

Содержание

Предисловие	15
Что нового в книге	15
Увидеть мир глазами физика	17
Благодарности	19
Об авторе	24
Студентам	25
Как работать с книгой	25
О задачах	25
Ждем ваших отзывов!	27
Авторы фотографий	28
Глава 1. Введение, измерения, оценки	31
1.1. Природа науки	32
1.2. Физика и ее связь с другими областями науки	35
1.3. Модели, теории и законы	37
1.4. Измерение и погрешность; значащие цифры	38
Погрешность	38
Значащие цифры	39
Экспоненциальное представление числа	42
* Относительная погрешность и значащие цифры	42
Приближенные вычисления	42
Точность и прецизионность	43
1.5. Единицы измерения, стандарты и СИ	43
Длина	43
Время	45
Масса	46
Приставки единиц	46
Системы единиц	47
* Основные и производные величины	48
1.6. Преобразование единиц измерения	49
1.7. Быстрая оценка порядка величины	52
Более трудный, но мощный пример	56
*1.8. Размерности и анализ размерностей	57

Глава 2. Описание движения: кинематика в одном измерении	69
2.1. Системы координат и перемещение	71
2.2. Средняя скорость	74
2.3. Мгновенная скорость	77
2.4. Ускорение	79
Торможение	82
2.5. Равноускоренное движение	83
2.6. Решение задач	86
2.7. Свободно падающие тела	92
Дополнительный пример — применение квадратичной формулы	102
2.8. Графический анализ линейного движения	104
Вектор скорости как наклон кривой	104
Наклон и ускорение	106
Глава 3. Кинематика в двух измерениях. Векторы	129
3.1. Векторы и скаляры	130
3.2. Графическое сложение векторов	131
3.3. Вычитание векторов и умножение вектора на скаляр	135
3.4. Покомпонентное сложение векторов	136
Компоненты вектора	136
Сложение векторов	140
3.5. Баллистическое движение	145
3.6. Решение задач баллистического движения	149
Предельное расстояние по горизонтали	155
*3.7. Баллистическое движение по параболе	158
3.8. Относительная скорость	159
Глава 4. Динамика: законы движения Ньютона	185
4.1. Сила	186
4.2. Первый закон Ньютона	188
Инерциальные системы отсчета	190
4.3. Масса	190
4.4. Второй закон Ньютона	191
4.5. Третий закон Ньютона	195
4.6. Сила гравитации и нормальная реакция опоры	202
4.7. Решение задач на законы Ньютона	207
Натяжение гибкого шнура	213
4.8. Задачи с трением и наклонными плоскостями	219
Трение	219
Наклонная плоскость	227

Глава 5. Движение по окружности. Гравитация	257
5.1. Кинематика равномерного движения по окружности	258
5.2. Динамика равномерного движения по окружности	263
5.3. Повороты на шоссе	269
*5.4. Неравномерное движение по окружности	274
5.5. Закон всемирного тяготения Ньютона	276
5.6. Сила тяготения вблизи поверхности Земли	281
5.7. Спутники и “невесомость”	283
Движение спутников	283
Невесомость	286
5.8. Планеты, законы Кеплера и обобщение Ньютона	289
Законы Кеплера	290
Третий закон Кеплера, масса Солнца, пертурбации	293
Другие центры притяжения для законов Кеплера	294
Отдаленные планетарные системы	295
Обобщение Ньютона	295
Системы отсчета, связанные с Солнцем и с Землей	296
5.9. Восходы Луны	297
5.10. Типы сил в природе	298
Глава 6. Работа и энергия	319
6.1. Работа постоянной силы	320
*6.2. Работа переменной силы	326
6.3. Кинетическая энергия и связь энергии и работы	328
6.4. Потенциальная энергия	332
Гравитационная потенциальная энергия	333
Определение потенциальной энергии в общем случае	336
Потенциальная энергия упругой пружины	336
6.5. Консервативные и неконсервативные силы	338
Расширение принципа связи работы и энергии	340
6.6. Механическая энергия и ее сохранение	341
6.7. Решение задач с использованием сохранения механической энергии	342
6.8. Другие виды энергии и преобразование энергий.	
Закон сохранения энергии	350
6.9. Сохранение энергии при участии диссипативных сил: решение задач	352
Принцип связи работы и энергии и закон сохранения энергии	353
6.10. Мощность	356
Глава 7. Импульс	383
7.1. Импульс и его связь с силой	384
7.2. Сохранение импульса	387
7.3. Столкновения и импульс	394

7.4. Сохранение энергии и импульса при столкновениях	396
7.5. Упругие столкновения в одном измерении	397
7.6. Неупругие столкновения	402
*7.7. Столкновения в двух измерениях	405
7.8. Центр масс	409
*7.9. Центр масс человеческого тела	413
*7.10. Центр масс и поступательное движение	415
Глава 8. Вращательное движение	441
8.1. Угловые величины	442
8.2. Постоянное угловое ускорение	451
8.3. Качение (без проскальзывания)	453
8.4. Вращающий момент	455
*Силы, стремящиеся наклонить ось	460
8.5. Динамика вращения, момент сил и момент инерции	460
8.6. Решение задач по динамике вращения	465
Дополнительный, более сложный пример	467
8.7. Кинетическая энергия вращения	469
Работа момента силы	473
8.8. Момент импульса и его сохранение	473
*8.9. Векторная природа угловых величин	478
Глава 9. Статическое равновесие, упругость и разрушение	507
9.1. Условия равновесия	509
Первое условие равновесия	510
Второе условие равновесия	512
9.2. Решение задач на статику	513
*Более сложный пример: лестница	519
9.3. Применение статики к мышцам и суставам	521
9.4. Устойчивость и равновесие	526
9.5. Упругость, напряжение и деформация	528
Упругость и закон Гука	528
Модуль Юнга	529
Напряжение и удлинение	532
Растяжение, сжатие и сдвиг	532
Изменение объема — объемный модуль упругости	534
9.6. Разрушение	535
*9.7. Арки и купола	539
Глава 10. Жидкости	569
10.1. Агрегатные состояния вещества	570
10.2. Плотность вещества	571

10.3. Давление в жидкостях	572
10.4. Атмосферное и манометрическое давления	576
Атмосферное давление	576
Манометрическое давление	577
10.5. Принцип Паскаля	578
10.6. Измерение давления	579
10.7. Плаву́честь и принцип Архимеда	583
10.8. Движение жидкости. Поток жидкости и уравнение неразрывности	591
10.9. Уравнение Бернулли	594
10.10. Применения принципа Бернулли	597
Крыло самолета и подъемная сила	598
Парусники	599
Крученый мяч	600
Транзиторная ишемическая атака	601
Другие применения	602
*10.11. Вязкость	603
*10.12. Жидкость в трубах. Уравнение Пуазёйля. Ток крови	604
*10.13. Поверхностное натяжение	606
*Капиллярность	609
*10.14. Насосы и сердце	610
Глава 11. Колебания и волны	633
11.1. Простое гармоническое движение — колебания пружины	635
11.2. Энергия при простом гармоническом движении	640
11.3. Период и синусоидальная природа простого гармонического движения	644
Период и частоты — вывод	646
Положение объекта как функция времени	647
Синусоидальное движение	649
*Скорость и ускорение как функции от времени	649
11.4. Простой маятник	651
11.5. Затухающее гармоническое движение	654
11.6. Вынужденные колебания и резонанс	656
11.7. Волновое движение	658
11.8. Типы волн: поперечная и продольная	662
Скорость поперечных волн	664
Скорость продольных волн	665
Прочие волны	666
11.9. Перенос энергии волнами	667
Связь интенсивности волны с амплитудой и частотой	670
11.10. Отражение волн	670
11.11. Интерференция и принцип суперпозиции	672
11.12. Стоячие волны. Резонанс	676

*11.13. Преломление	679
*11.14. Дифракция	682
*11.15. Математическое представление движущейся волны	684
Глава 12. Звук	707
12.1. Характеристики звука	708
12.2. Интенсивность звука	712
Уровень громкости	713
Связь интенсивности и амплитуды	717
*12.3. Ухо	718
*Реакция уха	718
12.4. Источники звука: вибрирующие струны и воздушные столбы	720
Струнные инструменты	721
Духовые инструменты	724
*12.5. Качество звука и шум. Суперпозиция	729
12.6. Интерференция звуковых волн. Биения	731
Интерференция в пространстве	731
Интерференция во времени — биения	733
12.7. Эффект Доплера	736
Эффект Доплера для света	742
*12.8. Ударные волны и сверхзвуковой хлопок	743
*12.9. Применения: гидролокация, ультразвук, УЗИ	745
*Сонар	745
*УЗИ	746
Глава 13. Температура и кинетическая теория	769
13.1. Атомная теория вещества	770
13.2. Температура и термометры	773
Температурные шкалы	775
*Стандартная температурная шкала	777
13.3. Термическое равновесие и нулевой закон термодинамики	778
*Нулевой закон термодинамики	778
13.4. Термическое расширение	778
Линейное расширение	779
Расширение объема	782
Аномальное поведение воды при температуре ниже 4°C	783
*Термические напряжения	784
13.5. Газовые законы и абсолютная температура	785
13.6. Закон идеального газа	788
13.7. Решение задач на закон идеального газа	790
13.8. Идеальный газ с точки зрения молекул. Число Авогадро	793
13.9. Кинетическая теория и молекулярная интерпретация температуры	795

*Кинетическая энергия вблизи абсолютного нуля	800
13.10. Распределение молекул по скоростям	801
13.11. Реальные газы и фазовые переходы	802
13.12. Давление пара и влажность	805
Испарение	805
Давление пара	806
Кипение	807
Парциальное давление и влажность	808
*13.13. Диффузия	811
Глава 14. Теплота	833
14.1. Теплота как передача энергии	834
14.2. Внутренняя энергия	837
Различие между температурой, теплотой и внутренней энергией	837
Внутренняя энергия идеального газа	837
14.3. Удельная теплоемкость	838
*Удельная теплоемкость газов	841
14.4. Решение калориметрических задач	841
Бомбовый калориметр	845
14.5. Скрытая теплота	846
Испарение	851
Кинетическая теория скрытой теплоты	851
14.6. Передача теплоты: теплопроводность	852
*R-значения строительных материалов	855
14.7. Передача теплоты: конвекция	855
14.8. Передача теплоты: излучение	857
Глава 15. Законы термодинамики	881
15.1. Первый закон термодинамики	882
*Расширение первого закона термодинамики	884
15.2. Термодинамические процессы и первый закон	885
Изотермические процессы ($\Delta T = 0$)	885
Адиабатические процессы ($Q = 0$)	886
Изобарический и изохорический процессы	887
Работа при изменении объема	887
*15.3. Метаболизм человека и первый закон термодинамики	892
15.4. Второй закон термодинамики — введение	893
15.5. Тепловые двигатели	895
Паровой двигатель и двигатель внутреннего сгорания	896
*Почему для теплового двигателя необходима разность температур	897
Эффективность	898
Двигатель Карно	900

15.6. Холодильники, кондиционеры и тепловые насосы	903
*Сезонный коэффициент энергоэффективности	908
15.7. Энтропия и второй закон термодинамики	909
15.8. Порядок и беспорядок	912
Биология и энтропия	914
“Стрела времени”	914
15.9. Недоступность энергии. Тепловая смерть	914
*15.10. Статистическая интерпретация энтропии и второго закона	916
*15.11. Тепловое загрязнение, глобальное потепление и энергетические ресурсы	919
Приложение А. Математический обзор	943
А.1. Отношения, пропорциональности и уравнения	943
А.2. Степень	944
А.3. Степени 10, экспоненциальная запись	946
А.4. Алгебра	947
Поиск неизвестного	947
Две и более неизвестных	949
Квадратичная формула	951
А.5. Биномиальное разложение	952
А.6. Геометрия на плоскости	953
А.7. Тригонометрические функции и тождества	954
А.8. Логарифмы	959
Приложение Б. Избранные изотопы	963
Приложение В. Вращающиеся системы отсчета, инерционные силы, эффект Кориолиса	971
Инерциальные и неинерциальные системы отсчета	971
Фиктивные (инерциальные) силы	972
Эффект Кориолиса	973
Приложение Г. Молярная удельная теплоемкость газов, распределение энергии по степеням свободы	977
Молярная удельная теплоемкость газов	977
Распределение энергии по степеням свободы	979
Твердые вещества	981
Ответы к задачам с нечетными номерами	983
Предметный указатель	1001



Когда холодно, теплая одежда действует как изолятор, уменьшающий потери теплоты от тела в окружающую среду за счет теплопроводности и конвекции. Тепловое излучение от костра может нагреть вас и вашу одежду. Огонь может передавать энергию с помощью конвекции и теплопроводности непосредственно к приготовляемой вами пище. Теплота, как и работа, представляет собой передачу энергии, и определяется как передача энергии из-за разности температур. Внутренняя энергия U представляет собой сумму энергий всех молекул системы.

ГЛАВА 14

Теплота

Вводный вопрос

Куб теплого (60°C) железа массой 5 кг помещают в тепловой контакт с кубом холодного (15°C) железа массой 10 кг. Какое из утверждений верно?

а) Теплота самопроизвольно перетекает из теплого куба в холодный до тех пор, пока кубы не будут иметь одинаковое содержание теплоты.

СОДЕРЖАНИЕ

- 14.1. Теплота как передача энергии
- 14.2. Внутренняя энергия
- 14.3. Удельная теплоемкость
- 14.4. Решение calorиметрических задач
- 14.5. Скрытая теплота

- б) Теплота самопроизвольно перетекает из теплого куба в холодный до тех пор, пока кубы не будут иметь одинаковую температуру.
- в) Теплота может протекать самопроизвольно как из теплого куба в холодный, так и от холодного куба к теплому.
- г) Теплота течет из большего куба к меньшему, потому что больший куб имеет большую внутреннюю энергию.

СОДЕРЖАНИЕ

- 14.6. Передача теплоты: теплопроводность
- 14.7. Передача теплоты: конвекция
- 14.8. Передача теплоты: излучение

Если котелок с холодной водой поставить на зажженную горелку плиты, то температура воды возрастет. Мы говорим, что теплота от горячей горелки перешла к холодной воде. Когда два тела, имеющие разные температуры, находятся в контакте, теплота переходит от более теплого к более холодному телу. Поток теплоты направлен таким образом, чтобы температуры тел стали одинаковыми. Если два тела пребывают в контакте достаточно долго, так что их температуры становятся одинаковыми, то говорят, что тела находятся в тепловом равновесии; при этом никакого переноса теплоты между ними не существует. Например, ртуть в медицинском термометре поднимается вверх, когда теплота от тела пациента передается термометру; если ртуть останавливается, то, следовательно, термометр пришел в тепловое равновесие с телом пациента; при этом температуры термометра и тела становятся одинаковыми.

Теплоту и температуру часто путают, однако это очень разные понятия, и в этой главе мы будем проводить четкое различие между ними. Мы начинаем с определения и использования концепции теплоты. Мы также обсудим, как теплота используется в калориметрии, как оно участвует в изменении состояния вещества, а также рассмотрим процессы теплопередачи — теплопроводность, конвекцию и излучение.

14.1. Теплота как передача энергии

Мы используем термин “теплота” в повседневной жизни, и думаем, что мы точно знаем, что мы имели в виду. Но на самом деле этот термин часто используется непоследовательно, поэтому для прояснения явлений и понятий, связанных с теплотой, важно ясно и точно определить термин “теплота”.

Обычно говорят о потоке теплоты — теплота “перетекает” от горелки плиты к кофейнику с кофе, от Солнца к Земле, от тела человека к медицинскому термометру. Теплота самопроизвольно перетекает от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. В модели теплоты в физике XVIII века считалось, что поток теплоты является результатом перемещения гипотетической субстанции, подобной жидкости и называемой *теплородом*. Согласно теории те-

плорода, любое тело содержит некоторое количество этой субстанции, и если в тело перетечет еще некоторое ее количество, то температура тела повысится; если же теплород вытечет из тела, то его температура понизится. Считалось, что когда тело разрушается (например, в процессе его сжигания), то освобождается значительное количество теплорода.

Однако в процессе переноса теплоты никогда не отмечалось изменения массы тела, и никаким другим методом теплород также не мог быть обнаружен. Поэтому предполагалось, что у теплорода нет ни массы, ни запаха, ни вкуса, ни цвета. Несмотря на несколько таинственный характер этой субстанции, теория теплорода объясняла многие наблюдаемые явления, в частности тепловой поток от горячего тела к холодному. Но, как мы вскоре увидим, были обнаружены явления, не находившие удовлетворительного объяснения в рамках этой теории.

Хотя теория теплорода давно отброшена, ее отголоски остались, например выражение “тепловой поток”, как если бы теплота была жидкостью. Одна из обычных используемых единиц измерений теплоты называется **калорией** (кал) (“теплород” по латыни — *calorie*). Эта единица определяется как количество теплоты, необходимое для повышения температуры одного грамма воды на один градус Цельсия (точнее — от температуры 14,5°C до температуры 15,5°C. Эта конкретная температура указана потому, что количество теплоты, требуемое для нагрева, хотя и совсем незначительно, зависит от температуры. В диапазоне температур от 0 до 100 °C это изменение составляет не более 1%, и для большинства целей этим различием можно пренебречь). Чаще используется более крупная единица — **килокалория** (ккал), которая равна 1000 кал. Таким образом, 1 ккал — это количество теплоты, необходимое для повышения температуры 1 кг воды на 1°C (от 14,5°C до 15,5°C). Иногда килокалорию называют *большой калорией* (1 Кал = 1 ккал); именно с помощью этих единиц указывается энергетическая ценность, или калорийность пищи.

Идея, что теплота связано с передачей энергии, была выдвинута рядом ученых в 1800-х годах, в частности, английским пивоваром Джеймсом Прескоттом Джоулем (1818–1889). Джоуль и другие исследователи провели ряд экспериментов, которые имели решающее значение для создания сегодняшней точки зрения на тепловые явления, состоящей в том, что теплота, как и работа, представляет собой передачу энергии. Один из экспериментов Джоуля упрощенно показан на рис. 14.1. Опускающийся груз заставляет поворачиваться колесо с лопастями. Трение между водой и лопастями приводит к тому, что температура воды слегка поднимается (согласно Джоулю, на едва измеримую величину). Тот же подъем температуры может быть получен путем нагрева воды на горячей плите. В этом и многих других экспериментах (некоторых — с участием электрической энергии) Джоуль определил, что определенное количество работы всегда эквивалентно определенному количеству подводимой теплоты. Количественно было найдено, что работа 4,186 Дж эквивалентна 1 кал теплоты. Это соотношение известно как механический эквивалент теплоты:

.....
◆ **ВНИМАНИЕ**
• Теплота не явля-
• ется жидкостью
.....

$$4,186 \text{ Дж} = 1 \text{ кал};$$

$$4,186 \text{ кДж} = 1 \text{ ккал}.$$

С помощью этих и других опытов ученые пришли к отказу о представлении теплоты как некоей субстанции или даже формы энергии, но установили, что теплота — это способ *передачи энергии*. При переходе теплоты от более горячего тела к более холодному именно энергия переходит от горячего тела к холодному. Следовательно, **теплота** — это энергия, которая переходит от одного тела к другому из-за разницы в их температурах. В СИ единицей измерения теплоты, как и любой формы энергии, является джоуль. Тем не менее иногда по-прежнему используются внесистемные единицы измерения теплоты — калория и килокалория. В настоящее время калория *определяется* через джоуль

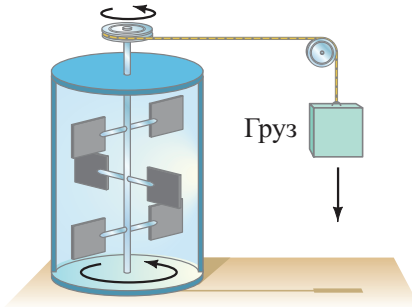


РИС. 14.1. Эксперимент Джоуля по получению механического эквивалента теплоты (работа переходит во внутреннюю энергию, раздел 14.2)

свойств воды, как было ранее). Но по-прежнему удобнее запоминать, что 1 кал поднимает температуру 1 г воды на 1°C , а 1 ккал поднимает температуру 1 кг воды на 1°C .

(а не с помощью

.....
 ! **ВНИМАНИЕ**
 : Теплота — это перенос
 : энергии из-за разности
 : температур
 :

ПРИМЕР 14.1. Оценка. Отработка дополнительных калорий

Предположим, вы потеряли осторожность и съели 500 лишних пищевых калорий в виде мороженого и пирожного. Чтобы их “сжечь”, вы хотите выполнить соответствующую работу, поднимаясь по лестнице или в горы. На какую высоту вы должны подняться?

.....
 🚶 **Прикладная**
ФИЗИКА
 : Похудение и от-
 : работка калорий
 :

Подход. Работа W , которую вы должны сделать с помощью подъема по лестнице, равна изменению гравитационной потенциальной энергии: $W = mgh$, где h — высота по вертикали. Для оценки примем массу равной $m \approx 60$ кг.

Решение. 500 пищевых калорий составляет 500 ккал, что в джоулях равно

$$(500 \text{ ккал})(4,186 \times 10^3 \text{ Дж/ккал}) = 2,1 \times 10^6 \text{ Дж}.$$

Работа по подъему на высоту h равна $W = mgh$, откуда

$$h = \frac{W}{mg} = \frac{2,1 \times 10^6 \text{ Дж}}{(60 \text{ кг})(9,80 \text{ м/с}^2)} = 3600 \text{ м}.$$

Это огромная высота.

Примечание. Тело человека не преобразует энергию пищи с эффективностью 100%; этот показатель составляет порядка 20%. Как мы увидим в следующей главе, некоторая часть энергии всегда тратится “впустую”, так что на самом деле вы должны подняться на высоту лишь около $(0,2)(3600 \text{ м}) \approx 700 \text{ м}$, что представляется куда более разумным.

14.2. Внутренняя энергия

Общая сумма энергий всех молекул в объекте называется его **внутренней энергией** (иногда для обозначения того же используется термин **тепловая энергия**). Мы вводим понятие внутренней энергии, так как оно поможет прояснить концепцию теплоты.

Различие между температурой, теплотой и внутренней энергией

Используя кинетическую теорию, мы можем провести четкое различие между температурой, теплотой и внутренней энергией. Температура (в кельвинах) является мерой *средней* кинетической энергии отдельных молекул (уравнение (13.8)). Термин внутренняя энергия относится к *полной* энергии всех молекул внутри объекта. (Таким образом, два горячих слитка железа одинаковой массы могут иметь одну и ту же температуру, но вдвоем они имеют вдвое большую энергию, чем один.) Наконец, теплота относится к *передаче* энергии от одного объекта к другому из-за разницы температур.

Обратите внимание, что направление теплового потока между двумя объектами зависит от их температур, а не от того, какова их внутренняя энергия. Таким образом, если 50 г воды при 30°C вводят в контакт (или смешивают) с 200 г воды при 25°C, тепловой поток будет направлен от воды при температуре 30°C к воде при температуре 25°C, даже при том, что внутренняя энергия воды при 25°C намного больше (потому что больше само количество воды).

Внутренняя энергия идеального газа

Давайте вычислим внутреннюю энергию n молей идеального одноатомного (с молекулами из одного атома) газа. Внутренняя энергия U является суммой поступательной кинетической энергии всех атомов. Эта сумма равна средней кинетической энергии одной молекулы, умноженное на общее число молекул N :

$$U = N \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right).$$

Используя уравнение (13.8), мы можем переписать уравнение для внутренней энергии как

$$U = \frac{3}{2} NkT,$$

или, вспоминая раздел 13.8, “Идеальный газ с точки зрения молекул. Число Авогадро”, можем записать внутреннюю энергию идеального одноатомного газа как

$$U = \frac{3}{2} nRT, \quad (14.1)$$

где n — количество молей газа. Таким образом, внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры и количества молей (или молекул) газа.

Если молекулы газа содержат больше, чем один атом, то должны быть приняты во внимание также вращательная и колебательная энергии молекул (рис. 14.2). При данной температуре внутренняя энергия окажется больше, чем для одноатомного газа, но по-прежнему будет функцией одной только температуры идеального газа.

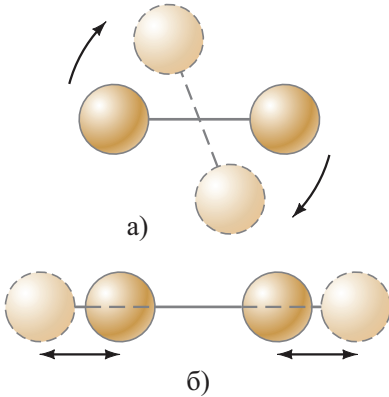


РИС. 14.2. Кроме поступательной кинетической энергии молекулы могут иметь *а*) кинетическую энергию вращения и *б*) колебательную энергию (как кинетическую, так и потенциальную)

Внутренняя энергия реального газа зависит главным образом от температуры, но там, где реальные газы отклоняются от поведения идеального газа, их внутренняя энергия также в определенной мере зависит от давления и объема (из-за потенциальной атомной энергии).

Внутренняя энергия жидкостей и твердых тел довольно сложна, поскольку она включает в себя электрическую потенциальную энергию, связанную с силами (химическими связями) между атомами и молекулами.

14.3. Удельная теплоемкость

Если тепловые потоки направлены в объект, его температура повышается (при условии отсутствия фазового перехода). Но насколько при этом поднимается его температура? Это зависит от разных факторов. Еще в XVIII веке экспериментаторы выяснили, что количество теплоты Q , которое требуется для изменения температуры данного вещества, пропорционально его массе m и изменению его темпе-

ратуры ΔT . Эту замечательную простоту природы можно записать уравнением

$$Q = mc\Delta T, \quad (14.2)$$

где c — величина, характеризующая материал, и именуемая **удельной теплоемкостью**. Поскольку $c = Q/(m\Delta T)$, удельная теплоемкость определяется в единицах Дж/кг·К¹ (единица СИ) или ккал/кг·°С. Для воды при 15°С и постоянном давлении, равном 1 атм, $c = 4,186 \times 10^3$ Дж/кг·К = 1,00 ккал/кг·°С, поскольку по определению требуется ровно 1 ккал теплоты, чтобы поднять температуру 1 кг воды на 1°С. В табл. 14.1 приведены значения удельной теплоемкости других веществ при температуре 20°С. Значения c в некоторой степени зависят от температуры (а также немного от давления), но для не слишком больших изменений температуры удельную теплоемкость можно считать постоянной.

Таблица 14.1. Удельная теплоемкость (при 20°С и 1 атм, если не указано иное)

Вещество	Удельная теплоемкость c	
	Дж/кг·К	ккал/кг·°С
Алюминий	900	0,22
Белки	1700	0,4
Вода		
Лед (–5°С)	2100	0,50
Жидкость (15°С)	4186	1,00
Пар (110°С)	2010	0,48
Дерево	1700	0,4
Железо или сталь	450	0,11
Медь	390	0,093
Мрамор	860	0,21
Ртуть	140	0,033
Свинец	130	0,031
Серебро	230	0,056
Спирт этиловый	2400	0,58
Стекло	840	0,20
Человеческое тело, в среднем	3470	0,83

ПРИМЕР 14.2. Теплопередача и удельная теплоемкость

а) Как много теплоты требуется для повышения температуры от 10°С до 90°С пустого чана массой 20 кг из железа? *б)* Каким будет ответ, если в чане находится 20 кг воды?

Подход. Применяем уравнение (14.2) для различных материалов.

Решение. *а)* Наша система состоит из одного железного чана. Из табл. 14.1 известна удельная теплоемкость железа — 450 Дж/кг·К. Изменение температуры равно $(90^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 80^\circ\text{C} = 80 \text{ K}$.² Таким образом,

$$Q_{\text{чана}} = mc\Delta T = (20 \text{ кг})(450 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(80 \text{ К}) = 7,2 \times 10^5 \text{ Дж} = 720 \text{ кДж.}$$

б) Теперь наша система кроме чана включает воду в нем. Сама по себе вода требует для нагревания

$$Q_{\text{воды}} = mc\Delta T = (20 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(80 \text{ К}) = 6,7 \times 10^6 \text{ Дж} = 6700 \text{ кДж,}$$

¹ Дж/кг·К следует рассматривать как Дж/(кг·К), но не как (Дж/кг)·К.

² Вспомним из главы 13, что один градус по шкале Цельсия равен одному градусу в кельвинах.

или почти в 10 раз больше теплоты, чем чан такой же массы. В сумме для нагрева чана и воды требуется теплота $720 \text{ кДж} + 6700 \text{ кДж} = 7400 \text{ кДж}$.

Примечание. В пункте б) железо и вода нагреваются на одну и ту же температуру $\Delta T = 80 \text{ К}$, но удельные теплоемкости у них разные.

Если железо в части а) примера 14.2 было бы охлаждено от 90°C до 10°C , то 720 кДж теплоты ушло бы из железа. Другими словами, уравнение (14.2) справедливо для теплового потока как внутрь, так и наружу, с соответствующим увеличением или уменьшением температуры.

Мы видели в части б) примера 14.2, что чтобы произошло то же самое изменение температуры, вода требует почти в 10 раз больше теплоты при массе, равной массе железа. Вода имеет одну из самых высоких удельных теплоемкостей среди всех веществ, что делает ее идеальным веществом для систем обогрева и других применений, требующих минимального падения температуры для определенного количества передаваемой теплоты. Именно наличие воды приводит к тому, что в горячем яблочном пироге наши языки обжигает не корочка, а яблоки.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРИМЕР 14.3. Очень горячая сковорода

Вы случайно оставили на плите пустую железную сковороду на горячей (200°C или даже больше) печи. Что произойдет, если вы опустите ее в холодную воду в раковине? Будет ли конечная температура примерно равна средней между начальными температурами воды и сковороды? Будет ли вода кипеть? Предположим, что масса воды в раковине примерно такая же, как и масса сковороды.

Ответ. Опыт может подсказать вам, что вода нагреется — возможно, на 10 или 20 градусов, но и близко не дойдет до кипения. Повышение температуры воды намного меньше, чем уменьшение температуры сковороды. Почему? Потому что масса воды примерно равна массе сковороды, а железо имеет удельную теплоемкость почти в 10 раз меньше, чем у воды (табл. 14.1). Когда теплота покидает сковороду и уходит в воду, изменение температуры железной сковороды будет примерно в 10 раз больше, чем у воды. Если же вы просто уроните несколько капель воды на горячую сковородку, то такое малое количество воды зашипит и испарится (масса сковороды может быть в сотни раз больше, чем у капель воды).³

³ Однако следует отметить, что при быстром погружении горячей сковороды в воду из-за не слишком высокой скорости теплопередачи сначала прилегающий к железу тонкий слой воды может нагреться до высокой температуры (теплота не будет успевать отводиться в остальную воду) и может начаться (очень недолгое!) кипение прилегающей к железу воды. — *Примеч. ред.*

Упражнение А. Вернитесь к вводящему вопросу в начале главы, и ответьте на него снова. Постарайтесь объяснить, почему вы, возможно, сейчас ответили на него иначе, чем в первый раз.

*Удельная теплоемкость газов

Таблица 14.2. Удельная теплоемкость газов

Газ	Удельная теплоемкость, ккал/кг·°С	
	c_p (постоянное давление)	c_v (постоянный объем)
Азот	0,248	0,177
Гелий	1,15	0,75
Кислород	0,218	0,155
Пар (100°С)	0,482	0,350
Углекислый газ	0,199	0,153

Вопрос удельной теплоемкости газов значительно сложнее, чем для твердых веществ и жидкостей, у которых изменение объема при изменении температуры незначительное. Изменение объема газа с изменением температуры при постоянном давлении, как мы видели в главе 13, “Температура и кинетическая теория”, весьма велико. Точно так же, если хранить газ в емкости при постоянном объеме, то с изменением температуры сильно меняется его давление. Удельная теплоемкость га-

за очень зависит от того, как именно осуществляется процесс изменения его температуры. Чаще всего мы имеем дело с теплоемкостями газов, которые хранятся *a*) при постоянном давлении (c_p) или *b*) при постоянном объеме (c_v). Некоторые значения приведены в табл. 14.2, из которой мы видим, что c_p всегда больше, чем c_v .⁴ Для жидкостей и твердых веществ, это различие, как правило, незначительно. Более подробная информация приведена в приложении Г, “Молярная удельная теплоемкость газов, распределение энергии по степеням свободы”.

14.4. Решение калориметрических задач

При обсуждении теплоты и термодинамики мы часто рассматриваем ту или иную **систему**, которая представляет собой объект или набор объектов, которые мы решили рассмотреть. Все остальное во Вселенной является “окружающей средой” (или “окружением”). Есть несколько категорий систем. **Замкнутая система** — это система, в которую не входит и которую не покидает никакая масса (но система может обмениваться энергией с окружающей средой). В **открытой системе** наряду с обменом энергией с окружающей средой возможен обмен мас-

⁴ Что легко поясняется тем, что при постоянном давлении происходит расширение газа, а значит, тепло затрачивается не только на нагрев газа, но и на совершаемую им работу, т.е. для нагрева газа на одну и ту же температуру при постоянном давлении требуется большее количество тепла. — *Примеч. ред.*

сой. Многие (идеализированные) исследуемые нами системы являются замкнутыми. Но многие системы, включая животных и растений, являются открытыми системами, поскольку они обмениваются с окружающей средой веществами (пища, кислород, продукты жизнедеятельности). Закрытая система называется **изолированной**, если через ее границы нет никакого обмена энергией (равно как и массой) в любой форме.

Совершенно изолированная система является идеалом, но мы часто пытаемся создать систему, которая может быть в достаточной мере приближенной к изолированной системе (с которой довольно легко иметь дело). Когда различные части изолированной системы находятся при разных температурах, теплота будет перетекать (будет происходить передача энергии) от частей с более высокой температурой к частям с более низкой температурой, то есть до достижения в системе термического равновесия, когда вся система находится при одной и той же температуре. В изолированной системе никакая энергия не передается в систему и не уходит из нее вовне. Таким образом, для такой изолированной системы мы можем применить закон сохранения энергии. Простой интуитивный способ записи уравнения сохранения энергии состоит в том, чтобы уравнять потери теплоты одной части системы с теплотой, накопленной другой частью:

$$\text{потери теплоты} = \text{полученная теплота} \quad [\text{изолированная система}]$$

или

энергия, *отданная* одной частью = энергия, *полученная* другой частью.

ПРИМЕР 14.4. Остывание чая в чашке

Если 200 см^3 чая при температуре 95°C выливают в стеклянную чашку массой 150 г , первоначально имеющую температуру 25°C (рис. 14.3), то какова будет общая конечная температура T чая и чашки, когда будет достигнуто тепловое равновесие? (В предположении, что передачи теплоты в окружающую среду нет.)

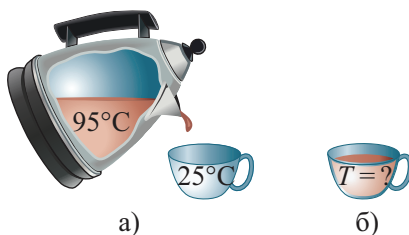


РИС. 14.3. К примеру 14.4

Подход. Применим закон сохранения энергии в системе, состоящей из чая и чашки, которую мы предполагаем изолированной: вся теплота, которую отдает чай, передается чашке. Мы можем использовать уравнение теплоемкости (14.2), чтобы определить, как тепловой поток связан с изменением температуры.

Решение. Поскольку чай в основном представляет собой воду, мы можем принять его удельную теплоемкость равной $4186 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ (табл. 14.1), а его массу m посчитать как плотность, умноженную на объем:

$$m = \rho V = (1,0 \times 10^3 \text{ кг/м}^3)(200 \times 10^{-6} \text{ м}^3) = 0,20 \text{ кг.}$$

Воспользуемся уравнением (14.2) и законом сохранения энергии, обозначая еще неизвестную конечную температуру как T :

теплота при остывании чая = теплота на нагрев чашки

$$m_{\text{чая}} c_{\text{чая}} (95^\circ\text{C} - T) = m_{\text{чашки}} c_{\text{чашки}} (T - 25^\circ\text{C}).$$


Подставляя числовые значения и используя табл. 14.1 ($c_{\text{чашки}} = 840 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ — удельная теплоемкость стекла), мы находим

$$\begin{aligned} (0,20 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К})(95^\circ\text{C} - T) &= (0,15 \text{ кг})(840 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К})(T - 25^\circ\text{C}), \\ 79\,500 \text{ Дж} - (837 \text{ Дж/К})T &= (126 \text{ Дж/К})T - 3150 \text{ Дж}, \\ T &= 86^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Температура чая при установлении теплового равновесия с чашкой уменьшится на 9°C .

Примечание. Температура чашки увеличивается на $86^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 61^\circ\text{C}$. Изменение ее температуры намного больше, чем изменение температуры чая, что объясняется гораздо меньшей удельной теплоемкостью стекла по сравнению с водой.


Примечание. В этом расчете ΔT в (14.2) является положительной величиной по обе стороны нашего уравнения сохранения энергии. Слева теплота теряется и ΔT равно разности между начальной и конечной температурами, тогда как справа теплота поступает к объекту, и ΔT равно разности конечной и начальной температур.

.....
 **ВНИМАНИЕ**
 При использовании уравнения “поступившая теплота = потерянная теплота” значение ΔT положительно с обеих сторон

Другой, возможно, более общий способ записи уравнения сохранения энергии для передачи теплоты внутри изолированной системы состоит в том, чтобы записать, что сумма всех внутренних передач теплоты в системе равна нулю:

$$\sum Q = 0. \quad [\text{изолированная система}] \quad (14.3)$$

Каждое из значений Q в сумме представляет теплоту, входящую или покидающую некоторую часть системы. Каждый член записывается как $Q = mc(T_{\text{к}} - T_{\text{н}})$, а $\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{н}}$ всегда записывается как конечная температура минус начальная. Значение ΔT может быть положительным или отрицательным, в зависимости от того, куда направлен тепловой поток. Давайте еще раз решим пример 14.4 с использованием уравнения (14.3).

.....
 **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ**
 Альтернативный
 подход: $\sum Q = 0$

ПРИМЕР 14.4'. Альтернативное решение

Подход. Воспользуемся уравнением (14.3).

Решение. Для каждого члена $\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{н}}$, так что уравнение (14.3) принимает вид

$$m_{\text{чашки}} c_{\text{чашки}} (T - 25^\circ\text{C}) + m_{\text{чая}} c_{\text{чая}} (T - 95^\circ\text{C}) = 0.$$

Второй член отрицателен, так как T будет меньше 95°C . Решение данного уравнения приводит к тому же ответу $T = 86^\circ\text{C}$.

Вы можете использовать любой подход. Алгебраически они полностью эквивалентны. Например, если вы переместите первый член в уравнении из альтернативного решения примера 14.4 по другую сторону знака равенства, вы получите уравнение “потери теплоты = полученная теплота” из первого варианта решения примера 14.4.

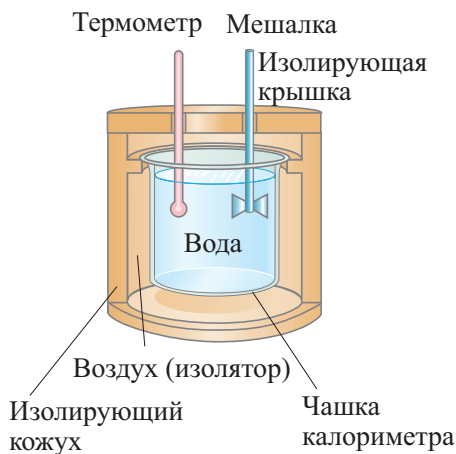


РИС. 14.4. Простой водяной калориметр

Обмен энергией, как проиллюстрировано в примере 14.4, является основой метода, известного как **калориметрия**, который позволяет количественно измерить теплообмен. Для того, чтобы сделать такие измерения, используется **калориметр**; схема простого водяного калориметра показана на рис. 14.4. Очень важно, чтобы калориметр был хорошо теплоизолированным, чтобы теплообмен с окружающей средой практически отсутствовал. Одним из важных использований калориметра является определение удельных теплоемкостей веществ. В методике, известной как “метод смесей”, образец вещества нагревают до высокой, точно измеренной температуры, а затем быстро помещают в холодную воду калориметра. Потерянная образцом теплота будет получена водой и чашкой калориметра. Измерив конечную температуру смеси, можно вычислить интересующую удельную теплоемкость, как показано в следующем примере.

ПРИМЕР 14.5. Определение удельной теплоемкости с помощью калориметра

Инженер хочет определить удельную теплоемкость нового металлического сплава. Для этого образец сплава массой 0,150 кг нагревают до температуры 540°C, и быстро помещают в 0,400 кг воды при температуре 10,0°C, которая находится в алюминиевой чашке калориметра массой 0,200 кг. Конечная температура системы составляет 30,5°C. Рассчитайте удельную теплоемкость сплава.

Подход. Применим закон сохранения энергии в нашей системе, в которую входят образец сплава, вода и чашка калориметра. Мы считаем эту систему изолированной и применяем формулу (14.3).

Решение. Каждый член имеет вид $Q = mc(T_k - T_n)$. Таким образом $\sum Q = 0$ дает нам

$$m_{\text{спл}}c_{\text{спл}}\Delta T_{\text{спл}} + m_{\text{воды}}c_{\text{воды}}\Delta T_{\text{воды}} + m_{\text{кал}}c_{\text{кал}}\Delta T_{\text{кал}} = 0,$$

где индексы обозначают сплав, воду и калориметр, и для каждого из них ΔT представляет собой конечную температуру (30,5°C) минус начальную температуру каждого объекта. Используя числовые значения из условия задачи и из табл. 14.1, мы получаем уравнение

$$(0,150 \text{ кг})(c_{\text{спл}})(30,5^\circ\text{C} - 540^\circ\text{C}) + (0,400 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K})(30,5^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) + (0,200 \text{ кг})(900 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K})(30,5^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 0,$$

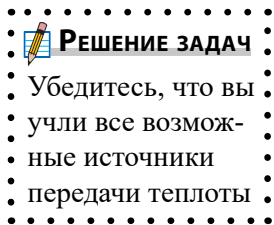
или

$$-(7664 \text{ кг} \cdot \text{K})c_{\text{спл}} + 34300 \text{ Дж} + 3690 \text{ Дж} = 0.$$

Решая уравнение относительно $c_{\text{спл}}$, мы получаем:

$$c_{\text{спл}} = 497 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K} \approx 500 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}.$$

Примечание. Мы округлили результат, потому что в решении игнорировали передачу теплоты в термометр и мешалку (которая используется для ускорения процесса теплопередачи и, таким образом, уменьшения потерь теплоты наружу). Чтобы учесть их наличие, нужно было бы добавить (небольшие) дополнительные члены в уравнение.



РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ


Убедитесь, что вы учли все возможные источники передачи теплоты

Во всех примерах и задачах такого рода следует убедиться, что учтены *все* объекты, которые могут получать или терять теплоту (в разумных пределах). Для простоты мы пренебрегли очень малыми массами, такими как термометр и мешалка, и которые влияли бы на энергетический баланс только в очень малой степени.

Бомбовый калориметр

Бомбовый калориметр используется для измерения тепловой энергии, выделяющейся при сгорании вещества (в том числе пищевых продуктов), чтобы опре-

делить содержание в них калорий. Тщательно взвешенный образец вещества с избыточным количеством кислорода помещают в запечатанный контейнер (“бомбу”), который помещается в воду калориметра. В бомбу проведена тонкая проволока, которая нагревается, чтобы зажечь смесь. Калорийность продуктов, определенных таким образом, может быть недостоверной, потому что наши органы не могут усваивать всю доступную энергию. Тщательные измерения и расчеты должны это учитывать.


ПРИКЛАДНАЯ
ФИЗИКА
 • Измерение со-
 • держания кало-
 • рий в продуктах

14.5. Скрытая теплота

Если вещество испытывает фазовый переход из твердого состояния в жидкое или из жидкого в газообразное (см. раздел 13.11, “Реальные газы и фазовые переходы”), то этот процесс **изменения фазового состояния** сопровождается передачей некоторого количества энергии. Проследим, например, что происходит при равномерном нагреве льда массой 1,0 кг от температуры -40°C , до тех пор, пока весь лед не превратится в воду, которая затем при дальнейшем нагревании при температуре 100°C не превратится в пар. Будем считать, что все процессы происходят при давлении 1 атм. Как показано на рис. 14.5, каждый раз при сообщении льду килокалории теплоты его температура возрастает примерно на 2°C (поскольку удельная теплоемкость льда $c \approx 0,50$ ккал/кг·К). Однако, когда температура достигает 0°C , ее рост прекращается, хотя теплота по-прежнему подводится. Вместо повышения температуры лед постепенно превращается в воду, т.е. переходит в

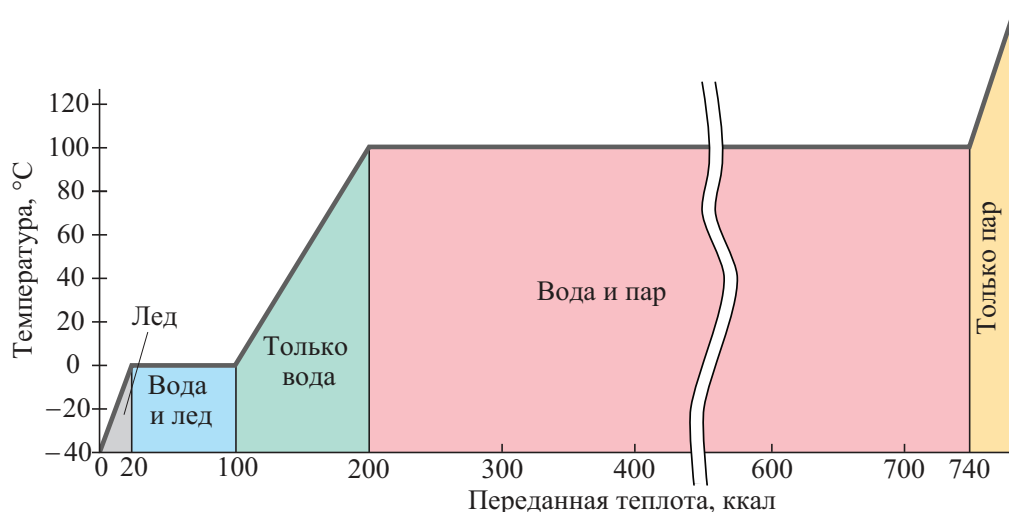


РИС. 14.5. Температура как функция от количества теплоты, передаваемой 1,0 кг льда при начальной температуре -40°C

жидкую фазу без изменения температуры. После того как льду при 0°C будет сообщено около 40 ккал теплоты, половина его останется в твердом состоянии, а половина превратится в воду. После того как льду будет сообщено 80 ккал теплоты, весь лед превратится в воду, но температура воды по-прежнему будет равна 0°C. Дальнейшее добавление теплоты приведет к повышению температуры (но теперь со скоростью 1°C/ккал). Когда вода нагреется до 100°C, температура опять остановится на постоянном уровне, так как сообщаемая теплота будет идти на превращение воды в пар. Для превращения 1,0 кг воды полностью в пар потребуется около 540 ккал. После того как такое количество теплоты будет сообщено воде, кривая на рис. 14.5 снова пойдет вверх, указывая на то, что теперь при добавлении теплоты температура пара повышается.

Количество теплоты, которое требуется для превращения 1 кг вещества из твердого состояния в жидкое, называется **теплотой плавления**, мы будем обозначать ее L_F .⁵ Теплота плавления льда равна 79,7 ккал/кг = 333 кДж/кг. Количество теплоты, необходимое для превращения 1,0 кг вещества из жидкого состояния в пар, называется теплотой испарения (парообразования), мы будем обозначать ее L_V .⁶ Теплота испарения воды равна 539 ккал/кг = 2260 кДж/кг. У других веществ изменение температуры с теплотой имеет характер, аналогичный рис. 14.5, хотя температуры точек плавления и кипения будут иными, так же, как и теплоемкости, теплота плавления и теплота испарения. В табл. 14.3 представлены значения теплоты плавления и теплоты испарения (которые называются также скрытой теплотой, или теплотой фазового перехода) для некоторых веществ.

Таблица 14.3. Скрытые теплоты (при 1 атм)

Вещество	Точка плавления, °C	Теплота плавления		Точка кипения, °C	Теплота испарения	
		кДж/кг	ккал/кг		кДж/кг	ккал/кг
Кислород	-218,8	14	3,3	-183	210	81
Азот	-210,0	26	6,1	-195,8	200	48
Спирт этиловый	-114	104	25	78	850	204
Аммиак	-77,8	33	8,0	-33,4	137	33
Вода	0	333	79,7	100	2260	539
Свинец	327	25	5,9	1750	870	208
Серебро	961	88	21	2193	2300	558
Железо	1538	289	69,1	3023	6340	1520
Вольфрам	3410	184	44	5900	4800	1150

⁵ От англ. fusion — плавление. — *Примеч. пер.*

⁶ От англ. vaporization — испарение. — *Примеч. пер.*

Теплота испарения и теплота плавления также связаны с количествами теплоты, *выделяющимися* при переходе вещества из газообразного состояния в жидкое и из жидкого состояния в твердое. Так, пар, превращаясь в воду, выделяет 2260 кДж/кг, а превращаясь в лед, вода выделяет 333 кДж/кг. [В этих случаях выделения теплоты $Q < 0$ при использовании подхода $\sum Q = 0$, уравнение (14.3).]

Теплота, участвующая в изменении фазового состояния, зависит не только от скрытой теплоты фазового перехода, но и от общей массы вещества, т.е.

$$Q = mL, \quad (14.4)$$

где L — скрытая теплота для конкретного процесса и вещества, m — масса вещества, а Q — теплота, которая должна быть передана (или выделена) при изменении фазового состояния. Например, когда 5,00 кг воды замерзает при 0°C , высвобождается $(5,00 \text{ кг})(3,33 \times 10^5 \text{ Дж/кг}) = 1,67 \times 10^6 \text{ Дж}$ энергии.

Упражнение Б. На газовой плите в кастрюле кипит вода. Хозяйка увеличивает огонь. Что происходит? а) Температура воды начинает расти. б) Немного снижается скорость потери воды путем испарения. в) Скорость потери воды путем испарения увеличивается. г) Имеется значительное увеличение как скорости кипения, так и температуры воды. д) Ни один из приведенных ответов.

Калориметрия иногда включает изменение агрегатного состояния вещества, как показано в следующих примерах. Скрытые теплоты действительно часто измеряются с использованием калориметрии.

ПРИМЕР 14.6. Изготовление льда

Сколько энергии морозильник должен удалить из 1,5 кг воды при температуре 20°C , чтобы сделать лед с температурой -12°C ?

Подход. Мы должны вычислить общую энергию путем добавления отбираемой теплоты 1) чтобы уменьшить температуру воды от 20°C до 0°C , 2) чтобы превратить жидкую воду в твердый лед при 0°C , и 3) чтобы понизить температуру льда от 0°C до -12°C .

Решение. Теплота Q , которая должно быть удалена из 1,5 кг воды, равна

$$\begin{aligned} Q &= mc_v(20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) + mL_f + mc_l(0^\circ\text{C} - (-12^\circ\text{C})) = \\ &= (1,5 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K})(20 \text{ K}) + (1,5 \text{ кг})(3,33 \times 10^5 \text{ Дж/кг}) + \\ &\quad + (1,5 \text{ кг})(2100 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K})(12 \text{ K}) = \\ &= 6,6 \times 10^5 \text{ Дж} = 660 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Упражнение В. Какой процесс в примере 14.6 требует наибольшей потери теплоты?

ПРИМЕР 14.7. Оценка. Растает ли весь лед?

Кусок льда массой 0,50 кг с температурой -10°C помещают в 3,0 кг холодного чая при температуре 20°C . Какую температуру будет иметь получившийся чай, и какой состав? Чай можно рассматривать как воду. Все потоки теплоты в окружающую среду, в том числе теплопередачу сосуду, игнорируйте.

Подход. Прежде чем мы сможем записать уравнение сохранения энергии, мы должны выяснить, будет ли в конечном состоянии весь лед не растаявшим, будет смесь льда и воды при 0°C , или весь лед превратится в воду. Для того, чтобы довести 3,0 кг воды при температуре 20°C до 0°C , требуется забрать у нее энергию

$$m_{\text{в}}c_{\text{в}}(20^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}) = (3,0 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(20^{\circ}\text{C}) = 250\,000 \text{ Дж}.$$

С другой стороны, чтобы нагреть лед от -10°C до 0°C , потребуется теплота

$$m_{\text{л}}c_{\text{л}}(0^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})) = (0,50 \text{ кг})(2100 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(10^{\circ}\text{C}) = 10\,500 \text{ Дж},$$

а для того, чтобы превратить лед в воду при температуре 0°C , потребуется теплота

$$m_{\text{л}}L_{\text{F}} = (0,50 \text{ кг})(333 \text{ кДж/кг}) = 167\,000 \text{ Дж}.$$

Сумма двух последних величин равна $10,5 \text{ кДж} + 167 \text{ кДж} = 177 \text{ кДж}$. Отобразить эту энергию недостаточно для того, чтобы охладить 3,0 кг воды от 20°C до 0°C , так что мы видим, что в конечном состоянии мы получим воду с некоторой температурой между 0°C и 20°C .

Решение. Для того, чтобы определить конечную температуру T , мы применяем закон сохранения энергии. Мы рассмотрим оба метода из раздела 14.4.

Метод 1: $\sum Q = 0$ дает


$$\begin{aligned} & (\text{теплота для нагрева } 0,5 \text{ кг льда от } -10^{\circ}\text{C} \text{ до } 0^{\circ}\text{C}) + \\ & (\text{теплота для превращение } 0,5 \text{ кг льда в воду}) + \\ & (\text{теплота для нагрева } 0,5 \text{ кг воды от } 0^{\circ}\text{C} \text{ до } T) + \\ & (\text{потери теплоты при охлаждении } 3,0 \text{ кг воды от } 20^{\circ}\text{C} \text{ до } T) = 0 \end{aligned}$$


Используя результаты, полученные в части “Подход”, мы получаем:

$$\begin{aligned} 10\,500 \text{ Дж} + 167\,000 \text{ Дж} + (0,5 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(T - 0^{\circ}\text{C}) + \\ + (3,0 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(T - 20^{\circ}\text{C}) = 0. \end{aligned}$$

Решая данное уравнение относительно T , получаем $T = 5,0^{\circ}\text{C}$.

Метод 2: принцип “отданная теплота = полученная теплота” дает уравнение, подобное приведенному выше:

.....
 **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ**
.....
• Сначала определите
• (или оцените) ко-
• нечное состояние
.....

.....
 **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ**
.....
• Затем определите ко-
• нечную температуру
.....

$$10500 \text{ Дж} + 167000 \text{ Дж} + (0,5 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(T - 0^\circ\text{C}) = \\ = (3,0 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})(20^\circ\text{C} - T).$$

Член справа от знака равенства представляет собой потери теплоты при остывании воды от 20°C до температуры T . Алгебраически данное уравнение совершенно эквивалентно рассмотренному ранее, в первом методе.⁷

Упражнение Г. Насколько больше льда при температуре -10°C потребовалось бы в примере 14.7, если бы чай требовалось охладить до 0°C ?

СТРАТЕГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.

КАЛОРИМЕТРИЯ

1. Убедитесь, что у вас есть достаточно информации, чтобы применить закон сохранения энергии. Спросите себя: это **изолированная система** (или изолированная в достаточной степени, чтобы получить хорошую оценку)? Знаем ли мы (или можем вычислить) все значимые источники передачи энергии?

2. Примените закон сохранения энергии. Используйте его либо в форме “отданная теплота = полученная теплота” либо в форме

$$\sum Q = 0.$$

3. Если **изменения фазового состояния вещества нет**, каждый член в уравнении сохранения энергии будет иметь вид

$$Q = mc\Delta T.$$

4. Если же имеется (или может произойти) **изменения фазового состояния вещества**, то в уравнении сохранения энергии могут быть члены вида $Q = mL$, где L — скрытая теплота. Но *перед* применением закона сохранения энергии определите (или оцените) конечное фазовое состояние, как мы делали это в примере 14.7, путем вычисления различных составляющих значений для теплоты Q .

5. Следует отметить, что, когда система достигает **теплового равновесия**, конечная **температура** каждого вещества будет иметь одно и то же значение. Имеется только одна конечная температура.

6. **Решите** ваше уравнение сохранения энергии относительно требуемого неизвестного.

⁷ Для любого алгебраического уравнения $A = B$ вычитание B с обеих сторон дает уравнение $A - B = 0$. Таким образом, перемещение члена с одной стороны знака равенства на другую приводит к изменению его знака.

Испарение

Скрытая теплота, необходимая для превращения жидкости в газ, нужна не только при температуре кипения. Вода может переходить из жидкой в газовую фазу даже при комнатной температуре. Этот процесс называется **испарением** (см. раздел 13.12, “Давление пара и влажность”). Значение теплоты испарения воды слегка возрастает с уменьшением температуры: при 20°C, например, она равна 2450 кДж/кг (585 ккал/кг), а при 100°C — 2260 кДж/кг (539 ккал/кг). Когда вода испаряется, оставшаяся жидкость охлаждается, потому что необходимая для испарения энергия (скрытая теплота парообразования) поступает от самой воды; таким образом, ее внутренняя энергия, а следовательно, и ее температура должна при испарении уменьшаться.⁸

Испарение воды с поверхности кожи является одним из наиболее важных способов управления температурой тела. Когда температура крови незначительно повышается выше нормы, гипоталамус (область мозга) обнаруживает это повышение температуры и посылает сигнал потовым железам, заставляя их увеличить производство пота. Скрытая теплота, необходимая для испарения пота, поступает от тела, которое таким образом охлаждается.



Кинетическая теория скрытой теплоты

Мы можем использовать кинетическую теорию, чтобы понять, почему для расплавления или испарения необходима энергия. В точке плавления скрытая теплота плавления действует не для того, чтобы увеличить среднюю кинетическую энергию (и температуру) молекул в твердом теле, а для преодоления потенциальной энергии, связанной с силами притяжения между молекулами. Таким образом, чтобы молекулы могли свободно двигаться одна относительно другой в жидкой фазе, следует выполнить работу против этих сил притяжения. Аналогично, для молекул, которые удерживаются одна вблизи другой в жидкой фазе, требуется энергия, позволяющая им выйти в газовую фазу, где они находятся далеко одна от другой и практически не взаимодействуют. Этот процесс представляет собой более энергичную реорганизацию молекул, чем плавление (так как среднее расстояние между молекулами увеличивается в значительной мере), а потому и теплота испарения, как правило, значительно превышает теплоту плавления данного вещества.

⁸ С точки зрения кинетической теории испарение представляет собой процесс охлаждения, потому что он представляет собой “убегание” с поверхности наиболее быстро движущихся молекул (раздел 13.12). Таким образом, средняя скорость остальных молекул становится меньшей, так что по формуле (13.8) меньшей становится и температура.

14.6. Передача теплоты: теплопроводность

Теплота может передаваться из одного места объекта и между объектами тремя различными способами: с помощью *теплопроводности*, *конвекции* и *излучения*. Мы обсудим последовательно каждый из этих способов; заметим, однако, что в практических ситуациях могут одновременно осуществляться любые два из них (или даже все три). Рассмотрим сначала процесс теплопроводности.

Когда отливка из металла помещается в открытое пламя, или серебряная ложка погружается в тарелку с горячим супом, свободные концы этих предметов вскоре также оказываются горячими, хотя они и не находились в прямом контакте с источником теплоты. В этих случаях мы говорим, что теплота передается (или переносится) от нагретого конца предмета к его холодному концу.

Явление **теплопроводности** можно представлять себе как результат столкновений молекул. По мере нагревания одного из концов предмета молекулы в нем начинают двигаться все быстрее и быстрее. При столкновениях с менее быстро

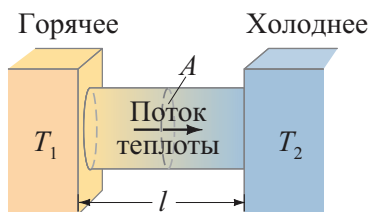


РИС. 14.6. Теплопроводность между областями с температурами T_1 и T_2 . Если T_1 больше T_2 , то поток направлен вправо; его величина задается уравнением (14.5)

движущимися соседними молекулами они передают им часть своей энергии, в результате чего скорость последних увеличивается. Затем ускорившиеся молекулы передают часть своей энергии в процессе столкновений следующим молекулам, находящимся еще дальше от нагретого конца. Таким образом, можно сказать, что происходит передача (или перенос) теплоты, т.е. передача энергии теплового движения по объему тела за счет столкновений между молекулами.

Явление теплопроводности происходит только при наличии разности температур между различными точками тела. Экспериментально установлено, что количество теплоты, которое переносится в единицу времени из одного конца тела в другое (и называется тепловым потоком), пропорционально разности температур на его концах. Тепловой поток зависит также от размеров и формы тела. Рассмотрим этот вопрос количественно на примере теплового потока через однородный цилиндр (рис. 14.6). Экспериментально установлено, что поток теплоты ΔQ , переносимой за время Δt , дается выражением

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{T_1 - T_2}{l}, \quad (14.5)$$

где A — площадь поперечного сечения объекта, l — расстояние между двумя концами с температурами T_1 и T_2 , а k — коэффициент пропорциональности, который называется **теплопроводность** и является характеристикой материала. Из уравнения (14.5) мы видим, что скорость теплового потока (в единицах Дж/с) пря-

мо пропорциональна площади поперечного сечения, и градиенту температуры⁹ $(T_1 - T_2)/l$.

Теплопроводности k для различных веществ приведены в табл. 14.4. Вещества, у которых k велико, проводят теплоту быстро и являются хорошими проводниками

Таблица 14.4. Теплопроводность

Вещество	Теплопроводность k	
	Дж/(с·м·К)	ккал/(с·м·°С)
Серебро	420	10×10^{-2}
Медь	380	$9,2 \times 10^{-2}$
Алюминий	200	$5,0 \times 10^{-2}$
Сталь	40	$1,1 \times 10^{-2}$
Лед	2	5×10^{-4}
Стекло	0,84	$2,0 \times 10^{-4}$
Кирпич	0,84	$2,0 \times 10^{-4}$
Бетон	0,84	$2,0 \times 10^{-4}$
Вода	0,56	$1,4 \times 10^{-4}$
Человеческое тело	0,2	$0,5 \times 10^{-4}$
Дерево	0,1	$0,3 \times 10^{-4}$
Стекловата	0,048	$0,12 \times 10^{-4}$
Пробка	0,042	$0,10 \times 10^{-4}$
Шерсть	0,040	$0,10 \times 10^{-4}$
Гусиный пух	0,025	$0,060 \times 10^{-4}$
Полиуретан	0,024	$0,057 \times 10^{-4}$
Воздух	0,023	$0,055 \times 10^{-4}$

ми теплоты. В эту категорию попадают большинство металлов, хотя даже у них имеется широкий диапазон теплопроводности, как вы можете заметить, потрогав концы серебряной ложки и ложки из нержавеющей стали, погруженных в одну и ту же тарелку горячего супа. Вещества, для которых значение k мало, такие как шерсть, стекловолокно, полиуретан и гусиный пух, плохо проводят теплоту и являются хорошими **теплоизоляторами**. Относительные значения величин k могут объяснить простые явления, такие как почему плитка пола намного холоднее для ног, чем ковровое покрытие при той же температуре. Плитка — лучший проводник теплоты, чем ковер. Теплота, которая перетекает из вашей ноги на ковер, отводится медленно, так что поверхность ковра быстро нагревается до температуры ноги, и нога чувствует себя комфортно. Плитка же хорошо проводит теплоту, которая быстро уходит дальше и, таким образом, температура поверхности вашей ноги падает и вам становится холодно.

⁹ Уравнение (14.5) очень похоже на уравнение, описывающее диффузию (раздел 13.13), а также поток жидкости через трубу (раздел 10.12). В указанных случаях было обнаружено, что поток вещества пропорционален градиенту концентрации или градиенту давления. Это близкое сходство — одна из причин, по которой мы говорим о “потоке” тепла. Тем не менее, мы должны иметь в виду, что при теплопроводности нет никакого перемещения вещества, а есть только передача энергии.

ПРИМЕР 14.8. Потери теплоты через окно

Основной источник потерь теплоты из дома в холодную погоду — окно. Вычислите тепловой поток через стеклянное окно в размером $2,0 \text{ м} \times 1,5 \text{ м}$ толщиной $3,2 \text{ мм}$, при температурах на внутренней и наружной поверхностях $15,0^\circ\text{C}$ и $14,0^\circ\text{C}$ соответственно (рис. 14.7).

Подход. Для вычисления теплового потока за счет теплопроводности через стекло толщиной $3,2 \text{ мм}$

 **ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА**

Потери теплоты через окно

от более высокой температуры внутри до более низкой наружной температуры используем уравнение теплопроводности (14.5).

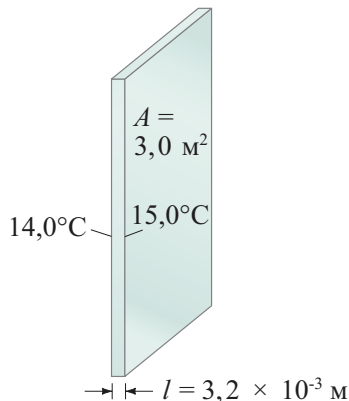


РИС. 14.7. К примеру 14.8

Решение. $A = (2,0 \text{ м})(1,5 \text{ м}) = 3,0 \text{ м}^2$, а $l = 3,2 \times 10^{-3} \text{ м}$. Из табл. 14.4 получим k и вычислим

$$\frac{Q}{t} = kA \frac{T_1 - T_2}{l} = \frac{(0,84 \text{ Дж/с} \cdot \text{м} \cdot \text{К})(3,0 \text{ м}^2)(15^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C})}{(3,2 \times 10^{-3} \text{ м})} = 790 \text{ Дж/с.}$$

Примечание. Эта величина потока теплоты соответствует 680 ккал/ч .

Вы могли заметить, что температура 15°C в примере 14.8 не комфортна для жизни в доме. Комната в действительности может быть намного теплее, а снаружи может быть и похолоднее, чем 14°C . Но температуры 15°C и 14°C определены как температуры непосредственно у поверхностей окна — как правило, в непосредственной близости от окна действительно ощущается значительное падение температуры воздуха. Таким образом, слой воздуха по обе стороны окна действует как изолятор, и как правило, основная часть перепада температур между температурой внутри дома и снаружи приходится на слой воздуха. Если на улице сильный ветер, воздух снаружи окна будет постоянно заменяться холодным воздухом; температурный градиент в стекле будет больше, и скорость потери теплоты будет намного большей. Увеличение ширины воздушного слоя, например, при использовании двух оконных стекол, разделенных воздушным зазором, приведет резкому снижению потерь теплоты, большему, чем при простом увеличении толщины стекла, — так как теплопроводность воздуха значительно меньше, чем теплопроводность стекла. Такой “двойной стеклопакет” часто называют “теплым окном”.

Теплоизолирующие свойства одежды также обеспечиваются теплоизолирующими свойствами воздуха. Без одежды наши тела в неподвижном воздухе будут нагревать воздух, находящийся в контакте с кожей, и в скором времени нам станет достаточно комфортно, потому что воздух — очень хороший теплоизолятор. Но

так как воздух движется, всегда есть ветерок и сквозняки, да и люди не стоят неподвижно — теплый воздух будет заменяться холодным, тем самым увеличивая разность температур и потери теплоты из организма. Одежда удерживает слой воздуха в покое, поэтому он не может легко перемещаться. Наше тело от холода изолирует не ткань, а воздух, “пойманный” тканью. Гусиный пух является очень хорошим изолятором, потому что даже небольшое его количество распушивается и хорошо удерживает воздух.

Упражнение Д. Объясните, почему портьеры перед окном уменьшают потери теплоты из дома.

*R-значения строительных материалов


Изолирующие свойства строительных материалов часто определяются их R -значениями (“термическим сопротивлением”), определяемыми для данной толщины материала l как

$$R = \frac{l}{k}.$$

R -значение данного образца материала комбинирует толщину l и теплопроводность k в одно значение. Большее значение R означает лучшую изоляцию от жары или холода. В США R -значения выражаются в британских единицах — фут²·ч·°F/Btu (например, R-19 означает $R = 19$ фут²·ч·°F/Btu). В табл. 14.5 приведены R -значения некоторых распространенных строительных материалов. R -значения увеличиваются с ростом толщины материала: например, 2 дюйма стекловолокна имеют термосопротивление R -6, тогда как 4 дюйма — R -12.

Таблица 14.5. R -значения

Материал	Толщина, дюйм	R -значение, фут ² ·ч·°F/Btu
Стекло	0,125	1
Кирпич	3,5	0,6–1
Фанера	0,5	0,6
Стекловолокно	4	12

.....
 **ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА**

14.7. Передача теплоты: конвекция

Несмотря на то, что жидкости и газы являются, как правило, не очень хорошими проводниками теплоты, они могут обеспечивать довольно быструю ее передачу благодаря явлению конвекции. **Конвекция** — это процесс, благодаря которому теплота переносится за счет перемещения большого числа молекул из одного места в другое. Различие между явлениями теплопроводности и конвекции в том, что в первом из них молекулы (и/или электроны) перемещаются лишь на очень малые расстояния (порядка длины свободного пробега) и затем сталкиваются, в то время как во втором случае молекулы перемещаются на значительные расстояния.

Холодная вода

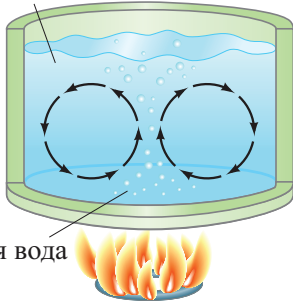


РИС. 14.8. Конвекционные токи в котелке с водой, нагреваемом на плите

датель на примере теплых или холодных океанских течений (например, Гольфстрима). Ветер представляет собой еще один пример явления конвекции; вообще погодные условия обусловлены в конечном счете конвективными движениями (токов) воздуха.


Когда нагревается котелок с водой (рис. 14.8), конвекционные потоки возникают по мере того, как нагретая вода со дна кастрюли поднимается вверх из-за своей пониженной плотности. Это нагретая вода заменяется более холодной водой сверху.


Данный принцип используется во многих отопительных системах, таких как система водяного отопления, схематически показанная на рис. 14.9. Вода нагревается в котле, ее температура увеличивается, она расширяется и поднимается, как показано на рисунке. Это приводит к циркуляции воды в системе отопления. Затем горячая вода поступает в радиаторы, за счет теплопроводности теплота передается воздуху, и охлажденная вода возвращается в котел. Таким образом, вода циркулирует из-за конвекции; однако иногда для улучшения циркуляции используются насосы. Воздух в комнате также нагревается в результате конвекции. В результате конвективных потоков воздуха (показаны круглыми стрелками на рис. 14.9) нагретый радиатором воздух поднимается и заменяется холодным.

От конвекции зависят и другие типы печей. Печь с поддувалом (отверстием) вблизи пола часто не имеет вентилятора, завися от естественной конвекции (тяги), которая может быть весьма значительной. В других системах может использоваться вентилятор. В любом случае важно то, что холодный воздух может вернуться в печь таким образом, что конвективные потоки будут циркулировать по всей комнате, и комната при этом равномерно прогревается.

Человеческое тело производит большое количество тепловой энергии. Из пищевой энергии, получаемой организмом, на выполнение некоторой работы в лучшем

Конвекция может быть как *вынужденной*, так и *естественной*; примером конвекции первого типа может служить нагреватель с вентилятором, с помощью которого нагретый воздух вдувается в комнату. Известным примером естественной конвекции является подъем вверх нагретого воздуха. Например, вблизи радиатора отопления (или другого нагревателя) воздух по мере нагревания расширяется (см. главу 13, “Температура и кинетическая теория”), так что его плотность по сравнению с другими слоями уменьшается, что и приводит к его подъему. Крупномасштабное проявление естественной конвекции можно наблю-

•••••
:  **Прикладная** :
: **ФИЗИКА** :
: :
: Океанские :
: течения и ветер :
:•••••

•••••
:  **Прикладная** :
: **ФИЗИКА** :
: :
: Конвекционный :
: обогрев дома :
:•••••

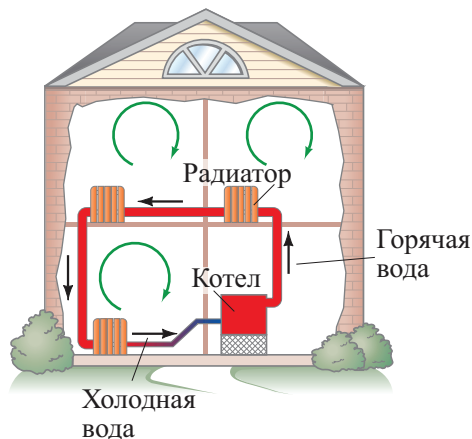



РИС. 14.9. Конвекция играет важную роль в обогреве помещений. Круглые стрелки показывают конвективные потоки воздуха в комнатах

случае используется 20%, а более 80% представляют собой тепловую энергию. Если бы во время легкой деятельности эта тепловая энергия не рассеивалась, температура тела могла бы расти со скоростью до 3°C в час. Очевидно, что генерируемая телом теплота должна быть отдана наружу. Передается ли теплота только за счет теплопроводности? Температура кожи в комфортной среде составляет от 33°C до 35°C , в то время как внутренние органы тела имеют температуру около 37°C . Расчет (задача 52) показывает, что из-за этой малой разницы температур, а также в связи с низкой теплопроводностью тканей прямая проводимость обеспечивает вывод наружу только малого количества теплоты. На деле теплота переносится в кожу с помощью крови. В дополнение ко всем прочим важным обязанностям, кровь действует и как конвективная жидкость для передачи теплоты непосредственно под поверхность кожи. Затем теплота передается (через очень малое расстояние) к поверхности кожи. После этого на поверхности тела теплота передается в окружающую среду за счет конвекции, испарения и излучения (раздел 14.8).

.....
 **Прикладная**
ФИЗИКА

 : Теплота тела:
 : перенос кровью
 :.....

14.8. Передача теплоты: излучение

Для того чтобы передать теплоту как посредством конвекции, так и за счет теплопроводности, необходимо наличие вещества. Однако, например, жизнь на Земле целиком и полностью зависит от солнечной энергии, которая переносится от Солнца к Земле сквозь пустое (или почти пустое), т.е. не заполненное веществом, пространство. Такая форма передачи энергии может быть осуществлена лишь за счет теплопередачи и называется **излучением** (рис. 14.10). Напомним, что температура Солнца (6000 K) значительно превышает температуру поверхности

Земли (около 300 К). Теплота, которую мы получаем от горячего огня, также передается главным образом посредством излучения.

В последующих главах мы увидим, что излучение, по существу, состоит из электромагнитных волн. Здесь же достаточно лишь заметить, что солнечное излучение содержит как видимый свет, так и много других длин волн, к которым глаз человека не чувствителен, в том числе инфракрасное излучение, в основном и нагревающее Землю.

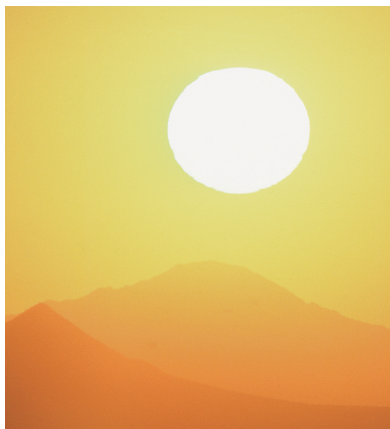


РИС. 14.10. Поверхность Солнца излучает при температуре 6000 К, гораздо более высокой, чем температура поверхности Земли

Как показали эксперименты (и подтвердила теория), энергия, излучаемая нагретым телом за единицу времени, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры T . Это означает, что если для сравнения взять два тела с температурами 2000 и 1000 К, то первое излучает энергии в $2^4 = 16$ раз больше, чем второе. Величина излучаемой энергии пропорциональна также площади поверхности A излучающего тела, так что энергия, излучаемая в единицу времени, может быть записана в виде

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \sigma A T^4. \quad (14.6)$$

Это уравнение называется **уравнением Стефана-Больцмана**, а σ является универсальной константой, которая называется **постоянной Стефана-Больцмана**, и которая имеет значение

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4.$$

Безразмерный множитель ε , величина которого находится в пределах от 0 до 1, называется *излучательной способностью* и характеризует свойство самого вещества. Очень черные поверхности (например, древесный уголь) имеют значение ε , близкое к единице, в то время как у блестящих поверхностей металлов величина ε близка к нулю, и поэтому они излучают меньше энергии. Вообще говоря, значение ε также слегка зависит от температуры тела.

Блестящие поверхности не только меньше излучают, но и меньше поглощают излучение, которое падает на них (большая его часть отражается). Черные и очень темные объекты являются хорошими излучателями ($\varepsilon \approx 1$); они также поглощают почти все излучение, попадающее на них. Именно поэтому в жаркий день светлая одежда, как правило, предпочтительнее темной. Итак, **хороший поглотитель излучения является одновременно и хорошим излучателем.**

•••••
 **Прикладная**
ФИЗИКА
 • Темная и
 • светлая одежда
 •••••

Любое тело не только излучает, но и поглощает энергию, излученную другими телами. Если излучательная способность тела равна ε , а площадь его поверхности A , причем поверхность тела находится при температуре T_1 , то такое тело излучает в единицу времени энергию $\varepsilon\sigma AT_1^4$. Если тело окружено средой, находящейся при температуре T_2 и излучающей в единицу времени энергию, пропорциональную T_2^4 , то энергия, поглощаемая телом в единицу времени, также будет пропорциональна T_2^4 . Таким образом, результирующий тепловой поток, излучаемый телом, можно записать в виде

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4), \quad (14.7)$$

где A — площадь поверхности тела, T_1 — его температура, ε — его излучательная способность (при температуре T_1), а T_2 — температура окружающей среды. Уравнение согласуется с экспериментальным наблюдением, состоящим в том, что между телом и окружающей его средой достигается тепловое равновесие, когда температуры у них становятся одинаковыми; иными словами, величина $\Delta Q/\Delta t$ должна обращаться в нуль при $T_1 = T_2$, так что коэффициент ε при каждом слагаемом должен быть одним и тем же. Это согласуется с ранее приведенным утверждением о том, что хороший поглотитель излучения является также и хорошим излучателем. Поскольку как само тело, так и его окружение излучают энергию, всегда существует результирующий перенос энергии в том или ином направлении; он отсутствует лишь в случае, когда температуры тела и окружения одинаковы. Из уравнения (14.7) очевидно, что при $T_1 > T_2$ результирующий поток теплоты направлен от тела к окружению, так что тело при этом охлаждается; если же $T_1 < T_2$, то результирующий поток теплоты направлен от окружения к телу, так что тело нагревается и температура его повышается. Если различные части окружающей среды находятся при разных температурах, то соотношение (14.7) принимает более сложный вид.

ПРИМЕР 14.9. Оценка. Охлаждение излучением

Раздетый спортсмен сидит в раздевалке, темные стены которой имеют температуру 15°C . Оцените скорость потери телом теплоты через излучение, предполагая температуру кожи равной 34°C , излучательную способность $\varepsilon = 0,70$, а площадь поверхности тела вне контакта со скамейкой — $1,5\text{м}^2$.

Подход. Используем уравнение (14.7), которое требует температуры по шкале Кельвина.



ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

- Потери теплоты
- телом через из-
- лучение

Решение. Имеем

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) = (0,70) (5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4) \times$$

$$\times ((307 \text{ К})^4 - (288 \text{ К})^4) = 120 \text{ Вт.}$$

 **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ**

Следует использовать температуру в кельвинах


Примечание. “Выход” теплоты от человека немного больше, чем у лампы накаливания мощностью 100 Вт.

Примечание. Избегайте распространенной ошибки:

$$(T_1^4 - T_2^4) \neq (T_1 - T_2)^4.$$


 **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ**

$$(T_1^4 - T_2^4) \neq (T_1 - T_2)^4$$

 **ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА**

Комфортные условия в доме

Отдыхающий человек производит внутреннюю теплоту со скоростью около 100 Вт, как мы увидим в разделе 15.3, и это меньше, чем потери теплоты за счет излучения, рассчитанные в примере 14.9. Следовательно, температура человека снизится, в результате чего он будет испытывать значительный дискомфорт. Организм реагирует на чрезмерную потерю теплоты увеличением метаболизма, и одним из способов, с помощью которого тело увеличивает метаболизм, является дрожь. Естественно, помогает также одежда. Пример 14.9 показывает, что человеку может быть неуютно, даже если температура воздуха составляет, скажем, 25°C, что является достаточно теплой комнатой температурой. Если стены или пол холодные, то излучение к ним от тела происходит независимо от того, насколько теплым является окружающий воздух. По оценкам, излучение составляет около 50% от потерь теплоты человеком, сидящем в нормальной комнате. Человеку наиболее комфортно, когда стены и пол теплые, а воздух прогрет не сильно. Полы и стены могут быть нагреты с помощью трубопроводов горячей воды или электрических нагревательных элементов. Такие нагревающие системы становятся все более распространенными в наше время; интересно отметить, что еще 2000 лет назад римляне, даже в домах в отдаленной провинции Великобритании, для обогрева своих домов использовали горячую воду и пар в трубах в полу.

 **ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА**

Предпочитайте теплые стены и прохладный воздух

ПРИМЕР 14.10. Оценка. Два чайника

В два чайника — керамический ($\varepsilon = 0,70$) и сделанный из блестящего металла ($\varepsilon = 0,10$) наливают по 0,75 л чая при температуре 95°C. а) Оцените скорости потери теплоты от каждого чайника, и б) оцените падение температуры каж-

дого чайника через 30 мин. Рассматривайте только излучение, и считайте, что температура окружающей среды равна 20°C.

Подход. У нас имеется всю информацию, необходимая для расчета теплопотерь из-за излучения, за исключением площади поверхности чайника. Чайник имеет объем 0,75 л, так что мы можем аппроксимировать его кубом со стороной 10 см (объем 1,0 л), при этом излучение происходит с пяти сторон этого куба. Для того, чтобы оценить падение температуры δ , мы используем удельную теплоемкость воды и игнорируем теплоемкость чайника по сравнению с теплоемкостью воды.

Решение. а) Чайник, представленный как куб со стороной 10 см, и излучающий пятью из шести граней, имеет площадь излучения около $5 \times (0,1 \text{ м})^2 = 5 \times 10^{-2} \text{ м}^2$. Скорость потери теплоты можно оценить как

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) = \\ = \varepsilon (5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4) (5 \times 10^{-2} \text{ м}^2) ((368 \text{ К})^4 - (293 \text{ К})^4) \approx \varepsilon (30) \text{ Вт},$$

или около 20 Вт для керамического ($\varepsilon = 0,70$) и 3 Вт для металлического ($\varepsilon = 0,10$) чайников.

б) Для того, чтобы оценить падение температуры, рассмотрим удельную теплоемкость воды и игнорируем теплоемкость чайников. Масса 0,75 л воды равна 0,75 кг. Используя уравнение (14.2) и табл. 14.1, получаем

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc \frac{\Delta T}{\Delta t}.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta Q / \Delta t}{mc} \approx \frac{\varepsilon (30) \text{ Дж/с}}{(0,75 \text{ кг})(4186 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К})} \approx \varepsilon (0,01) \text{ К/с}.$$

Через 30 мин (1800 с) температура чайника упадет на

$$\Delta T = \varepsilon (0,01 \text{ К/с})(1800 \text{ с}) \approx 18 \varepsilon \text{ К},$$

или примерно 12 градусов для керамического и 2 градуса для металлического чайника. Металлический чайник имеет преимущество перед керамическим (по крайней мере в смысле излучения).

Примечание. Теплопроводность и конвекция могут играть значительно большую роль, чем излучение.

Степень нагревания тела за счет солнечного излучения нельзя вычислить с помощью уравнения (14.7), поскольку в этом соотношении предполагается однородное распределение температуры T_2 во всей окружающей тело среде, в то время как Солнце является, по существу, точечным



**Прикладная
ФИЗИКА**

• Излучение
• Солнца

источником; поэтому его следует рассматривать как дополнительный источник энергии. Нагревание за счет излучения Солнца вычисляется на основе того факта, что каждую секунду на каждый квадратный метр атмосферы Земли (перпендикулярно солнечным лучам) падает около 1350 Дж энергии. Это число (1350 Вт/м^2) называется **солнечной постоянной**. Прежде чем энергия, излучаемая Солнцем, достигнет поверхности Земли, атмосфера может поглотить до 70% этой энергии (в зависимости от состояния облачности). В ясный день на земную поверхность падает около 1000 Вт/м^2 ; это означает, что тела с излучательной способностью ε и площадью поверхности A , обращенной к Солнцу, поглощают в единицу времени количество теплоты (в ваттах) около

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (1000 \text{ Вт/м}^2) \varepsilon A \cos \theta, \quad (14.8)$$

где θ — угол между направлением солнечных лучей и нормалью к поверхности A (рис. 14.11). Иными словами, $A \cos \theta$ — “эффективная” площадь поверхности, перпендикулярная солнечным лучам.

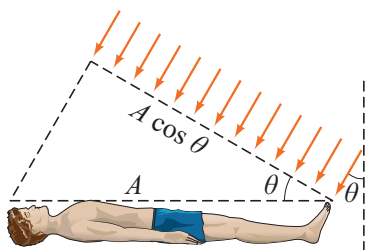


РИС. 14.11. Энергия излучения падает на тело под углом θ

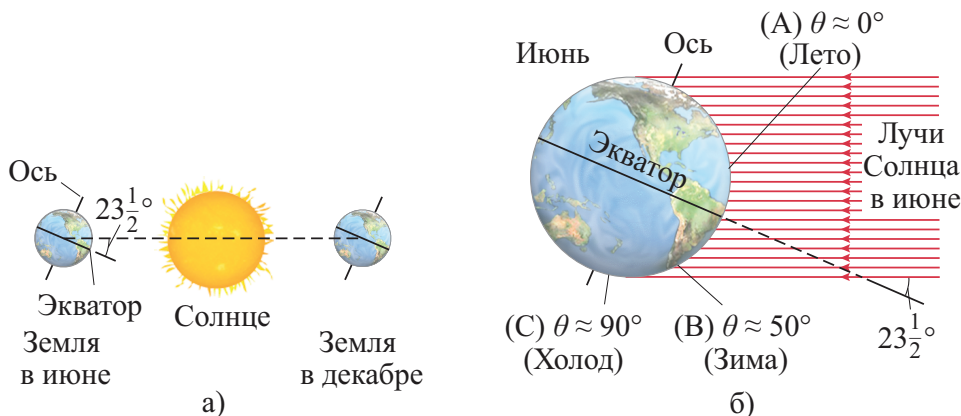


РИС. 14.12. а) Времена года на Земле объясняются наклоном земной оси по отношению к ее орбите вокруг Солнца. б) В июне солнечный свет составляет угол около 23° с экватором. Таким образом, в южных странах (метка А) угол θ близок к 0° , но в южном полушарии (В) составляет 50° или 60° , так что поглощается меньше солнечного излучения и наступает зима. Вблизи полюсов (С) есть области, куда зимой солнечный свет вообще не попадает, а летом попадает под малым углом, так что из-за такого малого поступления теплоты там формируются нетающие ледяные шапки

Объяснение сезонов и полярных льдов (рис. 14.12) также опирается на этот множитель $\cos \theta$ в уравнении (14.8). Времена года является не результатом того, насколько близко Земля приближается к Солнцу. На самом деле, когда в северном полушарии лето — Земля оказывается дальше от Солнца, чем зимой. В действительности важен угол, под которым лучи Солнца падают на Землю. И это та же причина, по которой Солнце нагревает Землю в полдень сильнее, чем на восходе или закате.

ПРИМЕР 14.11. Оценка. Поглощение энергии

Какова скорость поглощения энергии излучения Солнца человеком, лежащим плашмя на пляже в ясный день, если угол солнечных лучей составляет 30° с вертикалью? Считаем, что $\varepsilon = 0,70$ и что поверхности Земли достигает поток 1000 Вт/м^2 .

Подход. Используем уравнение (14.8) и оценим размеры типичного человека как имеющего высоту порядка 2 м и ширину 0,4 м, так что $A \approx (2 \text{ м})(0,4 \text{ м}) = 0,8 \text{ м}^2$. См. также рис. 14.11.

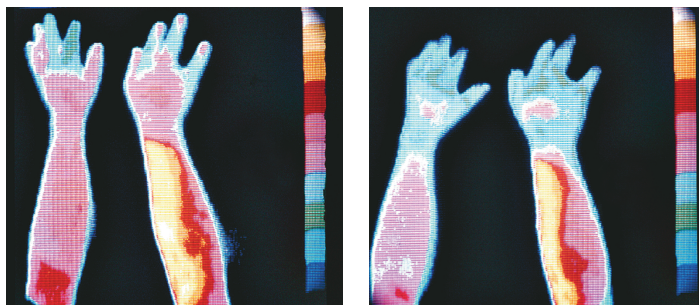
Решение. Поскольку $\cos 30^\circ = 0,866$, мы имеем

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (1000 \text{ Вт/м}^2) \varepsilon A \cos \theta = (1000 \text{ Вт/м}^2)(0,70)(0,8 \text{ м}^2)(0,866) = 500 \text{ Вт}.$$

Примечание. Если человек носит одежду светлого цвета, ε будет намного меньше, поэтому и поглощаться будет меньше энергии.

Имеется интересное применение теплового излучения для медицины **термографии**. Специальный инструмент, термограф, сканирует тело, измеряя интенсивность инфракрасного излучения¹⁰ от множества точек, и формирует изображение, напоминающее рентгеновский снимок (рис. 14.13). Области, где метабо-

•••••
 ••••• **Прикладная**
 ••••• **ФИЗИКА**
 ••••• Термография
 •••••



а)

б)

РИС. 14.13. Термограммы рук здорового человека а) до и б) после курения сигареты показывают снижение температуры из-за нарушения

кровообращения, связанного с курением. Термограммы в оригинале цветные; разный цвет соответствует разной температуре

¹⁰ Инфракрасное излучение — это свет, длина волны которого больше, чем длина волны видимого света.

лическая активность высока, например, в опухолях, часто можно обнаружить на термограмме из-за их более высокой температуры, и, как следствие, повышенного теплового излучения.

ПРИМЕР 14.12. Оценка. Размер звезды

Гигантская звезда Бетельгейзе испускает энергию излучения, в 10^4 раз большую, чем наше Солнце, в то время как температура ее поверхности (2900 К) составляет только половину температуры поверхности Солнца. Оцените радиус Бетельгейзе, считая $\varepsilon = 1$ и зная, что радиус Солнца равен $r_S = 7 \times 10^8$ м.

Подход. Мы предполагаем, что обе звезды имеют сферическую форму, с площадью поверхности $4\pi r^2$.

Решение. Мы решаем уравнение (14.6) относительно площади поверхности A :

$$4\pi r^2 = A = \frac{\Delta Q / \Delta t}{\varepsilon \sigma T^4}.$$

Тогда

$$\frac{r_B^2}{r_S^2} = \frac{(\Delta Q / \Delta t)_B}{(\Delta Q / \Delta t)_S} \frac{T_S^4}{T_B^4} = (10^4)(2^4) = 16 \times 10^4.$$

Следовательно,

$$r_B = \sqrt{16 \times 10^4} r_S = 400 r_S \approx 3 \times 10^{11} \text{ м.}$$

Если бы Бетельгейзе была на месте Солнца, она простиралась бы за орбиту Земли (Земля находится на расстоянии $1,5 \times 10^{11}$ м от Солнца).



**ПРИКЛАДНАЯ
ФИЗИКА**

- Астрономия —
- размер звезд

Упражнение Е. Вентилятор в жаркий день охлаждает вас путем *a)* увеличения излучения кожи; *b)* повышения теплопроводности; *в)* уменьшения средней длины свободного пробега молекул в воздухе; *г)* увеличения испарения пота; *д)* ни один из приведенных ответов не верен.

Резюме

Внутренняя энергия U означает полную энергию всех молекул в объекте. Для идеального одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT, \tag{14.1}$$

где N — число молекул, а n — число молей газа.

Теплота означает передачу энергии от одного объекта к другому из-за разницы температур. Таким образом, теплота измеряется в единицах энергии, таких как джоули.

Теплота и внутренняя энергия иногда также указываются в калориях или килокалориях (ккал), где

$$1 \text{ ккал} = 4,186 \text{ Дж}$$

равно количеству теплоты, необходимому для повышения температуры 1 кг воды на 1°C.

Удельная теплоемкость c вещества определяется как энергия (или теплота), требуемая для изменения температуры единицы массы вещества на 1 градус

$$Q = mc\Delta T, \quad (14.2)$$

где Q — поглощаемая или выделяемая теплота, ΔT — увеличение или уменьшение температуры, а m — масса вещества.

Когда теплота перетекает между частями изолированной системы, закон сохранения энергии говорит нам о том, что теплота, накопленная одной частью системы, равна теплоте, потерянной другой частью системы. Это утверждение является основой **калориметрии**, которая представляет собой способ количественного измерения теплообмена.

Всякий раз, когда изменяется фазовое состояние вещества, обмен энергией происходит без изменения температуры. **Удельная теплота плавления** представляет собой теплоту, необходимую для плавления 1 кг твердого вещества в жидкую фазу; она также равна теплоте, выделяемой, когда 1 кг вещества переходит из жидкого состояния в твердое. **Удельная теплота парообразования** представляет собой энергию, необходимую для превращения 1 кг жидкости в пар; она также равна энергии, выделяемой, когда вещество конденсируется из пара в жидкость.

Теплота передается от одного места (или объекта) к другому тремя различными способами: с помощью теплопроводности, конвекции и излучения.

При **теплопроводности** энергия передается через вещество посредством столкновений между более горячими (быстрыми) молекулами или электронами с их медленнее движущимися соседями.

Конвекция представляет собой передачу энергии при массовом движении молекул на значительные расстояния.

Излучение, не требующее присутствия материи, представляет собой передачу энергии с помощью электромагнитных волн, как, например, передача теплоты от Солнца. Все объекты излучают энергию в количестве, пропорциональном четвертой степени их абсолютной температуры и площади их поверхности. Количество излучаемой (или поглощаемой) энергии также зависит от природы поверхности (темные поверхности поглощают и излучают больше, чем яркие и блестящие), которая характеризуется излучательной способностью ϵ .

Излучение от Солнца поступает в ясный день на поверхность Земли со скоростью около 1000 Вт/м^2 .

Вопросы

1. Что происходит с работой, проделанной над баночкой апельсинового сока при энергичном встряхивании баночки?
2. Когда горячий объект нагревает более холодный объект, имеется ли между ними перетекание температуры? Являются ли изменения температуры двух объектов равными? Поясните свой ответ.
3. а) Если два объекта с различными температурами помещаются в тепловой контакт, то будет ли естественный поток теплоты направлен от объекта с более высокой внутренней энергией к объекту с более низкой внутренней энергией? б) Может ли теплота перетекать, если внутренняя энергия двух объектов одинакова? Поясните свой ответ.
4. В теплых регионах, где растут тропические растения, но температура за зиму может несколько раз упасть ниже точки замерзания, можно попытаться спасти чувствительные растения от заморозков с помощью полива в вечернее время. Объясните это явление.
5. Удельная теплоемкость воды достаточно велика. Объясните, почему это факт делает воду особенно хорошо подходящим теплоносителем для отопления с помощью радиаторов.
6. Почему вода в металлической фляге становится прохладнее, если тканый чехол фляги поддерживать во влажном состоянии?
7. Объясните, почему ожоги кожи, вызванные паром при 100°C , часто оказываются более серьезными, чем ожоги, вызванные водой при тех же 100°C .
8. Объясните, почему при испарении вода охлаждается (ее температура падает), используя понятия скрытой теплоты и внутренней энергии.
9. Будут ли макароны готовиться быстрее, если вода кипит более энергично? Поясните свой ответ.
10. Очень высоко в атмосфере Земли температура может достигать 700°C . Тем не менее на такой высоте животное скорее бы замерзло, чем изжарилось. Объясните, почему.
11. Участники некоторых неудачных арктических экспедиций выжили, зарываясь в снег. Почему они это делали?
12. Почему по мокрому песку на пляже ходить холоднее, чем по сухому?
13. Если вы слышите, что объект имеет “высокое содержание теплоты”, означает ли это, что он имеет высокую температуру? Поясните свой ответ.
14. Почему в печи для обогрева дома обязательно должно быть отверстие для поступления воздуха в печь? Что произойдет, если это вентиляционное отверстие окажется заблокированным книжным шкафом?

15. Потолочные вентиляторы иногда имеют реверсный режим, позволяющий им толкать воздух вниз или тянуть его вверх в разное время года. Объясните, как следует настроить вентилятор а) летом, б) зимой.
16. Спальные мешки и куртки на гусином пухе часто маркируются толщиной слоя в распушенном состоянии. Объясните, почему.
17. Микросхемы процессоров часто имеют приклеенный поверх них радиатор, выглядящий как ряд ребер. Почему радиаторы имеют такую форму?
18. В солнечные дни на берегу у большой массы воды часто заметен морской бриз. Объясните, почему (заметив, что температура земли при нагреве солнцем растет быстрее, чем у находящейся рядом воды).
19. Пол дома на фундаменте, под которым может “гулять” воздух, часто холоднее, чем пол, который опирается непосредственно на землю (например, на бетонное основание). Объясните, почему.
20. Днем при температуре 22°C тепло, в то время как в бассейне с водой той же температуры вам будет прохладно. Почему?
21. Объясните, почему показания температуры воздуха всегда измеряются термометром, находящемся в тени.
22. Недоношенный ребенок в инкубаторе может опасно переохладиться даже тогда, когда воздух в инкубаторе достаточно теплый. Объясните, почему.
23. Остужает ли обычный электрический вентилятор воздух? Почему да или почему нет? Если нет, то зачем его использовать?
24. Теплопотери через окно происходят с помощью следующих процессов: 1) через оконные стекла, 2) через раму, особенно если она металлическая, 3) через вентиляцию в раме и 4) через излучение. а) Какие механизмы теплопотерь у первых трех случаев — теплопроводность, конвекция или излучение? б) Какие из этих тепловых потерь уменьшают плотные шторы? Подробно объясните.
25. Кусок дерева, лежащий на солнце, поглощает больше теплоты, чем кусок блестящего металла. Тем не менее для руки металл кажется горячее, чем дерево. Объясните, почему.
26. Обычно земля остывает ночью гораздо быстрее, когда погода ясная, чем когда облачно. Почему?
27. “Спасательное” одеяло представляет собой тонкую блестящую (с металлическим покрытием) пластиковую пленку. Объясните, каким образом она может помочь сохранить теплоту неподвижного человека.
28. Объясните, почему города, расположенные на берегу океана, как правило, имеют меньшие экстремальные температуры, чем города на той же широте внутри континента.
29. Бумажный стаканчик, стоящий среди горячих углей, загорится, если он пуст (обратите внимание на горелые пятна на верхней части стаканчика на

рис. 14.14), но если он заполнен водой — он не будет гореть. Объясните, почему. Не обращайтесь внимания на зефир.



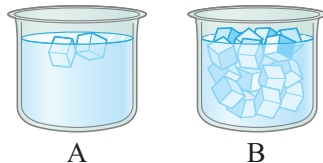
РИС. 14.14. К вопросу 29

30. В холодный ветренный день окно кажется холоднее, чем в такой же по температуре безветренный день. Это верно, даже если нет никакой утечки воздуха возле окна. Почему?

Викторина

1. Когда вы помещаете кубик льда в стакан теплого чая, что из следующего происходит?
 - а) Холод вытекает из кубика льда в чай.
 - б) Холод вытекает из кубика льда в чай, а теплота вытекает из чая в ледяной куб.
 - в) Теплота поступает из чая в ледяной куб.
 - г) Нет ни потоков теплоты, ни потоков холода. Есть только потоки температуры между льдом и чаем.

2. Два сосуда А и В на рис. 14.15 содержат смесь льда и воды, находящиеся в равновесии. Какой сосуд более холодный?



- а) Сосуд А.
 - б) Сосуд В.
 - в) Они оба имеют равную температуру.
3. Какое из следующих утверждений справедливо для объектов, находящихся в тепловом равновесии?
 - а) Они оба имеют одинаковую температуру.
 - б) Они оба имеют одинаковую внутреннюю энергию.

РИС. 14.15. К вопросу 2

- в) Они оба имеют одинаковую теплоту.
г) Все перечисленное выше.
д) Ничто из вышеперечисленного.
4. Какие из перечисленных событий происходят при изменении фазового состояния вещества?
- а) Изменяется температура.
б) Изменяется химический состав.
в) Теплота поступает в вещество или из него.
г) Молекулы распадаются на атомы.
5. Может ли температура, измеряемая с помощью термометра в воде, оставаться постоянной при добавлении теплоты?
- а) Да, вода может испытывать фазовый переход.
б) Нет, добавление теплоты всегда будет изменять температуру.
в) Может; это зависит от скорости, с которой добавляют теплоту.
г) Может; это зависит от начальной температуры воды.
6. Типичный термос имеет тонкую вакуумную прослойку между блестящей внутренней колбой (которая удерживает жидкость) и блестящей же защитной внешней колбой (часто из нержавеющей стали). Вакуумное пространство отлично предотвращает
- а) теплопроводность;
б) конвекцию;
в) излучение;
г) теплопроводность и конвекцию;
д) теплопроводность, конвекцию и излучение.
7. Теплота представляет собой
- а) жидкость, которая называется теплород;
б) меру средней кинетической энергии атомов;
в) количество энергии, передаваемой между объектами в из-за разницы в температуре;
г) невидимое, без запаха, невесомое вещество;
д) полную кинетическую энергию идеального газа.
8. Излучение испускают
- а) только светящиеся объекты, такие как Солнце;
б) только объекты, температура которых выше, чем температура окружающей среды;

- в) только объекты с большим количеством теплоты, чем у их окружения;
г) любой объект с температурой выше 0 К;
д) только объекты, которые имеют большую удельную теплоемкость.
9. Десять граммов воды добавляется к десяти граммам льда в изолированном контейнере. Растает ли весь лед в контейнере?
а) Да. б) Нет. в) Нужна дополнительная информация.
10. Два объекта сделаны из одного и того же материала, но у них различные массы и температуры. Если объекты находятся в тепловом контакте, то у какого из них будет большее изменение температуры?
а) У объекта с более высокой начальной температурой.
б) У объекта с более низкой начальной температурой.
в) У объекта с большей массой.
г) У объекта с меньшей массой.
д) У объекта с большей удельной теплоемкостью.
е) Недостаточно информации.
11. Стоит жаркое лето, поэтому, когда вы приехали на озеро, то решили пойти искупаться, несмотря на ночь. Вода оказалась холодной! На следующий день вы идете купаться в самое жаркое время дня, но, несмотря на теплый воздух, вода по-прежнему почти так же холодна. Почему?
а) Вода довольно плотная по сравнению со многими другими жидкостями.
б) Вода остается в жидком состоянии в широком диапазоне температур.
в) Вода имеет высокий объемный модуль упругости.
г) Вода имеет высокую удельную теплоемкость.
12. Две равных массы жидкости, первоначально находящиеся при одной и той же температуре, нагревают в течение одного и того же времени в одной и той же печи. После измерения температуры обнаружили, что одна жидкость имеет более высокую температуру, чем другая. Какая жидкость имеет более высокую удельную теплоемкость?
а) Более холодная.
б) Более горячая.
в) Обе теплоемкости одинаковы.

Задачи

14.1. Теплота как передача энергии

1. (I) До какой температуры 8200 Дж теплоты нагреют 3,0 кг воды, изначально имеющей температуру 10,0°C?

2. (I) Как много теплоты (в джоулях) потребуется, чтобы поднять температуру 34,0 кг воды от 15°C до 95°C?
3. (II) Когда водолаз погружается в океан, вода протекает в разрыв гидрокостюма и образует слой воды толщиной около 0,5 мм между кожей водолаза и гидрокостюмом. Предполагая, что общая площадь поверхности гидрокостюма, покрывающего водолаза, составляет около 1,0 м², и что морская вода, поступающая в костюм, имеет температуру 10°C и нагревается телом водолаза до температуры кожи (35°C), оцените количество энергии, которое требуется для такого нагрева.
4. (II) Средний активный человек потребляет около 2500 ккал в день. а) Чему равна эта энергия в джоулях? б) в киловатт-часах? в) Если стоимость электроэнергии около 10 центов за киловатт-час, то каковы были бы ваши затраты за день, если бы вы кормились из электрической розетки? Можете ли вы прокоррмироваться на такую сумму в день?¹¹
5. (II) Британская тепловая единица (British thermal unit, Btu) представляет собой единицу теплоты в Британской системе единиц. Одна Btu определяется как теплота, необходимая для подогрева 1 фунта воды на 1°F. Покажите, что 1 Btu = 0,252 ккал = 1056 Дж.
6. (II) Сколько джоулей и килокалорий генерируются при использовании тормозов, полностью останавливающих автомобиль массой 1300 кг, движущийся со скоростью 95 км/ч?
7. (II) Водонагреватель может производить 32 000 кДж/ч. Сколько воды он может нагреть за час от 12°C до 42°C?
8. (II) Небольшой погружаемый в чашку нагреватель имеет мощность 375 Вт. Оцените, сколько времени ему потребуется, чтобы нагреть чашку бульона (примем ее объем равным 250 мл воды) от 15°C до 75°C.

14.3 и 14.4. Удельная теплоемкость и калориметрия

9. (I) Система охлаждения автомобиля содержит 18 л воды. Сколько теплоты она поглощает при повышении температуры от 15°C до 95°C?
10. (I) Какова удельная теплоемкость металлического вещества, если для нагрева 4,1 кг металла от 18,0°C до 37,2°C требуется 135 кДж?
11. (II) а) Сколько энергии требуется, чтобы довести кастрюлю воды объемом 1,0 л от температуры 20°C до 100°C? б) Как долго могла бы светиться за счет этой энергии лампочка мощностью 60 Вт?
12. (II) Образцы меди, алюминия и воды в опыте нагревались одинаково, на одно и то же количество градусов, и поглощали при этом одинаковое количество теплоты. Каковым является отношение их масс? [Указание: см. табл. 14.1.]

¹¹ Можете подставить стоимость электроэнергии и продуктов питания в вашей стране. — Примеч. ред.

13. (II) Сколько времени требуется кофейнику мощностью 750 Вт, чтобы довести до кипения 0,75 л воды, изначально находящейся при температуре 11°C? Предположим, что часть кофейника, которая нагревается вместе с водой, изготовлена из 280 г алюминия, и что вода не выкипает.
14. (II) Какой будет равновесная температура, если брусок меди массой 265 г при температуре 245°C поместить в алюминиевую чашку калориметра массой 145 г, в которой содержится 825 г воды при 12,0°C?
15. (II) Стекланный термометр массой 31,5 г показывает температуру 23,6°C перед тем, как его помещают в 135 мл воды. Когда вода и термометр приходят в равновесие, термометр показывает 41,8°C. Какой была исходная температура воды? Массой жидкости внутри стеклянного термометра пренебречь.
16. (II) Только что выкованную и еще очень горячую железную подкову массой 0,40 кг (рис. 14.16) сбрасывают в 1,25 л воды с температурой 20,0°C, которая находится в железном сосуде массой 0,30 кг. Оцените начальную температуру горячей подковы, если конечная равновесная температура равна 25,0°C.
17. (II) Кусок железа массой 290 г с температурой 180°C помещают в алюминиевую чашку калориметра массой 95 г, которая содержит 250 г глицерина при 10°C. Наблюдаемая конечная температура равна 38°C. Оцените удельную теплоемкость глицерина.
18. (II) Теплоемкость C некоторого объекта определяется как суммарная теплота, необходимая, чтобы повысить его температуру на 1°C. Таким образом, подъем температуры ΔT требует теплоту ΔQ , равную

$$\Delta Q = C \Delta T.$$

а) Выразите теплоемкость C через удельную теплоемкость материала. б) Какова теплоемкость 1,0 кг воды? в) 45 кг воды?

19. (II) Головка молотка массой 1,20 кг имеет непосредственно перед ударом по гвоздю скорость 7,5 м/с (рис. 14.17), и после удара останавливается. Оцените подъем температуры железного гвоздя массой 14 г, если по нему в быстром темпе сделано восемь таких ударов молотком. Считайте, что вся энергия идет на нагрев гвоздя.



РИС. 14.16. К задаче 16

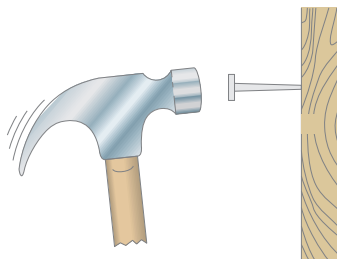


РИС. 14.17. К задаче 19

20. (II) Образец вещества массой 215 г нагревают до 330°C , а затем погружают в алюминиевую чашку калориметра массой 105 г, содержащую 185 г воды и стеклянный термометр массой 17 г при температуре $10,5^{\circ}\text{C}$. Конечная температура составляет $35,0^{\circ}\text{C}$. Чему равна удельная теплоемкость вещества? (Предполагается, что вода не выкипает.)
21. (II) Алюминиевый шар массой 0,095 кг падает с крыши здания высотой 55 м. Если 65% тепловой энергии, производимой при ударе о землю, поглощается шаром, то каково повышение его температуры?
22. (II) Оцените содержание калорий в 65 г конфет на основе следующих измерений. 15-граммовый образец конфеты помещают в небольшой алюминиевый контейнер массой 0,325 кг, наполненный кислородом. Этот контейнер помещают в 1,75 кг воды в алюминиевой чашке калориметра массой 0,624 кг с начальной температурой $15,0^{\circ}\text{C}$. Кислородно-конфетная смесь в контейнере (“бомбовый калориметр”) поджигается, и конечная температура всей системы становится равной $53,5^{\circ}\text{C}$.
23. (II) Определите содержание энергии в 100 г печенья на основе следующих измерений. 10-граммовый образец печенья тщательно высушивают, после чего его помещают в бомбовый калориметр. Алюминиевый бомбовый калориметр имеет массу 0,615 кг; его помещают в 2,00 кг воды, содержащихся в алюминиевой чашке калориметра массой 0,524 кг. Начальная температура системы составляет $15,0^{\circ}\text{C}$, а температура после сжигания образца — $36,0^{\circ}\text{C}$.

14.5. Скрытая теплота

24. (I) Если $3,40 \times 10^5$ Дж энергии подается в контейнер с жидким кислородом при температуре -183°C , то сколько кислорода при этом может испариться?
25. (II) Сколько теплоты необходимо для плавления 23,50 кг серебра, первоначально находящегося при температуре 25°C ?
26. (II) Во время физических упражнений человек может выделять до 185 ккал теплоты за 25 мин путем испарения воды (при 20°C) с кожи. Сколько воды при этом испаряется?
27. (II) Какая масса пара при 100°C должна быть добавлена к 1,00 кг льда при 0°C , чтобы получить жидкую воду при температуре 30°C ?
28. (II) Кубики льда массой 28 г при температуре плавления опущены в изолированный контейнер с жидким азотом. Сколько азота испаряется, если он находится в точке кипения 77 К и имеет скрытую теплоту парообразования 200 кДж/кг? Предположим для простоты, что удельная теплоемкость льда постоянна и равна ее значению вблизи точки плавления.
29. (II) Высокогорные альпинисты не едят снег, а сначала плавят его на плите. Чтобы понять, почему они так поступают, вычислите энергию, поглощаемую из тела, если: а) съесть 1,0 кг снега при температуре -15°C , который ваше

тело нагревает до температуры тела 37°C ; б) расплавить $1,0$ кг снега с помощью печи и выпить получившийся $1,0$ кг воды при температуре 2°C , которую ваше тело затем нагреет до 37°C .

30. (II) Железный котел массой 180 кг содержит 730 кг воды при температуре 18°C . Нагреватель поставляет энергию со скоростью $58\,000$ кДж/ч. Сколько времени потребуется для того, чтобы а) вода достигла точки кипения, и б) полностью превратилась в пар?
31. (II) Определите скрытую теплоту плавления ртути с использованием следующих калориметрических данных: $1,00$ кг твердой ртути при температуре ее плавления -39°C помещают в алюминиевую чашку калориметра массой $0,620$ кг с $0,400$ кг воды при $12,80^{\circ}\text{C}$. Результирующая равновесная температура равна $5,06^{\circ}\text{C}$.
32. (II) На месте преступления судебный эксперт выясняет, что свинцовая пуля массой $6,2$ г, попавшая в дверную коробку, по-видимому, полностью расплавилась при ударе. Если предположить, что выстрел был сделан при комнатной температуре (20°C), то какой будет оцененная экспертом минимальная скорость пули при выстреле?
33. (II) Конькобежец массой 64 кг скользит с начальной скоростью $7,5$ м/с до остановки. Если предположить, что лед находится при температуре 0°C , и что 50% генерируемой трением теплоты поглощается льдом, то какова масса растаявшего льда?
34. (II) Кубик льда из морозильной камеры помещен в алюминиевую чашку калориметра массой 85 г, заполненную 310 г воды при комнатной температуре $20,0^{\circ}\text{C}$. В конечном итоге получается вода при $17,0^{\circ}\text{C}$. Какова была масса кубика льда?
35. (II) Пуля массой 55 г со скоростью 250 м/с попадает в блок льда при температуре 0°C и останавливается. Считая, что температура пули существенно не меняется, определите, сколько льда растает в результате столкновения?

14.6–14.8. Теплопроводность, конвекция, излучение

36. (I) Вычислите скорость потока теплоты за счет теплопроводности через окно из примера 14.8, в предположении сильного порывистого ветра при температуре снаружи -5°C .
37. (I) Температура одного конца медного стержня диаметром $2,0$ см и длиной 56 см поддерживается равной 460°C , а другой конец погружен в воду с температурой 22°C . Вычислите поток теплоты вдоль стержня.
38. (II) а) Сколько энергии излучается вольфрамовой сферой (излучательная способность $\varepsilon = 0,35$) радиусом 19 см при температуре 25°C ? б) Если сфера находится в комнате, стены которой имеют температуру -5°C , то каковы результирующие потери энергии из сферы?

39. (II) Сколько времени требуется Солнцу, чтобы растопить плоскую глыбу льда при 0°C с горизонтальной площадью $1,0\text{ м}^2$ и толщиной $1,0\text{ см}$? Предположим, что солнечные лучи составляют угол 35° с вертикалью и что излучательная способность льда равна $0,050$.
40. (II) *Теплопроводность кожи.* Предположим, что к поверхности кожи (общей площадью $1,5\text{ м}^2$) капилляры подводят тепловой поток 150 Вт . Оцените среднее расстояние от капилляров до поверхности кожи, если разность температур крови и поверхности кожи составляет $0,50^{\circ}\text{C}$.
41. (II) Две комнаты, каждая из которых представляет собой куб с ребром $4,0\text{ м}$, имеют общую кирпичную стену толщиной 14 см . Из-за наличия в одной комнате ряда лампочек мощностью 100 Вт , воздух в ней имеет температуру 30°C , в то время как температура в другой комнате 10°C . Сколько лампочек требуется, чтобы поддерживать указанную разницу температур с двух сторон стены?
42. (II) Лампочка мощностью 100 Вт генерирует 95 Вт теплоты, которая рассеивается через стеклянную колбу радиусом $3,0\text{ см}$ и толщиной $0,50\text{ мм}$. Какова разница температур между внутренней и наружной поверхностями стекла?
43. (III) Какое примерно время потребуется, чтобы расплавить $8,2\text{ кг}$ льда при температуре 0°C , если он помещен в тщательно загерметизированный пенопластовый ящик размером $25\text{ см} \times 35\text{ см} \times 55\text{ см}$, стенки которого имеют толщину $1,5\text{ см}$? Предположим, что теплопроводность пенопласта вдвое больше теплопроводности воздуха, а температура воздуха снаружи составляет 34°C .
44. (III) Медный и алюминиевый стержни с одной и той же длиной и площадью поперечного сечения соединены конец к концу (рис. 14.18). Медный конец помещают в печь, поддерживаемую при постоянной температуре 205°C . Алюминиевый конец помещен в емкость со льдом при постоянной температуре $0,0^{\circ}\text{C}$. Вычислите температуру в точке соединения стержней. Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.
- *45. (III) Предположим, что теплоизоляционные свойства стены дома обеспечиваются в основном слоем кирпича толщиной $4,0$ дюйма и слоем теплоизолятора с термосопротивлением $R-19$, как показано на рис. 14.19. Каковы общие потери теплоты через такую стену, если ее общая площадь 195 фут^2 , а разность температур с двух сторон стены — 35°F ?

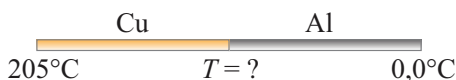


РИС. 14.18. К задаче 44

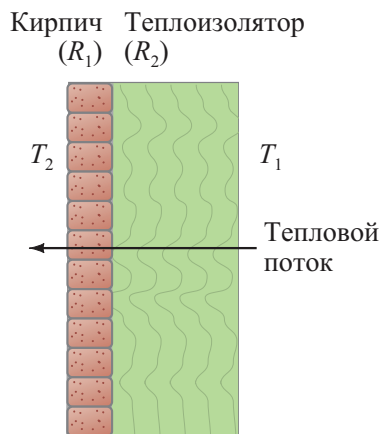


РИС. 14.19. К задаче 45. Двух-слойная стена

Общие задачи

46. Безалкогольный напиток может содержать около 0,35 кг жидкости при температуре 5°C . Питье этого напитка может приводить к расходу жира в организме, так как, чтобы нагреть жидкость до температуры тела (37°C), необходима энергия. Сколько килокалорий должен иметь напиток, чтобы обеспечить идеальное равновесие, т.е. чтобы энергия от напитка компенсировала расходы на его нагрев (по сути — нагрев воды)?
47. а) Оцените общую мощность излучения Солнца в космос, считая его идеальным излучателем с температурой $T = 5500\text{ К}$. Радиус Солнца — $7,0 \times 10^8\text{ м}$. б) Исходя из этого, определите мощность излучения на единицу площади, падающего на Землю на расстоянии $1,5 \times 10^{11}\text{ м}$ (рис. 14.20).

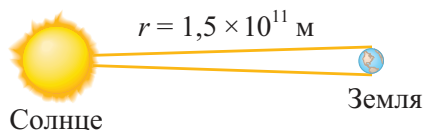


РИС. 14.20. К задаче 47

48. Для того, чтобы получить представление о тепловой энергии, содержащейся в мировом океане, оцените теплоту, выделяющуюся при остывании одного кубического километра морской воды на 1 К . (Для оценки рассматривайте океанскую воду как чистую пресную.)
49. Каким будет конечный результат, если смешать вместе равные массы льда при температуре 0°C и пара при температуре 100°C ?
50. Альпинист носит куртку с гусиным пухом толщиной $3,5\text{ см}$ с общей площадью поверхности $0,95\text{ м}^2$. Температура на поверхности одежды -18°C , кожи — 34°C . Определите поток теплоты через куртку за счет теплопроводности, предполагая а) что куртка сухая и ее теплопроводность k равна теплопроводности гусиного пуха, и б) что куртка мокрая, и что теплопроводность k куртки равна теплопроводности воды, а толщина куртки упала до $0,50\text{ см}$.
51. Во время дневной активности человек массой 70 кг может генерировать 200 ккал/ч . Предположим, что 20% этой энергии переходит в полезную работу, а остальные 80% преобразуется в теплоту. Оцените при данном предположении повышение температуры тела за 45 мин , если считать, что теплота в окружающую среду не передается.
52. Оцените скорость, с которой теплота может отводиться от внутренней части тела к поверхности. В качестве модели предположим, что толщина приповерхностных тканей тела составляет $4,0\text{ см}$, что кожа имеет температуру 34°C , а внутренняя температура — 37°C , а также что площадь поверхности всей кожи — $1,5\text{ м}^2$. Сравните это с измеренным значением около 230 Вт , кото-

рые должны рассеиваться человеком, занятым нетяжелой работой. Эта задача ясно показывает необходимость конвективного охлаждения тела кровью.

53. Велосипедист потребляет 9,0 л воды в течение 3,5 часов гонки. Оцените, сколько энергии в ккал тратит велосипедист во время езды, если принять модель, согласно которой 80% энергии велосипедиста переходит испарение этой воды (при 20°C) в виде пота?
54. Если уголь выделяет при сгорании 30 МДж/кг, то сколько угля необходимо, чтобы нагреть дом, требующий для обогрева в течение всей зимы $2,0 \times 10^5$ МДж? Считайте, что потери теплоты через дымоход составляют 30%.
55. Свинцовая пуля массой 15 г выстреливается в фиксированный деревянный блок массой 35 кг. Блок и попавшая в него пуля вместе поглощают всю образовавшуюся теплоту. После достижения термического равновесия измеренное повышение температуры системы составило 0,020°C. Рассчитайте входящую скорость пули.
56. Мраморный валун массой 310 кг скатывается с вершины скалы и пролетает по вертикали перед ударом о землю 120 м. Оцените повышение температуры камня, если на его нагрев уходит 50% генерируемой теплоты.
57. Свинцовый шар массой 2,3 кг помещают в 2,5 л воды в теплоизолированном сосуде при начальной температуре воды 20,0°C. Если конечная температура воды и свинца равна 32,0°C, то какой была начальная температура свинцового шара?
58. Микроволновая печь используется для нагрева 250 г воды. При установке максимальной мощности печь может поднять температуру воды от 20°C до 100°C за 105 с. а) Какой поток теплоты печь передает воде? б) Если мощность печи остается той же, определите, сколько граммов воды испарится при нагреве в течение 2 мин (а не 1 мин 45 с, как в части а)).
59. В типичной игре в сквош (рис. 14.21) два человека ударяют мягким резиновым мячиком по стене. Предположим, что мяч попадает в стену со скоростью 22 м/с и отскакивает обратно со скоростью 12 м/с, и что теряющаяся в этом процессе кинетическая энергия нагревает мяч. Каким будет повышение температуры мяча после одного удара? (Удельная теплоемкость каучука составляет около 1200 Дж/кг·К.)
60. Температура внутри земной коры увеличивается примерно на 1,0°C на каждые 30 м глубины. Теплопроводность коры 0,80 Дж/(с·м·К). а) Определите теплоту, передаваемую за 1,0 ч из внутренних областей Земли к ее поверхности для всей планеты в целом. б) Сравните эту теплоту с энергией, получаемой за 1,0 ч поверхностью Земли от излучения Солнца (1000 Вт/м^2).
61. Железный метеорит плавится, входя в атмосферу Земли. Вычислите минимальную скорость метеорита, с которой он входит в атмосферу Земли, если его начальная температура за пределами земной атмосферы была -105°C .



РИС. 14.21. К задаче 59

62. Температура стеклянной поверхности лампочки мощностью 75 Вт равна 75°C ; температура в помещении — 18°C . Оцените температуру лампочки мощностью 150 Вт со стеклянной колбой того же размера. Рассмотрите только излучение, и считайте, что 90% энергии выделяется в виде теплоты.
63. В холодных условиях, человек может терять теплоту за счет теплопроводности и излучения со скоростью около 200 Вт. Оцените, сколько времени потребуется, чтобы температура тела понизилась от $36,6^{\circ}\text{C}$ до $35,6^{\circ}\text{C}$, если обмен веществ близок к полной остановке. Считайте, что тело имеет массу 65 кг. (См. табл. 14.1.)
64. Свинцовая пуля массой 12 г, движущаяся со скоростью 220 м/с, проходит тонкую стену насквозь и выходит со скоростью 160 м/с. Если пуля поглощает 50% выделившейся теплоты, а) то насколько повысится температура пули? б) Если начальная температура пули была равна 20°C , то расплавится ли часть пули, и если да, то какая?
65. Лист растения площадью 40 см^2 и массой $4,5 \times 10^{-4}\text{ кг}$ в ясный день ориентирован так, что солнечные лучи падают на него перпендикулярно. Лист имеет излучательную способность 0,85 и удельную теплоемкость $0,80\text{ ккал/кг}\cdot\text{K}$. а) Оцените энергию солнечного излучения, поглощаемую листом за секунду, а затем б) оцените скорость подъема температуры листа. в) Будет ли такое повышение температуры продолжаться в течение нескольких часов? Почему да или почему нет? г) Вычислите температуру, которой бы достиг лист, если бы он терял всю поступающую теплоту только с помощью излучения в окружающую среду при 24°C . д) Какие другие способы рассеяния теплоты листом могут иметь место?
66. Используя результат пункта а) из задачи 65, примите во внимание излучение от листа, чтобы рассчитать, сколько воды должно испаряться листом за час для поддержания температуры 35°C .
67. После горячего душа и мытья посуды в бойлере объемом 245 л не осталось горячей воды, т.е. бак заполнен водой с температурой примерно 10°C . а) Сколь-

ко энергии требуется для подогрева воды до 45°C ? б) Сколько времени займет подогрев, если мощность нагревательного элемента бойлера — 9500 Вт ?

68. Домашний термостат обычно устанавливается на температуру 22°C , а ночью на срок $9,0\text{ ч}$ — на температуру 16°C . Оцените, насколько больше теплоты будет необходимо (в виде процентов от ежедневного использования), если термостат не устанавливать на более низкую температуру в ночное время. Считаем, что температура снаружи составляет в среднем от 0°C в течение $9,0\text{ ч}$ ночного времени, и 8°C в течение оставшейся части дня, а также что потери теплоты из дома пропорциональны разности температур внутри дома и снаружи. Для того, чтобы получить оценку из этих данных, вам придется сделать другие упрощающие предположения (какие именно?).

Поисковые и обучающие задачи

1. Изобразите графики, аналогичные представленному на рис. 14.5, для свинца и этилового спирта. Сравните и сопоставьте их один с другим и с графиком для воды. Существуют ли какие-либо температурные диапазоны, в которых все три вещества являются жидкостями? Паром? Твердыми веществами? Для удобства используйте удельные теплоемкости, приведенные в табл. 14.1, для всех фазовых состояний свинца и этилового спирта.
2. а) Используя солнечную постоянную, оцените мощность, которую вся Земля в целом получает от Солнца. б) Предположим, что Земля излучает равное количество энергии обратно в космическое пространство (то есть Земля находится в равновесии). Оцените среднюю температуру поверхности Земли, предполагая, что Земля является совершенным излучателем ($\epsilon = 1,0$). [Указание: подумайте, какую из площадей πr_3^2 и $4\pi r_3^2$ использовать для Земли в каждом из случаев.]
3. Вычислите, что произойдет, когда 1000 Дж теплоты добавляются к 100 г а) льда при -20°C ; б) льда при 0°C ; в) воды при 10°C ; г) воды при 100°C ; д) пара при 110°C .
4. Дом имеет теплоизолирующие стены толщиной $19,5\text{ см}$ (считаем, что их теплопроводность равна теплопроводности воздуха) и площадью 410 м^2 , крышу из дерева толщиной $5,5\text{ см}$ и площадью 250 м^2 , а также окна толщиной $0,65\text{ см}$ и общей площадью 33 м^2 . а) Предполагая, что теплота теряется только путем теплопроводности, рассчитайте скорость, с которой теплота должна подаваться в дом, чтобы поддерживать его внутреннюю температуру равной 23°C , если температура наружного воздуха -15°C . б) Пусть дом изначально находится при температуре 15°C . Оцените количество теплоты, необходимое, чтобы повысить температуру до 23°C за 30 минут . Предположим, что нагревать нужно только воздух, и что его объем 750 м^3 . в) Если цена природного газа $0,080\text{ долларов/кг}$, а его теплота сгорания — $5,4 \times 10^7\text{ Дж/кг}$, то каковы

ежемесячные расходы на круглосуточное поддержание дома в условиях из пункта *a*), в предположении, что на нагрев дома уходит 90% производимой теплоты? Удельную теплоемкость воздуха считаем равной 0,24 ккал/кг·К.

Ответы к упражнениям

A. б).

B. в).

B. Второй (превращение жидкой воды в твердый лед).

Г. 0,21 кг.

Д. Портьеры создают ловушку для слоя воздуха между внутренней стороной окна и помещением, который действует как превосходный теплоизолятор.

E. з).