B9.** 200°C . **B10.** 19 кал/град;
 $1,9 \cdot 10^2 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град})$.
B11. 33°C . **B12.** 79°C . **B13.** 9,4 г.
B14. $9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж/}(\text{кг} \cdot \text{град})$. **B15.** $2,5 \cdot 10^2 \text{ Дж/град}$.
B16. $\frac{c_{\text{ал. лож.}}}{c_{\text{сер. лож.}}} \approx 1,01$. **Г1.** 53°C .
Г2. -19°C ; 1,3 МДж. **Г3.** $5,4 \cdot 10^2 \text{ кал/}(\text{кг} \cdot \text{град})$.
Г4. $8,0 \cdot 10^{20}\text{C}$. **Д1.** 55°C .
Д2. $m_{\text{св}} \approx 95 \text{ г}$; $m_{\text{ал}} \approx 55 \text{ г}$. **Д3.** $1,4 \cdot 10^2 \text{ Дж/град}$.
Д4. 0,14 кг.

5

- A9.** 1,4 ккал. **A10.** 7,7 ккал. **A11.** 910 Мкал. **A12.** 22 ккал.
A13. 0,22 Мкал. **B12.** 10,0 г. **B13.** 27 ккал/кг. **B14.** 20,0 г.
B15. 33 кал/г. **B16.** $Q_{\text{Al}} - Q_{\text{Cu}} \approx 50 \text{ ккал}$. **B18.** $x \approx 13,3$.
B19. $x \approx 160$. **B20.** 8,7 Мкал. **B21.** 23 ккал. **B22.** 13,6 Мкал.
B23. 10,5 г. **B24.** 1,50 кг. **B25.** 27 ккал/кг. **B26.** 31°C .
B3. $x \approx 4,0$. **B4.** 17 ккал. **B5.** $4,3^\circ\text{C}$. **B6.** 10 ккал.
B7. 66 ккал. **B8.** 10 кг. **B9.** 37°C . **B10.** 2,5 кг.
B11. 25°C . **B12.** 33 г. **Г3.** 78 г. **Г4.** 6,9 г.
Г5. 17%. **Г6.** 26 г. **Г7.** 1 м. **Г8.** 33 кг.
Г9. а) 5,4 г; б) 0,096 ккал/(\text{кг} \cdot \text{град}).
Г10. $1,2 \cdot 10^2^\circ\text{C}$. **Г11.** $1,4 \cdot 10^2^\circ\text{C}$. **Г12.** 7,5 г. **Г13.** $5,2^\circ\text{C}$.
Г14. $-7,3^\circ\text{C}$. **Г15.** 40 кг. **Г16.** 0,19 кг. **Г17.** 0°C .
Г18. $\theta = 0^\circ\text{C}$. В сосуде, кроме воды, будет 5 г льда.
Г19. 0°C ; нет; 66%.
Г20. Температура смеси 0°C ; масса воды 200 г; масса льда 400 г.
Г21. 0°C . **Г22.** -49°C . **Г23.** 0°C ; 7,6 л.

$$\text{Д1. } h + R = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}}}{\rho_{\text{л}} \lambda_{\text{л}}} (t - t_0) R + \frac{R}{3} \approx 2,4 \text{ см; см. рис. 5.15.}$$

$$\text{Д2. } C \approx 0,24 \text{ ккал/град.}$$

6

- | | | |
|---|--|---|
| А8. 1,3 Мкал.
А11. 0,19 МДж.
Б11. 300 кДж/кг.
Б14. 6,2 Мкал.
В3. 33 ккал; 21 ккал; 6,9 ккал; 0,11 Мкал.
В5. 0,13 Мкал.
В8. 1,4 Мкал.
В11. 0,17 кг.
В14. 1,2 г.
Г5. 113 г.
Г7. Вода и калориметр нагрелись до 100°C, а затем 51 г воды испарилось.
Г8. 2,0 кг; нет; 1,0 кг; 2,3 МДж.
Г9. 90 г.
Г12. 88°C.
Г14. 4,6 кг.
Д2. 1) $\theta = 0^\circ\text{C}$; 2,2 г снега; 97,8 г воды. Если учесть теплоемкость калориметра, масса снега будет больше. 2) $\theta = 60^\circ\text{C}$; только вода; если учесть теплоемкость калориметра, температура воды будет меньше.
Д3. 6,4%. | А9. 6,4 ккал.
Б4. На 350 кДж.
Б12. 54 кг.
Б15. 2,0 кг.
В6. 0,17 кг.
В9. 3,8 кг.
В12. 51 кг.
Г3. $5,4 \cdot 10^2$ ккал/кг.
Г6. 420 г; 80 г.
Г10. 34 г.
Г13. $\theta = 0^\circ\text{C}$; растает 52,8 г льда.
Г15. 38°C.
Д4. 72 г. | А10. 0,52 Мкал.
Б10. 8,00 кг.
Б13. 0,21 Мкал.
В2. 3,1 Мкал.
В4. 1,2 Мкал.
В7. 0,72 Мкал.
В10. 31 кг.
В13. 105,4°C.
Г4. 3,6 кг.
Д1. 34°C.
Д5. 0,4 см. |
|---|--|---|

7

- | | | |
|---|---|---|
| А3. $1,2 \cdot 10^5$ ккал.
А6. 44 МДж/кг.
Б4. 17 Мкал.
Б7. 11%.
В1. 5,4 МДж, 26 кг.
В4. 33 кг.
В7. 40 кг.
В10. 6,4 мин.
В13. 6,3 мин.
В16. 204 кДж, 7,6 г. | А4. 0,90 Мкал/кг.
Б3. 3,5 кг; 0,79 кг; 1,3 кг; 0,79 кг.
Б5. 11 т.
Б8. 40%.
В2. 50 кг.
В5. 62°C.
В8. 38 т.
В11. 3,7 мин.
В14. 10 м ³ .
В17. 52%. | А5. 6,6 кг.
Б6. 6,0 кг.
Б9. 59%.
В3. 27 кг.
В6. 41%.
В9. 22 кг.
В12. 1,7 ч.
В15. 1,1 кг.
Г1. $2,6 \cdot 10^3$ вагонов. |
|---|---|---|

- Г3. $q = 2 \cdot 10^7$ Дж/кг; $\eta = 0,7$. Г4. 3,5 кВт.
 Г5. 28 Дж; 2,1 кг. Г6. 1,4 кг. Г7. 0,20 кг.
 Г8. В 3,2 раза; 0,05 кг. Г9. 1,5 кг в секунду. Г10. $25 \cdot 10^{-3}$ г.
 Д1. 2,4 МДж/кг. Д2. 0,23 кДж/(кг·град). Д3. 12 мин; 0,14 г.
 Д4. 0,16 кДж в секунду. Д5. 42 с. Д6. 20 капель; 0,4 °С.

8

- Б15. 1,0 кВт. Б16. 0,69 кВт. Б12. 86 Вт; 0,17 кг.
 В13. 10 см. В14. 40 °С. В15. 1,5
 Вт/(м·град).
 В16. 12 м². В17. 54 г. В18. 11 кг.
 В19. 100,48 °С. В20. 147 °С. В21. 0,96 мм.
 Г5. Температура воды в медном чайнике 97 °С; в фарфоровом 91,4 °С.
 Г6. 12 °С; 9,25 см. Г7. 14 °С; 0,16 Вт/(м·град).
 Д3. Если d – диаметр круглого сечения, h – высота термоса, а l – сторона квадратного сечения, то площади боковых поверхностей термосов равны: $S_{\text{кр}} = \pi dh$; $S_{\text{квадр}} = 4lh$, а объем $V_{\text{кр}} = \frac{\pi d^2 h}{4}$, $V_{\text{квадр}} = l^2 h$.
 Д4. 8,3 °С.

- Д5. В расплавленном состоянии находится $\frac{l_1}{l_1 + l_2} = \frac{k(t_1 - t_{\text{пл}})}{k(t_1 - t_{\text{пл}}) + (t_{\text{пл}} - t_2)}$ часть металла, где l_1 – длина нижней части трубы, заполненной расплавленным чугуном; l_2 – длина верхней части трубы, заполненной чугуном в твердом состоянии.
 Д6. $L = \frac{2m\lambda}{\rho V} \cdot \frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \frac{t - t_1}{t - t_2} \approx 1,9 \cdot 10^5$ Дж/кг.

9

- Б5. Вверху. (Почему?)
 Б6. Когда поставили на лед. (Почему?)
 Б10. Вниз. (Почему?)
 В1. Нет. (Почему?)
 В2. Если в холодную наливать горячую. (Почему?)
 Г1. Стеарин стекает в сторону стенки.
 Г2. Если уровень воды опустится ниже уровня $a-b$, двигатель сгорит.
 Г3. Зимой. (Почему?)
 Г4. В покрытом одним стеклом.

A1. Да.	A2. Кинетическая.	A5. 20%, 33%.
A6. Второй.	A7. 20%, 25%.	B1. Да.
B2. Второго и третьего.	B7. Вначале.	B8. Уменьшает
КПД.		
B9. 16.	B11. У второго.	B12. 30%.
B13. 25%.		
B2. а) в начале рабочего хода; б) в конце такта сжатия.		
B10. 8.	B11. 25.	B12. 25%.
B13. 28%.	B14. 24%.	B15. 3,6%.
B16. 20%.	B17. 20%.	B18. 33%.
B19. 25 кВт.	Г1. 20%.	Г2. 6,13 кг.

Филатов Евгений Николаевич

ФИЗИКА – 7

Часть 1. Тепловые явления

Учебное пособие

Набор и верстка *Е.Н.Кочубей*

Подписано в печать 28.05.2014. Формат 60×84/16.

Объем 12,25 п.л. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ .
АНО ЗФМЛ “Авангард”. 115446, Москва, Коломенский проезд, д.16
Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское ш., 31