



Дж.Твайделл А.Уэйр

---

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ  
ИСТОЧНИКИ  
ЭНЕРГИИ

---

Перевод с английского  
под редакцией В. А. Коробкова



МОСКВА  
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ  
1990

ББК 31.15  
Т 26  
УДК 620.92

Рецензенты В. И. Виссарионов, В. А. Коробков

John W. Twidell and Anthony D. Weir  
RENEWABLE ENERGY RESOURCES  
London: E. & F. N. Spon, 1986

**Т26 Твайделл Дж., Уэйр А.**  
Возобновляемые источники энергии: Пер. с  
англ.— М.: Энергоатомиздат. 1990.—392 с.: ил.  
ISBN 5-283-02469-5 (рус.)

Книга представляет собой введение в научно обоснованный анализ возможностей природных источников возобновляемой энергии. Вопросы использования солнечной энергии и ее производных, приливной энергии и тепловой энергии недр планеты рассмотрены в связи с фундаментальными физическими процессами.

Для инженерно-технических работников, приступающих к работам по программам использования возобновляемых источников энергии

Т  $\frac{2201000000-353}{051(01)-90}$  264-89

ББК 31.15

ISBN 5-283-02469-5 (рус.)  
ISBN 0-419-12000-9 (англ.)

© J. W. Twidell and A. D. Weir, 1986  
© Перевод на русский язык,  
Энергоатомиздат, 1990

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Без преувеличения можно сказать, что история развития общества — это и история энергетики, причем первыми источниками энергии для преобразовательной деятельности человека были именно возобновляемые источники энергии — мускульная сила животных, ветер, реки, приливы. Затем в ход пошли запасы ископаемого топлива и в частности ядерное горючее. Постоянно растущие потребности в энергии так или иначе удовлетворялись за счет вовлечения новых ресурсов, совершенствования технологии переработки топлива, совершенствования потребления. И вот здесь, когда казалось, что перспективы ставшей традиционной энергетики на ископаемом топливе (именно оно в настоящее время является основным источником энергии) достаточно устойчивы, в нарастающем темпе стали проявляться связанные с ней негативные эффекты: тепловое, химическое, радиоактивное загрязнение среды в сочетании с быстрым уменьшением легкодоступных запасов топлива, особенно нефти, газа, высококачественного угля. Правда, есть еще новые, во много раз более экономичные способы переработки урана, есть, наконец, возможность создания термоядерных преобразователей, которые должны позволить решить проблему снабжения человечества энергией на тысячелетия, но это не снимет проблем теплового загрязнения, проблем хранения отходов, проблем возможных аварий энергетических гигантов.

Именно здесь диалектика жизни вновь повернула нас лицом к источникам возобновляемой энергии, природа которых определяется процессами на Солнце и в глубинах Земли, гравитационным взаимодействием Солнца, Земли и Луны. По оценкам специалистов оказалось, что только за счет извлечения доступной части энергии, постоянно возобновляющейся в Мировом океане путем образования градиентов температур и соленостей, волн, течений, приливов, можно получать примерно в 10 раз больше энергии, чем сейчас дают ежегодно «сжигаемые» 10 млрд. т условного топлива. А ведь есть еще собственно излучение Солнца, есть ветры, есть глубинное тепло Земли. Даже активные сторонники опережающего развития ядерной энергетики в своих прогнозах на конец XXI в. «отдают» возобновляемой энергии



не менее 18% общего потребления, а это примерно столько, сколько сейчас человечество получает за счет ископаемого топлива.

Возобновляемые источники энергии привлекают своей относительной экологической чистотой, принципиальной возможностью создать на планете общество, живущее в равновесии со средой, возможностью распределения преобразователей самого различного масштаба и назначения по всей планете. В перспективе это позволит даже управлять климатом, что немаловажно, если учесть энергозатраты, идущие на преодоление последствий стихийных бедствий, на отопление жилищ, на получение пищи. Но чтобы использование возобновляемой энергии вышло на требуемый уровень, необходимо совершить революцию в наших представлениях о соответствующих источниках, создать в обществе предпосылки к широкому внедрению соответствующих устройств, подготовить специалистов, которые могли бы не только разрабатывать такие устройства, но правильно эксплуатировать их.

И вот перед нами одна из новых книг по этому вопросу. Книга несколько необычная. Книга — учебник, книга — введение в новую чрезвычайно широкую специальность, по которой еще не выпускает инженеров ни один вуз страны. Ее отличительная особенность — масштабный охват явлений, лежащих в основе создания соответствующих преобразователей энергии. В то же время в ней не отдается предпочтение каким-то определенным преобразователям, нельзя сказать даже, что она полностью описывает всевозможные виды источников возобновляемой энергии. Внешне бесстрастная, она позволяет получить общее представление о теории, лежащей в основе создания широкого класса устройств, но делает это так, что сразу хочется что-то изобрести, что-то применить у себя дома или на работе.

Книга состоит из шестнадцати глав, пять из которых носят обобщенный характер и практически относятся ко всем видам источников. Глава I посвящена принципам энергетики на возобновляемых ресурсах. Здесь не только даны необходимые определения, но и проведен сравнительный анализ различных видов возобновляемых и невозобновляемых ресурсов по их специфическим свойствам (интенсивность, локализация, постоянство во времени, безопасность, экологичность и т. д.). Наряду с научными принципами разработки источников такой энергии рассматриваются общетехнические и социальные моменты, связанные с ее использованием. В частности, отмечается то обстоятельство, что развитие технологии возобновляемой энергии должно привести к выравниванию обеспеченности энергией районов с различной плотностью населения, в том числе и труднодоступных, а это приведет к глубокой перестройке стиля энергопотребления.

Главы 2—4 знакомят читателя с необходимыми для понимания вопроса сведениями из механики жидкости, теплопереноса, с физикой распространения солнечного излучения. Здесь раскрыты основные понятия, приведены наиболее часто используемые соотношения, объяснены основные физические законы, лежащие в основе новой энергетики. С помощью наглядных примеров показано, как эти соотношения можно применять для численных оценок. Здесь сразу следует оговориться, что математический аппарат книги предельно упрощен. Это приближает ее к широкому читательскому кругу, сводя изначальные знания, необходимые для понимания материала, к получаемым на первом курсе любого технического вуза. Поэтому когда по ходу изложения авторам требуются более сложные математические выкладки, они предпочитают давать качественные объяснения. Так они поступают, например, вводя понятие турбулентности или описывая различные виды теплообмена.

Главы 5—7 посвящены преобразованию солнечной энергии в технических системах. Здесь рассмотрены основные способы нагревания воды — от непосредственного поглощения излучения свободной водной поверхностью до реализации систем со сложными многослойными покрытиями, препятствующими как отражению коротковолновой части спектра, так и выходу наружу преобразованного длинноволнового излучения. Интересны и наглядны приведенные здесь электрические аналогии процессов, происходящих при различных способах нагревания. Много внимания уделено способам кондиционирования, дистилляции, сушки — процессам, имеющим большое значение в производственной деятельности и требующим больших затрат энергии. Рассмотрены способы накопления тепла в солнечных прудах, различные концентраторы излучения, термохимические преобразователи. При описании принципов прямого преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью полупроводниковых систем особое внимание уделено физике процессов, принципиальным и технологическим ограничениям, связанным с использованием таковых.

В гл. 8 и 9 приведено описание наиболее традиционных отраслей использования возобновляемых источников энергии — гидро- и ветроэнергетики. Детальность описания здесь различна. Если в главе о гидроэнергетике лишь упоминается о современных крупных гидроэлектростанциях, а основное внимание уделяется малым ГЭС, то при описании ветроэнергетики авторы стараются дать наиболее полную сводку сведений, рассмотреть теоретические и практические аспекты проблемы для энергетики всех масштабов. Это связано с тем, что сейчас в мире особенно велик интерес именно к малым ГЭС, а ветроэнергетика, переживающая «второе рождение», занимает умы многих специалистов, особенно в островных государствах с малыми ресурсами

гидравлической энергии, как в плане создания энергетических систем, так и в плане удовлетворения нужд отдельных потребителей.

Главы 10 и 11 посвящены преобразованию солнечной энергии, но уже в рамках биотехнологии. Здесь приведены интересные, хотя и недостаточно полные описания теории фотосинтеза, теории и практики преобразования биотоплива, различных процессов, связанных с его получением и использованием.

В гл. 12—15 рассмотрены основы преобразования энергии океана — волн, приливов, запасенного в океане тепла и использования тепла недр Земли. Здесь приведены необходимые соотношения для первоначального расчета соответствующих преобразователей, даны примеры их конкретного исполнения.

Глава 16 посвящена очень важным для новой энергетики вопросам аккумулирования и передачи выработанной энергии.

Возможно, не весь материал одинаково интересен для советского читателя, особенно когда идет речь о проблемах, существующих в развивающихся странах и связанных с приготовлением пищи, и т. п. Однако и здесь возникают параллели: чем, скажем, отличается костер первобытного человека от открытых газовых горелок наших современных квартир? Почему наши жилища в случае катастрофического отключения от систем отопления не держат тепла более суток? Как мы относимся к различным видам отходов и всегда ли подсчитываем тот эффект, который можно было бы получить при их переработке? И так далее и тому подобное. Многие вопросы, представляющие интерес для нас, живущих ближе к Северному полюсу, чем к экватору, здесь, естественно, опущены или не акцентированы. Например, нашими исследователями показано, что и в северных районах можно с успехом получать энергию из океана, «перерабатывая» перепад температур между атмосферой и океаном.

При переводе книги мы несколько сократили те разделы ее, которые, на наш взгляд, не имеют принципиального значения для советского читателя. Мы также опустили ссылки на зарубежные литературные источники как труднодоступные для широкого читателя. Вместо них приведен список книг, изданных по рассматриваемой проблематике на русском языке.

Перевод книги выполнен Г. М. Жинжиковым (предисловие, гл. 1—3, 8, 9), В. А. Коробковым (гл. 10—16), Н. О. Павловой (гл. 4—7).

*В. А. Коробков*

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ

Мы написали эту книгу, чтобы осветить предмет, приобретающий все большую важность для человечества и с технической, и с экономической точки зрения. Это вводный курс для студентов — будущих физиков и инженеров. Но так как многие исследователи и инженеры не имеют основных представлений в области энергетики на возобновляемых ресурсах, нашей целью было сделать эту книгу полезной и для них. Книга содержит теоретический и практический материал, позволяющий понять физическую сущность явлений, на конкретных примерах убедиться в возможности реализации технических решений и закрепить полученные знания на задачах.

Эта книга ликвидирует пробел между описательными обзорами и специальными изданиями по частным вопросам. Ее цель — показать, какие фундаментальные физические процессы лежат в основе использования возобновляемых источников энергии. Хотя технические решения непрерывно развиваются, физические принципы, лежащие в их основе, остаются без изменений. Поэтому есть все основания предполагать, что и в будущем знание этих принципов обеспечит необходимую основу для разработки новых технических средств.

Надеемся, что наши читатели имеют основы знаний, особенно по физике, математике, методам вычислений. Это не обязательно для получения представления о предмете книги, однако для понимания некоторых наиболее общих вопросов (особенно в области теплопередачи), представленных здесь более детально, необходим определенный уровень знаний.

Дисциплины, лежащие в основе понимания и применения возобновляемой энергии, включают не только области техники, но и области биологии. Мы осознаем, что читатели с техническим образованием могут быть недостаточно хорошо знакомы с соответствующими предметами, но мы делаем на них упор в связи с необходимостью получения биотоплив и для приложений, так или иначе связанных с использованием фотосинтеза.

Нам бы хотелось увлечь читателя содержанием книги и побудить его активно бороться за использование возобновляемых источников энергии на благо общества. Наш собственный инте-

рес к этой проблеме возник в результате работы в различных странах обоих полушарий планеты. По отношению к возобновляемым источникам энергии мы не разделяем мир на индустриально развитые и развивающиеся страны: сельские и отдаленные общины любых стран имеют много общего, включая благоприятные возможности, открываемые для них использованием возобновляемой энергии, в том числе и для индустриализации. Это очень важно для нас, так как мы хотим, чтобы наша собственная инженерная деятельность была направлена на создание справедливого и жизнестойкого общества, свободного от бедности и угрозы военных катаклизмов. Мы уверены, что использование возобновляемой энергии будет способствовать этому, и солидарны с теми, кто всеми силами содействует популяризации идеи использования мелкомасштабных источников энергии. Не все разделяют эти взгляды, но, к счастью, не они определяли содержание этой книги.

Как пользоваться этой книгой, чтобы что-то узнать, зависит, главным образом, от того, сколько времени отводится на предмет. Например, в Южно-Тихоокеанском университете мы читаем для будущих физиков в течение одного семестра курс «Источники энергии и их распределение». Примерно половина этого курса посвящена тому, как общество использует энергию, а также ископаемым топливам и связанным с ними ограничениям и другим подобным вещам, известным из многих существующих книг. Основное время уделено анализу возможности использования тех возобновляемых источников энергии, которые наиболее характерны для этой части планеты. Подобный курс был прочитан и в университете Страклайда. Но мы не нашли ни одной книги, которая перекрывала бы весь диапазон необходимого материала на уровне, соответствующем задачам преподавания будущим исследователям или инженерам. Нам приходится читать и другие курсы, вести лабораторные практикумы, и мы нашли массу предметов, так или иначе связанных с возобновляемой энергией. С большим успехом они могли бы быть использованы при обучении вообще.

В эту книгу преднамеренно включено больше сведений, чем нужно для узкоспециализированного курса. Это позволяет концентрировать внимание на тех особенностях энергоиспользования, которые наиболее соответствуют ситуации. Чтобы помочь такому выбору, большинство глав начинается с предварительных оценок соответствующих источников энергии и их изменения в зависимости от географического положения.

Главы книги сгруппированы по темам. В гл. 1 дано общее представление о возобновляемой энергии, особое внимание уделено тем ее характеристикам, которые отличают ее от энергии, связанной с использованием ископаемого топлива или ядерного горючего. Главы 2 и 3 содержат известные из курса физики

сведения, объединенные здесь для справки. Главы 4—7 посвящены различным аспектам непосредственно солнечной энергии. Читателям, интересующимся этим вопросом, советуем начать изучение прямо с гл. 5 или 7, обращаясь, если понадобится, к гл. 3 и 4. Главы 8, 9, 12 и 13 являются приложением механики жидкости. Вновь советуем читателям начинать изучение основного вопроса непосредственно с прикладных, обращаясь, если необходимо, к гл. 2. В гл. 10 и 11 рассмотрена биомасса как энергетический источник, соответственно в них объясняется, каким образом энергия накапливается и как она может быть использована; вопросы, рассмотренные в гл. 14 и 15, важны только для определенных ограниченных географических районов; гл. 16, как и гл. 1, относится ко всем возобновляемым источникам энергии вообще, в ней рассмотрены вопросы аккумуляирования и распределения энергии и объединения источников энергии в энергетические системы. В большинстве глав приведены задачи и примеры, по большей части основанные на реальных значениях величин, для которых имеются подробные решения или ответы.

*Дж. Твайделл  
А. Уэйр*

## Глава I

# ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

### 1.1. Введение

Цель этой главы — дать представление о всем спектре возобновляемых источников энергии, которые можно использовать в современном народном хозяйстве. Рассмотрены такие источники энергии, как ветер, вода, солнечное излучение, органические вещества и др. Хотя мощность энергетических установок, работающих на возобновляемой энергии, колеблется от сотен ватт до мегаватт, в любом случае, анализируя возможность использования таких установок, следует ответить на три основных вопроса.

1. Чему равны энергоресурсы потенциальных источников возобновляемой энергии?

2. Для каких целей можно использовать производимую энергию?

3. Чему равна стоимость этой энергии по сравнению с энергией от других источников?

Ответу на первые два вопроса посвящены по существу все главы этой книги. Последний вопрос — важнейший для потребителей энергии и в конечном счете является решающим при практическом использовании возобновляемых энергоресурсов. Очень важно осознать, что экономически оправданная эксплуатация возобновляемых источников энергии возможна при выполнении двух условий.

1. Четко поняты и использованы принципиальные преимущества таких источников энергии.

2. Максимально эффективен весь процесс преобразования возобновляемой энергии в энергоустановках благодаря минимизации потерь и максимизации экономических и социальных показателей.

Когда эти условия выполнены, можно проводить сравнительные стоимостные расчеты применительно к конкретной установке и делать экономические оценки. Невыполнение первого условия

приводит, как правило, к технически несовершенным решениям и как следствие — к низким экономическим показателям. Отчасти это связано с теми большими различиями в методах решения задач, которые используются в энергетике на возобновляемых ресурсах, с одной стороны, и в традиционной тепловой и атомной энергетике, с другой.

Потребность в освоении и развитии энергетики на возобновляемых ресурсах становится все более очевидной при возрастающем спросе на топливо, особенно на нефть, росте населения и требований к уровню жизни, особенно в развивающихся странах.

Рассмотрим простейшую модель, описывающую потребности общества в энергии для хозяйственных и бытовых целей:

$$R = EN. \quad (1.1)$$

Здесь  $R$  — годовая потребность в энергии некоторого коллектива из  $N$  человек;  $E$  — средние затраты энергии на одного человека в год, связанные с производством питания, промышленной продукции и т. д. Уровень жизни, зависящий, очевидно, от  $E$ , но очень сложным образом, можно приближенно оценивать значением национального дохода на душу населения  $S$ , связанного с  $E$  соотношением

$$S = fE. \quad (1.2)$$

Коэффициент  $f$  — нелинейная функция многих параметров. Его можно рассматривать как эффективность использования энергии для производства жизненных благ, поэтому желательно, чтобы он был максимально большим. Очевидно, что любые непроизводительные расходы энергии уменьшают этот коэффициент. Подставляя  $E$  из (1.2) и (1.1), получаем

$$R = SN/f. \quad (1.3)$$

Население Земного шара в настоящее время составляет более 5 млрд. человек и возрастает примерно на 2—3% в год. Во многих странах острота проблемы роста населения несколько снижена высокой детской смертностью и низкой продолжительностью жизни. Среднее на душу населения потребление мощности составляет примерно 0,8 кВт, но национальные различия в уровне потребляемой энергии очень велики — от 10 кВт в США и 4 кВт в странах Европы до 0,1 кВт в Центральной Африке. Средние темпы роста национального дохода в странах современного мира равны 2—5% в год. При таких темпах роста ежегодное потребление энергии с учетом роста населения, как следует из (1.3), должно возрастать (при постоянном значении коэффициента  $f$ ) на 4—8%. Такой прирост производства энергии трудно обеспе-



чить без использования новых источников энергии, так как при возрастающей потребности в энергии запасы топлива истощаются. Независимо от отношения к атомной энергетике энергетические программы всех стран содержат, как правило, два основных пункта, направленных на улучшение обеспечения энергией:

- 1) развитие энергетики на возобновляемых источниках энергии;
- 2) повышение эффективности использования энергии.

Возобновляемые источники энергии можно использовать в слабо развитых регионах Земли и в промышленно развитых странах.

Оценим грубо потенциальные возможности источников возобновляемой энергии, предполагая, что при рациональном ее использовании для создания комфортных условий жизни требуется в среднем 2 кВт на человека. С каждого квадратного метра земной поверхности можно получать, используя различные источники возобновляемой энергии, в среднем 500 Вт мощности. Если считать, что эффективность преобразования этой энергии в удобную для потребления форму всего 4%, то для мощности 2 кВт требуется площадь 100 м<sup>2</sup>. Средняя плотность населения в городах с учетом пригородной зоны — примерно 500 человек на 1 км<sup>2</sup>. Для обеспечения их энергией из расчета 2 кВт на человека необходимо с 1 км<sup>2</sup> снимать 1000 кВт, т. е. достаточно всего 5% занимаемой ими площади. Таким образом, возобновляемые источники энергии могут вполне обеспечить удовлетворительный уровень жизни, если будут найдены приемлемые по стоимости методы ее преобразования. Изучению физических основ этих методов и посвящена данная книга.

## 1.2. Основные понятия и определения

**Определения.** Все источники энергии можно разделить на два класса.

1. *Возобновляемые источники энергии* — это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Типичный пример такого источника — солнечное излучение с характерным периодом повторения 24 ч. Возобновляемая энергия присутствует в окружающей среде в виде энергии, не являющейся следствием целенаправленной деятельности человека, и это является ее отличительным признаком.

2. *Невозобновляемые источники энергии* — это природные запасы веществ и материалов, которые могут быть использованы человеком для производства энергии. Примером могут служить ядерное топливо, уголь, нефть, газ. Энергия невозобновляемых источников в отличие от возобновляемых находится в природе

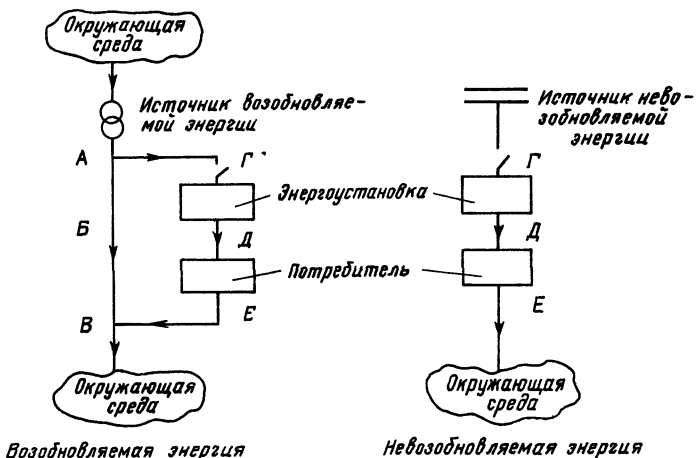


Рис. 1.1. Схемы процессов использования возобновляемой и невозобновляемой энергии:  
*АВВ* — неиспользуемый поток возобновляемой энергии; *ГДЕ* — используемый поток энергии

в связанном состоянии и высвобождается в результате целенаправленных действий человека. Вместо не совсем удобного термина «невозобновляемый» мы часто будем использовать термин «истощаемый».

Схемы на рис. 1.1 поясняют смысл данных определений. В табл. 1.1 приведены сравнительные характеристики традиционных энергетических установок и установок на возобновляемых источниках энергии.

**Источники энергии.** Существует пять основных источников энергии:

- 1) солнечное излучение;
- 2) движение и притяжение Солнца, Луны и Земли;
- 3) тепловая энергия ядра Земли, а также химических реакций и радиоактивного распада в ее недрах;
- 4) ядерные реакции;
- 5) химические реакции различных веществ.

Источники 1—3 являются источниками возобновляемой энергии. Источниками невозобновляемой энергии являются 1 (топливо на основе окаменелых органических соединений), 3 (горячие горные породы), 4 и 5.

**Энергия вокруг нас.** Окружающее нас пространство непрерывно пронизывается потоками энергии от различных источников (рис. 1.2). Например, полный поток солнечного излучения, падающего на Землю, равен  $1,2 \cdot 10^{17}$  Вт, т. е. на одного человека приходится около 30 МВт, что равно мощности 10 крупных

Таблица 1.1. Сравнение характеристик энергосистем на возобновляемых и ископаемых источниках энергии

Характеристики энергосистемы	На возобновляемых источниках энергии	На ископаемых источниках энергии
Примеры источника	Ветер, солнце, приливы	Уголь, нефть, газ
Местонахождение	Окружающая природная среда	Сосредоточенные месторождения
Естественная форма существования	Потоки энергии	Потенциальная, связанная энергия
Начальная интенсивность	Низкая интенсивность, рассеянная энергия с плотностью 300 Вт/м <sup>2</sup> и меньше	Высокая интенсивность до 100 кВт/м <sup>2</sup> и выше
Время истощения	Бесконечное	Конечное
Стоимость потребляемой энергии	Бесплатно	Непрерывно возрастает, (более 0,01 долл. США за 1 кВт·ч)
Стоимость оборудования	Высокая, примерно 2000 долл. за 1 кВт установленной мощности	Средняя, примерно 500 долл. за 1 кВт
Стабильность и управляемость	Стабильность выходной мощности низкая, лучший метод управления — управление нагрузкой с прямой связью	Стабильность высокая, лучший метод управления — управление расходом с обратной связью
Ограничения для использования	Особенности местных условий и спроса на энергию	Без ограничений
Размеры	Небольшие системы экономичны, в больших возникают трудности	Крупные системы обычно предпочтительнее
Научные основы использования источников	Широкий диапазон различных областей науки и техники, в том числе биологической и сельскохозяйственной науки	Узкий диапазон, в основном электротехника и механика
Области применения	Сельскохозяйственное производство	Промышленность
Безопасность эксплуатации	Во время работы есть опасные зоны, в выключенном состоянии обычно безопасны	Без специальных мер защиты опасность высокая, особенно при холостом режиме
Автономность	Самообеспечены источниками энергии	Зависят от поставок топлива
Влияние на окружающую среду	Обычно небольшое, особенно на небольших установках	Как правило, окружающая среда загрязняется, особенно воздух и вода
Эстетичность	Обычно достаточно эстетичны, хотя возможны исключения	Эстетичны только сравнительно небольшие установки

дизель-электрогенераторов. Максимальная плотность потока солнечного излучения на Земле достигает 1 кВт/м<sup>2</sup>.

Представленные на рис. 1.2 глобальные данные, конечно, не представляют большой ценности для практики, так как возможность использования того или иного источника возобновляемой

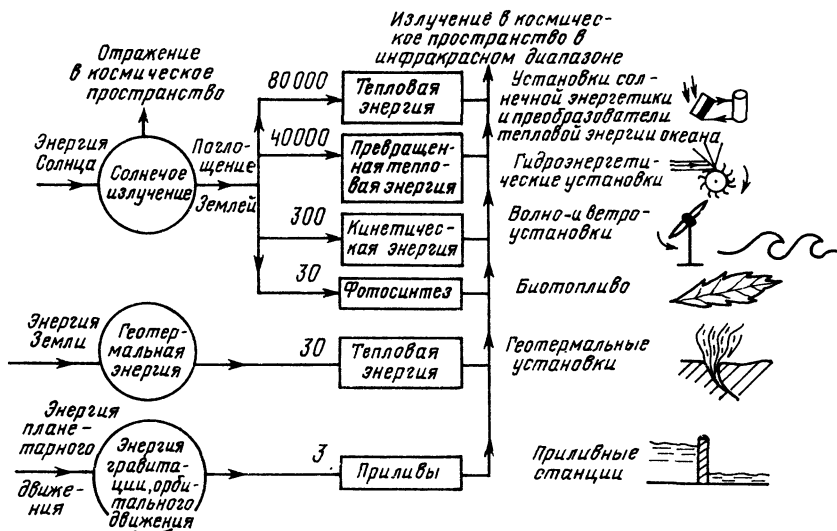


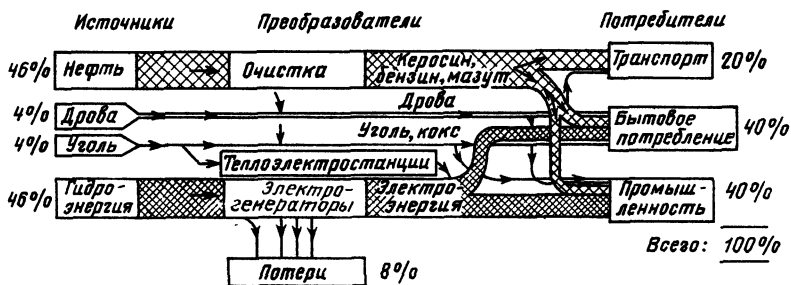
Рис. 1.2. Возобновляемые источники энергии и их использование. Числа обозначают мощность источника в тераваттах ( $10^{12}$  Вт). Следует обратить внимание на большое различие в мощностях источников ( $1:10^5$ ) и на доминирующую роль солнечного излучения

энергии очень сильно зависит от местных условий. Например, в равнинных регионах, подобных Дании, трудно рассчитывать на использование гидроэнергетических ресурсов, но возможно развитие ветроэнергетики, а в смежных с ней районах, например в Норвегии, гидроэнергетические ресурсы велики. Тропические леса могут служить основой для биоэнергетики, а пустыни, расположенные на этой же широте, таким источником энергии не располагают. Таким образом, энергетика на возобновляемых источниках должна ориентироваться прежде всего на местные природные особенности.

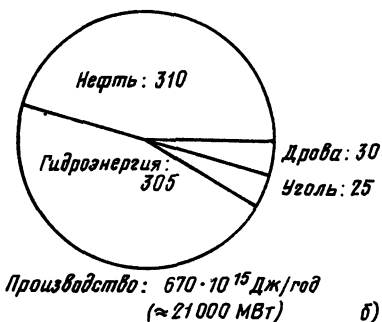
**От источников энергии к потребителям.** Все энергетические системы можно представить в виде электрической цепи, по которой энергия различных источников передается потребителю и в которой она преобразуется в удобную для него форму. На рис. 1.3, а представлена ленточная диаграмма энергетической системы. Поперечные срезы такой диаграммы позволяют представить графически структуру используемых источников энергии и потребителей (рис. 1.3, б, в).

**Принципы планирования энергетики.** При планировании энергетики следует придерживаться следующих принципов.

1. Совершенная энергетическая система должна наиболее полно учитывать особенности источников энергии и ее потребителей. К сожалению, о потребителе часто забывают, и поэтому



а)



б)



Рис. 1.3. Структура энергетики Норвегии (1980 г.):

ленточная (а) и круговая (б) диаграммы. Использованы округленные статистические данные. Население Норвегии — 4 млн. человек. Следует обратить внимание на большое значение гидроэнергетики в общем объеме энергетики страны, а также малое в сравнении с большинством промышленно развитых стран производство электроэнергии и связанные с этим малые потери энергии

оказываются плохо увязанными его потребности и возможности источников энергии. Это приводит к неэкономному расходованию энергии и ее потерям. Например, если большая часть энергии в быту расходуется на отопление и нагрев воды, то, наверное, неразумно использовать для этих целей электроэнергию тепловых электростанций, теряя очень много тепла при выработке электроэнергии, чтобы затем снова превратить ее в тепло. В этом случае более экономичным может оказаться непосредственное снабжение потребителя теплом. На этом основан принцип комбинированного энергоснабжения, реализуемый, например, на ТЭЦ.

2. Расчеты, использующие эффективность или коэффициент полезного действия энергетической системы, наиболее полно раскрывают ее возможности и позволяют избежать ненужных потерь энергии. Под эффективностью или КПД системы здесь понимается отношение полезной энергии на выходе системы ко всей энергии, затраченной на ее производство. Рассмотрим это на примере энергетической системы, в которой электроэнергия

тепловой электростанции используется только для освещения. Эффективность или КПД различных этапов преобразования энергии топлива в энергию видимого излучения осветительных ламп можно оценить так: производство электроэнергии — 30%, передача и распределение электроэнергии — 90%, преобразование электроэнергии в излучение видимого диапазона — 5%. В результате полный КПД 1,4%. Если же для освещения использовать энергию ТЭЦ, вырабатывающую электроэнергию и тепло (КПД ~ 80%), и экономичные современные осветительные лампы (КПД ~ 20%), то полный КПД составит 14%, т. е. в 10 раз выше. Экономически более совершенная энергетическая система будет, как правило, более выгодной, несмотря на большие удельные капитальные затраты, вследствие меньшего расхода топлива и большего срока службы оборудования, особенно электроламп.

3. Повышение эффективности энергосистемы и экономических показателей ее работы во многом зависит от искусства управления ею. Ни при каком источнике энергия не достается даром, и на практике энергия возобновляемых источников обычно гораздо дороже, чем принято считать, поэтому никогда не могут быть оправданы бесполезные ее затраты.

### **1.3. Научные принципы использования возобновляемых источников энергии**

Из приведенных в § 1.2 определений возобновляемых и истощаемых источников энергии видно принципиальное различие между ними, поэтому эффективно использовать возобновляемые источники энергии можно только на основе научно разработанных принципов использования этой энергии.

**Анализ возобновляемых энергоресурсов.** Очень важно усвоить, что в окружающем нас пространстве всегда существуют потоки возобновляемой энергии и энергетика на возобновляемых источниках энергии должна ориентироваться только на эти уже существующие энергоресурсы, а не ставить себе целью создание новых. Чтобы подчеркнуть этот момент, на одной из конференций по проблемам использования возобновляемой энергии в столице Фиджи был представлен в качестве шутки расчет поголовья свиней, необходимого для обеспечения биотопливом энергоустановки, питающей целый город. Таким образом, очевидно, что в расчетах надо исходить из уже имеющегося количества биотоплива при существующей животноводческой базе, а не наоборот. Отсюда следует, что прежде чем развивать энергетику на возобновляемых источниках, необходимо точно определить их мощность. Это требует регулярных и длительных наблюдений и анализа параметров этих источников. Например, на рис. 1.1 необходимо сначала оценить располагаемый поток

Т а б л и ц а 1.2. Интенсивность и периодичность действия возобновляемых источников энергии

Источник	Периодичность	Определяющие параметры	Энергетические соотношения	Примечание	Формулы и таблицы
Прямое солнечное излучение	24 ч, 1 год	Облученность ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), угол падения излучения	$P \sim G_0 \cos \theta$ , максимум $1 \text{ кВт}/\text{м}^2$	Только в дневное время	(4.2)
Рассеянное солнечное излучение	24 ч, 1 год	Облачность	$P \ll G$ ; $P \ll 300 \text{ Вт}/\text{м}^2$	Тем не менее энергия значительна	(4.3)
Биотопливо	1 год	Качество почвы, облученность, вода, специфика топлива, расходы	Связанная энергия $10 \text{ МДж}/\text{кг}$	Очень много видов топлива, источники — лесное и сельское хозяйство	Табл. 11.1
Ветер	1 год	Скорость ветра, высота над земной поверхностью	$P \sim u_0^3$ ; $u_z/u_0 = (z/h)^b$	Флукутирует	(9.2)
Волны	1 год	Амплитуда волны $H_s$ , ее период $T$	$P \sim H_s^2 T$	Высокая плотность энергии ( $\sim 50 \text{ кВт}/\text{м}$ )	(9.54) (12.46)
Гидроэнергия	1 год	Напор $H$ , объемный расход воды $Q$	$P \sim HQ$	Искусственно создаваемый источник	(8.1)
Приливы	12 ч 25 мин	Высота прилива $R$ , площадь бассейна $A$ , длина эстуария $L$ , глубина эстуария $h$	$P \sim R^2 A$	Увеличение высоты прилива, если $L/\sqrt{h}$ имеет значение $36400 \text{ м}^{0.5}$	(13.35) (13.28)
Тепловая энергия	Постоянные параметры	Разность температуры воды на поверхности и на глубине $\Delta T$	$P \sim (\Delta T)^2$	Ряд районов в тропиках. Низкая эффективность преобразования энергии	(14.4)

энергии *АВВ*, а уже потом определять ту его часть, которая может быть использована в энергоустановках.

**Временные характеристики возобновляемых источников энергии.** Потребности в энергии, как правило, не постоянны во времени. Например, потребность в электроэнергии максимальна в утренние и вечерние часы и минимальна в ночное время. Традиционные тепловые электростанции могут подстраиваться под эти колебания спроса на энергию, регулируя расход топлива. При использовании же возобновляемых источников энергии колеблется не только спрос на энергию, но и мощность этих источников, поэтому работающие на этих источниках энергоустановки должны учитывать оба эти фактора (*Г* и *Д* на рис. 1.1), которые часто противоречат друг другу. Более подробно эти вопросы рассматриваются в последующих главах. В табл. 1.2 представлены основные параметры, определяющие мощность различных источников возобновляемой энергии, и характерные периоды ее флуктуаций, которые, впрочем, могут очень сильно зависеть от местных особенностей. Источники энергии в табл. 1.2 расположены в порядке возрастания регулярности колебаний их мощности: от крайне нерегулярных (ветер) до строго регулярных (приливы). Регулярность солнечной энергии очень сильно зависит от географического положения и высока, например, в Хартуме и низка в Глазго.

**Качество источника энергии.** О качестве источников энергии говорят часто, но, как правило, не поясняют, что же это такое. Мы под качеством источника энергии будем понимать долю энергии источника, которая может быть превращена в механическую работу. Например, электроэнергия обладает высоким качеством, так как с помощью электродвигателя более 95% ее можно превратить в механическую работу. Качество тепловой энергии, выделяющейся при сжигании топлива на традиционных тепловых электростанциях, довольно низкое, потому что только около 30% теплотворной способности топлива превращается в конечном счете в механическую работу. По этому признаку возобновляемые источники энергии можно разделить на три группы.

1. Источники механической энергии, как, например, гидроветро-источники, волновые и приливные. В целом качество этих источников энергии высокое, и они обычно используются для производства электроэнергии. Качество ветровой энергии — обычно порядка 30%, гидроэнергии — 60%, волновой и приливной — 75%.

2. Тепловыми возобновляемыми источниками энергии являются, например, биотопливо и тепловая энергия солнца. Максимальная доля тепла таких источников, которая может быть превращена в механическую работу, определяется вторым законом термодинамики. На практике превратить в работу удается



примерно половину тепла, допускаемого вторым законом. Для современных паровых турбин эта величина (качество тепловой энергии) не превышает 35%.

3. Источники энергии на основе фотонных процессов, к которым относятся источники, использующие фотосинтез (гл. 10) и фотоэлектрические явления (гл. 7). Например, с помощью фотоэлектрических преобразователей солнечное излучение определенной частоты можно с высокой эффективностью преобразовать в механическую работу. Добиться высокой эффективности преобразования энергии во всем спектре солнечного излучения очень трудно, и на практике КПД фотопреобразователей, равный 15%, считается хорошим.

**Рассеянная энергия или энергия низкой плотности.** Возобновляемые и истощаемые источники энергии очень сильно различаются по характерной для них начальной плотности потоков энергии. Для возобновляемых источников энергии эта величина — порядка  $1 \text{ кВт/м}^2$  (например, плотность потока энергии солнечного излучения, ветра при скорости около  $10 \text{ м/с}$ ), для невозобновляемых источников она на несколько порядков выше. Например, тепловая нагрузка в трубах паровых котлов — порядка  $100 \text{ кВт/м}^2$ , а в теплообменниках ядерных реакторов — несколько мегаватт на  $1 \text{ м}^2$ . Потребители энергии, за редким исключением, как, например, цеха рафинирования металла, используют у себя гораздо меньшие плотности потоков энергии.

Из-за большого различия плотностей потоков энергии в энергоустановках на невозобновляемых и возобновляемых источниках первые эффективны при большой единичной мощности установки, но при этом распределение энергии среди потребителей требует больших затрат, вторые же эффективнее при небольшой единичной мощности, но большие затраты требуются уже для повышения мощности за счет объединения таких установок в единую энергосистему.

Использование возобновляемых энергоресурсов, как показала практика, ускоряет экономическое развитие сельских районов, и, вообще, эта энергетика в силу своей специфики соответствует сельскому укладу жизни, а не городскому.

**Комплексный подход в планировании энергетики на возобновляемых ресурсах.** Возобновляемые источники энергии являются неотъемлемой частью окружающей нас среды, и их изучение не может ограничиваться рамками какой-то одной научной дисциплины, скажем, физики или электротехники. Часто рамки исследований охватывают область от промышленной биотехнологии до электроники и процессов управления.

Прекрасным примером комплексного планирования являются некоторые агропромышленные предприятия на Филиппинах (см. § 11.8). Отходы животноводства и растениеводства могут служить сырьем для производства метана, а также жидкого и

твердого топлива, а все в целом — для производства удобрений и высокоэффективного ведения сельского хозяйства.

**Определяющая роль конкретной ситуации.** Ни один источник возобновляемой энергии не является универсальным, подходящим для использования в любой ситуации. Это всегда определяется конкретными природными условиями и потребностями общества, т. е. конкретной ситуацией. Поэтому для эффективного планирования энергетики на возобновляемых ресурсах необходимы, во-первых, систематические исследования окружающей среды, аналогичные геологическим исследованиям при поиске нефти, во-вторых, изучение потребностей конкретного региона в энергии для промышленного, сельскохозяйственного производства и для бытовых нужд. В частности, необходимо знать структуру потребителей энергии, чтобы выбирать наиболее экономичный источник энергии. В этом отношении энергетика на возобновляемых ресурсах подобна сельскохозяйственному производству, в котором рентабельность возделывания той или иной культуры зависит от качества почвы, природных условий и рыночного спроса на нее. Отсюда вытекает такой вывод: невозможно предложить простой и универсальный метод планирования энергетики на возобновляемых источниках ни в международном масштабе, ни в рамках одной страны. Например, солнечные энергетические установки на юге Италии должны быть совсем не такими, как в Бельгии и даже на севере Италии. Использовать в качестве топлива спирт, получаемый из зерна, приемлемо в штате Миссури, но не в Новой Англии, и т. д. Характерный размер района, в рамках которого разумно планировать энергетику на возобновляемых источниках, — порядка 250 км, но, конечно, не 2500 км. К сожалению, современное урбанизированное и индустриализированное общество плохо приспособлено к такому многовариантному использованию возобновляемой энергии.

#### **1.4. Технические проблемы использования возобновляемых источников энергии**

**Мониторинг окружающей среды.** В основе решения об использовании возобновляемых источников энергии обычно лежат результаты многолетних наблюдений (мониторинга) за состоянием окружающей среды в данном районе. При этом очень важно, чтобы получаемая в процессе мониторинга информация включала все параметры, необходимые для разработки конкретной энергетической системы. Частично такую информацию содержат результаты метеорологических наблюдений, но, к сожалению, расположение метеостанций очень часто не совпадает с местом предполагаемого размещения энергоустановок и методы регистрации и анализа метеоданных не полностью соответ-

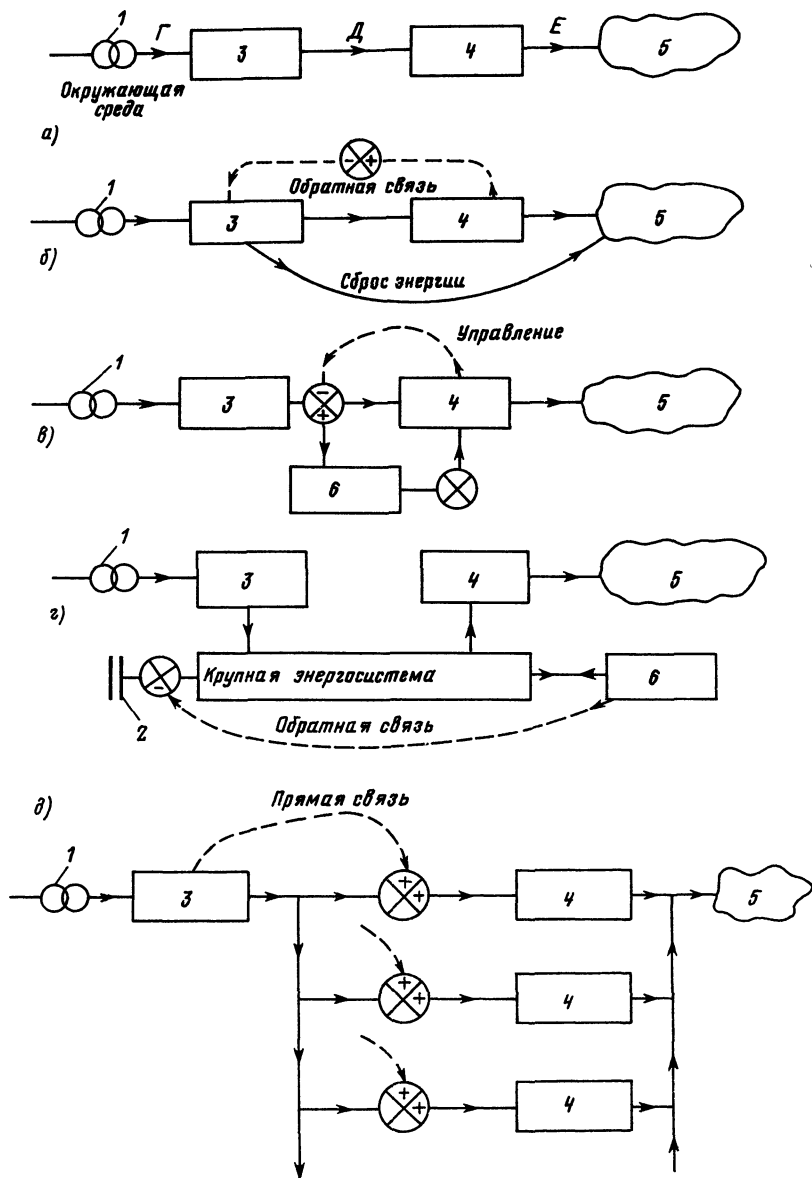


Рис. 1.4. Схемы согласования возобновляемых источников энергии с потребителями (полное использование потока возобновляемой энергии). Чем меньше сопротивления отдельных участков в цепи расходования энергии, тем меньше размеры энергетического оборудования (а). Управление с отрицательной обратной связью сопряжено с потерями энергии (б). Использование накопителей энергии позво-

твуют рассматриваемой задаче. Тем не менее данные метеостанций могут служить базой для проведения сравнительного анализа с результатами целевого мониторинга. Так, например, сравнивая результаты измерения скорости ветра в течение нескольких месяцев в месте предполагаемого размещения ветроустановки с данными ближайшей метеостанции, можно, опираясь на метеоданные за более длительный период, экстраполировать и результаты мониторинга скорости ветра.

Значительно сложнее проводить оценку возобновляемых источников энергии, в основу которой не могут быть положены стандартные метеоданные. В этом случае необходимы специальные методы измерений и соответствующие приборы, что требует значительных людских и материальных ресурсов. К счастью, опираясь только на данные метеорологии, сельскохозяйственных наук и науки о море, можно и в этом случае получить большую часть необходимой информации.

**Потребители энергии и их характеристики.** Производству энергии всегда должно предшествовать всестороннее изучение потребности в ней. Так как производство энергии всегда недешево и сопряжено с нежелательным воздействием на окружающую среду, очень важно расходовать ее эффективно и экономично.

В электросетях потребитель энергии называется нагрузкой, и от ее характеристик во многом зависит выбор используемого источника электроэнергии. Вкладывая средства в развитие энергетики, следует помнить, что повышать эффективность и экономичность потребителей, как правило, выгоднее, чем увеличивать производство энергии.

Больше всего энергии расходуется на транспорте и для производства тепла. Эти потребители обладают, как правило, различными накопителями (аккумуляторами) энергии, поэтому включение их в энергетическую систему может существенно повысить ее эффективность.

**Согласование источников энергии и потребителей.** После анализа характеристик потребителей и потенциальных источников возобновляемой энергии необходимо согласовать их друг с другом. Согласование предполагает выполнение следующих условий.

---

ляет развязать во времени производство энергии и ее потребление (а). Развязывание источника энергии и потребителя с помощью более крупной энергосистемы (г). Система управления с прямой связью с нагрузкой энергоустановки — самая эффективная система управления при использовании возобновляемой энергии (д); число потребителей энергии можно все время согласовывать с располагаемым потоком энергии и на этой основе управлять работой энергоустановки:

1 — возобновляемый источник энергии; 2 — источник ископаемой энергии; 3 — преобразователь энергии, 4 — потребитель, 5 — сброс в окружающую среду; 6 — накопитель энергии

1. Энергоустановка должна максимально эффективно использовать возобновляемую энергию. Сопротивления  $\Gamma$ ,  $D$  и  $E$  потоку энергии (рис. 1.4, а) должны быть минимальны. В этом случае будут сведены к минимуму энергетическое оборудование и его размеры.

2. Использование систем управления с отрицательной обратной связью между потребителем и источником энергии невыгодно, так как приходится сбрасывать в окружающую среду часть выработанной преобразователем энергии (рис. 1.4, б). Такое регулирование оправдано только в случае крайней необходимости или когда удовлетворены все возможные потребители энергии. Следует заметить, что неэффективность принципа регулирования с обратной связью в энергетических установках на возобновляемой энергии является следствием постоянного существования в окружающем пространстве потоков этой энергии. Для невозобновляемого источника энергии регулирование с обратной связью выгодно, так как уменьшает его расход.

3. Как отмечалось в § 1.3, спрос на энергию никогда не колеблется, точно так же как ее производство энергоустановками на возобновляемой энергии. Согласовать спрос и предложение, не превышая при этом мощность энергоустановки, можно только, включив в энергосистему накопители энергии (рис. 1.4, в). Хорошие накопители энергии дороги (см. гл. 16), особенно если разрабатывать их приходится для уже действующей энергосистемы.

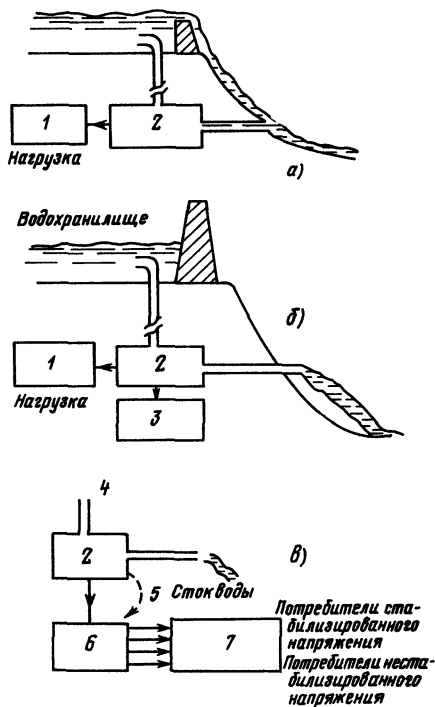
4. Если согласовать энергоустановку на возобновляемой энергии с потребителями очень сложно, от решения этой задачи отказываются (рис. 1.4, г). В этом случае эту установку подключают к более крупной и универсальной по составу источников энергии системе. Если такие системы имеют накопители энергии (например, гидравлические или тепловые), их эффективность повышается и становится возможным увеличить в них долю установок на возобновляемой энергии.

5. Наиболее эффективная схема использования энергии возобновляемых источников показана на рис. 1.4, д. При такой схеме к источнику энергии подключаются в каждый момент столько потребителей, чтобы суммарная нагрузка соответствовала текущей мощности источника. При этом отдельные потребители могут в свою очередь иметь накопители энергии или подстраиваться под изменяющиеся параметры источника. В таких схемах используется регулирование с прямой связью (см. § 1.4).

**Методы управления.** Для согласования источников энергии с потребителями используются различные методы управления. Из изложенного выше следует, что в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии можно использовать три ме-

Рис. 1.5. Примеры использования различных методов управления. Сброс излишков воды позволяет поддерживать постоянное давление на входе гидротурбины (а). Использование электрического накопителя энергии на гидроэлектростанции без водосброса (б). Управление нагрузкой (управление с прямой связью) (в); система регулирования автоматически перераспределяет энергию между потребителями, поддерживая постоянной суммарную нагрузку. Этим обеспечивается стабильный режим работы электрогенератора:

1 — нагрузка; 2 — турбина с генератором; 3 — аккумулятор; 4 — подача воды под напором; 5 — канал управления; 6 — электронное распределительное устройство, 7 — различные потребители



тогда управления, основанные на сбросе излишков энергии, аккумуляровании энергии и изменении нагрузки. Эти методы могут быть реализованы различными способами применительно ко всей энергосистеме или ее частям и иллюстрируются такими примерами (рис. 1.5).

1. Система со сбросом излишков энергии. Потоки энергии возобновляемых источников существуют постоянно, и если их не использовать, они будут безвозвратно потеряны. Тем не менее метод управления, основанный на сбросе части этой энергии, может оказаться самым простым и дешевым. Такой метод управления используется, например, на гидроэлектростанциях (рис. 1.5, а), в системах обогрева зданий солнечным излучением с управляемыми заслонками, в ветроколесах с изменяемым шагом.

2. Системы с накопителями (аккумуляторами) энергии. Накопители могут аккумулировать энергию возобновляемых источников как в ее исходном, необработанном виде, так и в преобразованном, после энергоустановки. В первом случае управление запасами возобновляемой энергии такое же, как и запасами невозобновляемой энергии. Основной недостаток систем регулирования с такими накопителями — их относительно вы-

сокая стоимость, сложность использования в небольших энергоустановках и при реализации дистанционного управления.

Например, водохранилище, показанное на рис. 1.5, б, сооружается, как правило, на гидростанциях мощностью не менее 10 МВт. Механические же системы регулирования расхода воды становятся чрезмерно громоздкими и дорогими на станциях мощностью более 10 кВт. Недостатком водохранилищ является также ущерб, наносимый ими окружающей среде. В качестве накопителей преобразованной энергии можно использовать аккумуляторные батареи, электролизные установки и т. д. Такие накопители особенно выгодны на небольших энергоустановках. Тепловые накопители в настоящее время уже устарели.

3. *Системы с регулированием нагрузки.* Такие системы поддерживают соответствие между спросом и предложением энергии за счет включения и выключения необходимого числа потребителей. Схема небольшого регулятора такого типа для бытового электроснабжения показана на рис. 1.5, в (см. § 8.6). Такое регулирование может применяться в любых системах, но наиболее выгодно оно при наличии большого числа разнородных потребителей. Его преимущество при использовании в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии заключается в следующем:

1) подключение или отключение потребителей в соответствии с располагаемой мощностью источника позволяет избежать потерь возобновляемой энергии;

2) в многоканальной системе регулирования могут учитываться потребности различных потребителей и их приоритеты, при этом, например, потребители с низким приоритетом, которые отключаются первыми, могут снабжаться энергией по низкой цене или, например, нагревательные установки могут питаться непостоянным по величине напряжением;

3) потребители, сами обладающие определенным аккумуляющим свойством (водогрейные баки, кондиционеры), могут с выгодой использовать это свое свойство, отключаясь в те периоды времени, когда энергия дорогая;

4) в таких системах регулирования можно использовать надежные, точные, малоинерционные и недорогие электронные и микропроцессорные устройства.

Регуляторы нагрузки с прямой связью особенно удобны для применения на автономных ветроэнергетических установках (см. гл. 9 и, в частности, § 9.10). Скорость ветра может колебаться очень сильно, и для поддержания максимальной мощности ветроустановки необходимо регулировать частоту вращения ветроколеса. Электронные регуляторы нагрузки с прямой связью в отличие от механических регуляторов позволяют наиболее просто и дешево решать эту задачу. Схема такого регулирования показана на рис. 1.6.

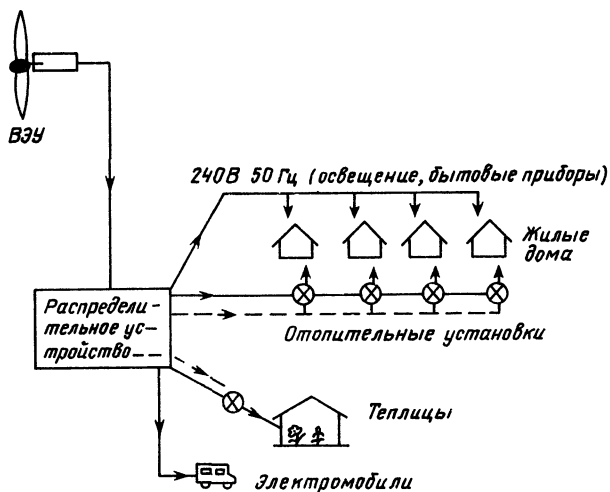


Рис. 1.6. Схема ветроэнергетической системы острова Фэйр (Шотландия). Подключение и отключение потребителей регулируется изменениями частоты вырабатываемой электроэнергии, согласуя таким образом потребление энергии и ее производство

## 1.5. Социально-экономические последствия развития энергетики на возобновляемых источниках энергии

Промышленная революция в Европе и Северной Америке и последующий рост промышленности во всех странах очень сильно изменили социальные условия и образ жизни людей. Определяющую роль в этом процессе сыграло развитие энергетики, особенно на новых источниках энергии — угле и нефти. Для промышленно развитых стран связь между развитием угледобывающей промышленности и их общим развитием несомненна, и эта зависимость будет существовать еще не одно столетие. Для развивающихся стран их развитие тесно связано с объемом мировой добычи и доступностью относительно дешевой нефти. Широкий доступ к нефти появился в 1950-х годах — в период, когда многие страны освободились от колониальной зависимости. Развитие этих стран очень сильно зависело от нефти и в результате привело к глубоким изменениям в их образе жизни. Подобных изменений в социальном развитии следует ожидать и при широком использовании источников возобновляемой энергии. Современный уровень науки и технологии позволяет коренным образом усовершенствовать методы использования энергии и на этой основе поднять жизненный уровень, особенно в сельских районах. Невозможно предсказать последствия широкого использования возобновляемой энергии, но очевидно, что основное их свойство — неисто-



щаемость — обещает большую стабильность энергетики, чем это возможно при использовании традиционных топливных ресурсов, особенно нефти. Большие различия в источниках возобновляемой энергии повлекут, наверное, такое же разнообразие социально-экономических последствий.

**Распределение населения.** В § 1.1 и 1.3 отмечалось, что потоки возобновляемой энергии имеют низкую плотность и рассеяны в пространстве. Концентрировать ее сложно и дорого. В противоположность ей концентрация невозобновляемой энергии высока и необходимы средства для ее распределения. Так, например, тепловая или атомная электростанция имеет мощность порядка 1000 МВт, и от нее во все стороны расходятся линии электропередачи, снабжающие энергией промышленные объекты. Энергоемкие производства размещаются, как правило, вблизи электростанций. Динамика численности населения в промышленных районах обычно определяется потребностями производства в рабочей силе. Здесь такая же связь, как между добычей угля и производством стали, перегонкой нефти и разработкой необходимого для этого оборудования, наличием источников газа и развитием городов.

При таком сугубо материалистическом анализе последствий широкого использования возобновляемой энергии следует заключить, что оно будет способствовать в большей степени рассредоточению населения и общественной жизни, чем их концентрации. Данная в § 1.1 верхняя оценка плотности населения в обществе, использующем только возобновляемые энергоресурсы, составляет примерно 500 чел/км<sup>2</sup>. Такая плотность, значительно превышающая плотность населения сельских районов, характерна для большинства небольших административных центров и промышленных городов. Таким образом, постоянный рост в энергетике доли возобновляемой энергии позволит избежать чрезмерной концентрации населения и образования новых мегаполисов. При разумном и экономном использовании имеющихся в настоящее время запасов топлива времени для разворачивания энергетики на возобновляемых источниках вполне достаточно.

**Воздействие на окружающую среду.** Энергетика на возобновляемых источниках использует потоки энергии, уже существующие в окружающем пространстве (см. рис. 1.1). В силу этого тепловое загрязнение окружающей среды, обусловленное сбросом в нее какой-то части преобразованной энергии, незначительно. По этой же причине незначительны и другие виды загрязнения воздуха и воды, а также объемы отходов. В экологическом отношении энергия возобновляемых источников имеет преимущество перед обычным топливом или атомной энергией. Исключением является загрязняющая воздух несовершенная технология сжигания древесины (см. гл. 11).

Похоже, что основным с экологической стороны недостатком энергоустановок на возобновляемых источниках является нарушение ими естественного ландшафта. Это неизбежно для установок, работа которых основана на использовании потоков энергии, циркулирующих в окружающем пространстве, т. е. когда окружающая среда является необходимым элементом процесса преобразования энергии. Наиболее сильно этот недостаток проявляется у крупных установок. Например, мощные гидроэлектростанции сооружаются там, где легче образовать водохранилище, т. е. в живописной горной или холмистой местности, и эта уникальная красота, естественно, нарушается. Еще более тяжелыми могут быть последствия при сооружении водохранилищ на равнинных реках с помощью дамб. Это может привести к эрозии почвы, ухудшению ее качества и в результате — к нарушению нормального земледелия. Таких последствий, конечно, надо всячески избегать, а для этого не следует, наверное, стремиться к сооружению слишком мощных энергетических установок на возобновляемых источниках энергии<sup>1</sup>.

**Долговременные последствия.** Физическая природа используемых источников энергии во многом предопределяет и направление развития технологии и общества в целом. Использование возобновляемых источников энергии ставит нас и нашу деятельность в гораздо большую зависимость от окружающей среды, чем использование обычного и ядерного топлива. Ориентация на опережающее развитие энергетики на возобновляемых источниках требует значительных расходов на развитие соответствующих этой энергетике предприятий и технологий, а также определенных изменений в области образования, планирования, финансирования, производства. Конечной целью должно быть воспитание общества в духе большого понимания своей связи с окружающей средой. Так как значительная часть потребляемой обществом энергии расходуется в жилых и служебных помещениях, широкое использование возобновляемой энергии, в частности солнечной, приведет к существенным изменениям в архитектурном облике зданий. Например, в районах с холодным и умеренным климатом рационально создавать застекленные оранжереи вдоль стен зданий, обращенных к солнцу, так как стекло хорошо пропускает тепловое излучение солнца. Естественно, что это повлияет как на облик зданий, так и на стиль жизни.

Определенные изменения произойдут и в области образования и научных исследований. При изучении физики, например, резко возрастет значение таких ее разделов, как теплоперенос, механика, оптика и гидродинамика. Совершенствование мето-

---

<sup>1</sup> Обращаем внимание читателя на то, с какой осторожностью оценивается возможность строительства ГЭС.— *Прим. ред.*

дов наблюдения за окружающей средой потребует дальнейшего развития методов измерений и приборостроения. Электронно-оптические явления в фотоэлектронных процессах и фотосинтезе займут значительное место в учебных программах и в научных исследованиях. Такие изменения в курсах физики дадут учащимся возможность весьма плодотворно использовать свои знания в дальнейшей практической работе.

Подобные изменения затронут химию, биологию и некоторые другие прикладные науки. Можно надеяться, что все эти изменения разорвут тесную связь науки, особенно физики, с военной промышленностью. Многие физики испытывают чувство вины за то, что развитие ядерной физики привело к созданию ядерного оружия. Мы надеемся, что широкое использование возобновляемой энергии также вызовет большие перемены в мире, но эти перемены будут на пользу всему человечеству.

## Глава 2

# ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ

## 2.1. Введение

Преобразование энергии движения жидкости лежит в основе работы гидро-, ветро-, волновых и ряда солнечных энергетических систем. Чтобы понять принцип работы этих систем, следует рассмотреть основные законы механики: сохранение массы, количества движения (импульса), энергии. Течения, как правило, будем считать несжимаемыми. Термином «жидкость» обозначаются как собственно жидкости, так и газы. Признаком, отличающим жидкость от твердого тела, является ее неспособность в состоянии равновесия оказывать сопротивление тангенциальным силам (сдвигу). Различие между жидкостью и газом состоит в гораздо большей сжимаемости последнего. Некоторая масса любой жидкости имеет вполне определенный объем, который очень слабо зависит от ее температуры и давления. Объем же, занимаемый некоторой массой газа, сильно зависит от температуры и давления и определяется, в первом приближении, уравнением состояния совершенного газа ( $pV = nRT$ ). Если скорость газового потока меньше 100 м/с и нет внешних воздействий, изменяющих его параметры, плотность газа можно считать постоянной. В книге рассматриваются в основном такие случаи.

Во многих приложениях течение жидкости является стационарным (установившимся), когда картина течения (поле течения) не изменяется во времени. В этом случае картину течения удобно представить множеством линий, направление которых в

каждой точке течения совпадает с вектором скорости в данной точке. Эти линии называются *линиями тока*.

Течение может быть *ламинарным* и *турбулентным*. Свойства этих течений и различия между ними рассмотрены ниже, в § 2.5, здесь же для примера можно привести струйку дыма, поднимающуюся в спокойном воздухе с тлеющего фитиля свечи. Сначала струйка дыма поднимается почти строго вертикально, не размываясь. Такое спокойное течение называется ламинарным. Потом форма струи искривляется, отдельные ее частицы начинают совершать хаотические перемещения в различные стороны. Течение становится турбулентным. Провести точный расчет турбулентного течения очень сложно, но часто оказывается достаточным считать его в целом стационарным вязким течением, в котором вязкость обусловлена хаотическим движением частиц.

## 2.2. Закон сохранения энергии, уравнение Бернулли

Рассмотрим наиболее важный случай стационарного несжимаемого течения. В таком течении, как следует из § 2.1, можно выделить трубки тока, т. е. струйки, ограниченные непроницаемой поверхностью, состоящей из линий тока.

На рис. 2.1 показана трубка тока с начальным сечением на высоте  $z_1$  и конечным на  $z_2$ . Трубка тока достаточно тонкая, чтобы координату  $z$  считать постоянной в пределах любого поперечного сечения.

Рассмотрим течение в контрольном объеме, ограниченном боковой поверхностью трубки тока и двумя поперечными сечениями 1 и 2. Через сечение 1 в контрольный объем втекает масса жидкости  $m = \rho A_1 u_1 \Delta t$  и столько же жидкости вытекает через сечение 2. Тогда из закона сохранения энергии жидкости в контрольном объеме следует, что потери потенциальной энергии и работа, совершаемая силами давления, в сумме равны увеличению ее кинетической энергии и потерям энергии на трение. Этот баланс запишем в виде

$$mg(z_1 - z_2) + [(p_1 A_1)(u_1 \Delta t) - (p_2 A_2)(u_2 \Delta t)] = \frac{1}{2} m (u_2^2 - u_1^2) + E_f \quad (2.1)$$

Здесь сила давления  $p_1 A_1$  совершает работу на расстоянии  $u_1 \Delta t$  (аналогично и для  $p_2 A_2$ ),  $E_f$  — тепловыделение при трении.

В идеальном случае, когда трением можно пренебречь, уравнение (2.1) принимает вид

$$(p_1/\rho) + gz_1 + \frac{1}{2} u_1^2 = (p_2/\rho) + gz_2 + \frac{1}{2} u_2^2 \quad (2.2)$$

или вдоль линии тока

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{u^2}{2g} = \text{const.} \quad (2.3)$$

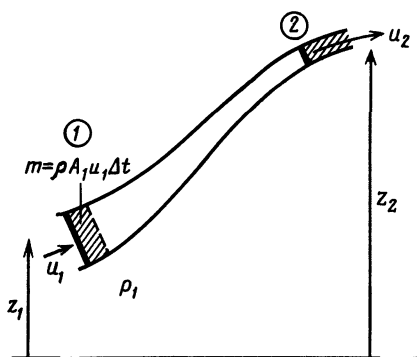


Рис. 2.1. Иллюстрация закона сохранения энергии для трубки тока

Обе эти формы уравнения сохранения энергии называются *уравнением Бернулли*.

Сумма членов левой части (2.3) называется полным напором. Полный напор — это полная энергия единицы массы жидкости, которая в общем случае различна в различных точках течения. В частности, константа в (2.3) может изменять-

ся от одной линии тока к другой. Напор имеет размерность длины, т. е. соответствует потенциальной энергии столба жидкости высотой, равной напору.

Уравнения (2.2) и (2.3) справедливы для течений, в которых можно пренебречь вязкостью, сжимаемостью и теплопроводностью. В противном случае в уравнение энергии следует ввести члены, учитывающие влияние этих факторов. Вид уравнения энергии для сжимаемой жидкости можно найти в любом учебнике по механике жидкости. При малых скоростях, рассматриваемых в этой книге, оно сводится к виду (2.3). Предположение об отсутствии теплопроводности означает, в частности, что отсутствует поток тепла через боковую поверхность рассматриваемой трубки тока от посторонних источников тепла, поэтому (2.3) справедливо, если в потоке нет источников тепла, что и имеет место в большинстве ветро- и гидроэнергетических установок.

В приемниках солнечного излучения и в теплообменниках

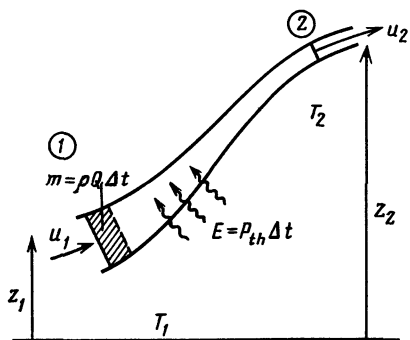


Рис. 2.2. То же, что и на рис. 2.1, но при наличии источников тепла. Тепло от источника мощностью  $P_{th}$  передается трубке тока

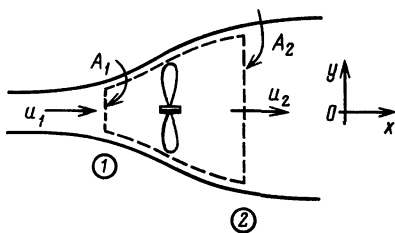


Рис. 2.3. Турбина в потоке жидкости, ограниченном стенками канала. Штрихами выделен контрольный объем, для которого применяется закон сохранения импульса

в единицу времени потоку жидкости передается от теплового источника энергия  $P_{th}$  (рис. 2.2). В этом случае в левую часть (2.1) следует добавить член, равный количеству переданной тепловой энергии,  $E = P_{th}\Delta t$ . Теплосодержание втекающей в контрольный объем массы жидкости  $m$  с температурой  $T_1$  равно  $mcT_1$  ( $c$  — удельная теплоемкость жидкости), теплосодержание вытекающей жидкости равно  $mcT_2$ . Следовательно, за время  $\Delta t$  теплосодержание контрольного объема изменяется на  $m\dot{c}(T_2 - T_1)$ . Добавляя этот член в правую часть (2.2), получаем

$$(p_1/\rho) + gz_1 + \frac{1}{2} u_1^2 + cT_1 + (P_{th}/\rho Q) = (p_2/\rho) + gz_2 + \frac{1}{2} u_2^2 + cT_2, \quad (2.4)$$

где  $Q$  — объемный расход жидкости через поперечное сечение контрольного объема, равный

$$Q = Au. \quad (2.5)$$

В теплообменных устройствах, как правило, определяющей является тепловая энергия потока. В этом случае (2.4) принимает вид

$$P_{th} = \rho c Q (T_2 - T_1). \quad (2.6)$$

### 2.3. Закон сохранения количества движения

Закон сохранения количества движения в механике жидкости является обобщением второго закона Ньютона для материальных тел на случай жидкой среды и формулируется так: в установившемся течении в любой момент времени главный вектор сил, действующих на поток жидкости, ограниченной замкнутой фиксированной поверхностью, равен потоку количества движения через эту поверхность.

Рассмотрим для примера течение жидкости в канале турбины (рис. 2.3). Единичный объем потока жидкости, пересекающий слева контрольную поверхность со скоростью  $u_1$ , переносит через нее количество движения, равное  $\rho u_1 \dot{i}$ , где  $\dot{i}$  — единичный вектор направления движения. За время  $\Delta t$  через поверхность  $A_1$  втечет объем жидкости, равный  $A_1 u_1 \Delta t$ . Количество движения, переносимое в единицу времени через поверхность  $A_1$ , т. е. поток количества движения через эту поверхность, равно  $(A_1 u_1 \Delta t) (\rho u_1 \dot{i}) / \Delta t = \rho A_1 u_1^2 \dot{i}$ . Точно так же поток количества движения через поверхность  $A_2$  равен  $\rho A_2 u_2^2 \dot{i}$ . Из сформулированного выше закона сохранения количества движения следует

$$\mathbf{F} = \rho (A_2 u_2^2 - A_1 u_1^2) \dot{i} = (\dot{m} u_2 - \dot{m} u_1) \dot{i}, \quad (2.7)$$

где  $\dot{m} = \rho A_1 u_1 = \rho A_2 u_2$  — поток массы;  $\mathbf{F}_1$  — сила, действующая на жидкость, следовательно, по третьему закону Ньютона  $\mathbf{F}_1$  — сила, действующая со стороны жидкости на турбину и стенки

канала. Обычно  $u_2 < u_1$ , поэтому сила  $F_1$  направлена против движения потока, а  $-F_1$  по потоку, что и следовало ожидать.

Из данного примера следует, что, используя закон сохранения количества движения, надо помнить, что количество движения — векторная величина и выражение для потока количества движения ( $\rho A_1 u_1^2$ ) содержит скорость потока в квадрате.

## 2.4. Вязкость

Пусть имеются две параллельные друг другу пластинки и жидкость, заполняющая пространство между ними, при этом верхняя пластинка движется относительно нижней со скоростью  $u_1$  (рис. 2.4). Систему координат выберем так, чтобы ось  $x$  была параллельна вектору  $i$ , а ось  $y$  перпендикулярна поверхности пластин. Экспериментально установлено, что при таком движении жидкость, непосредственно примыкающая к поверхности пластин, имеет одинаковую с ними скорость, т. е. не проскальзывает относительно твердой поверхности (так называемое *условие прилипания*).

Молекулы жидкости находятся в хаотическом (броуновском) движении, в результате этого частицы жидкости с большей  $x$ -составляющей скорости, приобретенной при контакте с верхней пластиной, перемещаются вниз, а частицы с меньшей этой составляющей, равной скорости нижней пластины, перемещаются вверх. Этот диффузионный перенос количества движения приводит к возникновению сил трения между слоями жидкости, имеющими разную горизонтальную скорость.

Исследования показали, что касательное напряжение (сила, действующая на единицу площади в направлении, показанном на рис. 2.4) равно

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right), \quad (2.8)$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость потока,  $\text{Н} \cdot \text{см}^{-2}$ . Эта вязкость определяется только составом и температурой жидкости и не зависит от  $\tau$  и  $du/dy$ .

Иногда удобнее использовать не динамическую, а кинематическую вязкость,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ :

$$\nu = \mu / \rho. \quad (2.9)$$

Например, в несжимаемой жидкости картина течения определяется в первом приближении кинематической вязкостью, а не динамической. Кинематическая вязкость аналогична

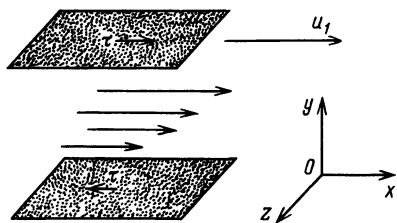


Рис. 2.4. Течение между параллельными пластинами

коэффициенту диффузии (см. определение коэффициента термодиффузии  $\kappa$  в § 3.3). Это означает, что, например, характерное время диффузионного переноса количества движения на расстояние  $x$  равно  $x^2/\nu$ .

## 2.5. Турбулентность

*Турбулентное движение* жидкости является следствием неустойчивости быстрых течений. Рассмотрим ламинарное течение в трубе, характеризующееся прямолинейными траекториями частиц жидкости (рис. 2.5, а), в которое эпизодически вносятся возмущения (например, постукиванием по трубе). Траектории частиц жидкости при этом будут хаотически искривляться и, если частицы движутся достаточно быстро, силы трения в жидкости будут не в состоянии вернуть им первоначальный прямолинейный характер. Более того, в определенных условиях возмущенные частицы будут искривлять траектории все большего числа соседних частиц, и в результате движение всех частиц становится хаотическим или турбулентным (рис. 2.5, б). Характер движения частиц жидкости, т. е. будет ли течение ламинарным или турбулентным, определяется отношением инерционных сил (пропорциональных количеству движения) к вязким силам. Это отношение называется *числом Рейнольдса*:

$$Re = uX/\nu, \quad (2.10)$$

где  $u$  — среднее значение скорости течения;  $X$  — характерный размер течения (в рассматриваемом случае это диаметр трубы);  $\nu$  — кинематическая вязкость. Экспериментальные исследования показали, что течение в трубах становится турбулентным при  $Re \geq 2300$ .

В турбулентных течениях на среднюю скорость потока накладываются более или менее случайные пульсации скорости. Эти пульсации скорости имеют трехмерный характер и не влияют на среднюю скорость потока. Таким образом, жидкая частица, двигаясь вдоль трубы, совершает в то же время быстрые поперечные перемещения, как это показано на рис. 2.5, б. Так как жидкость не проскальзывает вдоль поверхности трубы (см. § 2.4),

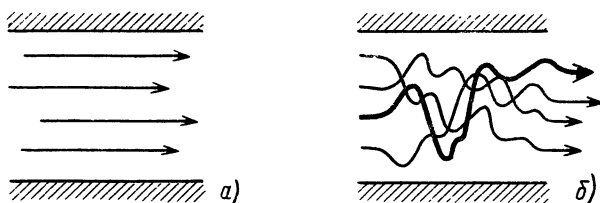


Рис. 2.5. Траектории жидкости при ламинарном (а) и турбулентном (б) режимах течения



среднее значение скорости у поверхности мало, а в центре трубы велико. Вследствие поперечных пульсаций скорости частицы жидкости с большой продольной скоростью перемещаются к стенке трубы, а с малой скоростью — в центр трубы. При этом процесс переноса количества движения в поперечном направлении оказывается гораздо более эффективным, чем при молекулярном переносе, описанном в § 2.4, так как длина свободного пробега молекул — порядка нанометров, а длина турбулентных пульсаций может быть порядка радиуса трубы. При турбулентном переносе импульса силы трения, препятствующие продольному движению жидкости, резко возрастают.

Если температура стенок трубы выше температуры жидкости, поперечные пульсации скорости обеспечивают перенос тепла от стенок внутрь трубы. При этом по той же причине, что и при передаче импульса, перенос тепла оказывается более интенсивным, чем при молекулярном переносе. Более детально этот механизм теплопроводности рассмотрен в § 3.4.

## 2.6. Трение при течении в трубах

Рассмотрим течение жидкости в трубе длиной  $L$  и с постоянным диаметром  $D$ . Какой перепад давлений  $\Delta p$  между входным и выходным концами трубы надо создать, чтобы при наличии трения в трубе средняя скорость жидкости в ней была равна  $u$ ?

Очевидно,  $\Delta p$  — это работа, совершаемая против сил трения при перемещении единицы массы жидкости на длину  $L$ . Если считать, что в любом сечении трубы картина течения будет одинаковой, то работа против сил трения пропорциональна длине и  $\Delta p$  возрастает с увеличением  $L$ . Так как основной вклад в сопротивление создают стенки трубы (из-за условия прилипания, см. § 2.4), то очевидно, что удаление стенок трубы от высокоскоростного потока в ее центре, т. е. увеличение диаметра трубы, уменьшает ее сопротивление. Из (2.8) следует, что сила трения возрастает с увеличением скорости потока, поэтому и  $\Delta p$  возрастает с  $u$ . Из уравнения Бернулли (2.3) видно, что величина  $(1/2)\rho u^2$  имеет ту же размерность, что и  $\Delta p$ . Все эти зависимости можно объединить единственным уравнением

$$\Delta p = 2\zeta (L/D) (\rho u^2), \quad (2.11)$$

в котором  $\zeta$  — безразмерный коэффициент сопротивления трубы, зависящий от условий эксперимента, точнее, от геометрии течения, т. е. от формы линий тока.

Величина  $\frac{1}{2}\rho u^2$  в (2.11) имеет ту же размерность, что и перепад давлений  $\Delta p$ , поэтому коэффициент  $\zeta$  показывает, чему равна работа сил давления по преодолению сопротивления трубы ( $\Delta p$ ) в сравнении с кинетической энергией потока единичного

поперечного сечения ( $\frac{1}{2} \rho u^2$ ). Кроме того, коэффициент  $\zeta$  можно трактовать как отношение характерного времени, в течение которого жидкая частица находится в контакте со стенкой трубы из-за условия прилипания, к характерному времени перемещения ее на единицу длины вдоль трубы. Для турбулентных течений это отношение значительно больше, чем для ламинарных.

Характер течения определяется в первую очередь безразмерным числом Рейнольдса (2.10). Отсюда следует, что зависимость  $\zeta$  от  $Re$  является универсальной (единой) для труб любого диаметра и длины и не зависит от рода жидкости и ее скорости течения. Трудно рассчитывать, что эта зависимость будет прямой или хотя бы непрерывной. Действительно, можно предполагать нарушение непрерывности при  $Re \approx 2000$ , когда ламинарный режим течения сменяется турбулентным.

Экспериментально было установлено, что зависимость  $\zeta$  от  $Re$  универсальна только для труб с идеально гладкой внутренней поверхностью. Эта зависимость, показанная на рис. 2.6, действительно имеет разрыв при  $Re \approx 2000$ .

Можно предположить, что в трубах с шероховатой внутренней поверхностью картина течения будет зависеть от отношения высоты шероховатостей  $\xi$  к диаметру трубы  $D$ . Группируя экспериментальные результаты по этому параметру, получим серию кривых для различных значений величины шероховатости  $\xi/D$ , представленных на рис. 2.6. Таким образом, зная величину шероховатости внутренней поверхности трубы  $\xi$ , можно определить ее коэффициент сопротивления. Некоторые характерные значения  $\xi$  даны в табл. 2.1, при этом следует помнить, что с увеличением срока эксплуатации труб их шероховатость увеличивается.

*Пример 2.1.* Определить напор, необходимый для поддержания в бетонной трубе длиной 200 м, диаметром 0,3 м расхода воды 0,1 м<sup>3</sup>/с при  $T=20^\circ\text{C}$ .

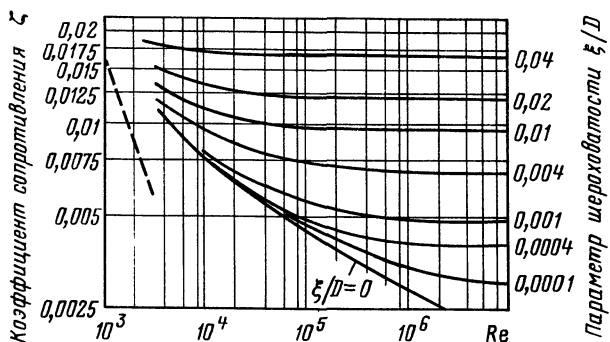


Рис. 2.6. Коэффициент сопротивления труб  $\zeta$  [см. (2.11)]. Штриховая кривая соответствует ламинарному течению

Решение. Средняя скорость

$$u = Q/A = \frac{0,1 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}}{\pi (0,15 \text{ м})^2} = 1,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Для воды при  $T=20^\circ \text{C}$  вязкость  $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Из (2.10) число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu} = \frac{(1,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})(0,3 \text{ м})}{1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}} = 0,4 \cdot 10^6 > 2000.$$

Таблица 2.1. Шероховатость промышленных труб

Материал трубы	Шероховатость $\xi$ , мм
Поливинилхлорид	0 (гладкая)
Асбестоцемент	0,012
Сталь (новая)	0,1
Бетон (гладкий)	0,4.

Следовательно, режим течения турбулентный. Для бетона (согласно табл. 2.1)  $\xi = 0,4$  мм, параметр шероховатости

$$\xi/D = \frac{0,4 \text{ мм}}{300 \text{ мм}} = 0,0013.$$

Для данных значений  $\text{Re}$  и  $\xi/D$  из рис. 2.6 определяем  $\zeta = 0,0050$ .

Представим (2.11) через потери напора на трение:

$$H_f = \Delta p / \rho g = 2\zeta L u^2 / Dg. \quad (2.12)$$

Отсюда

$$H_f = \frac{(2)(5,0 \cdot 10^{-3})(200 \text{ м})(1,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})^2}{(0,3 \text{ м})(9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2})} = 1,3 \text{ м}.$$

Следует напомнить, что при подобных расчетах все величины следует брать в одной системе единиц, например в СИ.

На рис. 2.6 показана только одна кривая при  $\text{Re} < 2000$ , откуда следует, что коэффициент сопротивления  $\zeta$  в этом диапазоне не зависит от шероховатости трубы  $\xi$ . Это объясняется тем, что в ламинарном течении шероховатость не в состоянии нарушить его устойчивость. В таком течении потери давления  $\Delta p$  определяются с использованием (2.8) для вязких напряжений, как показано в задаче 2.4. Соответствующее выражение для коэффициента сопротивления имеет вид

$$\zeta = 16\nu / (uD). \quad (2.13)$$

### Задачи

2.1. На рис. 2.7, а показан идеальный расходомер (трубка) Вентури для измерения расхода жидкости в трубах.

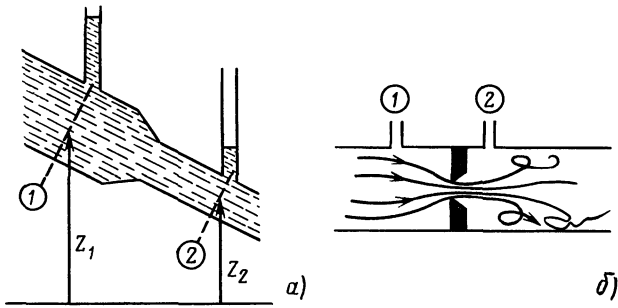


Рис. 2.7. К задаче 2.1. Расходомеры Вентури с плавным сужением канала (а) и шайбой (б)

а) Используя уравнения сохранения массы и энергии, покажите, что объемный расход жидкости через поперечное сечение 1 равен

$$Q = u_1 A_1 = A_1 \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]^{-1/2} \left\{ 2g \left[ \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) \right] \right\}^{1/2}.$$

б) Чему равен объемный расход через поперечное сечение 2 (рис. 2.7, а)?

в) Давления  $p_1$  и  $p_2$  измеряются высотой столбов жидкости в отводных трубках, как показано на рис. 2.7, а. Покажите на рисунке величину, соответствующую члену в квадратных скобках в выражении из задачи 2.1(а).

г) На рис. 2.7, б показано устройство для измерения параметров потока в трубе постоянного поперечного сечения. Оно состоит из шайбы с отверстием, имеющим острые кромки, помещенной в трубу, и двух отводов для измерения давления до и после шайбы. Можно ли разность этих давлений использовать в формуле задачи 2.1(а) для определения расхода жидкости в трубе или результат будет завышен (занижен) и почему?

Указание: используйте уравнение для полной энергии (2.1).

2..2. Из двумерного сопла истекает горизонтально прямоугольная в сечении струя шириной  $b$ , высотой  $h$ . Струя натекает на бесконечную плоскую наклонную преграду, как показано на рис. 2.8.

а) Пренебрегая эффектами вязкости и гравитации, покажите, используя уравнение Бернулли, что  $u_1 = u_2 = u_j$ .

Указание: изменением давления поперек тонкого слоя можно пренебречь.

б) Чему равна составляющая действующей на жидкость силы, параллельная преграде? Рассматривая изменение количества движения жидкости в рацио-

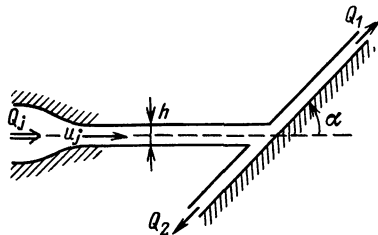


Рис. 2.8. К задаче 2.2. Натекание плоской струи на наклонную преграду

нально выбранном контрольном объеме и используя уравнение сохранения массы, покажите, что расход жидкости вверх и вниз по преграде соответственно равен

$$Q_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) Q_j,$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} (1 - \cos \alpha) Q_j.$$

в) Получите выражение для действующей на преграду силы и определите ее величину при  $b = 10$  см,  $h = 1$  см,  $Q = 10$  л/с,  $\alpha = 60^\circ$ .

2.3. Рассмотрите установившееся ламинарное течение жидкости между двумя неподвижными пластинами с ординатами  $y = 0$  и  $y = D$  (см. рис. 2.4). Жидкость движется вправо (в сторону увеличения координаты  $x$ ) под действием постоянного градиента давления  $\partial p / \partial x < 0$ .

а) Чему равны силы, действующие на элемент жидкости длиной  $\Delta x$ , шириной  $\Delta z$  и высотой от  $y$  до  $y + \Delta y$ ? Покажите, что в таком течении действующие на элемент жидкости силы связаны соотношением

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial x}.$$

б) Интегрируя это соотношение, покажите, что скорость течения на высоте  $y$  равна

$$u(y) = \frac{y}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) (D - y).$$

в) Пластины имеют ширину  $B \gg D$ , так что концевыми эффектами можно пренебречь. Покажите, что в этом случае объемный расход жидкости между пластинами равен

$$Q = \frac{1}{12} B D^3 \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|$$

2.4. Ламинарное течение в трубе. Рассмотрим направленное вертикально вниз течение жидкости в цилиндрической трубе диаметром  $D = 2R$  и с постоянным градиентом давления. Пусть  $x$  — расстояние вдоль трубы,  $r$  — расстояние от ее оси.

а) Как и в задаче 2.3, покажите, что силы, действующие на кольцевой элемент жидкости длиной  $\Delta x$  и радиусами  $r$  и  $r + \Delta r$ , связаны соотношением

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -r \frac{\partial p}{\partial x}.$$

*Указание:* сила трения, действующая на кольцевую поверхность радиусом  $r$ , равна  $(2\pi r x) \tau(r)$ , а  $r$  изменяется поперек трубы.

б) Интегрируя соотношение пункта а), покажите, что скорость течения связана с радиусом  $r$  соотношением

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) (R^2 - r^2).$$

в) Покажите, что объемный расход жидкости в трубе равен

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right).$$

г) Среднее значение скорости потока в трубе равно  $\bar{u} = Q/A$ . Используя это равенство, выражение для  $Q$  из пункта в) и (2.11), покажите, что  $\bar{u}\zeta = 16\nu/D$ , т. е. получите (2.13).

2.5. Оценивая результаты примера 2.1, можно подумать, что в этом случае было бы дешевле использовать трубы из поливинилхлорида значительно меньшего диаметра.

а) Проверните это предположение, рассчитав потери напора на трение при течении воды в ПВХ-трубе диаметром 5 см, длиной 200 м и расходе  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ , показав, что эти потери чрезмерно высоки.

б) Определите предельную скорость воды в такой трубе, если течение в ней происходит только под действием силы тяжести.

Указание: положите  $H_1 = L$  (вертикальная труба), оцените  $\zeta$  и определите скорость  $u$ .

2.6. Объемный расход жидкости через стальную трубу диаметром  $D$ , длиной  $L$  равен  $Q$ . Полагая коэффициент трения трубы  $\zeta$  слабо зависящим от числа Рейнольдса, покажите, что потери напора на трение пропорциональны  $D^{-5}$  (при фиксированных  $L$  и  $D$ ).

### Решения и ответы

2.1. а) Из уравнения сохранения массы  $u_2 = u_1 A_1 / A_2$ . Используйте уравнение Бернулли в форме (2.2).

б)  $Q$ .

в) Геометрическая разность уровней жидкости в отводах.

г) Рассчитанный расход будет завышен, так как в расчетах не учитываются потери кинетической энергии потока при его турбулизации перед и за шайбой.

2.2. а) В (2.4.) положите  $p_1 = p_2$  и  $g = 0$ .

б) Нулю, так как жидкость невязкая. Из уравнения сохранения массы следует  $A_1 = A_1 + A_2$ . Используйте уравнение сохранения количества движения в проекции на плоскость преграды:

$$\rho A_1 u_1^2 \cos \alpha = \rho A_1 u_1^2 - \rho A_2 u_2^2.$$

в)  $F = \rho Q u_i \sin \alpha = 86 \text{ Н}$ , направлена перпендикулярно преграде (вниз вправо).

2.3. а) Разность сил давления в сечениях  $x$  и  $x + \Delta x$  и разность сил трения, действующих на высоте  $y + \Delta y$  и  $y$ . Используйте (2.8).

б)  $u = 0$  при  $y = 0$ ,  $y = D$ .

в)  $Q = \int u (B dy)$ .

2.4. а)  $[(\partial p / \partial x) \Delta x] [\pi (r + \Delta r)^2 - \pi r^2] = \tau (r) 2\pi r \Delta x - \tau (r + \Delta r) 2\pi (r + \Delta r) \Delta x$ .

б) Из условия симметрии  $\partial u / \partial r = 0$  при  $r = 0$ , а также  $u = 0$  при  $r = R$ .

в)  $Q = \int u \cdot 2\pi r dr$ .

2.5. а) См. пример 2.1. В результате получаем  $H_1 = 12 \text{ км} \gg L$ .

б)  $\zeta = 0,006$  (слабая зависимость от  $Re$  в этом диапазоне), при этом  $u = 4,4 \text{ м/с}$ ,  $Q = 8 \text{ л/с}$ .

2.6. Учтите, что  $u = Q / \left( \frac{1}{4} \pi D^2 \right)$ .

## ТЕПЛОПЕРЕНОС

## 3.1. Введение

В основе действия большинства возобновляемых источников энергии, даже не являющихся непосредственно тепловыми, как, например, солнечные, геотермальные и биологические, лежат процессы теплопереноса. Теория теплопереноса — хорошо развитое научное направление, но нам нет необходимости останавливаться на ней слишком детально, так как это редко требуется при рассмотрении работы не очень больших энергетических установок. Например, температурные перепады в них обычно невелики, геометрические формы достаточно просты и, самое главное, потоки энергии малы.

При рассмотрении процессов теплопереноса мы будем пользоваться распространенным подходом, при котором совокупность взаимосвязанных тепловых процессов представляется единой «тепловой цепью». Например, изображенный на рис. 3.1 приемник солнечной энергии поглощает около 1 кВт на каждый  $1 \text{ м}^2$  солнечной энергии, при этом температура его поверхности нагревается примерно на  $50^\circ \text{С}$  выше температуры окружающей среды. Отвод тепла от поверхности приемника осуществляется за счет инфракрасного (теплого) излучения, конвекции и теплоотдачи. Только последний процесс является полезным, осуществляя передачу части поглощенной солнечной энергии теплоносителю. При используемом подходе представляем процесс передачи солнечной энергии теплоносителю в виде тепловой цепи (по аналогии с электрической цепью, см. рис. 3.2, в) и оцениваем эффективность каждого процесса, являющегося элементом цепи, с точностью порядка 50%. Затем, отбросив процессы, вносящие относительно небольшой вклад в теплоперенос, проводим более точный расчет. Естественно, что при таком подходе точность расчетов вряд ли может быть лучше 10%.

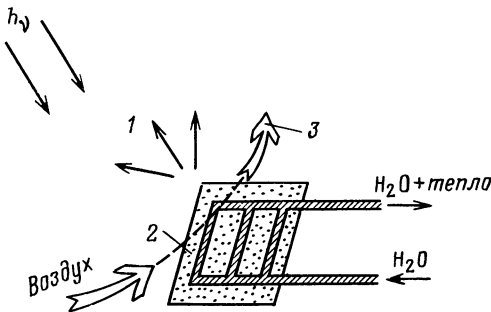
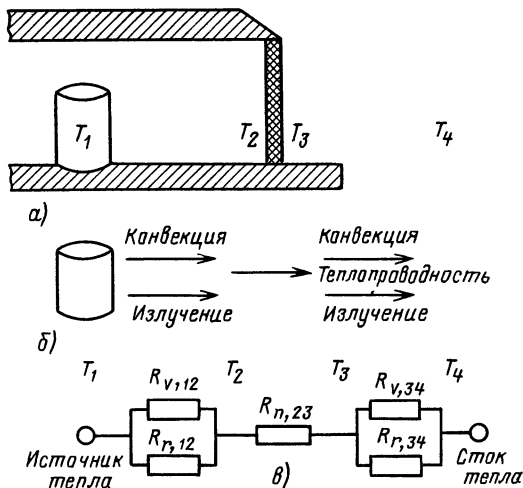


Рис. 3.1. Виды теплопереноса на примере приемника солнечного излучения (поглощающая пластина с трубками для воды внутри). Тепловые потери связаны с отражением солнечной энергии (1), теплопроводностью в месте крепления приемника (2) и конвекцией (3)

Рис. 3.2. Пример построения тепловой цепи для модельной задачи. Бак с горячей водой находится в помещении с теплопроводными стенами, окруженном холодным наружным воздухом.  $T_1—T_4$  — температуры соответственно бака, внутренней и наружной поверхностей стен, наружного воздуха (а). Схема процесса теплопереноса (б) и схема тепловой цепи (в)



Данная глава является вводной для последующих глав, посвященных конкретным энергетическим системам.

### 3.2. Метод тепловой цепи и терминология

Рассмотрим применение метода тепловой цепи при анализе процесса теплопередачи на простом примере (который в действительности, конечно, гораздо сложнее). Поместим в ночное время в закрытое холодное помещение емкость с горячей водой, при этом температура вне помещения (в окружающем пространстве) еще ниже, чем в помещении. Очевидно, что в конечном счете тепловой поток в этом случае будет направлен от горячей емкости в холодное окружающее пространство (рис. 3.2, а). Для простоты будем считать, что пол и потолок помещения абсолютно нетеплопроводны и перенос тепла осуществляется только через стены. От горячей емкости тепло передается стенам помещения за счет излучения (радиации) и конвекции. Через стены тепло передается теплопроводностью, а далее, в окружающее пространство, за счет конвекции и излучения (рис. 3.2, б). Последовательность этих процессов теплопереноса представлена на рис. 3.2 в в виде тепловой цепи.

Каждый процесс в тепловой цепи можно представить в форме

$$P_{ij} = (T_i - T_j) / R_{ij}, \quad (3.1)$$

где  $P_{ij}$  — тепловой поток от горячей поверхности с температурой  $T_i$  к холодной с температурой  $T_j$ , а  $R_{ij}$  — термическое сопротивление.

В общем случае значение термического сопротивления  $R_{ij}$  зависит от температуры, и эта зависимость может быть очень силь-



ной и нелинейной. В рассматриваемом случае, однако, тепловой поток  $P_{ij}$  зависит, в первом приближении, только от разности температур  $(T_i - T_j)$ , т. е. термическое сопротивление можно считать практически постоянным. Именно поэтому введение понятия о термическом сопротивлении оказывается полезным.

Если направление теплового потока очевидно, соотношение (3.1) запишем в виде

$$P_{ij} = \Delta T / R_{ij} \quad (3.2)$$

Параметр  $R_{ij}$  называется сопротивлением по аналогии с законом Ома для электрической цепи.

Замещение элементарных процессов теплопереноса соответствующими термическими сопротивлениями позволяет представить сложный процесс в виде цепи с последовательно-параллельным соединением сопротивлений. Для рассматриваемого здесь процесса имеем.

$$P_{14} = (T_1 - T_4) / R_{14}, \quad (3.3)$$

где

$$R_{14} = R_{12} + R_{23} + R_{34},$$

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_{12} \text{ (конвекция)}} + \frac{1}{R_{12} \text{ (излучение)}},$$

$R_{23} = R_{23}$  (теплопроводность),

$$\frac{1}{R_{34}} = \frac{1}{R_{34} \text{ (конвекция)}} + \frac{1}{R_{34} \text{ (излучение)}}.$$

Для определения полного термического сопротивления можно использовать приближенные значения отдельных его составляющих, вычисленных по приближенным значениям температур. В результате тепловой поток от горячей емкости будет определяться только значениями температур  $T_1$  и  $T_4$ . Возможность такого упрощения наряду с наглядностью графического представления тепловых потоков превращает метод тепловой цепи в эффективное средство решения задач теплопереноса.

В общем случае вместо параметра  $P$  удобнее использовать параметр  $q$  — плотность теплового потока (тепловой поток на единицу площади). При этом соотношение для  $q$  записывается в виде

$$q = \Delta T / r, \quad (3.4)$$

$$P = qA = T / (r/A). \quad (3.5)$$

Отсюда следует, что

$$R = r/A, \text{ К/Вт}, \quad r = RA, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}. \quad (3.6)$$

Назовем  $r$  *удельным термическим сопротивлением*. Заметим, что здесь аналогия с удельным электрическим сопротивлением

теряется, так как  $r$  получается из  $R$  умножением на  $A$ , а не делением.

В общем случае выражение для плотности теплового потока записывается в виде

$$q = h\Delta T, \quad (3.7)$$

где  $h$  — коэффициент теплопередачи или теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К). Сравнивая с (3.4), получаем

$$h = 1/r. \quad (3.8)$$

Далее в тексте различные механизмы теплопереноса обозначаются различными нижними индексами у параметров  $R$ ,  $r$  или  $h$ , а именно: индекс  $n$  — для теплопроводности,  $v$  — для конвекции,  $r$  — для излучения (радиации),  $m$  — для теплопереноса, обусловленного движением жидкости непосредственно.

### 3.3. Теплопроводность

*Теплопроводность* — это теплоперенос, обусловленный тепловым движением (поступательным или колебательным) атомов, молекул или электронов вещества, т. е. микроскопическими, а не макроскопическими перемещениями. В непрозрачных твердых телах это единственный механизм теплопереноса, в прозрачных средах теплоперенос осуществляется также излучением (излучательный или радиационный теплоперенос). Теплопроводность существует и в жидкостях и газах, но обычно в этих средах определяющим является конвективный перенос тепла, обусловленный макроскопическими перемещениями малых объемов среды.

Количество тепла  $P$ , переносимого в результате теплопроводности через пластину толщиной  $\Delta x$  и площадью  $A$  при разности температур ее поверхности  $\Delta T$ , равно

$$P = -\lambda A \Delta T / \Delta x. \quad (3.9)$$

Здесь  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), знак минус означает, что тепло переносится в направлении убывания температуры по толщине пластины. Сравнивая (3.9) с (3.2), получаем выражения для термического сопротивления при теплопроводном механизме переноса тепла

$$R_n = \Delta x / \lambda A \quad (3.10)$$

и удельного термического сопротивления

$$r_n = R_n A = \Delta x / \lambda. \quad (3.11)$$

Теплопроводность твердых тел практически не зависит от температуры в широком диапазоне ее изменения, поэтому термическое сопротивление  $R_n$  непрозрачных твердых тел можно считать постоянным. В жидкости, газе и паре ситуация совершенно дру-

гая. Их термическое сопротивление существенно изменяется с температурой вследствие конвективных процессов.

Термическая проводимость среды определяется выражением  $V=1/r$ .

*Пример. 3.1.* Значения теплопроводностного термического сопротивления некоторых материалов равны:

1)  $1 \text{ м}^2$  5-миллиметрового оконного стекла

$$R_n = \frac{5 \text{ мм}}{(1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) (1 \text{ м}^2)} = 0,005 \text{ К/Вт};$$

2)  $5 \text{ м}^2$  такого же стекла

$$R_n = 0,001 \text{ К/Вт};$$

3)  $1 \text{ м}^2$  глухой кирпичной стены толщиной 220 мм

$$R_n = \frac{220 \text{ мм}}{(1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) (1 \text{ м}^2)} = 0,022 \text{ К/Вт},$$

$$U = 45 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

4)  $1 \text{ м}^2$  спрессованной стекловаты толщиной 80 мм (для утепления чердачных перекрытий)

$$R_n = \frac{80 \text{ мм}}{(0,04 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) (1 \text{ м}^2)} = 2 \text{ К/Вт},$$

$$U = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Полезно отметить следующее.

1. Теплопроводностная проводимость оконного стекла гораздо меньше суммарной термической проводимости окна вследствие конвективного движения воздуха около него (см. задачу 3.7).

2. Так как термическая проводимость металлов высока [ $\lambda \approx \approx 100 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ], его кондуктивным термическим сопротивлением в многослойных материалах, включающих неметаллические компоненты, можно пренебречь.

3. Спрессованное стекловолокно обладает гораздо бóльшим термическим сопротивлением, чем листовое стекло, из-за наличия в стекловолокне большого количества микропор, заполненных неподвижным воздухом. Неподвижный воздух является очень хорошим теплоизолятором [ $\lambda \approx 0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ] и содержится во всех естественных и искусственных теплоизоляционных материалах. Термическое сопротивление таких материалов резко падает, если они намокают или если микропоры в них слишком велики (в последнем случае резко возрастает конвективный теплообмен внутри пор).

4. Понижение теплопроводностного сопротивления мокрых или сырых материалов объясняется двумя причинами: а) жидкость, обладающая большей теплопроводностью, проникает в микропоры, вытесняя из них воздух. Такой механизм характерен

для органических веществ, например древесины; б) пары жидкости из влажной атмосферы диффундируют внутрь пористого материала и там конденсируются (см. § 3.7.).

Еще одним свойством физических тел, непосредственно связанным с их теплопроводностью, является *температуропроводность*, характеризующая процесс изменения температуры в различных точках тела в процессе кондуктивного переноса тепла. Количественно температуропроводность характеризуется коэффициентом температуропроводности, равным

$$a = \lambda / \rho c, \quad (3.12)$$

где  $\rho$  — плотность, а  $c$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $a$  имеет размерность  $\text{м}^2/\text{с}$ , как и коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  [см. (2.9)].

Из (3.12) следует, что температура тела будет изменяться тем быстрее, чем выше его теплопроводность [велик коэффициент теплопроводности  $\lambda$  в числителе (3.12)] и чем меньше тепла расходуется на его нагрев (мала удельная объемная теплоемкость в знаменателе).

Характерное время «диффузии» температуры в среде на расстоянии  $y$  в процессе теплопроводности — порядка  $y^2/a$ .

### 3.4. Конвективный теплообмен

**Теплообмен при свободной и вынужденной конвекции.** *Конвективный теплообмен* — это процесс передачи тепла жидкости или телу при их движении относительно друг друга. Так как движение есть перемещение макроскопических объемов жидкости, естественно, что при этом происходит и перенос тепла. Как правило, конвективный перенос тепла происходит гораздо эффективнее, чем кондуктивный перенос в неподвижной жидкости.

При свободной конвекции (называемой также естественной) движение жидкости возникает вследствие разности температур в различных ее частях. Рассмотрим частицу жидкости, соприкасающуюся с горячей поверхностью (рис. 3.3). В начальный мо-

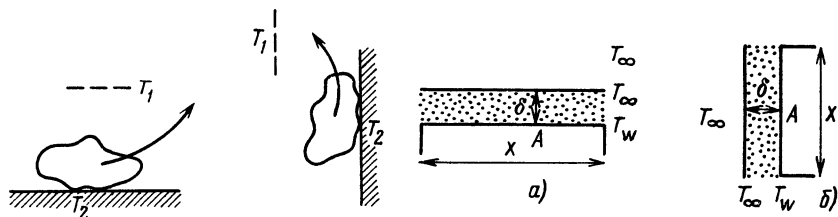


Рис. 3.3. Движение жидкости около горячей поверхности при свободной конвекции ( $T_2 > T_1$ )

Рис. 3.4. Температурный пограничный слой при свободной конвекции около горизонтальной (а) и вертикальной (б) горячих поверхностей

мент эта частица поглощает тепло от поверхности вследствие теплопроводности, расширяется при нагревании и ее плотность уменьшается. Вследствие этого она поднимается вверх, в область более низких температур, осуществляя таким образом перенос тепла в направлении уменьшения температуры жидкости.

При вынужденной конвекции жидкость перемещается под действием внешних сил, например насоса или ветра. Это движение не зависит от распределения температуры в жидкости. Очевидно, что существуют и промежуточные случаи конвекции — частично свободной и частично вынужденной.

**Число Нуссельта.** При рассмотрении конвективного теплообмена обычно используют упрощенную модель этого процесса. Предполагают, что жидкость около рассматриваемой поверхности неподвижна. Затем рассматривают перенос тепла поперек прилегающего к поверхности неподвижного пограничного слоя толщиной  $\delta$  и площадью основания  $A$ . Полагают, что температура на прилегающей к поверхности границе слоя равна температуре поверхности  $T_w$ , на внешней поверхности слоя равна температуре жидкости  $T_\infty$  вне его. В такой модели теплопроводностный перенос тепла поперек температурного пограничного слоя определяется выражением

$$q = \frac{P}{A} = \frac{\lambda(T_w - T_\infty)}{\delta}, \quad (3.13)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности жидкости.

В этой модели толщина пограничного слоя  $\delta$  — условная величина, ее нельзя измерить. Однако в каждом конкретном случае можно ввести величину  $X$  — некий характерный размер рассматриваемой задачи (рис. 3.4). Из (3.13) следует

$$q = \frac{P}{A} = \frac{\lambda(T_w - T_\infty)}{\delta} = \frac{X}{\delta} \frac{\lambda(T_w - T_\infty)}{X} = \text{Nu} \frac{\lambda(T_w - T_\infty)}{X}. \quad (3.14)$$

Здесь  $\text{Nu}$  — число Нуссельта для данного конкретного случая. Число Нуссельта — безразмерный параметр подобия процессов конвективного теплообмена, зависящий от геометрии тела и картины течения в его окрестности.

Сравнивая результаты § 3.2 и (3.14), получаем следующие зависимости:

конвективное термическое сопротивление

$$R_v = X / \text{Nu} \lambda A; \quad (3.15)$$

конвективное удельное термическое сопротивление

$$r_v = R_v A = X / \text{Nu} \lambda; \quad (3.16)$$

коэффициент теплоотдачи или теплопередачи

$$h_v = 1 / r_v = \text{Nu} \lambda / X. \quad (3.17)$$

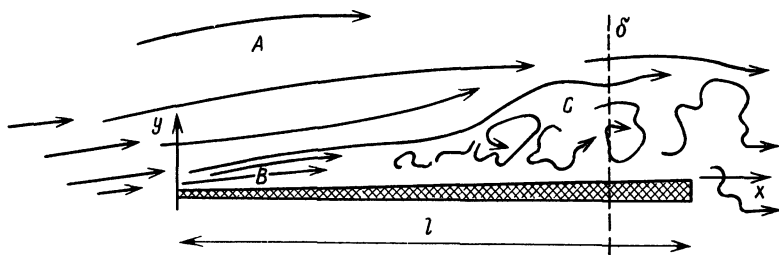


Рис. 3.5. Обтекание горячей пластины. Сплошными линиями показаны траектории частиц жидкости в области А, достаточно удаленной от поверхности пластины в ламинарной области В в окрестности передней кромки пластины и в турбулентной области С

Интенсивность конвективного теплопереноса определяется следующими факторами: свойствами жидкости, скоростью течения жидкости, формой и размером поверхности.

Число Нуссельта является безразмерной величиной измерения тепла при конвективном теплообмене и поэтому зависит только от безразмерных характеристик перечисленных выше факторов. Определяя эти характеристики, следует разделять случаи вынужденной и свободной конвекции.

**Вынужденная конвекция.** При заданной форме поверхности безразмерным масштабом скорости является число Рейнольдса

$$Re = uX/\nu. \quad (3.18)$$

В § 2.5 показано, что число Рейнольдса определяет картину течения, в частности, будет ли течение ламинарным или турбулентным. При обтекании плоской пластины (рис. 3.5) при  $Re \geq 3 \cdot 10^5$  устанавливается турбулентный режим течения, при этом возрастает теплоотдача, вызванная поперечными потоку турбулентными пульсациями скорости. Поток тепла, передаваемого телом потоку жидкости или наоборот, зависит от коэффициента температуропроводности  $a$  жидкости, а также от коэффициента кинематической вязкости  $\nu$  (который можно считать количественной характеристикой скорости переноса импульса), так как от него зависит число Рейнольдса, определяющее характер течения. Таким образом, число Нуссельта при вынужденной конвекции зависит только от двух параметров, так как переменные  $\lambda$ ,  $\rho$  и  $c$  объединены параметром  $a$  (3.12). Эти два параметра  $\nu$  и  $a$  определяют безразмерную переменную, называемую *числом Прандтля*

$$Pr = \nu/a. \quad (3.19)$$

Если число Прандтля велико, изменения в пространственном распределении скорости (или количества движения) жидкости будут гораздо более резкими, чем изменения в распределении температуры. Для большинства жидкостей число Прандтля  $Pr \sim 1$ .

Таким образом, при любой форме поверхности теплоотдачу при вынужденной конвекции можно представить в форме

$$Nu = Nu(Re, Pr), \quad (3.20)$$

т. е. при заданной форме поверхности число Нуссельта зависит только от числа Рейнольдса и числа Прандтля. Иногда вместо этих параметров используют другие безразмерные переменные, например число Стэнтона ( $Nu/RePr$ ) и число Пекле ( $Re/Pr$ ). В данной книге эти параметры не используются.

Точное значение числа Нуссельта определяется в эксперименте. Обобщение результатов экспериментов приведено в табл. 3.1 и 3.2.

Следует помнить, что точность этих данных не превышает 10%, так как они являются аппроксимацией множества экспериментальных результатов, содержащих в свою очередь случайные и систематические погрешности.

**Свободная конвекция.** При свободной конвекции первопричиной движения жидкости или газа являются процессы теплопереноса, а не наоборот. Вместо (3.20) в этом случае можно написать уравнение (см. табл. 3.1)

$$Nu = Nu(Ra, Pr), \quad (3.21)$$

где число Рэлея

$$Ra = \frac{g\beta X^3 \Delta T}{\alpha \nu}. \quad (3.22)$$

Здесь  $g$  — ускорение свободного падения;  $\beta$  — коэффициент теплового расширения, а остальные обозначения прежние.

Число Рэлея выражает соотношение процессов, показанных на рис. 3.6. Нагретая жидкость поднимается вверх под действи-

Таблица 3.1. Формулы для расчета теплообмена при свободной конвекции

Форма тел и их расположение	Режим	Формулы для расчета чисел Нуссельта
Горизонтальная плоская пластина ( $X$ — диаметр или полусумма сторон пластины) Горизонтальный цилиндр ( $X$ — диаметр цилиндра)	Ламинарный ( $10^2 < Ra < 10^5$ )	$Nu = 0,54Ra^{0,25}$
	Турбулентный ( $Ra > 10^5$ )	$Nu = 0,14Ra^{0,33}$
	Ламинарный ( $10^4 < Ra < 10^9$ )	$Nu = 0,47Ra^{0,25}$
	Турбулентный ( $Ra > 10^9$ )	$Nu = 0,10Ra^{0,33}$
Вертикальная плоская пластина или вертикальный цилиндр ( $X$ — высота пластины или цилиндра) Параллельные пластины (наклон не более $50^\circ$ ) ( $X$ — расстояние между пластинами)	Ламинарный ( $10^4 < Ra < 10^9$ )	$Nu = 0,56Ra^{0,25}$
	Турбулентный ( $10^9 < Ra < 10^{12}$ )	$Nu = 0,20Ra^{0,40}$
	Турбулентный ( $Ra > 10^5$ )	$Nu = 0,062Ra^{0,33}$

Т а б л и ц а 3.2. Формулы для расчета теплообмена при вынужденной конвекции и при одновременном действии свободной и вынужденной конвекции

Форма тел и их расположение	Режим	Формулы для расчета
Плоская пластина ( $X$ — размер пластины по потоку)	Ламинарный ( $Re < 5 \cdot 10^5$ ) Турбулентный ( $Re > 5 \cdot 10^5$ )	$Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33}$ $Nu = 0,37 Re^{0,8} Pr^{0,33}$
Круговой цилиндр, поперечное обтекание ( $X$ — диаметр цилиндра)	Ламинарный ( $0,1 < Re < 1000$ ) Турбулентный ( $10^3 < Re < 5 \cdot 10^4$ )	$Nu = (0,35 + 0,56 Re^{0,52}) Pr^{0,3}$ $Nu = 0,26 Re^{0,6} Pr^{0,3}$
Теплообмен внутри круглой трубы ( $X$ — внутренний диаметр трубы, $L$ — длина трубы)	Ламинарный, короткая труба ( $Re < 2300$ , $G_1 > 10$ ) Турбулентный ( $Re > 2300$ )	$G_1 = Re Pr (D/L) = 4Q / \pi L$ $Nu = 1,86 G_1^{0,33}$ $Nu = 0,027 Re^{0,8} Pr^{0,33}$
Плоская пластина в воздухе (сложный теплообмен)	$X > 0,1$ м $u < 20$ м/с	$h = a + b u$ $a = 5,7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ $b = 3,8 \text{ (Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мК}^{-1}) / (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$
Общий случай	—	$Nu_1 = \max (Nu_{\text{вынужд}}, Nu_{\text{своб}})$ $Nu_1 < Nu_{\text{однов}} < Nu_{\text{вынужд}} + Nu_{\text{своб}}$



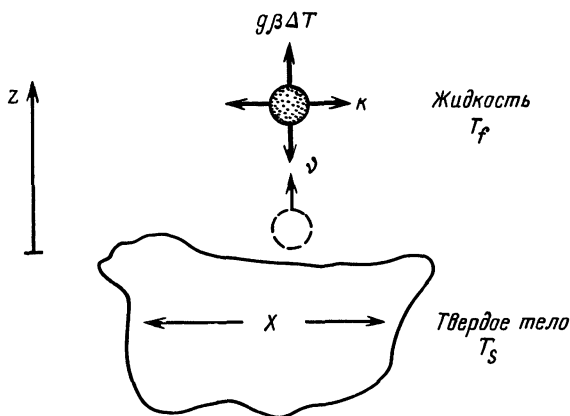


Рис. 3.6. Схема движения частицы жидкости при свободной конвекции. Стрелками обозначены Архимедова сила (вверх), сила трения (вниз), тепловой поток от частицы (в стороны)

ем архимедовой силы, пропорциональной произведению  $g\beta\Delta T$ , испытывая сопротивление сил вязкости, пропорциональных  $v$ . При этом температура жидкости (а следовательно, и подъемная архимедова сила) уменьшается со скоростью, пропорциональной коэффициенту температуропроводности  $a$ . Следовательно, интенсивность конвективного теплообмена пропорциональна  $g\beta\Delta T/av$ , т. е. числу Рэлея  $Ra$ . Параметр  $\chi^3$  введен для того, чтобы обезразмерить это отношение. Экспериментально обнаружено, что при  $Ra \leq 10^3$  свободная конвекция практически отсутствует, а при  $Ra \geq 10^5$  имеет турбулентный характер. Из изложенного следует, что число Нуссельта при свободной конвекции зависит в основном от числа Рэлея и в какой-то степени от числа Прандтля, так как это диктуется условием безразмерности числа Нуссельта. Формулы для расчета чисел Нуссельта в некоторых случаях приведены в табл. 3.1 и 3.2. Точность этих формул — не выше 10%. В некоторых работах в этих формулах используется число Грасгофа  $Gg = Ra/Pr$ . Так как оно физически менее наглядно, мы его не используем. Отметим, что число Нуссельта (а следовательно, и термическое сопротивление) при свободной конвекции неявно зависит от перепада температур  $\Delta T$  через число Рэлея, в которое он входит. Это совершенно понятно, так как при большем температурном перепаде конвективное движение интенсивнее, а значит, интенсивнее и теплоперенос. При вынужденной же конвекции число Нуссельта и термическое сопротивление практически не зависят от перепада температур  $\Delta T$ .

**Расчет конвективного теплообмена.** Из-за сложности в общем случае картины течения жидкости чисто теоретических методов

расчета конвективного теплообмена не существует. Во всех расчетах так или иначе используются результаты экспериментальных исследований. Представление этих результатов в безразмерном виде позволяет переносить их на подобные тела других размеров.

Стандартный алгоритм расчета конвективного теплообмена состоит в следующем:

1. Составляется схема рассматриваемого объекта.
2. Схема объекта расцеляется на стандартные элементы.
3. Для каждого из этих элементов:
  - а) определяются характерные размеры ( $X$ );
  - б) рассчитываются числа Рейнольдса  $Re$  и/или числа Рэлея  $Ra$ ;
  - в) из таблиц выбираются соответствующие полученным значениям  $Re$  или  $Ra$  формулы для расчета числа Нуссельта  $Nu$  (для ламинарного и турбулентного режимов течения эти формулы обычно различны);
  - г) рассчитываются числа Нуссельта, а следовательно, и потоки тепла  $P = qA$ .
4. Суммируются тепловые потоки от всех элементов, т. е. определяется полный поток тепла от рассматриваемого объекта.
5. Если в справочных данных используется число  $G\Gamma$ , то следует учесть, что  $Ra = G\Gamma Pr$ .

*Пример 3.2. Свободная конвекция между параллельными пластинами.* Две плоские пластины размером  $1 \times 1 \text{ м}^2$  разделены слоем воздуха толщиной 3 см. Температура нижней пластины  $70^\circ \text{С}$ , верхней  $45^\circ \text{С}$ . Для исключения концевых эффектов пластины по краям скреплены друг с другом теплоизоляционным материалом. Рассчитайте конвективное термическое сопротивление этой системы и тепловой поток от одной пластины к другой.

*Решение.* На рис. 3.7, а представлен стандартный элемент — две плоские параллельные пластины. Наличие теплоизоляции по краям пластин позволяет считать, что теплоперенос осуществляется только в результате свободной конвекции. Используя (3.22), при среднем значении температуры  $57^\circ \text{С}$  ( $330 \text{ К}$ )

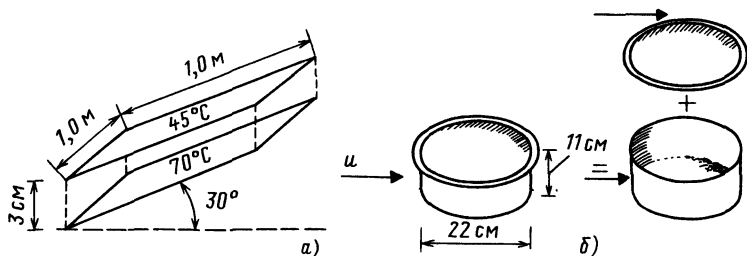


Рис. 3.7. Примеры расчетных схем для конвективного теплопереноса: параллельные пластины, пример 3.2 (а), и кастрюля, пример 3.3 (б)

определяем число Рэлея (для воздуха при  $T=57^\circ\text{C}$ ,  $a=2,6\cdot 10^{-5}\text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ,

$$Ra = \frac{g\beta X^3 \Delta T}{a\nu} = \frac{g\beta}{a\nu} X^3 \Delta T = \frac{(9,8\text{ м}\cdot\text{с}^{-1})(1/330\text{ К})}{(2,6\cdot 10^{-5}\text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1})(1,8\cdot 10^{-5}\text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1})} (0,03\text{ м})^3 (25\text{ К}) = 4,1\cdot 10^4.$$

Соответствующее значение числа Nu для этого случая, учитывая, что Ra незначительно меньше  $10^5$ , определяем по формуле (см. табл. 3.1)

$$Nu = 0,062 Ra^{0,33} = 2,06.$$

Из (3.16) находим

$$r_v = \frac{X}{Nu\lambda} = \frac{0,03\text{ м}}{(2,06)(0,028\text{ м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1})} = 0,52\text{ К м}^2/\text{Вт}.$$

Тепловой поток определяем по (3.5):

$$P = \frac{A\Delta T}{r_v} = \frac{(1\text{ м}^2)(25\text{ К})}{0,52\text{ К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Вт}^{-1}} = 48\text{ Вт}.$$

Следует отметить, что:

- 1) параметр  $g\beta/a\nu$  (равный  $Ra/X^3\Delta T$ ) обычно затабулирован;
- 2) параметры газа оцениваются по его средней температуре (в рассматриваемом случае можно положить ее равной средней температуре пластин);
- 3) при расчете всех безразмерных параметров надо пользоваться одной системой единиц измерения (например, СИ).

*Пример 3.3. Конвективное охлаждение кастрюли.* На плите находится металлическая кастрюля с водой, размеры которой приведены на рис. 3.7, б. Наружная поверхность кастрюли светлая и блестящая. Какое минимальное количество энергии необходимо, чтобы поддерживать кипение в кастрюле в течение 1 ч: 1) при отсутствии ветра и 2) при легком ветре со скоростью 3 м/с?

*Решение.* Считаем, что кастрюля плотно закрыта крышкой, поэтому нет потерь тепла на испарение. Как показано ниже, в задаче 3.4, для заданной поверхности кастрюли можно пренебречь радиационными потерями тепла. Так как теплопроводность стенок кастрюли велика, задача сводится к вычислению конвективных потерь тепла с верхней и боковой поверхностями цилиндра с температурой  $100^\circ\text{C}$ . Считать, что температура окружающего воздуха равна  $20^\circ\text{C}$ , а значение его средней температуры  $T$ , необходимое для расчета теплопереноса, равно  $60^\circ\text{C}$ .

1) *Только свободная конвекция.* Для верхней поверхности цилиндра (крышки) имеем (3.22)

$$Ra = (5,8\cdot 10^7\text{ м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1})(0,22\text{ м})^3 (80\text{ К}) = 4,9\cdot 10^7,$$

тогда (см. табл. 3.1)

$$Nu = 0,14\text{ } Ra^{0,33} = 48,4,$$

откуда

$$P_{кр} = A\lambda Nu\Delta T/X = (\pi/4)(0,22\text{ м})^2(0,027\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1})(48,4)(80\text{ К})/(0,22\text{ м}) = 18\text{ Вт}.$$

Для боковой поверхности цилиндра  $X=0,11$  м и

$$Ra_{бок} = Ra_{кр}(0,11 \text{ м}/0,22\text{м})^3 = 6,1 \cdot 10^6,$$

$$Nu = 0,56 Ra^{0,25} = 27,8,$$

откуда

$$P_{бок} = \pi(0,22 \text{ м})(0,11 \text{ м})(0,027 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1})(27,8)(80 \text{ К})/(0,11 \text{ м}) = 41 \text{ Вт}.$$

Окончательно имеем

$$P_{своб} = P_{кр} + P_{бок} = 59 \text{ Вт}.$$

Отсюда искомая энергия равна потерям тепла полученной интенсивности в течение 1 ч, т. е.

$$(0,059 \text{ кВт})(3600 \text{ с}) = 0,21 \text{ МДж}$$

2) Совместное действие свободной и вынужденной конвекции. В этом случае рассчитываем потери тепла при вынужденной конвекции, складываем их с уже известными потерями при свободной конвекции и получаем в результате потери тепла при данном конвективном теплопереносе.

Для крышки имеем

$$Re = (3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})(0,22 \text{ м})/(1,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}) = 3,5 \cdot 10^4,$$

откуда (см. табл. 3.2)

$$Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} = 110 \text{ (ламинарный режим } Re < 5 \cdot 10^5)$$

и

$$P_{кр} = A \lambda Nu \Delta T / X = 42 \text{ Вт}.$$

Для боковой поверхности, как и для крышки,

$$Re = 3,5 \cdot 10^4$$

и

$$Nu = 0,26 Re^{0,6} Pr^{0,3} = 124,$$

$$P_{бок} = \pi(0,22 \text{ м})(0,11 \text{ м})(0,027 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1})(124)(80 \text{ К})/(0,22 \text{ м}) = 93 \text{ Вт}.$$

Отсюда

$$P_{вынужд} = 93 + 42 = 135 \text{ Вт}$$

и полные конвективные потери тепла равны

$$P = P_{вынужд} + P_{своб} = 194 \text{ Вт} = 0,7 \text{ МДж/ч}.$$

Суммарная погрешность этих расчетов может достигать 50% и более, хотя погрешность отдельных формул существенно меньше. Это объясняется тем, что в случае, когда свободная и вынужденная конвекции одного порядка, полный тепловой поток не будет в общем случае равен сумме рассчитанных независимо друг от друга тепловых потоков при свободной и вынужденной конвекциях, так как, например, направление движения газа при свободной конвекции может быть противоположным

направлению вынужденной конвекции или просто исказить его. Кроме того, конвективные движения газа около различных отдельных элементов объекта оказывают взаимное влияние друг на друга.

В примере 3.3 есть еще одна сложность, связанная с определением характера конвективного движения, т. е. будет ли оно ламинарным или турбулентным. Например, для крышки кастрюли  $Ra > 10^5$ , следовательно, течение должно быть турбулентным, но если число  $Re$  определить по скорости внешнего потока, получим  $Re < 10^5$ , т. е. течение должно быть ламинарным. На практике это конвективное движение будет турбулентным, так как очень сложно ламинизировать внешним потоком турбулентность, возникшую при свободной конвекции. Поэтому единственным надежным способом точного определения конвективного теплопереноса, учитывающим все последствия эффектов взаимовлияния, является эксперимент! Некоторые из использованных здесь формул основаны на результатах специальных экспериментов и достаточно надежны, но область их применения довольно узка.

### 3.5. Радиационный теплоперенос

**Введение.** Согласно фундаментальным законам физики поверхность любого тела испускает энергию посредством электромагнитного излучения. С излучением энергии тесно связан процесс ее поглощения. Следует отметить, что терминология, используемая в литературе по радиационному теплопереносу, унифицирована плохо. Из-за этого часто различны соответствующие какому-либо понятию обозначения и термины и, наоборот, одному и тому же обозначению или термину могут соответствовать различные понятия. В данной книге мы следуем рекомендациям Международного общества по солнечной энергии 1978 г.

В этой главе рассматриваются общие вопросы радиационного (излучательного, лучистого) теплопереноса. Глава 4 посвящена солнечному излучению, а гл. 5 и 6 — различным устройствам, использующим солнечную энергию.

**Плотность потока излучения.** *Излучение* — это перенос энергии при распространении электромагнитных волн в прозрачной среде. Свойства излучения зависят от его длины волны  $\lambda$  или частоты  $\nu = c/\lambda$ , где  $c$  — скорость света. На рис. 3.8 приведена шкала длин волн, на которой показаны характерные диапазоны излучения. Количество энергии, переносимой в единицу времени (поток энергии) через единичную площадку, называется плотностью потока излучения (условное обозначение  $\phi$ , единица измерения  $Вт/м^2$ ), то же в единичном диапазоне длин волн называется *спектральной плотностью потока излучения* [услов-

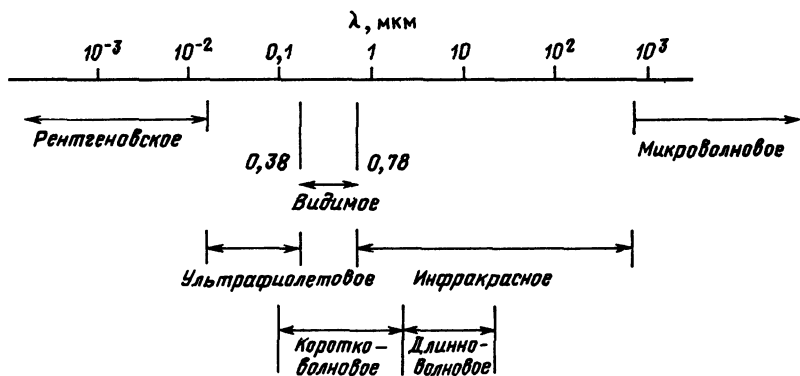


Рис. 3.8. Шкала длин волн электромагнитного излучения и его различные диапазоны. Внизу выделены два характерных диапазона теплового излучения — длинноволновый и коротковолновый

ное обозначение  $\varphi_\lambda$ , единицы измерения ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ )/м или чаще  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$ ] и равно производной  $d\varphi/d\lambda$ . Отсюда следует, что  $\varphi_\lambda \Delta\lambda$  — плотность потока энергии в узком спектральном диапазоне  $\Delta\lambda$ , а интеграл от  $\varphi_\lambda$  равен плотности потока излучения, т. е.  $\varphi = \int \varphi_\lambda d\lambda$ .

Совершенно очевидно, что многие свойства излучения характеризуются направленными, т. е. векторными, величинами. При определении различных характеристик излучения удобно пользоваться графическим представлением рассматриваемого явления, при этом следует четко оговаривать методы используемых измерений и размерность величин.

Итак, пусть мы имеем идеальный излучательный прибор, позволяющий определять параметры излучения. Таким прибором может быть небольшая абсолютно черная (полностью поглощающая падающее на нее излучение) пластинка (рис. 3.9), которая может поглощать излучение обеими своими сторонами (рис. 3.9, а), одной стороной (рис. 3.9, б), с одного направления (рис. 3.9, в) и в заданном телесном угле (рис. 3.9, г).

Количество энергии  $\Delta E$ , поглощаемой пластинкой за время  $\Delta t$ , можно определить, зная ее площадь и теплоемкость и измеряя повышение ее температуры в результате поглощения излу-

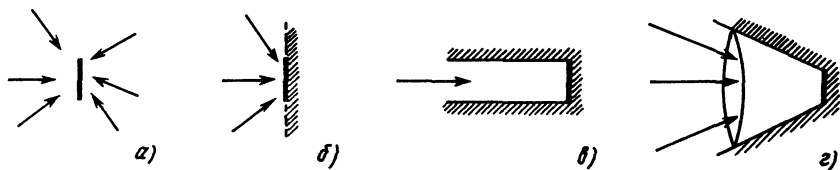


Рис. 3.9. Схемы измерения различных характеристик излучения с помощью абсолютно поглощающего приемника

чения. Как следует из рис. 3.9, а, плотность потока излучения, падающего на пластинку со всех направлений, равна  $\varphi = \Delta E / 2\Delta A \Delta t$ . На рис. 3.9, б излучение падает только на одну сторону пластинки (которая может быть помечена знаком «+» или «-») из полусферы, при этом

$$\varphi = \Delta E / \Delta A \Delta t. \quad (3.23)$$

На рис. 3.9, в на пластинку может попасть только излучение, распространяющееся в направлении, перпендикулярном ее поглощающей поверхности.

На рис. 3.9, г на пластинку падает излучение, распространяющееся в заданном телесном угле  $\Delta\omega$ , и размерность измеряемой величины в этом случае будет Вт/(м<sup>2</sup>·ср).

В рассмотренных случаях определялись характеристики излучения безотносительно к его спектральному составу, так как абсолютно черная пластинка полностью поглощает излучение любой длины волны. Если же перед пластинкой поместить спектральный прибор, пропускающий излучение только в узком диапазоне длин волн от  $\lambda - \Delta\lambda/2$  до  $\lambda + \Delta\lambda/2$ , тогда мы будем измерять спектральную плотность потока излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·м),

$$\varphi_\lambda = \Delta E / \Delta A \Delta t \Delta \lambda. \quad (3.24)$$

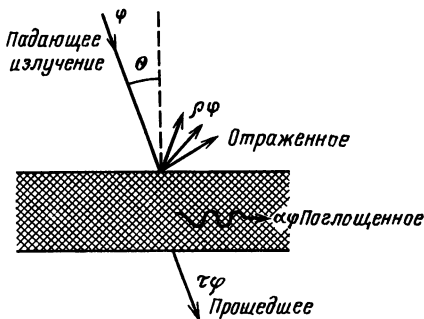
Эта величина, как и  $\varphi$ , также может быть векторной, т. е. зависеть от ориентации пластинки в пространстве.

При измерении энергии излучения иногда возникают трудности, вызванные тем, что существуют две системы единиц измерения параметров излучения — светотехническая (фотометрическая) и энергетическая. Светотехническая система единиц измерений исторически ориентировалась на специфику восприятия излучения человеческим глазом, и в ее основе лежит единица силы света (в СИ — кандела). В основе энергетической системы единиц измерения лежат универсальные энергетические единицы — джоуль, ватт, не связанные с особенностями человеческого восприятия. Для рассматриваемых целей имеет смысл пользоваться только энергетическими единицами измерений.

**Поглощение, отражение и пропускание излучения.** Падающее на вещество излучение может поглощаться, отражаться или проходить через него (рис. 3.10). Все эти процессы зависят от свойств вещества и его поверхности, длины волны излучения и угла падения  $\theta$ . Будем рассматривать, как правило, случаи нормального ( $\theta = 0$ ) падения излучения на вещество, но следует отметить, что при больших углах наклона падающих лучей ( $90^\circ > \theta \geq 70^\circ$ ) характеристики взаимодействия излучения с веществом могут существенно изменяться.

Введем понятие спектрального коэффициента поглощения  $\alpha_\lambda$ , равного поглощенной веществом части падающего потока излучения с длиной волны  $\lambda$  и узким спектральным диапазоном

Рис. 3.10. Отражение, поглощение и пропускание излучения ( $\varphi$  — плотность падающего потока излучения)



$\Delta\lambda$ . Коэффициент  $\alpha_\lambda$  зависит только от свойств поверхности вещества, например от энергии уровней атомов на поверхности, и не зависит от параметров падающего излучения, т. е. он просто информирует, какая часть излучения данной длины

волны поглотится при его взаимодействии с веществом, при этом не важно, присутствует ли в спектре падающего излучения излучение с данной длиной волны или нет.

Точно так же можно ввести понятие спектрального коэффициента отражения  $\rho_\lambda$  и спектрального коэффициента пропускания  $\tau_\lambda$ .

Из закона сохранения энергии применительно к падающему излучению следует, что должно выполняться равенство

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (3.25)$$

и что  $0 \leq \alpha_\lambda, \rho_\lambda, \tau_\lambda \leq 1$ .

Значения этих коэффициентов практически не зависят от угла падения  $\theta$ , за исключением случаев почти касательного падения ( $\theta \approx 90^\circ$ ). На практике спектральный диапазон падающего на поверхность вещества излучения обычно широк, поэтому имеет смысл ввести понятие о коэффициенте поглощения  $\alpha$ , равном поглощенной (*abs*) части падающего (*in*) потока излучения, т. е.

$$\alpha = \varphi_{abs} / \varphi_{in} \quad (3.26)$$

или

$$\alpha = \int_0^\infty \alpha_\lambda \varphi_{\lambda, in} d\lambda : \int_0^\infty \varphi_{\lambda, in} d\lambda. \quad (3.27)$$

Из (3.27) нетрудно понять, что коэффициент поглощения  $\alpha$  в противоположность  $\alpha_\lambda$  зависит от спектрального состава падающего излучения. Например, тело может выглядеть голубым при дневном освещении и темным при освещении желтой натриевой лампой, если оно поглощает желтый свет и отражает голубой.

Аналогично определяются коэффициент отражения  $\rho = \varphi_{refl} / \varphi_{in}$  и коэффициент пропускания  $\tau = \varphi_{trans} / \varphi_{in}$ , и так же выполняется равенство

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (3.28)$$



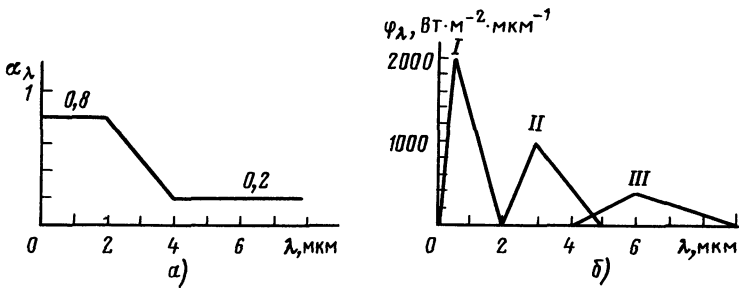


Рис. 3.11. К примеру 3.4. Положения максимумов кривых I—III определяются соответственно координатами (0,5, 2000), (3,0, 1000), (6,0, 400)

*Пример 3.4. Расчет поглощения излучения.* Зависимость коэффициента поглощения  $\alpha_\lambda$  от длины волны показана на рис. 3.11, а (это типичная зависимость для избирательно поглощающих поверхностей). Определите, сколько энергии поглощает в секунду  $1 \text{ м}^2$  этой поверхности, если спектральное распределение плотности падающего потока излучения

1)  $\varphi_\lambda$  задано кривой I на рис. 3.11, б (это примерно соответствует излучателю с температурой 6000 К);

2)  $\varphi_\lambda$  задано кривой II на рис. 3.11, б (температура излучателя примерно 1000 К);

3)  $\varphi_\lambda$  задано кривой III (температура излучателя примерно 500 К).

*Решение.* 1) Во всем диапазоне излучения излучателя  $\alpha_\lambda = 0,8$ , поэтому из (3.27) следует, что и  $\alpha = 0,8$ . Отсюда поглощаемая мощность

$$P = \alpha (1 \text{ м}^2) \int \varphi_{\lambda, \text{ин}} d\lambda = (0,8) (1 \text{ м}^2) [(1/2) (2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})) (2 \text{ мкм})] = 1600 \text{ Вт}.$$

(Интеграл равен площади под кривой I.)

2) В этом случае необходимо вычислить интеграл  $\int \alpha_\lambda \varphi_{\lambda, \text{ин}} d\lambda$  в (3.37). Для этого разобьем область интегрирования от 2 до 5 мкм на три равных отрезка по 1 мкм, в пределах которых обе подынтегральные функции линейны. Тогда искомый интеграл будет равен сумме произведений средних значений подынтегральных функций на ширину интервала  $\Delta\lambda = 1$  мкм. Результаты вычислений представлены ниже:

$\lambda$ , мкм	$\Delta\lambda$ , мкм	$\alpha_\lambda$	$\varphi_\lambda$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{мкм}$ )	$\alpha_\lambda \varphi_\lambda \Delta\lambda$ , Вт/ $\text{м}^2$
2,5	1	0,62	500	310
3,5	1	0,33	750	250
4,5	1	0,2	200	40
<i>Всего:</i>				600

3) Решение такое же, как и в случае 1), но при  $\alpha_\lambda = 0,2$ . Отсюда поглощаемая мощность

$$P = (0,2) (1 \text{ м}^2) [(1/2) (400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})) (5 \text{ мкм})] = 200 \text{ Вт}.$$

**Черное тело, законы излучения Кирхгофа.** В теории излучения широко используется понятие черного тела, т. е. тела, поверхность которого поглощает все падающее на него излучение. Происхож-

дение данного термина связано с тем, что поверхность черного цвета обладает этим свойством в видимом диапазоне спектра. Следовательно, по определению спектральный коэффициент поглощения черного тела  $\alpha_\lambda$  при любом значении  $\lambda$  равен 1, а значит, и полный коэффициент поглощения  $\alpha = 1$ . Нетрудно понять, что никакое реальное тело не может поглощать больше энергии, чем эквивалентное ему по форме и размерам черное тело. Кирхгоф также показал, что никакое реальное тело не может излучать больше энергии, чем эквивалентное черное тело при такой же температуре.

Назовем *излучательной способностью* поверхности или коэффициентом излучения  $\epsilon$  отношение плотностей потоков излучения, испускаемых соответственно данной поверхностью и поверхностью эквивалентного черного тела с той же температурой. *Спектральная излучательная способность*  $\epsilon_\lambda$  поверхности определяется так же, но для малого спектрального диапазона ( $\lambda - \frac{1}{2}\Delta\lambda, \lambda + \frac{1}{2}\Delta\lambda$ ). Из этих определений, очевидно, следует

$$0 \leq \epsilon, \quad \epsilon_\lambda \leq 1. \quad (3.29)$$

Излучательная способность  $\epsilon$  реальных тел зависит в общем случае от температуры.

Дальнейшие теоретические исследования позволили Кирхгофу сделать важный вывод, что поглощательные и излучательные свойства любых тел при данных температуре и длине волны связаны соотношением

$$\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda. \quad (3.30)$$

Этот результат, известный как закон излучения Кирхгофа, справедлив даже в тех случаях, когда тела не находятся в термодинамическом равновесии с окружающей средой и их температуры различны. Последнее утверждение очень важно, так как в солнечной энергетике одним из таких тел является Солнце, температура которого значительно выше температуры приемника солнечной энергии. Падающий на приемник поток солнечного излучения, испускаемый поверхностью Солнца с температурой 5800 К, имеет максимум интенсивности при  $\lambda \approx 0,5$  мкм, а максимум интенсивности поверхности приемника с температурой 350 К соответствует длине волны  $\lambda \approx 10$  мкм. Это означает, что максимальное значение спектрального коэффициента излучения равно  $\epsilon_{\lambda=0,5 \text{ мкм}}$ , а максимальное значение спектрального коэффициента поглощения  $\alpha_{\lambda=10 \text{ мкм}}$ , но значения этих коэффициентов должны быть равны.

Из закона Кирхгофа совсем не следует, что излучаемая телом на какой-то длине волны энергия равна поглощаемой им энергии на этой же длине волны, а следует лишь равенство коэффициентов  $\alpha_\lambda$  и  $\epsilon_\lambda$ , но не потоков  $A_{\phi\lambda, in}$  и  $A_{\phi\lambda, out}$ .

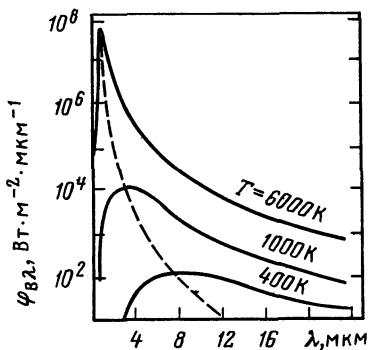


Рис. 3.12. Спектр излучения черного тела. Штриховая кривая соответствует положению максимумов излучения

**Излучение тел.** Спектральная плотность потока энергии, излучаемой черным телом при абсолютной температуре  $T$ , равна

$$\varphi_{B\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)}, \quad (3.31)$$

где  $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$  и  $C_2 = 0,0144 \text{ м} \cdot \text{К}$  — фундаментальные физические постоянные. Эту формулу, известную как закон излучения Планка, можно получить на основе квантовой теории, а константы  $C_1$  и  $C_2$  выразить через постоянную Планка, скорость света и постоянную Больцмана. Графически зависимость  $\varphi_{B\lambda}$  от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$  показана на рис. 3.12. Из графика видно, что длина волны, соответствующая максимуму излучения (максимум функции  $\varphi_{B\lambda}$  показан штриховой линией), увеличивается с уменьшением температуры  $T$ . Действительно, дифференцируя (3.31) по  $\lambda$  и полагая  $d\varphi_{B\lambda}/d\lambda = 0$ , получаем

$$\lambda_{\text{max}} T = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}. \quad (3.32)$$

Эта зависимость известна как *закон смещения Вина*.

При  $T \geq 700 \text{ К}$  значительная доля излучения приходится на видимую область спектра, поэтому цвет поверхностей тел с такой температурой отличен от черного. Из рис. 3.12 видно, что горячие тела излучают гораздо больше энергии, чем холодные. Действительно, из (3.31) следует, что плотность потока излучения черного тела (полная испускательная способность) равна

$$\varphi_B = \int_0^{\infty} \varphi_{B\lambda} d\lambda = \sigma T^4, \quad (3.33)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана—Больцмана.

Из (3.33) следует, что поток излучения реального тела с излучательной способностью  $\varepsilon$ , площадью  $A$  и абсолютной температурой  $T$  равен

$$P_r = \varepsilon \sigma A T^4. \quad (3.34)$$

Следует подчеркнуть, что (3.34) дает значение энергии, излучаемой телом в единицу времени, но эта энергия не всегда экви-

валентна результирующему потоку излучения, идущему от тела [подробнее см. (3.39)].

В расчетах удобнее использовать не функцию распределения (3.31), а безразмерную функцию  $D$ :

$$D = \int_0^{\lambda} \varphi_{B\lambda} d\lambda / \sigma T^4, \quad (3.35)$$

которую можно представить в виде функции одной переменной  $v = \lambda T$ . Значения этой функции представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Распределение энергии излучения черного тела

$$D(\lambda T) = \left( \int_0^{\lambda} \varphi_{B\lambda} d\lambda \right) / \sigma T^4$$

$\lambda T$ , мкм·К	$D(\lambda T)$	$\lambda T$ , мкм·К	$D(\lambda T)$	$\lambda T$ , мкм·К	$D(\lambda T)$
500	0,0000	4400	0,5488	8300	0,8676
600	0,0000	4500	0,5843	8400	0,8711
700	0,0000	4600	0,5793	8500	0,8745
800	0,0000	4700	0,5937	8600	0,8778
900	0,0001	4800	0,6075	8700	0,8810
1000	0,0003	4900	0,6209	8800	0,8841
1100	0,0009	5000	0,6337	8900	0,8871
1200	0,0021	5100	0,6461	9000	0,8899
1300	0,0043	5200	0,6579	9100	0,8927
1400	0,0077	5300	0,6693	9200	0,8954
1500	0,0128	5400	0,6803	9300	0,8980
1600	0,0197	5500	0,6909	9400	0,9005
1700	0,0285	5600	0,7010	9500	0,9030
1800	0,0393	5700	0,7107	9600	0,9054
1900	0,0521	5800	0,7201	9700	0,9076
2000	0,0667	5900	0,7291	9800	0,9099
2100	0,0830	6000	0,7378	9900	0,9120
2200	0,1009	6100	0,7461	10 000	0,9141
2300	0,1200	6200	0,7541	11 000	0,9318
2400	0,1402	6300	0,7618	12 000	0,9450
2500	0,1613	6400	0,7692	13 000	0,9550
2600	0,1831	6500	0,7763	14 000	0,9628
2700	0,2053	6600	0,7831	15 000	0,9689
2800	0,2279	6700	0,7897	16 000	0,9737
2900	0,2506	6800	0,7961	17 000	0,9776
3000	0,2732	6900	0,8022	18 000	0,9807
3100	0,2958	7000	0,8080	19 000	0,9833
3200	0,3181	7100	0,8137	20 000	0,9855
3300	0,3407	7200	0,8191	30 000	0,9952
3400	0,3617	7300	0,8244	40 000	0,9978
3500	0,3829	7400	0,8295	50 000	0,9988
3600	0,4036	7500	0,8343	60 000	0,9993
3700	0,4238	7600	0,8390	70 000	0,9995
3800	0,4434	7700	0,8436	80 000	0,9996
3900	0,4624	7800	0,8479	90 000	0,9997
4000	0,4829	7900	0,8521	100 000	0,9998
4100	0,4987	8000	0,8562	$\infty$	1,0000
4200	0,5160	8100	0,8601		
4300	0,5327	8200	0,8639		

**Пример 3.5.** Определите плотность потока излучения черного тела при температуре 2000° С в спектральном диапазоне от 0,4 до 0,7 мкм.

**Решение.**  $T = 2000 + 273 = 2270$  К, и для  $\lambda_1 = 0,4$  мкм  $\nu_1 = \lambda_1 T = 910$  мкм·К, для  $\lambda_2 = 0,7$  мкм  $\nu_2 = \lambda_2 T = 1590$  мкм·К.

Используя (3.35) и табл. 3.3, определяем искомую величину:

$$\int_0^{\lambda_2} \varphi_{B\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} \varphi_{B\lambda} d\lambda = \sigma T^4 [D(\nu_2) - D(\nu_1)] = (5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}) \times \\ \times (2273 \text{ К})^4 (0,0190 - 0,0001) = 28,6 \text{ кВт/м}^2.$$

**Лучистый теплообмен между черными телами.** Все тела и небо являются источниками излучения, поэтому при определении количества энергии, теряемой или приобретаемой телом в процессе излучения, необходимо учитывать взаимное влияние излучающих тел друг на друга.

Рассмотрим два тела 1 и 2 (рис. 3.13), находящихся в поле излучения друг друга. Результирующий поток излучения, которым они обмениваются в процессе взаимного поглощения энергии друг друга, зависит от их формы и свойств поверхности. В частности, необходимо знать долю излучения, испускаемого телом 1, которая достигает тела 2, и наоборот.

Предположим для простоты, что поверхности обоих тел черные, диффузно излучающие и что окружающая тела среда не поглощает излучения (*диффузно излучающей* называется поверхность, излучающая равномерно во всех направлениях; излучение такой поверхности невозможно сконцентрировать в луч). Большинство непрозрачных тел, кроме зеркал, являются диффузными или изотропными излучателями. Коэффициент формы  $F_{ij}$  есть доля излучения тела  $i$ , достигающего тела  $j$ . Он зависит только от геометрических характеристик поверхности тела и не зависит от ее оптических свойств.

Пусть  $\varphi_B$  — плотность потока излучения, испускаемого поверхностью черного тела в окружающее пространство, тогда поток лучистой энергии тела 1, падающий на поверхность тела 2, равен

$$P'_{12} = A_1 \varphi_{B1} F_{12}. \quad (3.36)$$

Аналогично поток, падающий на тело 1, равен

$$P'_{21} = A_2 \varphi_{B2} F_{21}. \quad (3.37)$$

Если эти тела находятся в тепловом равновесии, т. е. если  $P'_{12} = P'_{21}$  и  $T_1 = T_2$ , то отсюда следует, что

$$\varphi_{B1} = \sigma T_1^4 = \sigma T_2^4 = \varphi_{B2}$$

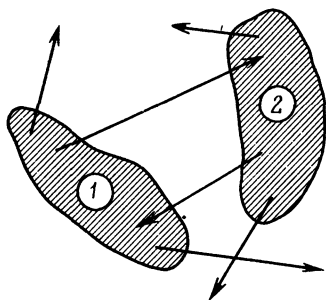


Рис. 3.13. Радиационный теплообмен двух (черных) тел

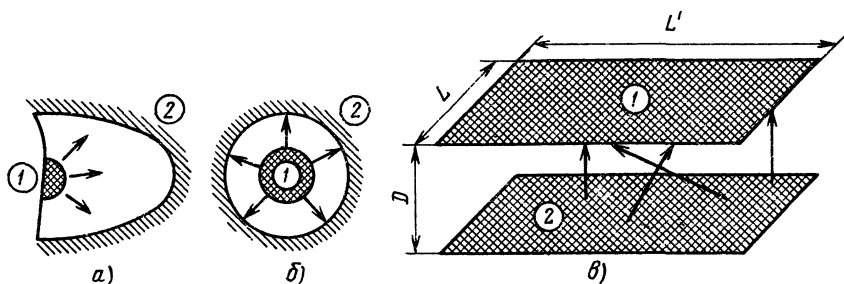


Рис. 3.14. Примеры геометрии поверхностей, для которых коэффициент формы  $F_{12} = 1$ :

выпуклая или плоская поверхность 1, полностью окруженная поверхностью 2 (а); одна цилиндрическая поверхность 1 внутри другой 2 (б); две близко расположенные параллельные пластины ( $L/D, L'/D \gg 1$ ) (в)

и из (3.36) и (3.37)

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21}. \quad (3.38)$$

Это геометрическое соотношение не содержит переменных, зависящих от свойств поверхности и температуры тел, поэтому справедливо при любых значениях этих параметров.

Если же температура рассматриваемых тел различна, то результирующий поток излучения от тела 1 к телу 2 с учетом (3.38) равен

$$P_{12} = P'_{12} - P'_{21} = \varphi_{B1} A_1 F_{12} - \varphi_{B2} A_2 F_{21} = \sigma T_1^4 A_1 F_{12} - \sigma T_2^4 A_2 F_{21} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_1 F_{12} \quad (3.39)$$

или, если легче вычислить коэффициент  $F_{21}$ ,

$$P_{12} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_2 F_{21}. \quad (3.40)$$

В общем случае определение параметра  $F_{ij}$  требует сложных вычислений, поэтому в учебниках приводят его значения для некоторых типичных случаев. Приемники солнечного излучения часто подобны изображенным на рис. 3.14, для которых коэффициент формы равен единице.

**Лучистый энергообмен между серыми телами.** Серые тела имеют диффузно излучающую поверхность, у которой коэффициенты  $\varepsilon = \alpha = (1 - \rho)$  — постоянные, не зависящие от температуры поверхности, длины волны и угла падения излучения. Такое тело хорошо моделирует свойства многих непрозрачных тел, находящихся в потоке солнечного излучения, когда их температура не превышает  $200^\circ \text{C}$  и спектральный диапазон излучения — от 0,3 до 15 мкм.

При анализе лучистого энергообмена между серыми телами достаточно учитывать поглощение, отражение и переизлучение. В результате для этих тел можно составить систему уравнений, которая позволяет определить поток излучения от каждого тела, если известны их температуры, и наоборот. В случае только двух тел поток лучистой энергии от тела 1 к телу 2 можно

представить в виде

$$P_{12} = \sigma A_1 F'_{12} (T_1^4 - T_2^4), \quad (3.41)$$

где обменный коэффициент  $F'_{12}$  зависит от коэффициента формы  $F_{12}$ , отношения площадей  $A_1/A_2$  и излучательных свойств поверхностей  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Сравнивая (3.39) и (3.41), получаем, что для черных тел  $F'_{12} = F_{12}$ .

**Термическое сопротивление при лучистом теплообмене.** Уравнение (3.41) запишем в виде

$$P_{12} = A_1 F'_{12} \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) (T_1 - T_2). \quad (3.42)$$

Сравнивая (3.42) с (3.1), можно заключить, что сопротивление потоку излучения тела  $l$  равно

$$R_r = [A_1 F'_{12} \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)]^{-1}. \quad (3.43)$$

В общем случае параметр  $R_r$  сильно зависит от температуры. Но так как  $T_1$  и  $T_2$  в (3.43) — абсолютные температуры, то часто выполняется условие  $(T_1 - T_2) \ll T_1, T_2$ . В этом случае (3.43) можно свести к виду

$$R_r \approx 1 / (4\sigma A_1 F'_{12} \bar{T}^3), \quad (3.44)$$

где  $\bar{T} = (1/2)(T_1 + T_2)$  — средняя температура.

*Пример 3.6.* Определение характерных значений  $R_r$  и  $P_r$ . Две пластины площадью  $1 \text{ м}^2$  каждая (см. пример 3.2) имеют излучательную способность соответственно 0,9 и 0,2. Определите термическое сопротивление  $R_r$  и поток излучения между ними  $P_r$ , если  $T_1 = 350 \text{ К}$ , а  $T_2 = 300 \text{ К}$ .

*Решение.* Используя (3.44) и табл. 3.4, имеем

$$R_r = \frac{(1/0,9) + (1/0,2) - 1}{4(1 \text{ м}^2)(5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4})(325 \text{ К})^3} = 0,66 \text{ К/Вт}.$$

Это значение сравнимо со значением конвективного термического сопротивления из примера 3.2.

Поток лучистой энергии  $P_r = 50 \text{ К} / (0,66 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}) = 75 \text{ Вт}$ .

Т а б л и ц а 3.4. Радиационный теплообмен между серыми телами

Излучающая система	Результирующий тепловой поток $P_{12}$
Тело 1 в однородном пространстве 2	$P_{12} = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$
Две близко расположенные поверхности 1 и 2	$P_{12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1}$
Две поверхности, образующие замкнутую полость	$P_{12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$
Тело 1 в замкнутой полости 2	$P_{12} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$

### 3.6. Свойства прозрачных веществ

У идеально прозрачных веществ коэффициент пропускания  $\tau=1$ , отражения  $\rho=0$  и поглощения  $\alpha=0$ . В действительности же у прозрачных материалов (например, у стекла)  $\tau \sim 0,9$  при углах падения излучения  $\theta \leq 70^\circ$ , при больших углах коэффициент  $\tau$  быстро уменьшается, а коэффициент отражения  $\rho$  возрастает.

Согласно уравнениям Максвелла для электромагнитного поля коэффициент отражения вещества зависит от его показателя преломления и угла падения излучения. Для большинства обычных стекол при углах падения, меньших  $40^\circ$  (типичные для практики случаи),  $\rho \approx 0,08$  в видимом диапазоне спектра. В этом случае при отсутствии поглощения

$$\tau_r = 1 - \rho \approx 0,92. \quad (3.45)$$

При прохождении излучения через любую реальную среду часть излучения поглощается. Ослабление излучения в зависимости от пройденного в среде пути  $x$  описывается законом Бугера — Ламберта, по которому доля излучения, прошедшего путь  $x$ , равна

$$\tau_a = \exp(-Kx), \quad (3.46)$$

где показатель поглощения  $K$  изменяется от  $0,04 \text{ см}^{-1}$  (для высококачественных стекол) до  $0,30 \text{ см}^{-1}$  (для обычных оконных стекол, имеющих зеленоватый оттенок из-за примесей железа).

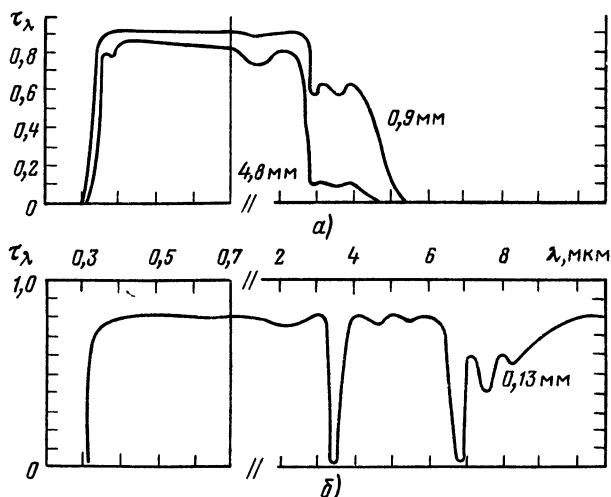


Рис. 3.15. Зависимость спектрального коэффициента пропускания от длины волны для стекла ( $0,15\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ) толщиной 4,8 и 0,9 мм (а) и полиэтилена (б). Обратите внимание на разрыв графика при  $\lambda=0,7 \text{ мкм}$



Стекла без примеси железа имеют меньший коэффициент поглощения, чем обычные оконные, и более пригодны для использования в солнечной энергетике.

С учетом коэффициентов  $\tau_r$  и  $\tau_a$  коэффициент пропускания

$$\tau = \tau_r \tau_a. \quad (3.47)$$

На рис. 3.15, а показана зависимость спектрального коэффициента пропускания обычного стекла  $\tau_\lambda = \tau_r \tau_{\lambda a}$  от его толщины и длины волны падающего излучения. Следует обратить внимание на очень плохое пропускание стеклом излучения в тепловой инфракрасной области спектра ( $\lambda > 3$  мкм). Это означает, что стекло очень хорошо поглощает излучение в этом спектральном диапазоне. Полиэтилен, как видно из рис. 3.15, б, пропускает излучение и в видимом, и в инфракрасном диапазоне. У синтетических материалов, подобных майлару, со сложным молекулярным строением коэффициент пропускания находится где-то между коэффициентами для стекла и полиэтилена.

### 3.7. Теплоперенос посредством теплоносителя

Теплоперенос при свободной и вынужденной конвекции (см. § 3.4) осуществляется за счет перемещения частиц жидкости или газа. При конвективном теплопереносе большое значение имеют процессы в температурном пограничном слое. Однако на практике во многих процессах теплопереноса с помощью движущейся жидкости стадия теплообмена между поверхностью и жидкостью или отсутствует, или рассматривается отдельно. Примером может служить процесс переноса тепла от приемника солнечной энергии к аккумулятору тепла с помощью теплоносителя. При анализе таких процессов рассматривается только стадия теплопереноса тепла теплоносителем.

**Теплоперенос без фазовых превращений в теплоносителе.** Рассмотрим течение жидкости в нагретой трубе (рис. 3.16). Согласно (2.6) количество тепла, выносимого жидкостью в единицу времени из контрольного объема, которое, очевидно, передается ей при теплообмене с трубой, равно

$$P_m = \dot{m}c(T_3 - T_1), \quad (3.48)$$

где  $\dot{m}$  — массовый расход жидкости в трубе, кг/с, а  $T_1$  и  $T_3$  — температуры жидкости в начальном и конечном сечении конт-

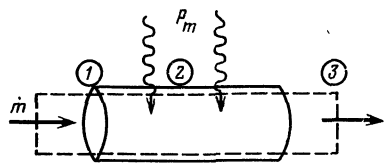


Рис. 3.16. Течение в трубе при наличии теплопровода. Предполагается, что к жидкости подводится в единицу времени количество тепла, равное  $P_m = \dot{m}c(T_3 - T_1)$ , при этом сам процесс переноса тепла от стенки трубы в жидкость (2) не рассматривается (штриховой контур — контрольный объем)

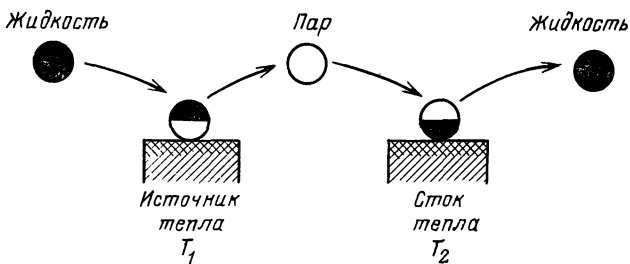


Рис. 3.17. Теплоперенос при наличии фазовых переходов. Жидкость, испаряясь, поглощает тепло, а затем, конденсируясь, отдает его

рольного объема соответственно. Если температуры  $T_1$  и  $T_3$  известны (например, из экспериментов), мощность  $P_m$  можно рассчитать, не вдаваясь в детали процесса теплообмена в трубе. Термическое сопротивление этого процесса определяется выражением

$$R_m = (T_3 - T_1) / P_m = 1 / \dot{m}c. \quad (3.49)$$

Следует подчеркнуть, что количество тепла  $P_m$ , передаваемого трубой жидкости, зависит от ее скорости, т. е. от расхода, поэтому температура  $T_3$  не является независимой переменной, как в случае теплопроводности, излучения и свободной конвекции. Это следует иметь в виду, пользуясь (3.49).

**Теплоперенос при наличии фазовых превращений в теплоносителе.** Наиболее эффективен теплоперенос, в котором участвует скрытая теплота испарения или конденсации. Например, скрытая теплота испарения 1 кг  $H_2O$  равна 2,4 МДж, что гораздо больше, чем требуется для нагрева 1 кг  $H_2O$  на  $100^\circ C$  (0,42 МДж). На рис. 3.17 показана схема теплопереноса, использующего фазовые превращения, когда тепло от источника передается приемнику соответственно при испарении и конденсации жидкости. Переносимая при этом в единицу времени тепловая энергия

$$P_m = \dot{m}L, \quad (3.50)$$

где  $\dot{m}$  — массовая скорость испарения или конденсации жидкости;  $L$  — скрытая теплота испарения. Данная зависимость наиболее удобна, когда известна  $\dot{m}$  (например, из экспериментов).

Теоретическое определение скорости испарения чрезвычайно сложно, так как этот процесс зависит от многих факторов, таких как плотность, вязкость, теплоемкость и теплопроводность жидкости и пара, скрытая теплота фазового перехода, разность температур и давлений, размер и форма поверхностей, их способность создавать центры конденсации. Более подробно об этом можно узнать в специальной литературе.

Процессы испарения и конденсации протекают практически при постоянной температуре, и теплоперенос, использующий скрытую теплоту фазового перехода, не зависит непосредственно от температуры источника  $T_1$  и приемника  $T_2$  тепла, тем не менее термическое сопротивление такого процесса обычно определяют так:

$$R_m = (T_1 - T_2) / \dot{m}L. \quad (3.51)$$

### 3.8. Смешанный теплоперенос и его тепловая цепь

**Тепловая цепь, состоящая из тепловых сопротивлений.** В § 3.2 показано, как при анализе процессов теплопереноса используется метод тепловых цепей с параллельным, последовательным и комбинированным соединением термических сопротивлений. В этом методе совершенно не важна природа процесса теплопереноса (теплопроводность, конвекция и т. д.), стоящая за каждым термическим сопротивлением. При построении тепловой цепи очень важно не упустить сколько-нибудь значительных составляющих теплового потока и соответствующих им термических сопротивлений. Ниже (см. гл. 5) приведено много связанных с этим вопросом примеров.

**Теплоемкость.** Электрическую аналогию для процессов теплопереноса можно еще более развить. Тепловая энергия может накапливаться в различных телах точно так же, как в электрических цепях накапливается электрическая энергия в конденсаторах.

Рассмотрим для примера емкость с горячей водой, окруженную средой с постоянной температурой  $T_0$  (рис. 3.18, а). Вода массой  $m$  с удельной теплоемкостью  $c$  имеет температуру  $T_1$ , превышающую  $T_0$ . Тепловой поток от воды в окружающее пространство определяется уравнением

$$-mc \frac{d}{dt} (T_1 - T_0) = \frac{(T_1 - T_0)}{R_{10}}, \quad (3.52)$$

где знак минус означает, что  $T_1$  уменьшается, если величина  $(T_1 - T_0)$  положительна:  $R_{10}$  — результирующее термическое сопротивление тепловому потоку, включающее конвекцию, излу-

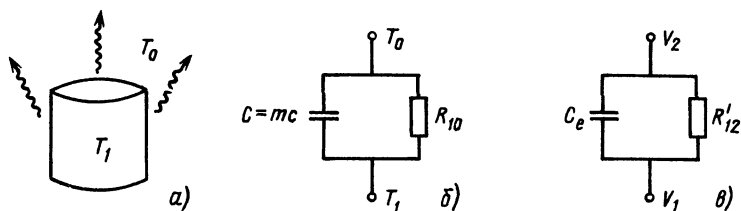


Рис. 3.18. Охлаждение горячего предмета: физическая модель (а); модель тепловой цепи (б); электрическая модель (в)

чение и теплопроводность (рис. 3.18, б). В аналогичной электрической цепи (рис. 3.18, в) электрический ток при разряде конденсатора и потенциалы обкладок  $V_1$  и  $V_2$  определяется уравнением

$$\frac{dq}{dt} = -C_e \frac{d}{dt} (V_1 - V_2) = \frac{V_1 - V_2}{R_{12}}, \quad (3.53)$$

где  $q = C_e(V_1 - V_2)$ .

Нетрудно заметить полную аналогию между (3.52) и (3.53). Действительно, если мы положим  $v = T_1 - T_0$ ,  $C = mc$  в (3.52) и  $v = V_1 - V_2$ ,  $C = C_e$  в (3.53), то эти уравнения станут тождественными и, следовательно, тождественными будут их решения.

Таким образом, если мы введем понятие теплоемкости (тепловой емкости)  $C = mc$ , Дж/К, то можно установить полную аналогию между параметрами и элементами тепловой и электрической цепи. Эта аналогия представлена в табл. 3.6.

При построении электрических аналогов тепловой цепи следует быть осторожным при определении значений температур (соответственно потенциалов), участков, параллельно которым включена теплоемкость.

Таблица 3.5. Аналогия между термодинамическими и электрическими величинами

Термодинамические величины			Электрические величины		
Величина	Обозначение	Единицы	Величина	Обозначение	Единицы
Температура	$T$	К	Потенциал	$V$	В
Поток тепла	$P$	Вт	Ток	$I$	А
Термическое сопротивление	$R$	К/Вт	Сопротивление	$R$	Ом, В/А
Теплоемкость	$C$	Дж/К	Емкость	$C$	Ф, А·с/В

### Задачи

3.1. Объясните подробно, почему при последовательном соединении термических сопротивлений (например, на рис. 3.2, б)

$$R_{13} = R_{12} + R_{23}.$$

*Указание:* рассмотрите, как связаны потоки тепла в различных сопротивлениях.

3.2. Используя определения (3.17) и (3.22), покажите, что параметры  $Nu$  и  $Ra$  — безразмерные величины.

3.3. Слой жидкости заключен между двумя горизонтальными пластинами (см. табл. 3.1). Нижняя пластина с ординатой  $z=0$  имеет температуру  $T_1 + \Delta T$ , верхняя пластина расположена на высоте  $z=d$  и ее температура  $T_1$ . Используя приведенные на рис. 3.19 измеренные профили температур, определите толщину температурного пограничного слоя  $\delta$  для представленных на рисунке чисел Рэлея. Полагая  $X=d$ , определите значения чисел Нуссельта в этих случаях. *Замечание:* только в одном случае толщину температурного пограничного слоя

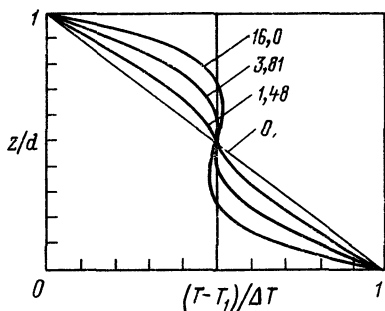


Рис. 3.19. Распределение температуры в слое жидкости высотой  $d$ , ограниченном двумя плоскими стенками с разной температурой. Числами у кривых обозначено отношение  $Ra/Ra_*$ , где  $Ra_* = 1700$ , ниже которого конвекция отсутствует

(3.13) можно определить непосредственно, а именно, она равна просто высоте слоя жидкости в окрестности пластины, если температура в этом слое линейно зависит от высоты.

3.4. Рассчитайте излучательные потери тепла в течение 1 ч кастрюлей из примера 3.3 и покажите, что они действительно меньше конвективных потерь тепла.

3.5. Сформулированный Ньютоном закон охлаждения гласит, что скорость охлаждения тела пропорциональна разности температур тела и окружающей среды, т. е. скорость охлаждения не зависит от других факторов, например от ветра. Рассчитайте конвективные потери тепла плоской пластиной площадью  $1 \text{ м}^2$  с температурой  $50^\circ \text{С}$  в воздух с температурой  $20^\circ \text{С}$  при скорости ветра: а)  $0 \text{ м/с}$ , б)  $5 \text{ м/с}$ , в)  $10 \text{ м/с}$

3.6. Рассчитайте тепловой поток от пластины задачи 3.5 при тех же скоростях ветра, суммируя тепловые потоки при вынужденной и свободной конвекции.

3.7. Потери тепла через окно.

В комнате два окна высотой  $1,5 \text{ м}$  и шириной  $0,8 \text{ м}$  со стеклами толщиной  $5 \text{ мм}$  (рис. 3.20). Температура в комнате  $20^\circ \text{С}$ , температура наружного воз-

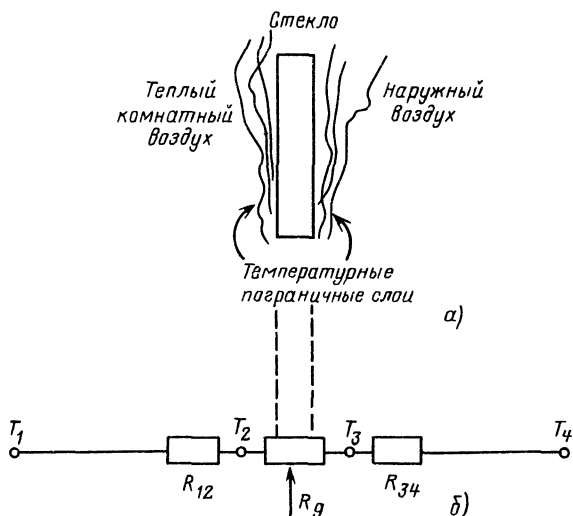


Рис. 3.20. Теплопередача через окно (см. задачу 3.7)

духа  $0^\circ \text{C}$ . Безветрие. Рассчитайте потери тепла через стекло; а) предполагая (ошибочно), что единственным термическим сопротивлением тепловому потоку является теплопроводность стекла, и б) учитывая также (правильно) термическое сопротивление температурных пограничных слоев у поверхностей стекла.

*Указание:* в первом приближении можно положить  $T_2 \approx T_3 \approx (1/2)(T_1 + T_2)$ . Потом проверьте справедливость этого предположения.

### Решения

3.3.  $R_a/R_{a^*} = 0, 1,48; 3,8, 16$

$Nu_{\text{эксп}} = 1, 1,5; 2,1; 3,3$

3.4. 26 кДж/ч при  $\epsilon = 0,10, T_1 = 373 \text{ K}$  (см. табл. 3.4).

3.5. а) 5,7 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ); б) 25 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ); в) 44 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ). Погрешность — около 50%.

3.6.  $h_{\text{полн}} = h_{\text{вынужд}} + h_{\text{воб}} = 4,8; 13,7; 43,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ , использовать табл. 3.1 и 3.2.

3.7. а) 10 кВт, б)  $r_v = 0,032 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$  с обеих сторон,  $R_{14} = 0,029 \text{ K}/\text{Вт}$ ,  $P_{14} = 0,7 \text{ кВт}$ .

## Глава 4

# СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

## 4.1. Введение

Наибольшая плотность потока солнечного излучения, приходящего на Землю, составляет примерно  $1 \text{ кВт}/\text{м}^2$  в диапазоне длин волн  $0,3—2,5 \text{ мкм}$ . Это излучение называется *коротковолновым* и включает видимый спектр. Для населенных районов в зависимости от места, времени суток и погоды потоки солнечной энергии, достигающие Земли, меняются от 3 до  $30 \text{ МДж}/\text{м}^2$  в день. Солнечное излучение характеризуется энергией фотонов в максимуме распределения порядка 2 эВ, определенной по температуре поверхности Солнца около  $6000 \text{ K}$ . Это — энергетический поток от доступного источника гораздо более высокой температуры, чем у традиционных технических источников. Тепловая энергия его может быть использована с помощью стандартных технических устройств (например, паровых турбин) и, что более важно, методами, разработанными на основе фотохимических и фотофизических взаимодействий.

Потоки энергии излучения, связывающие атмосферу с поверхностью Земли, тоже порядка  $1 \text{ кВт}/\text{м}^2$ , но они перекрывают другой спектральный диапазон — от 5 до  $25 \text{ мкм}$ , называемый *длинноволновым*, с максимумом около  $10 \text{ мкм}$ . По спектру коротко- и длинноволновое излучения расположены друг от друга достаточно далеко и могут быть легко различимы.

Основная цель этой главы — показать, можно ли использовать энергию солнечного излучения в качестве энергии, подво-

димой к солнечному устройству, ориентированному определенным образом в определенном месте и в определенное время. Во-первых, обсудим, на какое количество солнечной энергии вне атмосферы Земли можно рассчитывать (§ 4.2). Далее рассмотрим зависимость количества подходящей к солнечному устройству энергии от геометрических факторов, таких как географическая широта (§ 4.4, 4.5), и от атмосферных факторов, таких как поглощение парами воды (§ 4.6). В двух последних параграфах кратко обсуждается вопрос об измерениях солнечной энергии, а также более сложный вопрос о возможности использования других метеорологических данных для оценки этой энергии.

#### 4.2. Космическое солнечное излучение

Вследствие реакций ядерного синтеза в активном ядре Солнца достигаются температуры до  $10^7$  К; спектральное распределение потока излучения из ядра неравномерно. Это излучение поглощается внешними неактивными слоями, нагретыми до  $T=5800$  К, в результате чего спектральное распределение солнечного излучения становится относительно непрерывным.

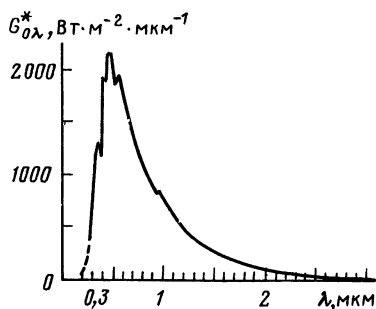
На рис. 4.1 показано спектральное распределение лучистой энергии на среднем расстоянии от Солнца до Земли, не искаженное влиянием атмосферы. Видно, что это распределение по форме, длине волны в максимуме и полной энергии излучения подобно распределению интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 5800 К (ср. с рис. 3.12). Площадь под этой кривой равна солнечной постоянной  $G_0=1353$  Вт/м<sup>2</sup>, которая представляет собой плотность потока излучения, падающего на площадку, перпендикулярную этому потоку и расположенную над атмосферой на расстоянии  $1,496 \times 10^8$  км от Солнца (среднее расстояние от Земли до Солнца).

На самом деле плотность потока излучения, достигающего верхней границы атмосферы, отличается от солнечной постоянной вследствие флуктуаций потока солнечной энергии менее чем на  $\pm 1,5\%$  и вследствие предсказуемых изменений расстояния Земля — Солнце, вызванных слабой эллиптичностью земной орбиты, — на  $\pm 4\%$  в течение года.

Солнечный спектр можно разделить на три основные области:

1) ультрафиолетовое излучение ( $\lambda < 0,4$  мкм) — 9% интенсивности;

Рис. 4.1. Спектральное распределение солнечного излучения вне атмосферы



2) видимое излучение ( $0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$ ) — 45% интенсивности;

3) инфракрасное излучение ( $\lambda > 0,7 \text{ мкм}$ ) — 46% интенсивности.

Вклад в поток солнечной радиации излучения с длиной волны больше 2,5 мкм пренебрежимо мал, поэтому все три области относятся к коротковолновому излучению.

### 4.3. Составляющие излучения

Солнечная энергия достигает атмосферы в виде направленного потока солнечного космического излучения. На поверхности Земли регистрируется как прямой поток, так и рассеянное атмосферой излучение. На рис. 4.2 показано, как это происходит.

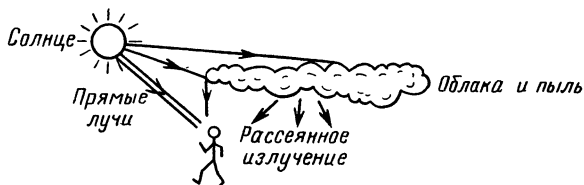


Рис. 4.2. Прямое и рассеянное солнечное излучение

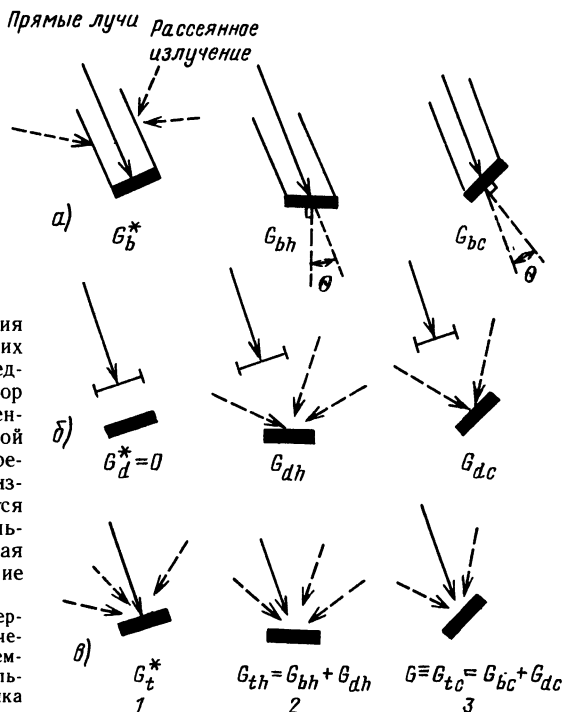


Рис. 4.3. Способы измерения различных составляющих солнечного излучения. Предполагается, что детектор представляет собой зачерненную поверхность единичной площади с фильтром, обрезающим длинноволновое излучение: регистрируются только прямые лучи (а); только диффузная составляющая (б); суммарное излучение (в):

1 — приемная площадка, перпендикулярная потоку излучения; 2 — горизонтальная приемная площадка; 3 — произвольный угол наклона приемника



На практике прямые лучи от диффузной составляющей отличаются тем, что направленный поток может быть сфокусирован. Даже в ясный день имеется некоторое количество рассеянного излучения. Отношение интенсивности направленного потока к полной интенсивности излучения меняется от 0,9 в ясный день до нуля в очень пасмурный день.

Важно различать компоненты солнечного излучения и выделить площадку, на которой измеряется облученность. Мы использовали следующие индексы для обозначений на рис. 4.3:  $b$  — прямые лучи,  $d$  — рассеянное излучение,  $t$  — полное излучение,  $h$  — горизонтальная площадка,  $c$  — приемная площадка. Звездочкой обозначен поток на площадку, перпендикулярную прямым лучам. Индекс 0 обозначает величины вне атмосферы. Если индексов нет вообще, это аналогично сразу двум индексам  $c$  и  $t$ , так что  $G = G_{ic}$ . Из рис. 4.3 следует

$$G_{bc} = G_b^* \cos \theta, \quad (4.1)$$

где  $\theta$  — угол между направлением потока излучения и нормалью к поверхности приемника. В частности,

$$G_{bh} = G_b^* \cos \theta_z, \quad (4.2)$$

где  $\theta_z$  — угол между направлением потока и вертикалью. Полная облученность произвольной площадки есть сумма интенсивности направленного и рассеянного излучений:

$$G_t = G_b + G_d. \quad (4.3)$$

#### 4.4. Геометрия Земли и Солнца

**Определения.** Читателю будет полезно иметь под рукой сферу, на которой можно отмечать точки и плоскости, показанные на следующей диаграмме.

На рис. 4.4 изображена Земля. Она обращается за 24 ч вокруг своей оси, которая обозначена точками северного и южного

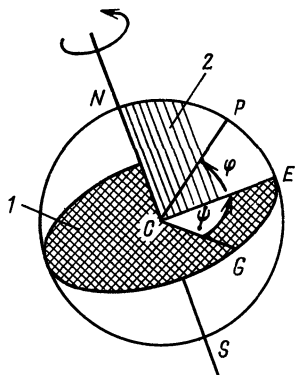


Рис. 4.4. Схема определения широты  $\varphi$  и долготы  $\psi$  (подробнее см. в тексте):  
1 — экваториальная плоскость;  
2 — меридиональная плоскость

полюсов  $N$  и  $S$ . Ось перпендикулярна экваториальной плоскости Земли. На рис. 4.4 точка  $C$  — центр Земли. Точка  $P$  на поверхности Земли характеризуется широтой  $\varphi$  и долготой  $\psi$ . Величина  $\varphi$  положительна для точек, лежащих севернее экватора, отрицательна — для точек южнее экватора. Долгота  $\psi$  положительна к востоку от Гринвича (Великобритания). Вертикальная плоскость, построенная с севера на юг через точку  $P$ , — локальная меридиональная плоскость. Точки  $E$  и  $G$  на рис. 4.4 — точки на экваторе, имеющие те же долготы, что и точка  $P$  и Гринвич соответственно.

Один раз каждые 24 ч Солнце попадает в меридиональную плоскость. Это — полдень по солнечному времени для всех точек, имеющих данную долготу. Полдень по солнечному времени не обязательно совпадает с двенадцатью часами, поскольку часы показывают так называемое *декретное время*, установленное единым для больших пространств местности в пределах  $15^\circ$  долготы, называемых часовыми поясами. Перевод часов на «летнее время» означает, что солнечное и декретное время могут различаться более чем на 1 ч. Более того, эллиптичность земной орбиты приводит к тому, что период между солнечными полднями составляет не точно 24 ч, хотя в среднем этот интервал составляет 24,0000 ч. Поправка не превышает 15 мин. Часовой угол  $\omega$  в точке  $P$  есть угол, на который Земля поворачивается с момента солнечного полдня. Так как Земля поворачивается на  $(360^\circ/24 \text{ ч}) = 15^\circ$  за 1 ч, то часовой угол определяется выражением

$$\omega = (15^\circ \text{ ч}^{-1})(t_{solar} - 12 \text{ ч}) = (15^\circ \text{ ч}^{-1}) \cdot (t_{zone} - 12 \text{ ч}) + \omega_{eq} + (\psi - \psi_{zone}), \quad (4.4)$$

где  $t_{solar}$  и  $t_{zone}$  — соответственно локальное солнечное и декретное время (в часах);  $\psi_{zone}$  — долгота, на которой находится Солнце, когда  $t_{zone}$  соответствует полудню (когда солнечное и декретное время совпадают). Малым поправочным членом  $\omega_{eq}$  чаще всего можно пренебречь. Согласно (4.4) угол  $\omega$  положителен вечером и отрицателен в утренние часы.

Земля обращается вокруг Солнца за год. Направление земной оси остается фиксированным в пространстве под углом  $\delta_0 = 23,5^\circ$  к нормали к плоскости вращения (рис. 4.5). Угол между направлением к Солнцу и экваториальной плоскостью называется склонением  $\delta$  и является мерой сезонных изменений. Мысленно проведем линию от центра Земли до Солнца, пересекающую поверхность Земли в точке  $P$  на рис. 4.4. В этом случае  $\delta$  представляет собой угол  $\varphi$  на рис. 4.4. Таким образом, склонение есть широта точки, для которой Солнце находится в зените в полдень по солнечному времени. Как следует из рис. 4.6, в северном полушарии  $\delta$  плавно меняется от  $\delta_0 = +23,5^\circ$  в период летнего солнцестояния до  $\delta_0 = -23,5^\circ$  в период зим-

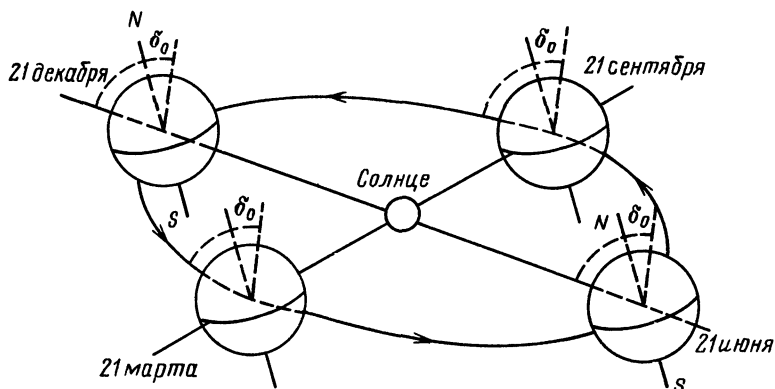


Рис. 4.5. Схема вращения Земли вокруг Солнца (не в масштабе). Сплошная линия на поверхности Земли — экватор

него солнцестояния. Аналитически получено

$$\delta = \delta_0 \sin [360^\circ (284 + n)/365], \quad (4.5)$$

где  $n$  — день года ( $n=1$  соответствует 1 января).

**Широта, время года и суточная облученность.** Суточная облученность  $H$  есть полная энергия солнечного излучения, которая приходится на единицу площади поверхности за день:

$$H = \int G dt. \quad (4.6)$$

На рис. 4.7 показано изменение суточной облученности в зависимости от широты местности и времени года. Сезонные изменения в высоких широтах достаточно велики. Приведенные на рисунке значения соответствуют измерениям при ясном небе в горизонтальной плоскости. Сезонные изменения определяются тремя основными факторами.

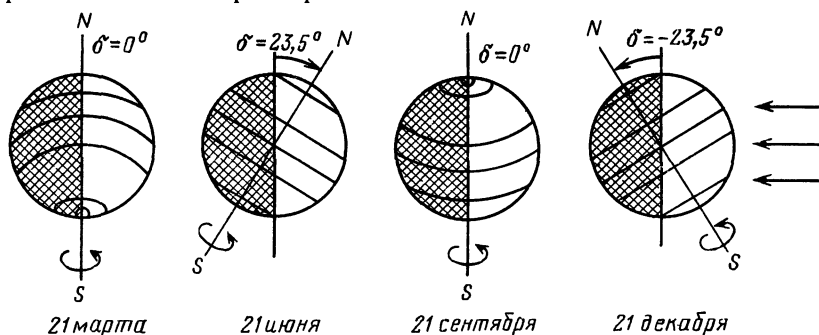
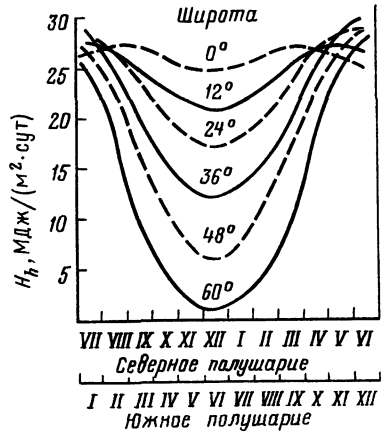


Рис. 4.6. Схема освещения поверхности Земли солнечным излучением в различные времена года. Отмечены широты  $0^\circ$ ;  $\pm 23,5^\circ$ ;  $\pm 66,5^\circ$ . Видно, как меняется склонение  $\delta$ . Стрелками обозначен поток солнечного излучения

Рис. 4.7. Сезонные изменения облученности  $H_h$  горизонтальной приемной площадки в ясный день на разных широтах. Летом  $H_h \approx 25 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$  в день во всех широтах. Зимой  $H_h$  в высоких широтах много меньше вследствие более короткого дня, косо го падения лучей и большого ослабления атмосферой. (Римскими цифрами обозначены месяцы)



1. *Изменением продолжительности дня.* В задаче 4.5 показано, что продолжительность дня между восходом и закатом Солнца определяется следующим образом:

$$N = (2/15) \cos^{-1} (-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta). \quad (4.7)$$

На широте  $48^\circ$ , например,  $N$  меняется от 16 ч в период летнего солнцестояния до 8 ч в период зимнего солнцестояния.

В полярных широтах ( $|\varphi| > 66,5^\circ$ ) значение  $|\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta|$  близко к единице. В этих случаях  $N = 24$  ч (летом) или  $N = 0$  (зимой) (см. рис. 4.6).

2. *Ориентацией приемной площадки.* Из рис. 4.8 видно, что горизонтальная плоскость в точке  $P$  летом больше повернута к Солнцу, чем зимой. Поэтому даже если  $G_b^*$  в (4.2) остается неизменным, множитель  $\cos \theta_z$  уменьшает  $G_{bh}$  зимой и пропорционально уменьшает  $H_h$ . Поэтому кривые на рис. 4.7 приблизительно пропорциональны  $\cos \theta_z = \cos(\varphi - \delta)$  (рис. 4.8). Облученность поверхностей разных наклонов показана на рис. 4.16.

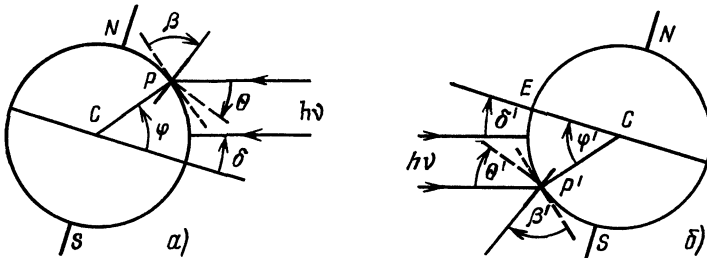


Рис. 4.8. Схема освещения приемника в полдень по солнечному времени. Показаны широта  $\varphi$ , склонение  $\delta$  и угол наклона  $\beta$  приемника в точке  $P$ . Угол  $\theta$  соответствует углу падения излучения на приемник, обращенный на север в южном полушарии (или на юг — в северном). Для северного полушария летом (а)  $\varphi, \delta, \beta > 0$ ; для южного полушария (б)  $\varphi' = -\varphi, \delta' = -\delta, \beta' = \beta, \theta' = 0$

3. *Изменением поглощения в атмосфере.* Энергия солнечного излучения, достигающая поверхности Земли при ясном небе и показанная на рис. 4.7, меньше космической вследствие ослабления потока излучения атмосферой. Это ослабление возрастает с увеличением  $\theta_z$ , поэтому  $G_b^*$  зимой ниже.

Хотя облученность земной поверхности при ясном небе является довольно условной величиной и действительные погодные условия сильно отличаются от тех, которые предполагались при ее расчете, из рис. 4.7 тем не менее мы имеем полезную информацию о средней облученности в зависимости от широты местности и времени года.

#### 4.5. Расположение приемника относительно Солнца

**Определения.** Для наклонной плоскости (приемника) определим следующие углы (рис. 4.9).

**Угол наклона  $\beta$ .** Угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной ( $0 < \beta < 90^\circ$  для поверхностей, обращенных к экватору;  $90^\circ < \beta < 180^\circ$  для поверхностей, повернутых от экватора);

**Азимут  $\gamma$ .** Отклонение от меридиана проекции на горизонтальную плоскость нормали к поверхности приемника ( $\gamma = 0$  для плоскости, ориентированной строго на юг;  $\gamma > 0$  — ориентированной к западу от направления строго на юг;  $\gamma < 0$  — к востоку. Для горизонтальной плоскости полагаем  $\gamma = 0$ ).

**Угол падения  $\theta$ .** Угол между направлением потока излучения к поверхности и нормалью к ней.

**Угол между направлением потока излучения и приемником.** С учетом выбранного направления отсчета основное соотношение между различными углами можно записать в виде

$$\cos \theta = (A - B) \sin \delta + [C \sin \omega + (D + E) \cos \omega] \cos \delta, \quad (4.8)$$

где

$$A = \sin \varphi \cos \beta;$$

$$B = \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma;$$

$$C = \sin \beta \sin \gamma;$$

$$D = \cos \varphi \cos \beta;$$

$$E = \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma.$$

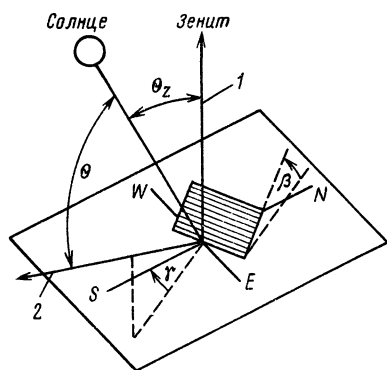


Рис. 4.9. Зенитный угол  $\theta$ , угол наклона  $\beta$  и азимут  $\gamma$  для наклонной поверхности (для случая, изображенного на рисунке,  $\gamma < 0$ ):

1 — нормаль к горизонтальной плоскости, 2 — нормаль к наклонной плоскости

*Пример 4.1. Расчет угла падения.* Вычислить угол падения потока радиации в 10 ч утра 1-го февраля на поверхность, расположенную в Глазго (56° сев. ш., 4° зап. д.), если она ориентирована на 20° восточнее направления строго на юг и наклонена на 40° к горизонтальной плоскости.

*Решение.* С учетом того, что 1 февраля — это 32-й день года ( $n=32$ ) и (4.5), получаем

$$\delta = 23,5^\circ \sin [360^\circ (284 + 32) / 365] = -17,5^\circ.$$

Декретное время в Глазго зимой есть среднее время по Гринвичу, которое соответствует солнечному времени ( $\pm 15$  мин) для долготы  $\psi_{zone}=0$ . Следовательно,  $t_{solar}=10$  ч, и из (4.4) находим  $\omega = -30^\circ$ .

Кроме того,  $\varphi = +56^\circ$ ,  $\gamma = -20^\circ$  и  $\beta = +40^\circ$ , так что в (4.8)

$$A = \sin 56^\circ \cos 40^\circ = 0,635;$$

$$B = \cos 56^\circ \sin 40^\circ \cos (-20^\circ) = 0,338;$$

$$C = \sin 40^\circ \sin (-20^\circ) = -0,220;$$

$$D = \cos 56^\circ \cos 40^\circ = 0,428;$$

$$E = \sin 56^\circ \sin 40^\circ \cos (-20^\circ) = 0,500;$$

$$\cos \theta = (0,635 - 0,338) \sin (-17,5^\circ) + [-0,220 \sin (-30^\circ) + (0,428 + 0,500) \times \cos (-30^\circ)] \cos (-17,5^\circ) = 0,783.$$

Таким образом,  $\theta = 38,5^\circ$ .

Для некоторых случаев общая формула (4.8) существенно упрощается. Например, из рис. 4.8 следует, что приемник, ориентированный по направлению к экватору, окажется повернутым прямо к солнечному потоку в полдень, если его угол наклона  $\beta$  равен широте местности  $\varphi$ . В этом случае ( $\gamma=0$ ,  $\beta=\varphi$ ) формула (4.8) преобразуется к виду

$$\cos \theta = \cos \omega \cos \delta. \quad (4.9)$$

Для горизонтальной плоскости  $\beta=0$  и (4.8) переходит в

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \omega \cos \delta. \quad (4.10)$$

Относительно формулы (4.8) и других, подобных ей, следует сделать два замечания.

1. Рано утром или поздно вечером, когда Солнце низко над горизонтом, угол  $\theta$  может превысить  $90^\circ$  (т. е.  $\cos \theta$  может стать отрицательным). В этом случае источник света окажется за фиксированным приемником. На это следует обращать внимание при анализе конкретных систем.

2. Формулы, как правило, получены для случаев, когда все углы положительны, и в частности  $\varphi > 0$ . Некоторые авторы уделяют недостаточно внимания знакам, поэтому их формулы неприменимы в южном полушарии. Предусмотрительным читателям приходится проверять эти формулы с помощью, например, построения дополнительных диаграмм, таких как на рис. 4.8, а, б, где  $\theta' = \theta$ , и проверки соответствия им данной формулы.

**Оптимальная ориентация приемника.** Собирающий приемник (см. § 6.8) должен быть всегда расположен прямо по направлению потока солнечного излучения (должно выполняться условие  $\theta=0$ ). Однако оптимальное расположение фиксированного плоского коллектора не очевидно. Облученность  $H_c$  есть сумма направленной и рассеянной компонент:

$$H_c = \int (G_b^* \cos \theta + G_d) dt. \quad (4.11)$$

Иногда удобно располагать приемник по направлению к экватору (например, в южном полушарии — строго на север) с наклоном, равным широте, как в (4.9).

В конкретных случаях расположение приемника будет определяться, например, ориентацией существующих сооружений и тем, когда нужно (или возможно) регулярно получать больший поток тепла — утром или днем. Однако, так как  $\cos \theta \approx 1$  для  $\theta < 30^\circ$ , изменение азимута или угла наклона на  $\pm 30^\circ$  слабо влияет на полную собранную энергию. В течение года угол падения в полдень по солнечному времени значительно

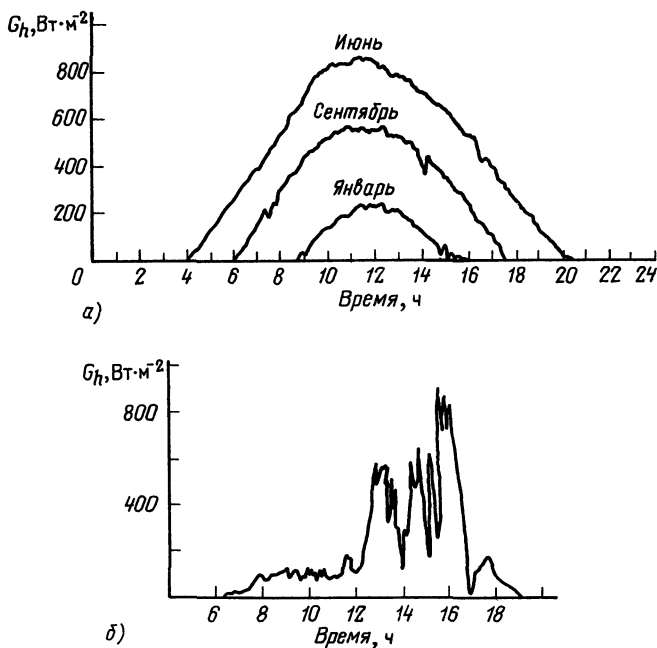


Рис. 4.10. Облученность горизонтальной поверхности, измеренная в различные времена года ( $52^\circ$  сев. шир.,  $0^\circ$  зап. долг., практически ясные дни) (а). Видно, что и максимальная облученность  $G_n$ , и продолжительность дня летом больше, чем зимой. Типичное изменение облученности горизонтальной площадки в облачный день (б). Рассеяние излучения облаками приводит к низким значениям облученности утром и нерегулярным изменениям облученности после полудня

меняется и становится необходимым регулировать «фиксированный» наклон приемника.

**Изменение плотности потока солнечного излучения в течение суток.** Некоторые примеры суточных изменений  $G_h$  приведены на рис. 4.10, а для ясных дней и на рис. 4.10, б для пасмурных. Для ясного дня форма кривой на рис. 4.10, а выражается в виде

$$G_h \approx G_h^{max} \sin(\pi t') / N, \quad (4.12)$$

где  $t'$  — время после восхода Солнца;  $N$  — продолжительность светового дня [см. (4.7) и рис. 4.10, а]. Интегрируя (4.12) по всей продолжительности светового дня для ясной погоды, получаем

$$H_h \approx (2N/\pi) G_h^{max}. \quad (4.13)$$

Так, на широте  $\pm 50^\circ$  в период летнего солнцестояния при  $G_h^{max} \approx 900$  Вт/м<sup>2</sup> и  $N \approx 16$  ч облученность  $H_h \approx 33$  МДж/м<sup>2</sup> в день. В зимнее солнцестояние на той же широте  $G_h^{max} \approx 200$  Вт/м<sup>2</sup>,  $N \approx 8$  ч,  $H_h \approx 3,7$  МДж/м<sup>2</sup> в день. В тропиках  $G_h^{max} \approx 950$  Вт/м<sup>2</sup>, но продолжительность светового дня в течение года мало отличается от  $N \approx 12$  ч, поэтому  $H_h \approx 26$  МДж/м<sup>2</sup> в день.

В этих расчетах не учитывается влияние облаков или пыли, поэтому средние измеренные значения  $H_h$  всегда меньше ожидаемых. Во многих районах типичные средние значения  $H_h$  составляют 50—70% рассчитанных для ясного неба. Только в пустынях средние значения  $H_h$  выше.

#### 4.6. Влияние земной атмосферы

**Оптическая масса.** Расстояние, пройденное прямыми солнечными лучами через атмосферу, зависит от угла падения (зенитного угла) и высоты расположения наблюдателя над уровнем моря (рис. 4.11). Мы предполагаем наличие ясного неба без облаков, пыли или загрязнений воздуха. Так как верхняя граница атмосферы точно не определена, более важным фактором, чем пройденное расстояние, является взаимодействие излучения с атмосферными газами и парами. Прямой поток, нормально проходящий сквозь атмосферу при нормальном давлении, взаимодействует с определенной массой воздуха. Уве-

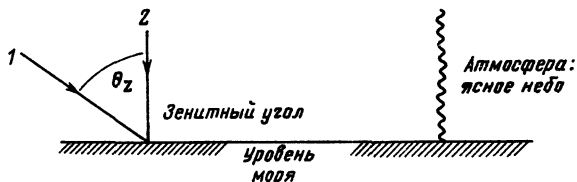


Рис. 4.11. Оптическая масса  $m = \sec \theta_z$ :

$l$  — длина пробега, увеличенная на коэффициент  $m$ ,  $2$  — нормальное падение — единичная длина пробега



личение длины пути при наклонном падении луча под углом  $\theta_z$  по сравнению с путем при нормальном падении называется *оптической массой* и обозначается символом  $m$ . Для оптической массы используется сокращение АМ. АМ0 соответствует нулевой атмосфере, т. е. излучению в космическом пространстве вне атмосферы; АМ1 соответствует  $m=1$ , т. е. Солнце находится в зените; АМ2 —  $m=2$  и т. д.

Из рис. 4.11 без учета кривизны земной поверхности получаем

$$m = \sec \theta_z. \quad (4.14)$$

Зависимость АМ от атмосферного давления или высоты расположения наблюдателя над уровнем моря учитывается отдельно.

**Поглощение в атмосфере и связанные с этим процессы.** В процессе прохождения коротковолнового солнечного излучения через атмосферу имеют место различные виды взаимодействия, а именно: поглощение — переход энергии излучения в тепло (возбуждение молекул) с последующим излучением света большей длины волны; рассеяние — изменение направления распространения света в зависимости от длины волны; отражение, которое не зависит от длины волны. Эти процессы показаны на рис. 4.12.

*Ограждение.* В среднем около 30% интенсивности космического солнечного излучения отражается обратно в космическое пространство. Большую часть излучения отражают облака, меньшую — снег и лед на поверхности Земли. Плотность оставшегося потока коротковолнового солнечного излучения составляет примерно  $(1 - \rho_0) 1,3 \text{ кВт/м}^2 \approx 1 \text{ кВт/м}^2$ . Коэффициент отражения  $\rho$  называется *альбедо*.

*Парниковый эффект и длинноволновое излучение.* Если радиус Земли  $R$ , а интенсивность космического солнечного излучения (солнечная постоянная)  $G_0$ , то полученная от Солнца энергия составляет  $\pi R^2(1 - \rho_0)G_0$ . Эта энергия равна энергии, излучаемой в космическое пространство Землей с излучательной способностью  $\varepsilon=1$  и средней температурой  $T_e$ . В условиях термодинамического равновесия, так как геотермические и приливно-отливные эффекты незначительны,

$$\pi R^2(1 - \rho_0)G_0 = 4\pi R^2\sigma T_e^4, \quad (4.15)$$

следовательно,  $T_e \approx 250 \text{ К} = -23^\circ \text{ С}$ .

Спектральное распределение длинноволнового излучения поверхности Земли, наблюдаемого из космоса, примерно соответствует спектральному распределению абсолютно черного тела при температуре 250 К. Максимум распределения при этой температуре соответствует  $\lambda=10 \text{ мкм}$ , с распределением солнечного излучения это распределение не перекрывается (рис. 4.13).

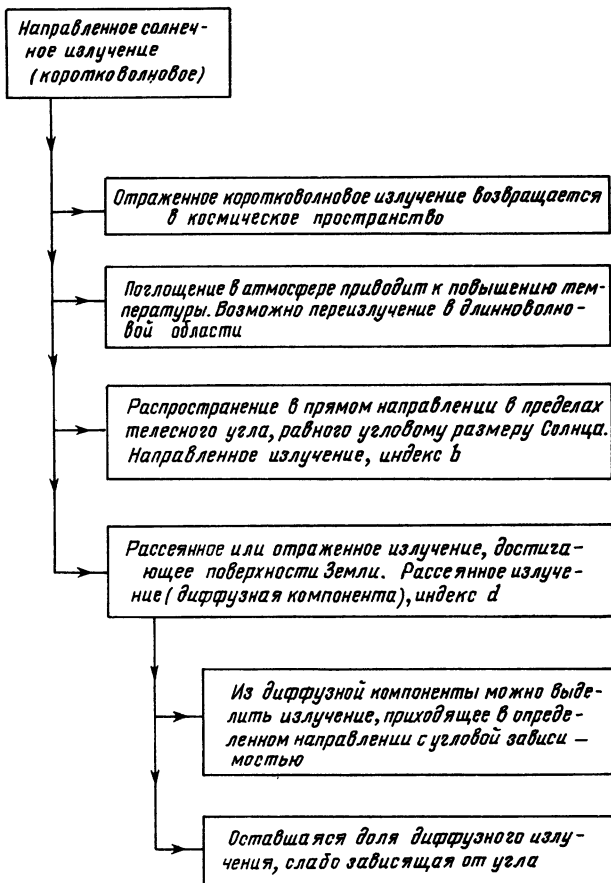


Рис. 4.12. Процессы, сопутствующие прохождению солнечного излучения сквозь атмосферу

Из рис. 4.13 видно, что спектральные распределения солнечного излучения (короткие волны) и теплового излучения Земли и атмосферы (длинные волны) можно безусловно различить и исследовать отдельно друг от друга. Инфракрасные длинноволновые потоки излучения от поверхности Земли достаточно сложны и велики. Излучение атмосферы распространяется как к поверхности Земли, так и в противоположном направлении. При измерении потока излучения или при определении энергетического баланса для какой-либо площади поверхности Земли или устройства очень важно учитывать, что плотность потока инфракрасного излучения в окружающем пространстве может достигать  $1 \text{ кВт/м}^2$ .

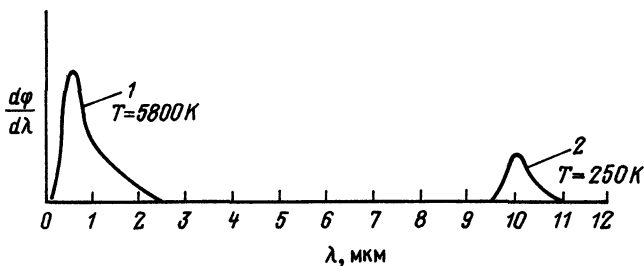


Рис. 4.13. Спектральные распределения коротковолнового и длинноволнового излучений:

1 — распределение коротковолнового излучения Солнца; 2 — распределение длинноволнового излучения Земли

Эффективная температура черного тела Земли как излучателя эквивалентна температуре, с которой излучают внешние слои атмосферы, а не поверхность Земли. Средняя температура поверхности Земли составляет около  $14^{\circ}\text{C}$ , что примерно на  $40^{\circ}\text{C}$  выше температуры внешней атмосферы, которая в данном случае выступает как инфракрасный теплоизоляционный экран. Это повышение температуры называется *парниковым эффектом*, так как стекло садовой оранжереи также не пропускает инфракрасное излучение из оранжереи наружу, но пропускает коротковолновое солнечное излучение внутрь.

Поскольку воздух почти прозрачен, тело на поверхности Земли обменивается лучистой энергией не с окружающим его в данный момент воздухом, а с более холодными верхними слоями атмосферы. В этом случае верхние слои атмосферы представляют собой выделенное пространство с температурой  $T_s$ , которая называется *температурой неба*, более низкой, чем температура окружающего тело воздуха  $T_a$ . Согласно проведенным оценкам

$$T_s \approx T_a - 6^{\circ}\text{C}, \quad (4.16)$$

хотя в пустынных районах  $T_a - T_s$  может достигать  $25^{\circ}\text{C}$ .

*Поглощение в атмосфере.* Для пояснения важного процесса поглощения спектральные распределения коротковолнового солнечного излучения и длинноволнового атмосферного можно разделить на отдельные участки:

а) коротковолновая ультрафиолетовая область ( $\lambda < 0,3$  мкм). Солнечное излучение практически полностью отсутствует на уровне моря вследствие поглощения  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и их ионами (рис. 4.14);

б) ближний ультрафиолетовый диапазон ( $0,3 \text{ мкм} < \lambda < < 0,4 \text{ мкм}$ ). Проходит очень малая доля излучения, но вполне достаточная для загара;

в) видимый диапазон ( $0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$ ). Чистая атмо-

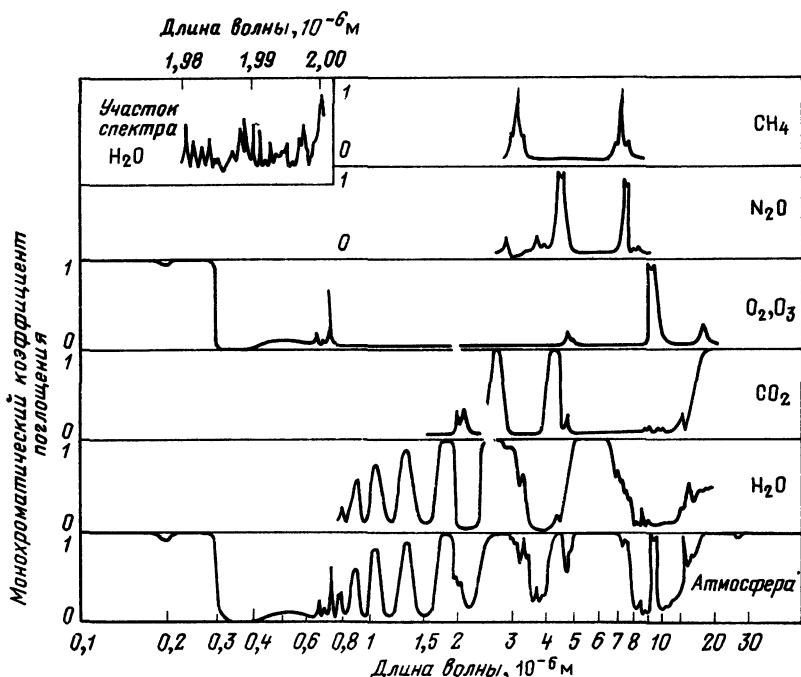


Рис. 4.14. Зависимость от длины волны падающего излучения монохроматического коэффициента поглощения атмосферы и ее основных составляющих

сфера практически полностью пропускает видимое излучение и становится «окном», открытым для прихода на Землю солнечной энергии. Почти половина потока солнечного излучения приходится на этот спектральный диапазон. Однако следует отметить, что наличие аэрозолей и загрязнение атмосферы могут быть причинами значительного поглощения излучения;

г) ближняя инфракрасная область ( $0,7 \text{ мкм} < \lambda < 2,5 \text{ мкм}$ ). На этот диапазон спектра приходится почти половина интенсивности космического солнечного излучения. Более 20% солнечной энергии поглощается в атмосфере, в основном парами воды и диоксидом углерода (рис. 4.14 и 4.15). Концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере относительно постоянна и составляет около 0,03%, а концентрация паров воды меняется очень сильно — почти до 4%. Флуктуации поглощения парами воды могут иметь важное значение для практических приложений, однако появление облаков при увеличении концентрации паров воды, вероятно, более важно;

д) дальний инфракрасный диапазон ( $\lambda > 12 \text{ мкм}$ ). В этой области спектра атмосфера практически непрозрачна.

На рис. 4.15 показано совокупное влияние на солнечный спектр поглощения во всех рассмотренных спектральных диапа-

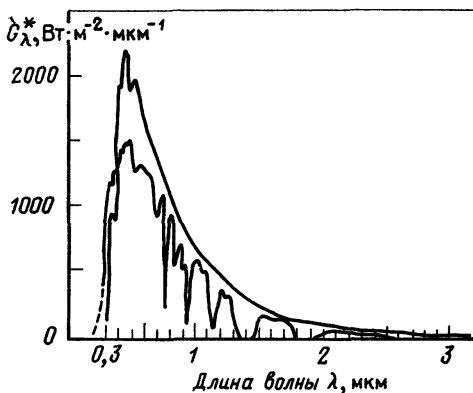


Рис. 4.15. Спектральные распределения солнечного излучения вне атмосферы (верхняя кривая) и на уровне моря (нижняя кривая). На видимую область спектра (0,4—0,7 мкм) приходится примерно половина полной облученности. С увеличением длины волны  $\lambda$  облученность  $G_{\lambda}^*$  резко уменьшается, на кривой распределения на уровне моря наблюдаются также провалы, связанные с поглощением парами воды и  $\text{CO}_2$

зонах. Нижняя кривая соответствует спектру солнечного излучения при  $m=1$ . Она представляет собой распределение лучистой энергии, измеренное в полдень в тропиках (когда Солнце находится вертикально над наблюдателем). На самом деле спектральное распределение зависит от запыленности и влажности даже в отсутствие облаков.

#### 4.7. Измерения солнечной энергии

*Приборы.* В табл. 4.1 перечислены самые распространенные приборы, используемые для измерений солнечной энергии. Их

Таблица 4.1. Классификация солнечных радиометров

Тип	Что измеряет	Стабильность, % в год	Абсолютная точность, %	Типичный отклик при плотности потока $1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$
Эталонный стандартный пирогелиометр	Направленное излучение (абсолютные измерения, сравнение с нагревом поверхности током)	0,2	2	—
Солариметр 1-го класса	Суммарное излучение $G_t$	1	3	10 мВ
Биметаллическая пластина	Суммарное излучение $G_t$	5	15	Отклонение на 5 см
Солнечные элементы	Суммарное излучение $G_t$	2	15	10 мА
Актинометр 2-го класса	Прямое излучение $G_b$	2	4	10 мВ
Самописец	Количество солнечных часов	10	20	Прожженная картонка
Глаз человека	Облачность, %	10	20	Визуальная шкала
Фотографирование со спутника	Облачность, %	10	20	Фотопленка

можно разделить на две основные группы: пирогелиометры, используемые для измерений направленного потока излучения  $G_b^*$ , и пиранометры или солариметры — для измерений полного потока  $G_{tc}$  (рис. 4.3).

С помощью эталонного стандартного пирогелиометра могут быть получены абсолютные значения потока энергии. В этом приборе поток солнечного излучения попадает на поглощающую поверхность площади  $A$ , измеряется повышение температуры этой поверхности и сравнивается с повышением температуры идентичного поглотителя (затененного), нагреваемого электрическим током. В принципе имеем

$$\alpha AG_b^* = P_{\text{эл.}} \quad (4.17)$$

На практике дело обстоит сложнее, например трудно независимо определить коэффициент  $\alpha$  (коэффициент поглощения).

#### 4.8. Оценки солнечной энергии

**Необходимость оценок.** Перед установкой приемника солнечной энергии необходимо определить, какое количество энергии требуется собрать, как предполагается использовать собранную энергию. Тогда можно рассчитать размер приемника.

В идеале требуемые данные должны быть получены в результате измерений лучистой энергии, проводимых в течение нескольких лет на месте установки будущего коллектора. Это трудно осуществить, поэтому требуемые (статистические) данные оцениваются по имеющимся метеорологическим данным: 1) для данного места или 2) (более вероятно) для некоторого близкого места, для которого предполагается наличие подобной облученности.

**Статистические изменения.** Кроме изображенных на рис. 4.7 и 4.10,  $a$  регулярных изменений облученности имеют место также значительные нерегулярные изменения. Из них наиболее важно учитывать флуктуации, имеющие место в течение дня (например, рис. 4.10,  $b$ ), так как они влияют на количество накопленной энергии, которая необходима для функционирования солнечной энергетической системы.

Таким образом, данные даже подробнейшей регистрации облученности можно использовать для прогнозирования только в статистическом смысле. Вот почему при проектировании солнечных энергетических систем обычно опираются на приближенные средние данные, такие как среднемесячная суточная облученность. Оценить эти приближенные значения легче, чем предсказать полную модель излучения.

**Светлое время суток как мера облученности.** Все главные метеорологические станции ежедневно замеряют время  $n$  (в часах), в течение которого Солнце светит ярко. Эти данные име-

ются за несколько десятилетий. Обычно измерения производятся с помощью самописца (см. табл. 4.1), в котором специально размеченные карты располагаются за увеличительным стеклом. Когда солнце светит ярко, в карточке прожигается отверстие. Количество ярких солнечных часов  $n$  определяется из размера отверстия, прожженного в карточке данного дня.

Связь облученности с количеством ярких солнечных часов обычно записывают в следующем виде:

$$H = H'_0[a + b(n/N)], \quad (4.18)$$

где (для данного дня)  $H'_0$  — лучистая энергия, приходящая на единицу горизонтальной площадки в ясный день (рис. 4.7);  $N$  — продолжительность дня [см. (4.7)].

К сожалению, было обнаружено, что имеет место разброс коэффициентов  $a$  и  $b$  в зависимости от места наблюдения. Коэффициент корреляции составляет обычно только около 0,7, т. е. данные измерений сильно отличаются от полученных с помощью (4.18).

При изучении изменений облученности полезно иметь информацию о количестве ярких солнечных часов в течение дня. Например, можно с уверенностью сказать, что день, когда  $n < 1$ , существенно не добавит энергии в солнечную энергетическую систему. Потребности накопления энергии необходимо оценивать из ежедневных данных. Информация эта также может быть полезна для того, чтобы учитывать, какие часы, утренние или дневные, для данной местности статистически являются более солнечными.

Предлагается множество других климатологических соотношений, связывающих облученность поверхности с такими переменными, как широта местности, температура окружающего воздуха, влажность и облачность. Большинство из них имеют малую точность и узкий диапазон применимости.

**Доля потока излучения.** Как отмечалось в § 4.3, доля приходящего излучения, которое может быть сфокусировано на приемнике (направленная составляющая потока излучения), зависит от облачности и запыленности атмосферы. Эти факторы можно оценить с помощью индекса ясности  $K_T$ , который представляет собой отношение лучистой энергии, пришедшей на горизонтальную поверхность за определенный период времени (обычно за один день), к энергии, пришедшей за тот же период времени на параллельную поверхность, расположенную вне атмосферы:

$$K_T = H_n / H_{0n}. \quad (4.19)$$

Самые ясные дни характеризуются оптической массой  $m = 1$  и соответственно  $K_T \approx 0,8$ . Для таких дней доля диффузной составляющей излучения равна примерно 0,2; она увеличивается

до 1,0 в пасмурные дни ( $K_T=0$ ). В солнечные дни при наличии в атмосфере значительного количества аэрозолей или при небольшой облачности рассеянная составляющая может достигать 0,5.

Долю направленной составляющей можно найти из соотношения

$$H_{bh}/H_{th} = 1 - H_{dh}/H_{th}. \quad (4.20)$$

Из выражения для  $H_{bh}/H_{th}$  видно, что фокусирующим системам трудно успешно работать в условиях сильной облачности. Однако следует отметить, что такие системы следят за Солнцем и поэтому собирают большую часть потока, идущего по нормали к поверхности.

**Влияние угла наклона приемника.** Если все солнечное излучение приходит к приемнику направленно, то измеренная на одной плоскости (плоскость 1) интенсивность излучения прямо преобразуется в интенсивность на другой плоскости (плоскость 2). Это особенно важно для преобразования данных для горизонтальной плоскости. Уравнение (4.8) описывает угол падения прямых солнечных лучей на произвольную плоскость. Тогда для направленной компоненты имеем

$$G_{1b}/\cos\theta_1 = G_{2b}/\cos\theta_2 = G_b^*. \quad (4.21)$$

Диффузную компоненту, однако, так же точно рассчитать нельзя.

В литературе обсуждаются различные усовершенствования методов расчета диффузной компоненты. Хотя разброс составляет более 10%, результаты являются весьма поучительными. Например, на рис. 4.16 показана зависимость изменения от времени года рассчитанного потока излучения, приходящего под

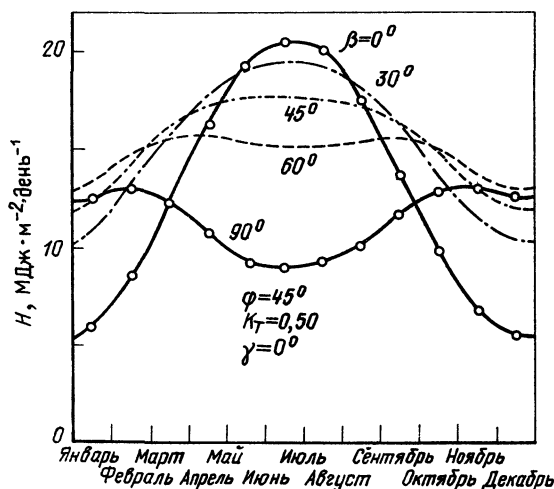


Рис. 4.16. Зависимость средней суточной облученности  $H$  поверхности при различных углах ее наклона от времени года. Данные приведены для  $45^\circ$  сев. шир. при  $K_T = 0,50$ ,  $\gamma = 0^\circ$  и коэффициенте отражения поверхности Земли 0,20



разными углами на поверхность, расположенную на  $45^\circ$  северной широты при индексе ясности  $K_T=0,5$ . Следует отметить, что на этой широте средняя облученность вертикальной, обращенной к Солнцу поверхности мало изменяется в зависимости от времени года и зимой превышает  $10 \text{ МДж/м}^2$  в день. Это в 2 раза превышает облученность в это же время года горизонтальной поверхности и, конечно, является достаточным для обеспечения полезной подводимой мощности к пассивным и некоторым активным нагревательным системам (см. § 6.4).

### Задачи

4.1. а) Предположим, что Солнце и Земля эквивалентны двум сферам в пространстве. Определите солнечную постоянную вне атмосферы,  $\text{Вт/м}^2$ .

б) Предположим, что Земля характеризуется средней поглощательной способностью  $\alpha$  и средней излучательной способностью  $\epsilon$ . Определите отношение  $\alpha/\epsilon$  в случаях, когда равновесная температура равна  $10$  и  $25^\circ \text{С}$ .

*Данные:*

Диаметр Солнца, м .....  $1,389 \times 10^9$

Диаметр Земли, м .....  $1,278 \times 10^7$

Расстояние от Земли до Солнца, м .....  $1,498 \times 10^{11}$

Эквивалентная температура черного тела, К .....  $5760$

4.2. Предположим, что направление отсчета углов  $\omega$  (часовой угол, см. § 4.4),  $\beta$  (наклон) и  $\gamma$  (азимут поверхности, см. § 4.5) выбрано для северного полушария. Пользуясь диаграммами для соответствующих случаев (см., например, рис. 4.8), проверьте справедливость выбранного направления отсчета также и для южного полушария (например, приемник, ориентированный на север, в южном полушарии имеет  $\beta > 0$ ,  $\gamma = 180^\circ$ ).

4.3. В Суве ( $\varphi = -18^\circ$ ) в 9 ч утра 20 мая измеренная в горизонтальной плоскости облученность составляет  $G_h = 1,0 \text{ МДж/м}^2$  в час.

а) Определите угол  $\theta_z$  между направлением потока и вертикалью и найдите облученность  $G^* = (G_b + G_d)^*$ , измеренную в направлении потока.

б) Определите угол  $\theta_c$  между потоком излучения и приемником, наклоненным на  $30^\circ$  и ориентированным строго на север. Найдите облученность приемной площадки (предположив, что все излучение приходит в направлении потока).

в) Что изменится, если предположить что диффузное излучение распределено в пространстве равномерно?

4.4. Покажите, что радиационные потери тепла от поверхности с температурой  $T$  при эффективной температуре неба  $T_s$  можно записать в виде

$$P_r = A_1 \epsilon \sigma (T_1^4 - T_s^4) = A_1 h_r (T_1 - T_s),$$

где

$$h_r = \epsilon \sigma (T_1^2 + T_s^2)(T_1 + T_s)(T_1 - T_s) / (T_1 - T_s).$$

4.5. а) Из (4.10) найдите часовой угол на восходе Солнца (когда зенитный угол  $\theta_z = 90^\circ$ ). Покажите, что число часов между восходом и закатом Солнца определяется (4.7).

б) Вычислите продолжительность дня в периоды летнего и зимнего солнцестояния на широтах 12 и 60°.

4.6. а) Если бы орбита Земли была круговой, тогда облученность горизонтальной плоскости вне атмосферы определялась бы формулой

$$G'_{0h} = G_0^* \cos \theta_z, \quad (4.22)$$

где  $G_0^*$  — солнечная постоянная.

Покажите, что интегральный суточный поток излучения, приходящий на горизонтальную плоскость вне атмосферы, определяется следующим образом:

$$H'_{0h} = [t_s G_0^* / \pi] [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + (2\pi \omega_s / 360) \sin \varphi \sin \delta], \quad (4.23)$$

где  $t_s$  — продолжительность дня;  $\omega_s$  — часовой угол на закате (в градусах).

*Примечание.* Вследствие слабой эллиптичности орбиты внеатмосферный поток излучения соответствует не  $H'_{0h}$ , а

$$H_{0h} = [1 + e \cos (360 n / 365)] H'_{0h}, \quad (4.24)$$

где  $e = 0,033$  — эксцентриситет орбиты;  $n$  — номер дня в году (например,  $n = 1$  соответствует 1 января).

б) С помощью (4.24) рассчитайте  $H_{0h}$  для  $\varphi = 48^\circ$  в периоды летнего и зимнего солнцестояний. Сравните результаты с данными, представленными на рис. 4.7.

4.7. Выведите (4.9), т. е.

$$\cos \theta = \cos \omega \cos \delta$$

(эта формула определяет угол  $\theta$  между потоком и нормалью к поверхности, имеющей азимут  $\gamma = 0$  и угол наклона  $\beta$ , равный модулю широты).

*Пояснение:* из центра Земли постройте систему координат  $(x, y, z)$  с Северным полюсом на оси  $Oz$  и Солнцем, расположенным в плоскости  $y = 0$ , и определите косинусы соответствующих углов.

*Примечание.* Вывод (4.8) аналогичен, но более сложен.

### Решения

4.1. а)  $G_0 = \sigma T_s^4 (4\pi R_s^2) / 4\pi l^2 = 1340 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

б) В равновесии

$$\alpha G_0 \pi R_e^2 = \varepsilon \sigma T_e^4 \cdot 4\pi R_e^2,$$

поэтому  $\alpha/\varepsilon = 1,08$  при  $T_e = 283 \text{ К}$  и  $\alpha/\varepsilon = 1,33$  при  $T_e = 298 \text{ К}$ .

4.3. а) Используем (4.8), полагая  $\varphi = -18^\circ$ ;  $\delta = 20,0^\circ$ ;  $\beta = 0$ ;  $\gamma$  выбираем произвольным (к данной задаче отношения не имеет);  $\omega = 45^\circ$ . Следовательно,  $\theta_1 = \cos^{-1} (0,526) = 58^\circ$  и  $G_d = 0$ ,  $G_b = G_b^* = G_h / \cos \theta_1 = 0,9 \text{ МДж} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ .

б) То же, что и для (а) при  $\beta = 30^\circ$ ;  $\gamma = -180^\circ$ ;  $\theta_z = 40^\circ$ .

в) Предполагаем  $G_{bh} = G_{dh} = (1/2) G_h = 0,5 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ . Тогда  $G_b^* = G_{bh} / \cos \theta_1 = 0,9$  и поэтому  $G^* = G_b^* + G_g^* = 0,9 + 0,5 = 1,4$  (предполагаем  $G_g^* = G_{dh} = G_{dc}$ ) и  $G_c = G_b^* \cos \theta_c + G_{dc} = 1,2 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

4.5. б) 12,7 ч, 11,3 ч; 18,5 ч, 5,5 ч.

4.6. б) Летом  $H_0 = 42,9 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ ; зимой  $H_0 = 8,2 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $K_T = 0,7$ .

## НАГРЕВАНИЕ ВОДЫ СОЛНЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

## 5.1. Введение

Наиболее очевидная область использования солнечной энергии — подогрев воздуха и воды. В районах с холодным климатом необходимо отопление жилых зданий и горячее водоснабжение. В промышленности также требуется большое количество горячей воды. В Австралии, например, на подогрев жидкостей до температур ниже  $100^\circ\text{C}$  расходуется почти 20% потребляемой энергии. В связи с этим в некоторых странах, особенно в Австралии, Израиле, США, Японии, активно расширяется производство солнечных нагревательных систем.

Энергия Солнца используется в нагревателях воды, воздуха, солнечных дистилляторах, зерносушилках, солнечных башнях (солнечных энергетических установках башенного типа). Эти системы обсуждаются в гл. 6.

В настоящей главе рассмотрены солнечные нагревательные системы, схематично показанные на рис. 5.1, где приведена последовательность приемников солнечного излучения, отличающихся долей поглощенной солнечной энергии и потерями тепла в системе. В табл. 5.1 приведены основные характеристики приемников солнечного излучения, а также их стоимость, которая, как следует из приведенных данных, повышается при улучшении параметров системы.

Основным элементом солнечной нагревательной системы является приемник, в котором происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии жидкости. Здесь рассмотрены плоские приемники излучения, фокусирующие приемники обсуж-

Таблица 5.1. Характеристики приемников солнечного излучения

Поверхность	Стеклоанное покрытие	Рисунок	$r_{pa}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$	$T_p^{(m)}$ , $^\circ\text{C}$	Цена, $\text{долл} \cdot \text{м}^{-2}$
Черная	Нет	5.1, <i>в</i>	0,031	40	20
	Один слой	5.1, <i>д</i> , 5.1, <i>е</i>	0,13	95	50—200
	Два слоя	5.1, <i>ж</i>	0,22	140	300
Селективная	Один слой	5.1, <i>е</i> , 5.1, <i>з</i>	0,40	240	300
	Два слоя	5.1, <i>ж</i> , 5.1, <i>з</i>	0,45	270	400
	Вакуумированная трубка	5.1, <i>и</i>	0,48	160	500

Примечание.  $r_{pa}$  — сопротивление лицевой поверхности приемника теплопотерям при  $T_p = 90^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 20^\circ\text{C}$ ,  $u = 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $T_p^{(m)}$  — температура, при которой поток солнечной энергии, равный  $750 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ , уравнивает тепловые потери при  $r_{pa}$ . В действительности рабочие температуры значительно ниже (см текст).

Цены приведены в долларах США на 1983 г. и являются приблизительными (с точностью до коэффициента 2). Тем не менее, из таблицы видно соотношение цен на различные типы приемников.

Расчеты  $r_{pa}$  и  $T_p^{(m)}$  приведены в примерах 5.1, 5.2 и 5.5 и задачах 5.3—5.5.

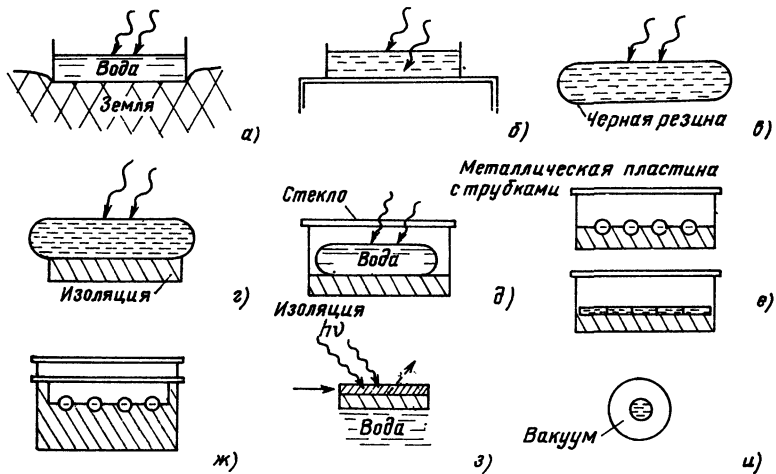


Рис. 5.1. Последовательность приемников солнечного излучения в порядке возрастания эффективности и стоимости:

*а* — открытый резервуар на поверхности Земли. Тепло легко уходит в Землю; *б* — открытый резервуар, изолированный от Земли. Чистая вода не является хорошим поглотителем, потери тепла происходят вследствие испарения; *в* — черный резервуар. Используется в Японии для подогрева воды к вечерним ваннам, характеризуется большими потерями тепла, особенно в ветреную погоду, и невозможностью накопления нагретой воды на ночь; *г* — черный резервуар с изолированным от Земли дном. Потери тепла происходят через верхнюю крышку, поэтому теплопотери всего в 2 раза ниже, чем в предыдущем случае; *д* — черный резервуар в контейнере со стеклянной крышкой. Использование полиэтиленовых крышек дешевле, но они быстро разрушаются на солнце; *е* — металлическая пластина с трубками и заполненная водой плоская емкость. Стандартный промышленный приемник; нагреваемая жидкость протекает сквозь приемник и накапливается в специальном резервуаре. Заполненная водой пластина более эффективна, чем пластина с трубками, *ж* — пластинчатый приемник с двойным стеклянным покрытием. Вариант рис. 5.1, *е* с лучшей изоляцией, жидкость может быть нагрета до 100°С; стекло, не содержащее железа, меньше поглощает, чем оконное стекло; *з* — селективная поверхность,  $\alpha_{short} \gg \epsilon_{long}$ , радиационные потери ниже (поглощаемое солнечное излучение, ослабленное излучение); *и* — вакуумированный приемник. Жидкость в черной внутренней трубке, стеклянная наружная трубка. Нет конвективных потерь через наружную поверхность

даются в § 6.8. Плоские приемники собирают как прямое, так и рассеянное излучение и поэтому могут работать также и в облачную погоду. В связи с этим, а также с учетом относительно невысокой стоимости (см. табл. 5.1) плоские приемники являются предпочтительными при нагревании жидкостей до температур ниже 100°С.

Простые приемники (рис. 5.1, *а—д*) содержат весь объем жидкости, которую необходимо нагреть. Приемники более сложной конструкции (рис. 5.1, *е—и*) нагревают за определенное время только небольшое количество жидкости, которая затем, как правило, накапливается в отдельном резервуаре, что позволяет снижать теплопотери системы в целом (см. § 5.5).

## 5.2. Расчет теплового баланса, общие замечания

Поток лучистой энергии, поглощаемой поверхностью приемника (рис. 5.2), составляет  $\tau_{cov} \alpha_p A_p G$ , где  $G$  — облученность приемника;  $A_p$  — площадь освещенной поверхности;  $\alpha_p$  — коэффициент поглощения приемной поверхности;  $\tau_{cov}$  — коэффициент пропускания прозрачного покрытия, защищающего приемную поверхность от ветра (например, рис. 5.1, д).

В процессе поглощения температура приемной поверхности повышается. Повышение температуры приемника  $T_p$  над температурой окружающей среды  $T_a$  приводит к возникновению потока от приемника, причем скорость теплоотдачи равна  $(T_p - T_a) / R_L$ , где  $R_L$  — термическое сопротивление.

Суммарный поток тепла, поступающего к приемной площадке, определяется балансом

$$P_{net} = \tau_{cov} \alpha_p A_p G - [(T_p - T_a) / R_L] = \eta_{sp} A_p G, \quad (5.1)$$

где  $\eta_{sp}$  — коэффициент захвата излучения ( $\eta_{sp} < 1$ ).

Коэффициент теплопередачи  $\eta_{pf}$  определяет долю суммарного потока  $P_{net}$ , передаваемую жидкости. В приемниках хорошего качества разность между температурами приемной площадки и жидкости  $T_f$  мала и коэффициент передачи лишь немного меньше единицы. Таким образом, поток тепла от приемника солнечного излучения к теплоносителю определяется соотношением

$$P_u = \eta_{pf} P_{net}; \quad (5.2a)$$

при нагревании статической массы жидкости  $m$

$$P_u = mcdT_f/dt; \quad (5.2б)$$

при нагревании жидкости, массовый расход которой через приемник  $m$ ,

$$P_u = \dot{m}c(T_2 - T_1). \quad (5.2в)$$

В последнем случае  $T_1$  — температура входящей в приемник жидкости,  $T_2$  — выходящей.

Эти соотношения чаще всего используют для определения теплового потока  $P_u$  при заданной плотности потока излучения

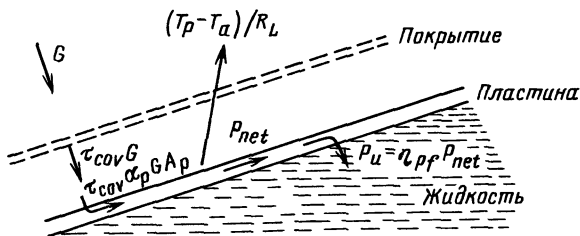


Рис. 5.2. Схема нагрева жидкости в коллекторе солнечным излучением

$G$ . Параметры  $A$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$  приемника, как правило, известны,  $R_L$  рассчитывается способом, описанным в гл. 3. Хотя значение  $T_p$  зависит от  $P_u$ , можно в первом приближении получить разумную оценку, а в случае необходимости позже уточнить ее.

### 5.3. Открытые нагреватели

**Открытый резервуар на поверхности земли.** На рис. 5.1, а показан простейший возможный нагреватель воды, например бассейн. Емкость, наполненная водой, нагревается под действием солнечного излучения, однако повышение температуры воды ограничено вследствие того, что тепло легко передается земле.

**Открытый резервуар, изолированный от земли** (см. рис. 5.1, б). Здесь тепловые потери меньше по сравнению с предыдущим случаем, повышение температуры ограничено вследствие низкого коэффициента поглощения воды ( $\alpha = 1 - \tau \ll 1$ ). Кроме того, значительная часть поглощенного тепла идет на испарение воды, что также препятствует повышению температуры.

**Черный резервуар** (см. рис. 5.1, в). В этом случае жидкость заключена в емкости с черной матовой поверхностью, обычно располагаемой на крыше здания. Потери тепла на испарение в этой конструкции сведены к нулю. Черная поверхность емкости поглощает излучение намного лучше, чем прозрачная вода (обычно  $\alpha = 0,9$ ). Часть поглощенного тепла передается жидкости.

Нагреватели этого типа достаточно недороги, просты в изготовлении и позволяют нагревать воду до температуры около  $45^\circ\text{C}$ . Широкое применение получили такие нагреватели в Японии, где с их помощью подогревают воду для вечерних ванн. Параметры нагревателя ограничены увеличением тепловых потерь в ветреную погоду. Другая проблема заключается в том, что многие дешевые черные водонепроницаемые материалы (например, старые автомобильные покрышки, полиэтиленовые емкости) быстро разрушаются на солнце и через несколько месяцев начинают пропускать воду. Однако в некоторых случаях может оказаться более выгодным периодически заменять старые емкости новыми, чем использовать более сложные конструкции. Следует отметить, что материал, из которого изготовлена емкость нагревателя, не обязательно должен быть черного цвета, ему достаточно иметь черное покрытие.

*Пример 5.1. Тепловой баланс открытой черной емкости* Рассмотрим прямоугольную черную резиновую емкость, размеры которой  $1\text{ м} \times 1\text{ м} \times 0,1\text{ м}$ , толщина стенок  $5\text{ мм}$ , помещенную на тонкую не проводящую тепло горизонтальную решетку (подставку) достаточно высоко над землей. Емкость содержит  $100\text{ л}$  воды. Поток солнечного излучения, падающего на поверхность емкости,  $G = 750\text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  (рис. 5.3). Температура окружающего воздуха  $T_a = 20^\circ\text{C}$ ,

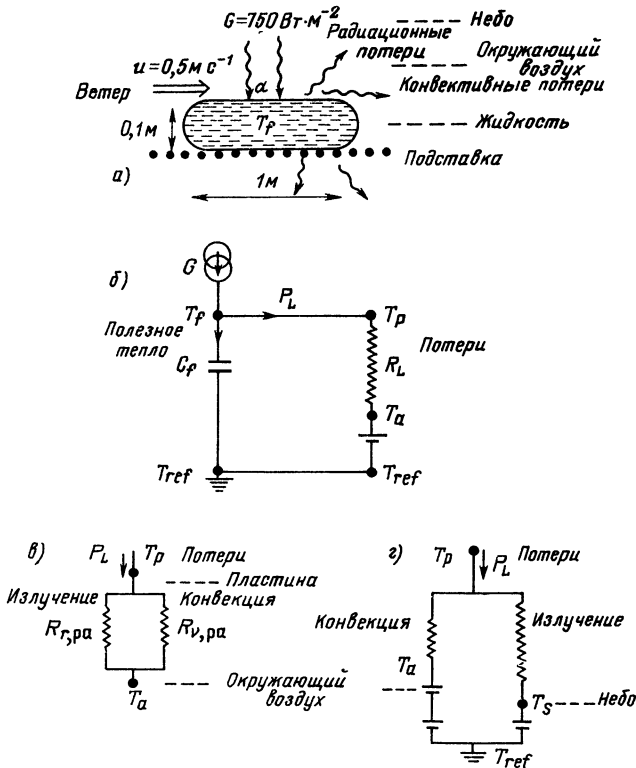


Рис. 5.3. Солнечный нагреватель с черной поверхностью: *а* — физическая диаграмма, *б* — упрощенная эквивалентная диаграмма; *в* — сопротивление  $R_L$  представлено в виде параллельных сопротивлений, соответствующих радиационным и конвективным теплотерям от поверхности нагревателя к окружающей среде с одной температурой  $T_a$ ; *г* — сопротивление  $R_L$  показано в виде параллельных компонентов, соответствующих конвективным теплотерям от поверхности нагревателя к окружающей среде с  $T_a$ , а радиационным — к верхним слоям атмосферы, характеризующимся температурой неба  $T_s$ , т. е. разным и, возможно, меняющимся температурам

скорость ветра  $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Определите сопротивление емкости тепловым потерям, затем оцените максимальную среднюю температуру воды, а также время, за которое вода может быть нагрета до такой температуры.

**Решение.** Тепло приходит к воде или уходит из воды через слой резины, который в данном случае является приемной площадкой системы (см. рис. 5.3, *а*), поэтому максимальная температура воды не может превышать температуру слоя резины. Действительно, в равновесии, когда вода уже нагрета, они равны друг другу. Так как теплоемкость тонкого слоя резины много меньше теплоемкости воды и термическое кондуктивное сопротивление слоя пренебрежимо мало, рассмотрим черный резервуар и его содержимое как один сложный объект, имеющий температуру  $T_p = T_i$ ; коэффициент поглощения  $\alpha = 0,9$ ; теплоемкость  $C_l = mc$ . (Для простоты пренебрегаем тем, что в действительности

вода у поверхности емкости будет горячее, а на дне холоднее.) В таком приближении в (5.2) сопротивление  $R_{pf}=0$  и  $\eta_{pf}=1$ .

Из (5.1) и (5.2б) с учетом  $\tau_{cov}=1$ , что соответствует отсутствию покрытия, получаем

$$mc \frac{dT_f}{dt} = \alpha AG - (T_f - T_a) / R_L. \quad (5.3)$$

На эквивалентной диаграмме (рис. 5.3, б), представляющей собой аналог электрической цепи,  $G$  соответствует источнику тока,  $C_f$  — емкость между  $T_f$  и реперной точкой  $T_{ref}$ . Температура  $T_{ref}$  произвольна, но фиксирована и не зависит от времени. Это соответствует тому, что производную  $dT_f/dt$  в левой части уравнения (5.3) можно заменить на производную  $d(T_f - T_{ref})/dt$ , где  $dT_{ref}/dt=0$ . Удобно в качестве  $T_{ref}$  выбирать  $T_{ref}=0^\circ\text{C}$ . Если температура окружающей среды не зависит от времени, можно положить  $T_{ref}=T_a$ ; аналогия с электрическим контуром при этом сохраняется, и остается справедливым уравнение теплового баланса (5.3). «Напряжение» источника тока в правой части эквивалентного контура составляет  $T_a - T_{ref}$  (не обязательно постоянное).

Сопротивление  $R_L$  между приемной поверхностью и окружающей средой включает потери тепла как от крышки, так и от дна приемника. Для данной системы и крышка, и дно емкости одинаково взаимодействуют с окружающей средой, так что от их суммарной поверхности площадью  $A=2\text{ м}^2$  конвективный и радиационный потоки тепла на эквивалентной диаграмме могут быть изображены параллельными (рис. 5.3, в).

Во многих случаях потери тепла вследствие излучения и конвекции не равны. Конвективный перенос тепла происходит от емкости к окружающей среде с температурой  $T_a$ , а радиационный — к верхним слоям атмосферы с температурой  $T_s$  и/или к окружающей среде. На рис. 5.3, г представлена полная эквивалентная диаграмма для тепловых потерь  $R_L$ , в которой учтено, что перенос тепла происходит к средам с различными, возможно меняющимися температурами. В данном примере  $T_s$  и  $T_a$  считают постоянными.

Сопротивление конвективным теплопотерям

$$R_{v, pa} = 1/(h_v A_L), \quad (5.4)$$

где

$$h_v = a + bu = 24,7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \quad (5.5)$$

для данных величин (см. табл. 3.2).

Радиационный поток тепла к верхним слоям атмосферы определен уравнением (см. табл. 3.4).

$$P_{r, ps} = \epsilon_p \sigma A_L (T_p^4 - T_s^4), \quad (5.6)$$

где эффективная температура неба  $T_s = T_a - 6\text{ К}$  [см. (4.16)].

Выражение (5.6) для потока тепла запишем в виде

$$P_{r, ps} = h_{r, pa} A_L (T_p - T_a). \quad (5.7)$$

Тождественное равенство с (5.6) выполняется, если положить

$$\frac{1}{AR_{r, pa}} = h_{r, pa} = \frac{\epsilon_p \sigma (T_p^2 + T_s^2)(T_p + T_s)(T_p - T_s)}{T_p - T_a}. \quad (5.8)$$



Таким образом, можно представить потери тепла в виде, показанном на рис. 5.3, в, где сопротивление  $R_L = (1/R_{v,pa} + 1/R_{r,pa})$  связывает поверхность приемника излучения с окружающей средой в соответствии с (5.3). Можно показать, что  $h_{r,pa}$  слабо зависит от  $T_p$ . Полагая  $T_p = 40^\circ \text{C}$ , находим  $h_{r,pa} = 7,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $r_{pa} = 0,031 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и  $R_L = 0,015 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

Максимально возможная температура достигается, когда имеет место баланс подводимого тепла и потерь, и выражение (5.3) преобразуется в (5.1) с  $P_{\text{нет}} = 0$ :

$$(T_j - T_a)/R_L = \tau \alpha A_p G.$$

Итак, для рассматриваемого резервуара  $T_j = 31^\circ \text{C}$ .

Оценим время, необходимое для достижения этой температуры. Скорость, с которой поднимается  $T_j$  при средней температуре  $T_j = 25^\circ \text{C}$ , определим согласно (5.3). Используя рассчитанную величину  $R_L$ , находим  $(dT_j/dt)_{25^\circ \text{C}} = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ К} \times \text{с}^{-1}$ . Следовательно, время, необходимое для повышения температуры на  $11^\circ \text{C}$ , составляет примерно

$$\Delta t = \Delta T / (dT_j/dt) = 1,3 \times 10^4 \text{ с} = 3,7 \text{ ч}.$$

На практике поток солнечного излучения  $G$  меняется в течение дня, так что расчеты дают только порядок величин  $\Delta T$  и  $\Delta t$ . Для получения более точных результатов необходимо решать уравнение (5.3) с учетом данных на каждый час по облученности поверхности приемника, а также расслоения воды по температуре.

**Черный резервуар с изолированным дном.** Потери тепла системой, изображенной на рис. 5.1, в, можно уменьшить почти в 2 раза, если изолировать дно приемника (рис. 5.1, з). В качестве изолятора можно использовать практически любой пористый материал, размер пор которого не превышает 1 мм, например стеклоткань, пенополистирол, древесную стружку и т. д. Теплопроводность этих материалов сравнима с теплопроводностью воздуха ( $k \sim 0,03 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ). Размеры пор не должны быть слишком велики, иначе будет существен конвективный перенос тепла, кроме того, поры должны быть сухими, поскольку теплопроводность воды выше, чем воздуха.

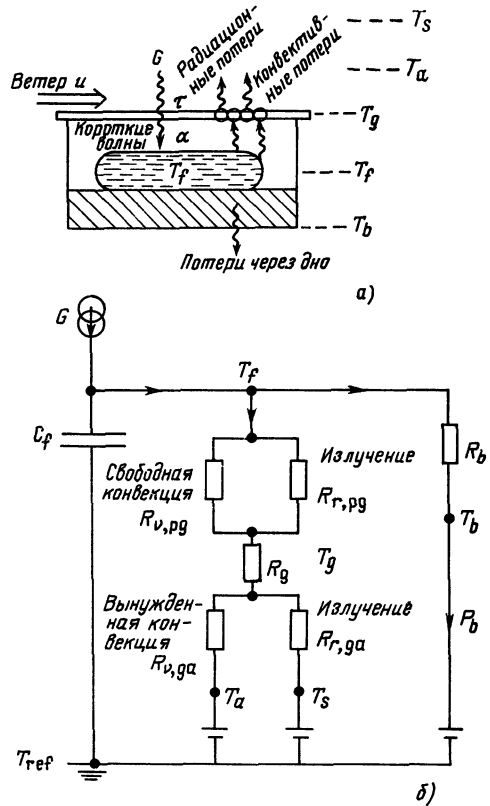
В задаче 5.2 показано, что достаточно всего нескольких сантиметров изолирующего слоя для того, чтобы сопротивление теплотерям от дна резервуара на порядок возросло по сравнению с сопротивлением крышки. Такая тонкая изоляция почти всегда достаточно дешева и потому выгодна.

## 5.4. Закрытые нагреватели

**Закрытые черные нагреватели.** Помещенный в открытом солнечном месте резервуар с изолированным от земли дном (см. рис. 5.1, з) обычно охлаждается ветром. Защитить емкость нагревателя от ветра можно, помещая его в контейнер с прозрачной для солнечного излучения крышкой (см. рис. 5.1, д).

Лучшим материалом для крышек является стекло. Прозрачная полиэтиленовая пленка дешевле, но ее слишком часто

Рис. 5.4. Закрытый черный нагреватель (а) и его эквивалентная диаграмма (б):  $T_s$  — небо;  $T_a$  — окружающий воздух;  $T_g$  — стекло (верхнее);  $T_f$  — жидкость;  $T_b$  — дно



приходится заменять, так как на солнце она быстро разрушается. Из рис. 3.15 следует, что коэффициент пропускания стекла в инфракрасной области спектра меньше, чем полиэтилена, следовательно, радиационные потери приемника со стеклянной крышкой ниже, чем с полиэтиленовой. Для приемников солнечного излучения используются также специальные покрытия из пластика, имеющие подобные стеклу свойства, но менее хрупкие.

Такую закрытую нагревательную систему, полная стоимость которой составляет около 200 долл. США, имеет смысл использовать в тех случаях, когда горячая вода не требуется рано утром (например, в домашнем хозяйстве). Емкость нагревателя можно заполнять вручную.

*Пример 5.2. Тепловой баланс закрытого приемника.* Пусть черный резервуар, описанный в примере 5.1, помещен внутри контейнера со стеклянной крышкой, расположенной над емкостью на расстоянии 3 см, толщина слоя изоляции под емкостью 10 см. Для таких же, что и в примере 5.1, внешних условий подсчитаем сопротивление тепловым потерям от резервуара, теоретическую максимальную среднюю температуру воды и время, необходимое для достижения этой температуры.

*Решение.* На рис. 5.4, а показана схема закрытого приемника, а на рис. 5.4, б — эквивалентная диаграмма. Как и раньше, будем рассматривать резервуар и его содержимое как единую систему, имеющую коэффициент поглощения  $\alpha=0,9$  и теплоемкость  $C_f=mc$ . Температура, при которой система теряет тепло, есть наружная температура резервуара  $T_p$ . В первом приближении можно положить  $T_p=T_f$  (средней температуре воды).

С учетом потерь тепла через дно резервуара, имеющего температуру наруж-

пой стенки  $T_b \approx T_a$ , получаем

$$P_b = (T_p - T_b)/R_b \approx (T_p - T_a)/R_b \quad (5.9)$$

или, используя (3.9),

$$P_b \approx \frac{(T_p - T_a) kA}{x} \approx \frac{(70 - 20) \text{К} (0,03 \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) (1 \text{ м}^2)}{0,1 \text{ м}} \approx 15 \text{ Вт},$$

что пренебрежимо мало.

Введем эффективное сопротивление дна резервуара  $R_b$  в общее сопротивление тепловым потерям  $R_L$ . На самом деле всегда можно сделать  $R_b$  достаточно большим, так как  $P_b$  пренебрежимо мало. Уравнение (5.1) теплового баланса запишем в виде

$$mc \frac{dT_j}{dt} = \tau \alpha A G - (T_j - T_a)/R_{pa}. \quad (5.10)$$

Из рис. 5.4, б следует, что поток тепла наружу выходит в три стадии.

1. Тепло в результате свободной конвекции поступает к стеклянной крышке через воздушный промежуток. Параллельно поверхность резервуара излучает энергию в диапазоне  $\lambda \approx 10$  мкм. В этой области спектра стекло не пропускает излучение, но сильно поглощает (см. рис. 3.15), поэтому тепловое излучение резервуара непосредственно с окружающей средой не взаимодействует, а поглощается стеклянной крышкой.

2. Тепло, подводимое к стеклу посредством этих двух механизмов, передается к наружной его поверхности.

3. С наружной поверхности отвод тепла происходит в процессе свободной и (или) вынужденной конвекции и излучением.

Таким образом, можно записать выражение для полного сопротивления теплотерям между приемной поверхностью резервуара и окружающим воздухом:

$$R_{pa} = \left\{ \frac{1}{R_{v, pg}} + \frac{1}{R_{r, pg}} \right\}^{-1} + R_g + \left\{ \frac{1}{R_{v, ga}} + \frac{1}{R_{r, ga}} \right\}^{-1}. \quad (5.11)$$

Сопротивление  $R_g$  на рис. 5.4, б пренебрежимо мало, так как стекло тонкое (около 5 мм) и достаточно хорошо проводит тепло ( $k \approx 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ); поэтому разность температур вдоль стеклянной крышки также пренебрежимо мала. Конвективное и радиационное сопротивления слабо зависят от температуры, поэтому в расчетах можно использовать оценочные значения температур:

$$T_p = 70^\circ \text{С}; \quad T_g = 0,5(T_p + T_a) = 45^\circ \text{С}.$$

Для приемника площадью  $1 \text{ м}^2$  конвективное сопротивление  $R_{v, pg}$  следует из примера 3.2:

$$R_{v, pg} = 0,52 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

Полагая для длинноволнового излучения  $\epsilon_p = \epsilon_g = 0,9$ , с помощью расчетов, аналогичных проведенным в примере 3.6, находим радиационное термическое сопротивление:

$$R_{r, pg} = 0,16 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

Таким образом, получаем полное термическое сопротивление промежутка приемная поверхность нагревателя — стеклянная крышка:

$$R_{pg} = [(1/R_{v, pg}) + (1/R_{r, pg})]^{-1} = 0,12 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}. \quad (5.12)$$

Сопротивление между наружной поверхностью стекла и окружающим воздухом такого же порядка, как и уже вычисленное для открытого резервуара, а именно:  $R_{ga} = 0,031 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Подставляя это значение в (5.11), получаем  $R_{pa} = 0,15 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Из выражения (5.10) при  $dT_i/dt = 0$ ,  $\tau = \alpha = 0,9$  и  $G = 750 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  находим  $T_p^{(m)} = 95^\circ \text{С}$ . Оценки  $(dT/dt)_{60^\circ \text{С}}$  показывают, что для достижения максимальной температуры требуется 31 ч работы нагревателя.

Расчетное значение максимально достижимой температуры сверхоптимистично, поскольку мы пренебрегли периодичностью солнечного излучения, вследствие которой невозможно обеспечить освещенность приемника в течение всего времени, необходимого для нагрева до такой температуры. Тем не менее, из примера 5.2 следует, что: 1) наличие стеклянной крышки примерно в 4 раза повышает сопротивление теплопотерям между поверхностью нагретой воды и окружающим воздухом; 2) простой закрытый нагреватель позволяет повышать температуру воды более чем на  $50^\circ \text{С}$ .

**Металлические проточные нагреватели.** В приемнике, показанном на рис. 5.1, *е*, вода протекает по параллельным трубкам, закрепленным на зачерненной металлической пластине. В такой системе необходимо обеспечивать низкое термическое сопротивление между пластиной и трубками и вдоль пластины между трубками.

Обычно диаметр трубок составляет около 2 см, расстояние между ними 20 см, толщина пластины 0,3 см. Пластины с трубками для защиты от ветра помещают в контейнер со стеклянной крышкой. Этот приемник имеет по существу ту же эквивалентную диаграмму, что и закрытый зачерненный резервуар (рис. 5.4, б), и поэтому близкие по значению сопротивления.

Заполненная водой пластина в принципе более эффективна, чем трубчатая, так как имеет большую поверхность теплового контакта.

Нагретую жидкость можно использовать сразу или можно ее запасать и (или) перекачивать, как показано на рис. 5.6.

**Эффективность плоского пластинчатого приемника.** Поток тепла от приемника с площадью  $A_p$  к теплоносителю при облученности в плоскости приемной площади  $G$  определяется следующим образом:

$$P_u = A_p q_u = \eta_c A_p G. \quad (5.13)$$

В соответствии с (5.1) и (5.2а) эффективность приемника  $\eta_c$  можно рассматривать как произведение двух множителей, характеризующих эффективность поглощения лучистой энергии

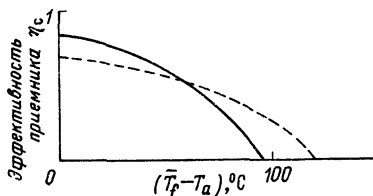


Рис. 5.5. Типичная зависимость эффективности плоского пластинчатого приемника от температуры;  $\bar{T}_f$  — средняя температура теплоносителя (сплошная кривая — коллектор с обычной черной матовой поверхностью, штриховая — с селективной поверхностью)

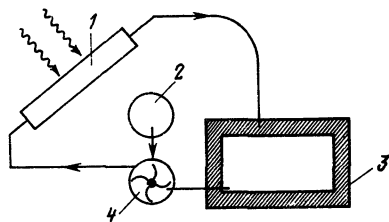


Рис. 5.6. Нагревательная система с изолированным накопителем и принудительной циркуляцией: 1 — приемник; 2 — регулятор; 3 — изолированный накопительный резервуар; 4 — насос

$\eta_{sp}$  и передачи тепла жидкости  $\eta_{pf}$ :

$$\eta_c = \eta_{sp} \eta_{pf}. \quad (5.14)$$

Из уравнения (5.1), кроме того, следует, что в процессе нагрева приемной пластины потери тепла растут до тех пор, пока при «равновесной» температуре  $T_p^{(m)} \eta_{sp}$  не уменьшится до нуля. В хорошо сконструированном нагревателе разность температур между приемной пластиной и теплоносителем мала и эффективность теплопередачи  $\eta_{pf}$  высока (см. задачу 5.8). Как правило,  $\eta_{pf} = 0,85$  и практически не зависит от температуры, а сопротивление радиационным потерям заметно падает при увеличении  $T_p$ . Этим объясняется наличие некоторой кривизны в зависимости  $\eta_c$  от рабочей температуры, показанной на рис. 5.5.

Характеристики плоского пластинчатого приемника и его эффективность при высоких температурах могут быть улучшены в результате: 1) уменьшения конвективного переноса между приемной пластиной и стеклянной крышкой, если над первой стеклянной крышкой поместить еще одну дополнительную стеклянную крышку (см. рис. 5.1, ж и задачу 5.5); 2) уменьшения радиационных потерь от пластины, если ее поверхность делать не черной, а селективной, т. е. сильно поглощающей, но слабо излучающей в определенной области спектра (см. § 5.6).

Параметры различных приемников представлены в табл. 5.1.

## 5.5. Системы с изолированным накопителем

**Принудительная циркуляция.** Приемники, изображенные на рис. 5.1, е, позволяют нагревать небольшие объемы жидкости, которая с помощью насоса перекачивается в изолированную накопительную емкость (рис. 5.6). Для систем, используемых в домашнем хозяйстве, резервуары объемом 100—200 л могут обеспечить суточную потребность в горячей воде. Обычно скорость прокачки выбирают такой, чтобы температура воды повы-

шалась примерно на  $4^\circ\text{C}$  при каждом проходе через нагреватель. Для этого используются однокоростные насосы как наиболее дешевые. Так как повышение температуры зависит от облученности приемной площадки  $G$  и температуры воды на входе приемника  $T_1$ , повышение на  $4^\circ\text{C}$  будет достигаться только для одного типа условий.

*Пример 5.3. Повышение температуры в приемнике.* Рассмотрим плоский пластинчатый нагреватель, размеры которого  $2 \times 0,8\text{ м}^2$ , сопротивление теплопотерям  $r_L = 0,13\text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и коэффициент теплопередачи  $\eta_{pl} = 0,85$ . Коэффициент пропускания стеклянной крышки  $\tau = 0,9$ ; коэффициент поглощения пластины  $\alpha = 0,9$ . Температура входящей в приемник жидкости  $T_1 = 40^\circ\text{C}$ . Температура окружающего воздуха  $T_a = 20^\circ\text{C}$ , поток лучистой энергии в плоскости приемной площадки  $G = 750\text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

а) Рассчитайте скорость прокачки, которая необходима для повышения температуры воды в приемнике на  $4^\circ\text{C}$ .

б) Предположим, что насос продолжает работать и ночью, когда  $G = 0$ . Как будет снижаться температура воды за каждый проход через приемник? (Положим, что  $T_1 = 40^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 20^\circ\text{C}$ .)

*Решение.* а) Из (5.1) и (5.2) получаем, что тепловой поток на единицу площади

$$q_u = (\rho c Q / A) (T_2 - T_1) = \eta_{pl} [\tau \alpha G - (T_p - T_a) / r_L]. \quad (5.15)$$

Положим  $T_p = 42^\circ\text{C}$  (средняя температура потока), тогда

$$Q = 3,5 \times 10^{-5}\text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} = 130\text{ л} \cdot \text{ч}^{-1}.$$

б) В выражение (5.15) подставим  $G = 0$ ,  $T_p = 38^\circ\text{C}$  и найденное значение  $Q$ , получим

$$T_2 - T_1 = -1,3^\circ\text{C}.$$

Таким образом, если приемник, описанный в примере 5.3, является частью нагревательной системы емкостью 130 л, в которой вода прокачивается со скоростью 1 цикл/ч, то температура воды ночью будет снижаться на  $1,3^\circ\text{C} \cdot \text{ч}^{-1}$ , если насос будет продолжать работать. Этот момент следует иметь в виду и предусматривать защиту жидкости от охлаждения в приемнике.

Системы с принудительной циркуляцией жидкости выгодны, поскольку для их создания можно использовать существующие водонагревательные системы, вводя в них приемник солнечного излучения и насос. Кроме того, в таких системах нет необходимости располагать накопительную емкость выше приемника. Недостатком систем является зависимость от электроэнергии, потребляемой насосом, которая может быть дорогостоящей или может подаваться нерегулярно.

**Тепловая циркуляция.** Циркуляция жидкости в нагревательной системе, показанной на рис. 5.7, а, осуществляется вследствие различия плотностей холодной (плотной) и горячей (менее плотной) воды. Рассмотрим циркуляцию жидкости по замкнутому вертикальному контуру (рис. 5.8).

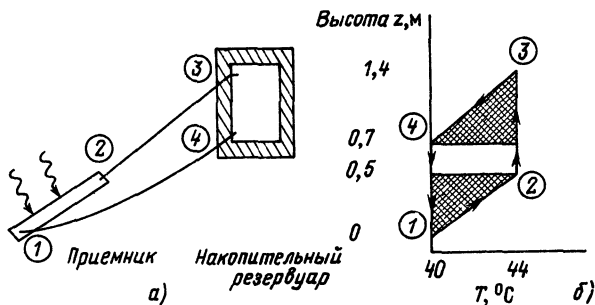


Рис. 5.7. Нагревательная система с изолированным накопителем и тепловой циркуляцией: диаграмма (а) и распределение температур (б), см. пример 5.4

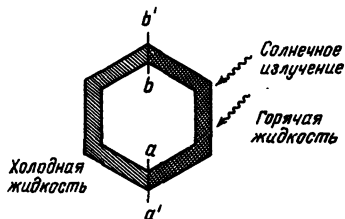


Рис. 5.8. Принцип действия системы с тепловой циркуляцией

В сечении  $a a'$

$$\int_{a(\text{left})}^b \rho g dz - \int_{a(\text{right})}^b \rho g dz > 0. \quad (5.16)$$

Давление жидкости в сечении  $a a'$  слева больше, чем справа, что приводит к движению жидкости по всему контуру.

Левую часть (5.16) можно записать в виде

$$\rho_T = \oint \rho g dz, \quad (5.17)$$

где интегрирование ведется по замкнутому контуру. Следует иметь в виду, что  $dz$  в (5.17) соответствует приращению в вертикальном направлении, а не вдоль длины трубки. Уравнение (5.17) перепишем в виде

$$\rho_T = \rho_0 g H_T, \quad (5.18)$$

где

$$H_T = \oint (\rho/\rho_0 - 1) dz \quad (5.19)$$

соответствует увеличению энергии на единицу массы жидкости;  $\rho_0$  — плотность жидкости в реперной точке. Увеличение энергии жидкости будет ограничено потерями на трение в трубке  $H_f$  (см. § 2.6).

Коэффициент расширения  $\beta$  обычно постоянен:

$$\beta = -(1/\rho) d\rho/dT.$$

В этом случае (5.19) можно представить в виде

$$H_T = -\beta I_T = -\beta \oint (T - T_0) dz, \quad (5.20)$$

где  $T_0$  — температура в реперной точке. Направление течения потока соответствует положительному значению  $I_T$ .

*Пример 5.4. Расчет течения в системе с тепловой циркуляцией.* В нагревательной системе, показанной на рис. 5.7, вода поступает в приемник при температуре  $T_1 = 40^\circ \text{C}$ , нагревается на  $4^\circ \text{C}$  и без потерь тепла перемещается вверх при  $T_3 = T_2 = 44^\circ \text{C}$ . Рассчитайте время, необходимое для циркуляции воды по всему контуру, если система содержит 100 л воды, считая расслоение жидкости в накопительном резервуаре по температуре установившимся. (Индексы при  $T$  соответствуют точкам на рис. 5.7 — *Прим. ред.*)

*Решение.* В результате циркуляции в изолированном контуре температура наиболее холодной воды на дне накопительного резервуара устанавливается такой же, как и на входе в приемник (т. е.  $T_4 = T_1$ ). Интеграл  $\oint (T - T_0) dz$  по контуру 1234 есть площадь, ограниченная кривой 1234 на рис. 5.7, б и равная сумме площадей заштрихованных треугольников и площади прямоугольника в центре:

$$I_T = 0,5(0,5 \text{ м})(4^\circ \text{C}) + (0,2 \text{ м})(4^\circ \text{C}) + 0,5(0,7 \text{ м})(4^\circ \text{C}) = +3,2 \text{ м} \cdot ^\circ \text{C}.$$

Положительное значение площади определяется направлением интегрирования. Направление потока жидкости совпадает с направлением 1234. Подставляя в (5.20) среднее значение  $\beta = 3,5 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ , получаем  $H_T = -0,0010 \text{ м}$ . Более точное значение получим, построив контур  $p(z)$  и решив уравнение (5.19).

Для расчета скорости потока приравняем  $H_T$  силе трения с противоположным знаком. Трение максимально в самых тонких трубках, т. е. в трубках приемника. Предположим, что в приемнике четыре трубки, каждая длиной  $L = 2 \text{ м}$  и диаметром  $D = 12 \text{ мм}$ . Тогда в каждой трубке

$$H_T = 2fLu^2/Dg,$$

где  $u$  — скорость потока;  $f = 16\nu/uD$  для ламинарного течения (обозначения те же, что и в гл. 2).

Следовательно,

$$u = \frac{gD^2 H_T}{32Lv} = \frac{(1,0 \times 10^{-3} \text{ м})(12 \times 10^{-3} \text{ м})^2 (9,8 \text{ мс}^{-2})}{(32)(2 \text{ м})(0,7 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1})} = 0,031 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

Найдем число Рейнольдса  $uD/\nu = 540$ , т. е. течение действительно является ламинарным.

Объемный расход через четыре трубки

$$Q = 4(u\pi D^2/4) = 1,4 \times 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Таким образом, в системе, содержащей 100 л воды, циркуляция по контуру происходит за

$$(100)(10^{-3} \text{ м}^3) \left( \frac{1}{1,4 \times 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}} \right) \left( \frac{1 \text{ ч}}{3,6 \cdot 10^3 \text{ с}} \right) = 2,0 \text{ ч}.$$



## 5.6. Селективные поверхности

**Идеальные селективные поверхности.** Максимум энергии солнечного излучения, поглощаемой приемником, соответствует длине волны, равной приблизительно 0,5 мкм; максимум энергии, излучаемой приемником, — длине волны 10 мкм. Идеальная поверхность приемника должна по возможности поглощать как можно больше энергии и сводить к минимуму потери, т. е. поверхность должна иметь большой монохроматический коэффициент поглощения  $\alpha_\lambda$  при  $\lambda \sim 0,5$  мкм и низкий монохроматический коэффициент излучения  $\epsilon_\lambda$  при  $\lambda \sim 10$  мкм (рис. 5.9). Для селективной поверхности справедливо  $\alpha_{short} \gg \epsilon_{long}$ . В этом случае  $\alpha$  и  $\epsilon$  есть средние значения  $\alpha_\lambda$  и  $\epsilon_\lambda$  соответственно в пределах разных интервалов длин волн [ср. с (3.27)].

**Структура металл—полупроводник.** Некоторые полупроводники характеризуются близким к требуемому для идеальной селективной поверхности отношением  $\alpha_\lambda/\epsilon_\lambda$ . Полупроводники могут поглощать только фотоны с энергиями, большими ширины запрещенной зоны  $E_g$ , т. е. энергии, необходимой для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости (см. гл. 7). Пороговая энергия  $E_g$  соответствует длинам волн, примерно равным 1,1 мкм для Si и 2 мкм для  $\text{Cu}_2\text{O}$ , более короткие волны сильно поглощаются (рис. 5.9). Однако низкая механическая прочность, низкая теплопроводность и высокая стоимость полупроводников делают их мало пригодными для изготовления всего приемника солнечного излучения.

Металлы прочны, хорошо проводят тепло и относительно дешевы, но, к сожалению, хорошо отражают (т. е. слабо поглощают) излучение в видимой и инфракрасной областях спектра.

Взаимодействие электронов проводимости с падающим на поверхность металла электромагнитным излучением приводит к изменению частоты колебаний электронов вблизи поверхности. В результате этого большая часть энергии, приобретенной электронами от электромагнитного поля, излучается в виде вторичных волн, которые, складываясь, создают отраженную волну. Энергия отраженной волны незначительно отличается от энергии падающей, поэтому внешнему наблюдателю кажется, что падаю-

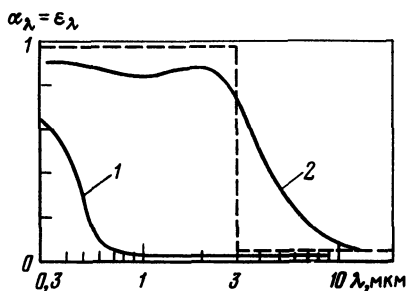
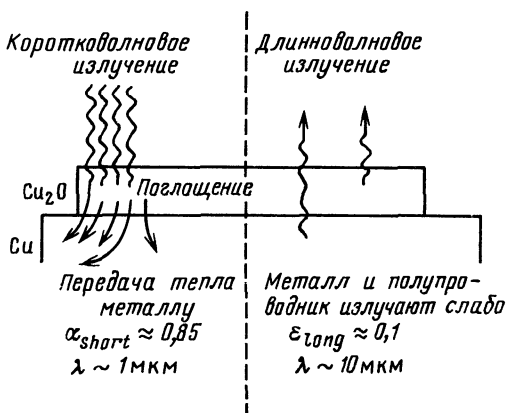


Рис. 5.9. Спектральные характеристики различных поверхностей. Приведены кривые для металла Cu (кривая 1) и полупроводника  $\text{Cu}_2\text{O}$  (2). Штриховая кривая — идеальная селективная поверхность

Рис. 5.10. Тепловые потоки для одного типа селективных поверхностей. Слой полупроводника (сильно поглощающий коротковолновое солнечное излучение) нанесен на металлическую поверхность (слабо излучающую в длинноволновом диапазоне спектра)



щее на поверхность металла излучение отражается. Так, для  $\lambda \gg 1 \text{ мкм}$   $\rho_\lambda \approx 0,97$ , т. е.  $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda \approx 0,03$  (см. рис. 5.9).

Для некоторых металлов характерно повышение коэффициента поглощения при длинах волн падающего излучения ниже определенной длины волны  $\lambda_p$ . Для меди  $\lambda_p \approx 0,5 \text{ мкм}$  (см. рис. 5.9), поэтому медь поглощает в синей области сильнее, чем в красной, и кажется красноватой. Длина волны  $\lambda_p$  соответствует плазменной частоте  $f_p = c/\lambda_p$ . Увеличение частоты падающего излучения выше плазменной приводит к возбуждению плазменных колебаний электронов, при этом коэффициент поглощения металла  $\alpha$  возрастает для  $f \geq f_p$ .

Если слой металла покрыть тонким слоем полупроводника, их характеристики можно скомбинировать. На рис. 5.10 показана схема процесса поглощения коротковолнового излучения (сильно поглощается в полупроводнике), приходящего на поверхность слоя полупроводника, и передачи тепла металлической подложке. Толщина слоя полупроводника определяется, с одной стороны, необходимостью обеспечения эффективной теплопередачи (теплопроводность полупроводника мала), с другой стороны — требованием поглощения максимальной доли потока излучения, чтобы исключить возможность отражения от поверхности металла прошедшего через полупроводник излучения. Эффективная длина поглощения в полупроводниках при  $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$  обычно составляет около 1 мкм, т. е. 63% приходящего излучения поглощается в слое толщиной 1 мкм и 95% — в слое 3 мкм (см. § 3.6), следовательно, коэффициент поглощения солнечного излучения достаточно высок. Излучательная способность как металла, так и полупроводника на длинах волн около 10 мкм невелика ( $\epsilon \approx 0,1$ , как, например, на рис. 5.10).

Полученная в результате сложная поверхность имеет более низкий уровень радиационных потерь, чем простая черная поверхность, которая является черной и для видимого, и для

инфракрасного излучения и поэтому имеет  $\alpha = \varepsilon \approx 0,9$ . Коэффициент поглощения селективной поверхности не такой высокий, как черной, поскольку  $\alpha_\lambda$  такой поверхности уменьшается для  $\lambda \geq 1$  мкм (см. рис. 5.9), а 30% солнечного излучения приходится на диапазон  $\lambda > 1$  мкм (см. рис. 4.1). Низкая излучательная способность селективной поверхности увеличивается при повышении температуры, при этом возрастают и радиационные потери (пропорционально  $\varepsilon T^4$ ). Так, при температуре поверхности  $40^\circ \text{C}$  и  $\varepsilon > 0,9$  радиационные потери обычно составляют около 20% полных потерь тепла (см. пример 5.1), однако при температуре поверхности  $400^\circ \text{C}$  они составят уже 50%, если  $\varepsilon = 0,9$ , и только 10%, если  $\varepsilon = 0,1$ .

Для получения селективной поверхности медную пластинку погружают в щелочной раствор, при этом на ее поверхности образуется пленка  $\text{Cu}_2\text{O}$ . На рис. 5.9 показаны абсорбционные характеристики такой поверхности, изготовленной промышленным способом.

В лабораторных условиях получены различные селективные поверхности, но использовать можно лишь некоторые из них, так как одни слишком дорогие, другие слишком хрупкие или с плохо воспроизводимыми параметрами; иногда характеристики поверхностей меняются со временем (процесс называется «старением»). Для некоторых селективных поверхностей, отличных от описанной структуры  $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ , могут быть существенны интерференция волн в тонких пленках, многократные отражения на шероховатостях поверхности металла.

Изготовление селективных поверхностей обходится дороже, чем простая окраска поверхности приемника в черный цвет. Вследствие этого, а также из-за низкого коэффициента поглощения при невысоких температурах такие поверхности в настоящее время нецелесообразно использовать для приемников, работающих при температурах ниже  $60^\circ \text{C}$ . Однако при температурах, составляющих сотни градусов Цельсия (например, в солнечных башнях, см. § 6.9), требуются селективные поверхности, которые способны в течение нескольких лет сохранять достаточно высоким отношение  $\alpha_{short}/\varepsilon_{long}$ , например, равным 30.

## 5.7. Вакуумированные приемники

Использование селективно поглощающей поверхности приводит к значительному снижению радиационных потерь в приемнике. Для достижения еще более высоких температур (например, температур около  $100^\circ \text{C}$  или выше, в которых особенно нуждается промышленность) необходимо уменьшить также и конвективные потери. Одним из способов является размещение дополнительных стеклянных покрытий над плоским приемником (см. рис. 5.1, ж и задачу 5.3). Лучшим, но технически более сложным

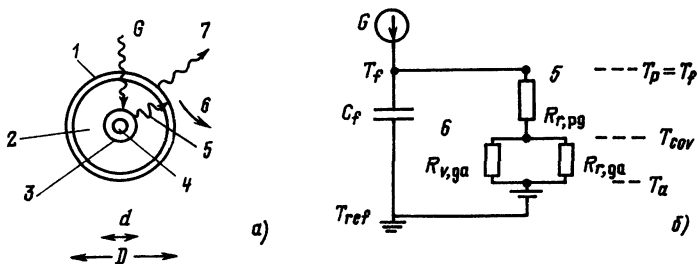


Рис. 5.11. Вакуумированный приемник (а) и его эквивалентная диаграмма (б): 1 — покрытие из стекла; 2 — вакуум; 3 — селективное покрытие на поверхности внутренней стеклянной стенки; 4 — жидкость; 5 — излучение; 6 — конвекция, 7 — излучение ( $T_p$  — приемная пластина, жидкость;  $T_{cov}$  — покрытие из стекла;  $T_a$  — окружающий воздух)

способом является вакуумирование пространства между приемной поверхностью и ее стеклянной крышкой.

Основным элементом вакуумированного приемника является двойная трубка (рис. 5.11, а). Внешняя трубка изготовлена из стекла, так как оно прозрачно для солнечного излучения, но непрозрачно для теплового. Внутренняя трубка также обычно изготавливается из стекла, широко используемого в вакуумной технике. Степень обезгаживания отожженного стекла (пирекса) такова, что давление может поддерживаться ниже 0,1 Па в течение 300 лет, что в  $10^{12}$  раз дольше, чем при использовании медной трубки. Внутренняя трубка имеет кольцевое сечение; это позволяет довольно хрупкому стеклу противостоять действию напряжений, возникающих в нем из-за перепада давлений между жидкостью внутри трубки и вакуумом снаружи. Обычно внешний диаметр трубок  $D=2$  см, внутренний  $d=1$  см. Соответствующим образом соединяя такие трубки, можно сконструировать приемник, который будет принимать как направленное, так и диффузное солнечное излучение. Рассматриваются различные варианты геометрии таких приемников; показанный на рис. 5.11, а наиболее прост для анализа.

*Пример 5.5. Тепловой баланс вакуумированного приемника.* Рассчитайте сопротивление теплопотерям вакуумированного приемника (рис. 5.11, а) и определите температуру торможения при  $D=2$  см,  $d=1$  см,  $G=750$  Вт·м $^{-2}$ ,  $T_a=20^\circ$  С и  $u=5$  м·с $^{-1}$ .

*Решение.* Используются обозначения и методы, изложенные в гл. 3.

Эквивалентная диаграмма приведена на рис. 5.11, б. Конвективный перенос тепла имеет место только от внешней стеклянной трубки к окружающей среде, между внутренней трубкой и внешней конвекции нет.

Рассмотрим трубку единичной длины и положим  $T_p=100^\circ$  С = 373 К,  $T_g=40^\circ$  С = 313 К [это значение  $T_g$  меньше, чем  $0,5(T_p+T_a)$ , так как идея конструкции состоит в получении  $r_{pg} > r_{ga}$ ]. Рассматривая две трубки как параллельные поверхности и полагая  $\epsilon_p=0,1$  и  $\epsilon_g=1$ , из (3.6), (3.43) и табл. 3.4

получаем

$$1/r_{pg} = \sigma \varepsilon_p (T_p^2 + T_g^2) (T_p + T_g) = 0,92 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Считая, что характеристическая поверхность  $A_{pg}$  есть поверхность цилиндра высотой 1 м со средним диаметром 1,5 см, находим

$$R_{pg} = r_{pg}/A_{pg} = 23 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

Для внешней поверхности площадью  $A_g = 2\pi(2 \text{ см})(1 \text{ м}) = 0,125 \text{ м}^2$  коэффициент потерь приближенно определяется из табл. 3.2:

$$h_{v, ga} = (5,7 + au) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1},$$

где  $a = 3,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} / (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$

Из (3.6), (3.8) и (3.44) имеем

$$h_{r, ga} = 4\sigma \left( \frac{T_g + T_a}{2} \right)^3 = 6,3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Следовательно,

$$R_{ga} = (h_{v, ga} + h_{r, ga})^{-1} / A_g = 0,25 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1},$$

$$R_{pa} = R_{ga} + R_{pg} = 23,2 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

Видно, что сопротивление радиационным потерям тепла преобладает, конвективный член пренебрежимо мал. Не имеет значения, что формула табл. 3.2 не совсем справедлива для данной геометрии, так как она дает верхнюю оценку сопротивления искривленной поверхности.

Так как каждый метр трубки занимает ту же площадь приемника, что и плоская пластина  $0,02 \text{ м}^2$ , можно сказать, что эквивалентное сопротивление единицы поверхности составляет  $r_{pg} = 0,48 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , хотя эта величина не имеет того же смысла, что и для действительно плоских приемных пластин.

Для расчета теплового баланса одной трубки следует учесть, что ввод энергии происходит на выпуклую поверхность внутренней трубки, а теряется энергия с наружной поверхности внешней трубки. В равновесии потоки энергии в ту и в другую сторону равны:

$$\tau \alpha_p G d = (T_p - T_a) / R_{pa},$$

отсюда получаем максимальную температуру

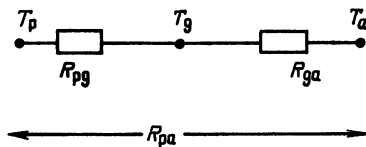
$$T_p^{(m)} = 156^\circ \text{ С для } \tau = 0,9, \quad \alpha_p = 0,85.$$

Это значение  $T_p^{(m)}$  меньше приведенного в табл. 5.1 для пластины, покрытой двойной стеклянной крышкой, но  $T_p^{(m)}$  и, что более важно, температуру на выходе из приемника  $T_2$  можно повысить, если увеличить подвод энергии к каждой трубке, например помещая за трубкой зеркало. Можно использовать даже плоский белый экран, который полезен еще и потому, что он возвращает часть радиационных потерь тепла обратно к внешней трубке.

### Задачи

5.1. В экранированном плоском пластинчатом приемнике перенос тепла между приемной площадкой и окружающим воздухом можно представить диаграм-

Рис. 5.12. Схема термических сопротивлений к задаче 5.1



мой, показанной на рис. 5.12, где  $T_p$ ,  $T_g$  и  $T_a$  — средние температуры приемной площадки, стекла и воздуха соответственно.

а) Покажите, что

$$T_g = T_a + (R_{ga}/R_{pa}) (T_p - T_a).$$

Подтвердите, что при  $T_p = 70^\circ \text{C}$  и сопротивлении, рассчитанном в примере 5.2,  $T_g = 32^\circ \text{C}$ .

б) Пересчитайте значения сопротивлений потерям с помощью этого второго приближения для  $T_g$  вместо первого приближения  $0,5(T_p + T_a) = 45^\circ \text{C}$ , использованного в примере, и покажите, что влияние полного сопротивления  $r_{pa}$  мало.

в) Подставьте рассчитанные в п. б) значения сопротивлений  $R_{ga}$  и  $R_{pa}$  в формулу из п. а) и подсчитайте третье приближение для  $T_g$ . Оправданы ли дальнейшие приближения?

5.2. Приемник, рассмотренный в примере 5.2, имеет термическое сопротивление поверхности  $r_{pa} = 0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Предположим, что дно приемника изолировано от окружающего неподвижного воздуха с помощью стекловолокна с  $k = 0,034 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ . Какой толщины требуется изоляция, чтобы обеспечить термическое сопротивление дна: а) равное сопротивлению поверхности и б) в 10 раз большее сопротивления поверхности?

5.3. Плоский пластинчатый приемник имеет двойное стеклянное покрытие. Нарисуйте эквивалентную диаграмму, показывающую потери тепла от пластины в окружающую среду, и подсчитайте сопротивление на единицу площади  $r_{pa}$  для потерь через стеклянные покрытия (возьмите стандартные условия, как в примере 5.2). Почему такому приемнику требуется более толстая изоляция дна, чем приемнику с одним слоем стекла?

5.4. Рассчитайте сопротивление  $r_{pa}$  плоского пластинчатого приемника с односторонним стеклянным покрытием и селективной поверхностью (рассмотрите стандартные условия, как в примере 5.2). Приемник показан на рис. 5.1, з.

5.5. Рассчитайте термическое сопротивление плоского пластинчатого приемника с двойным стеклянным покрытием и селективной поверхностью, показанного на рис. 5.1, ж (также при стандартных условиях).

5.6. Разлитое в бутылки пиво пастеризуется в потоке горячей воды ( $70^\circ \text{C}$ ) в течение 10 мин. Определено, что для качественной пастеризации необходимо на каждую бутылку подавать по 50 л горячей воды. Вода циркулирует так, что минимальная температура составляет  $40^\circ \text{C}$ .

а) Предполагается использовать солнечную энергию для подогрева воды на пивзаводах. Какой формы приемник был бы наиболее пригоден для этой цели? Подсчитайте минимальную требуемую площадь приемника в отсутствие потерь, если производительность завода составляет 65 000 бутылок за 8-часовой рабочий день (облученность поверхности приемника в горизонтальной плоскости  $20 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$ ).

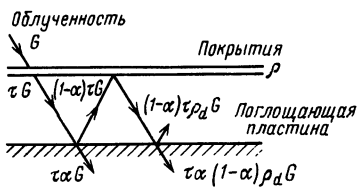
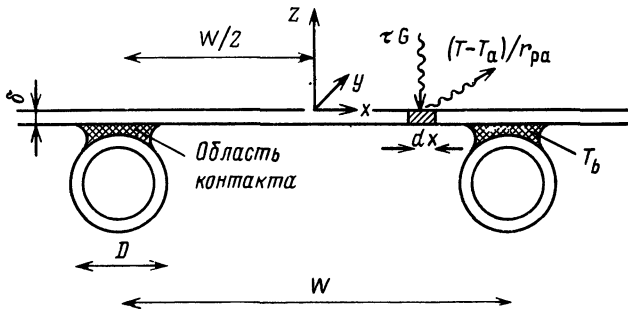


Рис. 5.13. Многократные отражения между поверхностью приемной пластины и покрытием (к задаче 5.7)  
Рис. 5.14. Сечение трубчато-пластинчатого коллектора (к задаче 5.8)



б) Уточните оценки требуемой площади приемника, предположив, что потери соответствуют потерям плоского пластинчатого приемника с односторонним стеклянным покрытием. Сделайте соответствующие оценки  $G$ ,  $T_a$ ,  $u$ .

в) Для данного приложения будет ли хуже, если использовать приемники с двойным стеклянным покрытием, с селективной поверхностью? Подтвердите Ваши рассуждения количественно.

*Рекомендация:* используйте данные табл. 5.1.

5.7. Рассмотрим закрытый стеклом плоский пластинчатый приемник. Часть излучения, достигающего приемной поверхности, отражается и возвращается к стеклу, а затем, отразившись от стекла, снова приходит на приемную пластину, как показано на рис. 5.13,  $\bar{\alpha}$  — доля поглощенной энергии

а) Покажите, что с учетом многократных отражений произведение  $\tau \alpha$  в (5.1) и (5.10) необходимо заменить на

$$(\tau \alpha)_{ef} = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d},$$

где  $\rho_d$  — коэффициент отражения системы покрытий для диффузного излучения.

б) Коэффициент отражения стеклянной пластины заметно возрастает для углов падения, больших  $45^\circ$  (почему?). Коэффициент отражения  $\rho_d$  можно оценить для угла падения  $60^\circ$ ; типичное значение  $\rho_d \approx 0,7$ . Для  $\tau = \alpha = 0,9$  подсчитайте отношение  $(\tau \alpha)_{ef} / \tau \alpha$  и объясните его влияние на тепловой баланс пластины.

5.8. Определим коэффициент эффективности оребрения. На рис. 5.14 показан трубчато-пластинчатый приемник. Элемент пластины  $dx dy$  поглощает определенное количество солнечного тепла, часть которого терется в окружающей среде, а остальное переносится вдоль пластины (в направлении  $x$ ) к месту соединения с трубкой. Пусть теплопроводность пластины  $k$ , толщина  $\delta$ , а температура в месте соединения постоянна и равна  $T_b$ .

а) Покажите, что в равновесии баланс энергии для элемента пластины записывается в виде

$$k\delta \frac{d^2T}{dx^2} = (T - T_a - \tau Gr_{pa})/r_{pa}.$$

б) Проверьте правильность граничных условий

$$dT/dx=0 \text{ при } x=0,$$

$$T=T_b \text{ при } x=(W-D)/2.$$

в) Покажите, что решением а) и б) является

$$\frac{T - T_a - \tau Gr_{pa}}{T_b - T_a - \tau Cr_{pa}} = \frac{\text{ch}mx}{\text{ch}m(W-D)/2},$$

где  $m^2 = 1/(k\delta r_{pa})$ , и что тепло, подводимое к месту соединения пластины с трубкой, записывается в виде

$$(W-D)F[\tau G - (T_b - T_a)/r_{pa}],$$

где коэффициент эффективности оребрения определяется выражением

$$F = \frac{\text{th}m(W-D)/2}{m(W-D)/2}.$$

г) Вычислите  $F$  для  $k=385 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $\delta=1 \text{ мм}$ ,  $W=100 \text{ мм}$ ,  $D=10 \text{ мм}$ .

5.9. Что происходит в системе с тепловой циркуляцией ночью? Покажите, что если накопительный резервуар целиком расположен над коллектором, то система может быть стабилизирована при  $H_T=0$ , но если хотя бы часть резервуара ниже коллектора, то будет происходить обратная циркуляция. Рекомендация: постройте диаграмму изменения температуры с высотой, как на рис. 5.7, б.

### Решения

5.1. б)  $h_{v,pg}=2,4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $h_{r,pg}=6,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ , следовательно,  $r_{pg}=0,12 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ,  $h_{v,ga}=24,7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $h_{r,ga}=7,9 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$  и, следовательно,  $r_{ga}=0,03 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ,  $r_{pa}=0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$  (сравните с 0,13 для  $T_g=45^\circ \text{ С}$ ).

в)  $30^\circ \text{ С}$ . Нет.

5.2. а) 4 мм, б) 44 мм.

5.3. В результате цинк от пластины к стеклу (см. рис. 5.4, б) проходит дважды,

$$r_{pa}=0,22 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

5.4. Эквивалентная диаграмма та же, что и на рис. 5.4, б, но с  $\epsilon_p=0,1$ ,  $r_{pa}=0,40 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

5.5. Эквивалентная диаграмма та же, что и для задачи 5.3. но с  $\epsilon_p=0,1$ ,  $r_{pa}=0,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

5.6. Используем (5.2) в форме

$$m\text{с}\Delta T/\Delta t = A\tau_{\text{cov}}\alpha G - (T_p - T_a)/r_{pa},$$

при  $m = (65\,000 \text{ бут.}) \times (50 \text{ кг/бут.})$ ,  $\Delta T = 30^\circ \text{ С}$ ,  $\Delta t = 8 \text{ ч}$ ,  $G = (20 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}) / (8 \text{ ч}) = 700 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  (в среднем) получаем



Пункт	$\tau_{сов}$	$\alpha$	$r_{ра}, \text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$	$A, 10^4 \text{ м}^2$	Стоимость приемника, долл $\cdot \text{м}^{-2}$	Стоимость приемника, $10^6$ долл
а)	1,0	1,0	$\infty$	2,0	—	—
б)	0,9	0,9	0,13	4,3	100	4,3
в)	$(0,9)^{2*1}$	$0,9^{*1}$	$0,22^{*1}$	$3,8^{*1}$	$130^{*1}$	$4,9^{*1}$
	$(0,9)^{2*2}$	$0,9^{*2}$	$0,40^{*2}$	$3,3^{*2}$	160	$52^{*2}$

\*1 Двойное стекло.

\*2 Селективная поверхность.

5.7. а) Заметим, что

$$\tau\alpha + \tau\alpha(1-\alpha)\rho_d + \tau\alpha(1-\alpha)^2\rho_d^2 + \dots = \tau\alpha/[1 - (1-\alpha)\rho_d].$$

б) 1,08.

5.8. а) Кондуктивный член равен

$$k\delta dy [(dT/dx)_x - (dT/dx)_{x+ax}].$$

в) 0,98.

## Глава 6

### ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

#### 6.1. Введение

Солнечную энергию можно использовать не только для подогрева воды. Теория передачи и накопления тепла для различных целей имеет много общего с изложенным в гл. 5, поэтому здесь мы рассмотрим только основные положения.

Энергию Солнца можно использовать для подогрева воздуха, для просушивания зерна (см. § 6.3), для обогрева зданий (см. § 6.4). Эти приложения имеют важное значение для экономики. Значительная часть урожая зерна в мире теряется вследствие поражения плесневым грибом, которое можно предупредить правильным просушиванием. На обогрев зданий зимой в странах с холодным климатом расходуется до половины энергетических ресурсов. Частичная разгрузка энергетики, связанная с проектированием или перестройкой зданий для использования солнечного тепла, позволит сэкономить миллионы долларов, которые затрачиваются на топливо за год.

Просушивание зерна требует переноса не только тепла, но и водяного пара. Эта проблема имеет большое значение также в солнечных системах очистки воды, обсуждаемых в § 6.6, где солнечное тепло используется для получения питьевой воды из солевой.

Тепловые двигатели, эффективность которых возрастает с повышением рабочей температуры, очевидно, также могут использовать солнечное тепло. Высокие температуры можно получить при концентрации потока солнечного излучения на малой площади.

## 6.2. Подогреватели воздуха

Теплый воздух необходим для просушки зерна (§ 6.3) и обогрева жилищ (см. § 6.4). Солнечные нагреватели воздуха подобны нагревателям воды, описанным в гл. 5, в которых жидкость нагревается, контактируя с поглощающей излучение поверхностью. В частности, влияние ориентации приемной площадки и потери тепла при обдувании ветром и т. д. для обоих типов нагревателей очень сходны.

На рис. 6.1 показаны два типичных устройства. Энергия, передаваемая воздуху от поглощающей поверхности в единицу времени, определена (2.6):

$$P_u = \rho c Q (T_2 - T_1). \quad (6.1)$$

Плотность воздуха составляет 0,001 плотности воды, поэтому при том же энерговкладе объемный расход  $Q$  воздуха может быть гораздо выше. Однако, поскольку теплопроводность воздуха намного ниже, чем воды, для сходных условий передача энергии от приемной поверхности к теплоносителю происходит намного слабее. Поэтому нагреватели такого типа, как показано на рис. 6.1, а, чаще всего изготавливают с шероховатыми приемными поверхностями или с поверхностями, на которых нарезаны канавки для увеличения площади и усиления турбулентности, необходимой для теплопередачи в воздухе. Альтернативный вариант состоит в увеличении контактной поверхности при использовании пористых или сетчатых приемников (рис. 6.1, б). Анализ теплопереноса довольно сложен, поскольку трудно разделить

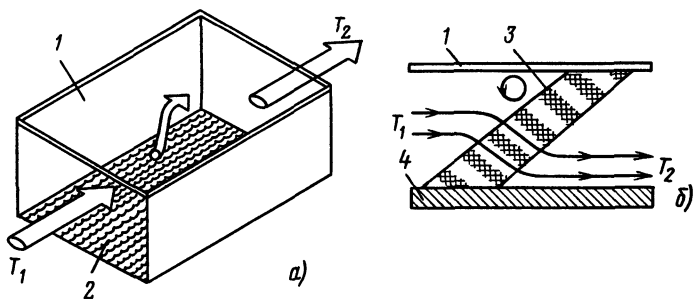


Рис. 6.1. Два типа воздушных нагревателей:

1 — стеклянное покрытие; 2 — шероховатая черная поглощающая поверхность; 3 — пористая поглощающая пластина; 4 — изоляция

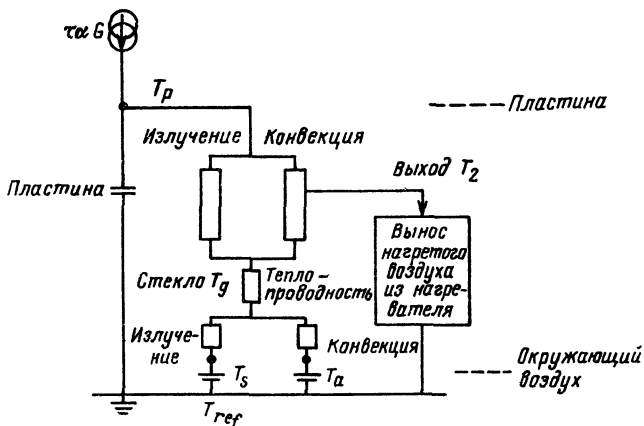


Рис. 6.2. Эквивалентная диаграмма для воздушного нагревателя, показанного на рис. 6.1, а. Вследствие циркуляции воздуха внутри нагревателя температура на выходе  $T_2$  ниже температуры приемной пластины  $T_p$  (обозначения те же, что и в гл. 5)

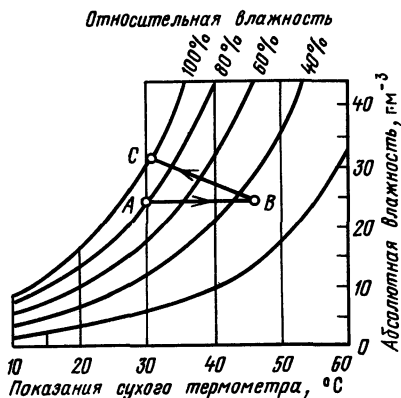
полезное тепло и потери, так как потоки тепла внутри приемной пластины и от пластины к стеклянному покрытию связаны между собой. Это отражено на диаграмме рис. 6.2. Обычно в первом приближении этой связью пренебрегают и используют уравнение (5.1) для теплового потока, как и при анализе нагревателей воды (это сделано в следующих параграфах). Следует отметить, что нагреватели воздуха дешевле водяных, так как в них не требуется заливать тяжелую жидкость, их можно изготовить из светлых местных материалов и нет необходимости защищать от мороза.

### 6.3. Зерносушилки

Большинство сельскохозяйственных культур перед закладкой на хранение необходимо просушить, иначе насекомые и плесневые грибки, которые быстро размножаются в условиях повышенной влажности, сделают их непригодными к употреблению. Это касается, например, пшеницы, риса, кофе, копры (мякоти кокосового ореха) и лесоматериалов. Мы рассмотрим только зерносушилки, так как остальные случаи аналогичны. В них происходит перенос влаги от сельскохозяйственной культуры к окружающему воздуху, поэтому необходимо прежде всего определить, какое количество влаги может содержаться в воздухе в виде водяного пара.

**Водяной пар и воздух.** Абсолютной влажностью, или «концентрацией водяного пара»,  $\chi$  называется содержание водяного пара в  $1 \text{ м}^3$  воздуха. При заданной температуре  $T$ , если пытаться повысить влажность  $\chi$  выше точки насыщения (например, прокачкой), жидкость начнет конденсироваться. Влажность насы-

Рис. 6.3. Психрометрическая диаграмма (для стандартного давления 101,3 кН·м<sup>-2</sup>)



щения  $\chi_s$  сильно зависит от температуры. Зависимость  $\chi_s$  (или какой-либо другой меры влажности) от  $T$  называется *психрометрической диаграммой* (рис. 6.3). Отношение  $\chi/\chi_s$  называется относительной влажностью и меняется от 0 (абсолютно сухой воздух) до 100% (насыщенный парами воды воздух).

Рассмотрим воздух, состав которого соответствует точке  $B$  на рис. 6.3. Если его охлаждать без изменения содержания влаги, соответствующая точка будет перемещаться горизонтально к точке  $A$ . Но воздух может быть охлажден и при испарении воды. Если это происходит в закрытой системе без теплообмена с окружающей средой (если воздух охлаждается адиабатически), то влажность его возрастает и характерная точка перемещается по диагонали вверх ( $BC$ ).

**Содержание влаги в сельскохозяйственных культурах.** Процентное содержание влаги  $w$  в пробе зерна определяется согласно формуле

$$w = (m - m_0) / m_0, \quad (6.2)$$

где  $m$  — полная масса пробы;  $m_0$  — масса сухого вещества пробы (для древесины  $m_0$  можно определить после просушивания пробы в печи при температуре 105° С в течение 24 ч). Будем использовать это определение содержания влаги в веществе (по «сухой массе»), являющееся стандартным в лесоводстве. В других областях сельского хозяйства может быть использовано определение содержания влаги по «сырой массе»

$$w' = (m - m_0) / m = w / (w + 1). \quad (6.3)$$

Определение  $m_0$  следует проводить в лабораторных условиях в соответствии со стандартными процедурами для каждой культуры или продукта. Температура и время просушивания ограничены, в частности для зерна — пересушенное зерно может потрескаться, что также приведет к его порче.

Во время просушивания зерно будет отдавать влагу окружающему воздуху до тех пор, пока не будет достигнуто равновесное содержание влаги, значение которого для данного продукта зависит от температуры и влажности окружающего воздуха. Для риса при температуре воздуха 30° С и относительной влажности 80%  $w_e \approx 0,16$ .

Процесс просушивания происходит неравномерно. Большая часть влаги содержится в сельскохозяйственных продуктах в виде жидкости, попавшей в поры, которая быстро теряется после уборки урожая. Оставшаяся часть воды, обычно 30—40%, связана на поверхности продукта химически, и поэтому удалить ее труднее. Важно, что зерно необходимо просушить достаточно быстро, в течение нескольких дней после уборки урожая, так как в сыром или даже влажном зерне быстро разрастается плесень.

**Энергетический баланс и температура просушки.** Если не насыщенный парами воды воздух пропускать сквозь влажный материал, воздух будет уносить с собой испаряемую влагу. Тепло, необходимое для испарения, содержится в воздухе и в просушиваемом материале. В процессе испарения воздух будет охлаждаться. В частности, если в процессе выпаривания массы  $m_w$  воды объем  $V$  воздуха охлаждается от  $T_1$  до  $T_2$ , то

$$m_w \Lambda = \rho c V (T_1 - T_2), \quad (6.4)$$

где  $\Lambda$  — удельная теплота парообразования воды;  $\rho$  и  $c$  — плотность и теплоемкость воздуха при постоянном давлении и средней температуре для умеренных разностей температур.

Основная проблема в конструировании зерносушилок, следовательно, заключается в определении  $T_1$  и  $V$ , необходимых для удаления данного количества жидкости  $m_w$ . Температура  $T_1$  не должна быть слишком высока, чтобы зерно не пересыхало.

*Пример 6.1.* Содержание влаги в собранном рисе  $w = 0,28$ . При температуре воздуха  $30^\circ \text{C}$  и относительной влажности 80% для риса  $w_e = 0,16$ . Подсчитайте, какое количество воздуха при температуре  $45^\circ \text{C}$  необходимо для того, чтобы просушить 1000 кг риса в условиях, аналогичных показанным на рис. 6.3.

*Решение.* Из уравнения (6.2)  $m/m_0 = w + 1 = 1,28$ , поэтому сухая масса риса составляет  $m_0 = 780$  кг. Следовательно, масса жидкости, которую необходимо испарить,

$$m_w = (0,28 - 0,16) (780 \text{ кг}) = 94 \text{ кг.}$$

Температура влажного воздуха на выходе из сушилки определяется следующим образом. При температуре воздуха  $30^\circ \text{C}$  и относительной влажности 80% абсолютная влажность  $1 \text{ м}^3$  воздуха

$$(0,8) (30,3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}) = 24,2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$$

(точка  $A$  на рис. 6.3). Если пренебречь малым изменением плотности, то для воздуха, нагретого до  $45^\circ \text{C}$  (точка  $B$ ), абсолютная влажность будет такой же величины. Прошедший через рис воздух будет более влажным. Так как рассматриваем условия, соответствующие рис. 6.3, то параметры на выходе из сушилки совпадают с точкой  $C$  (температура около  $30^\circ \text{C}$ ). Тогда из (6.4) получаем

$$V = \frac{(94 \text{ кг}) (2,4 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1})}{(1,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}) (1,0 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) (45 - 30^\circ \text{C})} = 13 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Можно провести более точные расчеты, но вывод будет тем же: больший объем просушиваемого продукта потребует продувки большего объема теплого сухого воздуха. Просушка с вынужденной конвекцией представляет собой сложную проблему. Просушка без обдува потоком воздуха еще более сложна, особенно если время просушки и температура ограничены.

#### 6.4. Солнечные отопительные системы

В странах с холодным климатом большая часть энергии расходуется на отопление зданий зимой. То, что понимается под комфортной температурой воздуха, зависит от влажности, проходящего потока солнечного излучения, скорости ветра и количества одежды на человеке. Когда температура наружного воздуха  $T_a$  падает до  $0^\circ \text{C}$  и ниже, мы стремимся, используя определенное количество искусственного тепла  $P_{boost}$ , поддерживать в помещении комфортную температуру  $T_r$ .

Тепловой баланс внутри здания описывается уравнением, аналогичным (5.1), а именно:

$$mc \frac{dT_r}{dt} = \tau \alpha GA + P_{boost} - \frac{(T_r - T_a)}{R}. \quad (6.5)$$

**Пассивные солнечные системы.** Идея пассивной отопительной солнечной системы состоит в выборе приемной площадки массой  $m$  с площадью обращенной к Солнцу поверхности  $A$  и сопротивлением потерям  $R$  — такой, чтобы получить оптимальное количество солнечного тепла для данной строительной конструкции. Первый шаг состоит в обеспечении качественной изоляции здания (высокое  $R$ ), включающей предупреждение сквозняков и устройство контролируемой вентиляции с регенерацией тепла. В новых зданиях соответствующей конструкцией и расположением окон можно получить максимальное произведение  $GA$ . Напомним, что мы имеем в виду зиму в высоких широтах, так что большая часть солнечных лучей попадает на вертикальные сте-

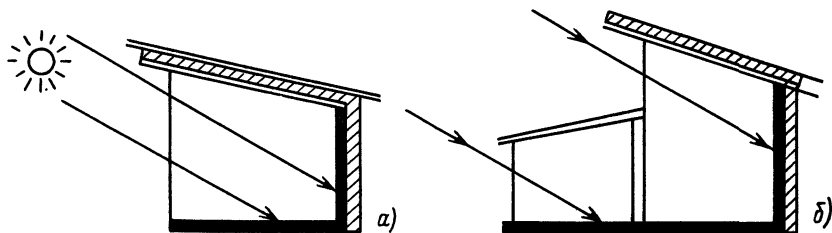


Рис. 6.4. Пассивный солнечный нагреватель: основная система (а) и окно в фанаре (б) для прямого нагрева задней стенки здания. Стрелками указано, где использованы массивные, окрашенные в черный цвет поверхности с усиленной теплоизоляцией для поглощения и накопления солнечного тепла

ны, а не на крыши зданий. Обращенные к солнцу поверхности должны быть черного цвета с  $\alpha > 0,8$  (рис. 6.4), здание должно иметь массивные внутренние стены (высокое  $m$ ), что должно ограничивать изменения  $T_r$ .

*Пример 6.2. Отопление дома солнечным теплом.* «Черный Солнечный дом», показанный на рис. 6.4, а, спроектирован для Вашингтона,  $38^\circ$  сев. шир. (с большим окном с южной стороны и массивной зачерненной стенкой с северной). Считая, что крыша и стены хорошо изолированы и все потери тепла происходят через окно, определите, какой требуется поток солнечного излучения, чтобы нагреть воздух в комнате на  $20^\circ$  С выше наружного.

*Решение.* Если температура в комнате постоянна, то (6.5) можно преобразовать к виду

$$\tau\alpha G = \frac{T_r - T_a}{r},$$

где  $r$  — термическое сопротивление потерям из комнаты наружу вертикального окна с одним стеклом. Следуя методам, изложенным в гл. 3 и 4, подсчитаем:

$$r = 0,07 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

Полагаем пропускание стекла  $\tau = 0,9$  и коэффициент поглощения стенки  $\alpha = 0,8$ , тогда

$$G = \frac{20^\circ \text{ С}}{(0,07 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}) (0,9) (0,8)} = 400 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Такую облученность можно ожидать в ясный зимний день на вертикальном окне, обращенном к Солнцу.

Считается, что качественно спроектированный дом можно обогревать от Солнца, однако конструирование пассивных солнечных отопительных систем на практике оказывается более сложным, чем предполагается в рассмотренном случае. Например, согласно расчетам «Черный Солнечный дом» нагревается до необходимой температуры только к середине дня. Однако тепло в доме необходимо поддерживать и ночью, кроме того, в доме требуется вентиляция.

*Пример 6.3. Потери тепла солнечным домом.* Размеры «Черного Солнечного дома» (рис. 6.4, а)  $2 \times 4 \times 5 \text{ м}^3$ , температура воздуха внутри дома в 4 часа дня составляет  $20^\circ$  С. Определите температуру воздуха в доме в 8 часов утра следующего дня, если: 1) толщина поглощающей стенки 10 см, в комнате одно окно; 2) толщина поглощающей стенки 50 см, окно изнутри закрыто толстым занавесом.

*Решение.* При  $G = P_{\text{boost}} = 0$  уравнение (6.5) преобразуется к виду

$$\frac{dT_r}{dt} = -\frac{(T_r - T_a)}{RC},$$

где  $C = mc$ .

Решение этого уравнения:

$$T_r - T_a = (T_r - T_a)_{t=0} \exp[-t/(RC)], \quad (6.6)$$

$T_a$  предполагается постоянной (ср. с § 16.4). Как и раньше, считаем, что все потери тепла происходят через окно, площадь которого  $10 \text{ м}^2$ . Предположим также, что поглощающая стенка изготовлена из бетона.

$$1) R = rA^{-1} = 0,007 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1};$$

$$C = mc = (2,4) (10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}) (2 \text{ м}) (5 \text{ м}) (0,1 \text{ м}) \times (0,84 \times 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) = \\ = 2,0 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$RC = 14 \cdot 10^3 \text{ с} = 4,0 \text{ ч.}$$

Через 16 ч температура воздуха в доме будет выше наружной на  $(20^\circ \text{С}) \exp(-16/4) = 0,4^\circ \text{С}$ .

2) Наличие занавеса приблизительно эквивалентно двойному оконному стеклу, поэтому из табл. 5.1 берем  $r \approx 0,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Следовательно,

$$R = 0,02 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1};$$

$$C = 10 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$RC = 2,0 \cdot 10^5 \text{ с} = 55 \text{ ч};$$

$$T_r - T_a = (20^\circ \text{С}) \exp(-16/55) = 15^\circ \text{С}.$$

Эти расчеты иллюстрируют влияние  $m$  и  $R$  на тепловой баланс, а также важную роль таких приспособлений, уменьшающих потери тепла ночью, как занавеси, ставни и т. д.

Анализ теплового баланса стандартного дома более сложен вследствие сложной геометрии поглотителя, ненулевых потерь через стены, наличия в доме людей, тепловыделения осветительных приборов и т. д. Люди, находящиеся в помещении, влияют на тепловой баланс вследствие присутствия им обмена веществ, в результате которого в слагаемое  $P_{boost}$  уравнения (6.5) добавляется по 100 Вт на каждого человека. Для вентиляции помещения требуется смена воздуха 1—3 раза за 1 ч, поэтому без установки теплообменников неизбежны значительные теплопотери.

Недостатком простых систем прямого нагрева является то, что в таком доме может быть слишком жарко в течение дня, особенно летом. Это неудобство может быть уменьшено, если делать достаточно большим козырек крыши. Если строить здания с так называемой накопительной стенкой с солнечной стороны, принципиально можно получить больший и лучше контролируемый приход тепла. Например, на рис. 6.5 показана стена, представляющая собой бетонную плиту толщиной 30 см с внешним стеклянным покрытием и щелями вверху и внизу. Зимой воздух циркулирует, как показано на рис. 6.5. Система работает как встроенный воздушный нагреватель с тепловой циркуляцией (для усиления циркуляции воздуха можно использовать вентилятор). Летом такую стену может затенять козырек крыши, или можно пропускать по дому холодный воздух с теневой стороны. Из эстетических соображений в бетонной стене обычно делают небольшие окна.



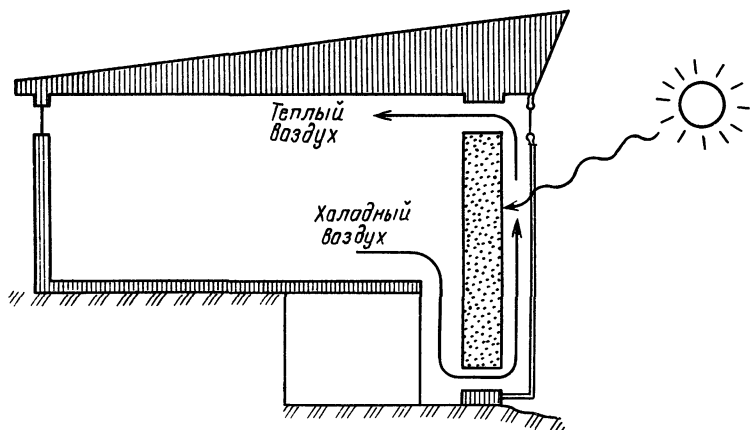


Рис. 6.5. Принцип действия накопительной стенки Tromble — Michel зимой

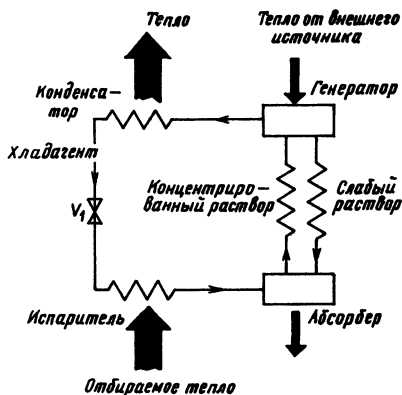
**Активные солнечные системы.** В активных солнечных системах используются внешние нагреватели воздуха (см. § 6.2) или воды (см. гл. 5). Такие системы легче контролировать, чем чисто пассивные, кроме того, их можно устанавливать на существующие здания. Однако реконструкция зданий для использования солнечного тепла обычно менее предпочтительна, чем корректная разработка пассивных элементов на начальной стадии конструирования. В обоих случаях требуются большие накопительные системы [например, большие резервуары для воды, которые располагаются либо в подвале здания, либо в отдельной постройке (см. § 16.4)]. Использование водонагревательных систем требует наличия теплообменников, для воздушнонагревательных систем необходимы системы воздухопроводов. Циркуляция теплоносителей осуществляется с помощью насосов или вентиляторов. Активные солнечные системы, так же как и пассивные, хорошо работают только при минимальных потерях тепла.

На практике так называемые пассивные дома обогреваются намного лучше, если в них имеются вентиляторы, благодаря которым воздух циркулирует между комнатами. Поэтому термин «пассивные» используется в тех случаях, когда солнечная энергия аккумулируется непосредственно в комнате, на стенах или вблизи окон, даже если в здании используется вентиляция. Термин «активные» означает, что тепло накапливается в нагревателях, расположенных вне отапливаемого помещения.

## 6.5. Охлаждение воздуха

Солнечную энергию можно использовать также для охлаждения воздуха, например в абсорбционных холодильниках

Рис. 6.6. Схематическая диаграмма абсорбционного холодильника. Зигзагами обозначены теплообменники



(рис. 6.6). В стандартных компрессионных холодильниках рабочая жидкость испаряется в процессе теплообмена при повышенном давлении, которое поддерживается с помощью компрессора. В абсорбционном холодильнике необходимо повышение давления обеспечивается разностью давлений паров хладагента в генераторе, содержащем пары хладагента над концентрированным раствором жидкого хладагента, и поглотителя, содержащем пары хладагента над разбавленным раствором. В абсорбционном холодильнике требуется подвод тепла для повышения температуры в генераторе до такого уровня, когда давление пара в генераторе становится равным давлению насыщения в конденсаторе. Обычно в качестве охлаждающей жидкости используется вода, в качестве абсорбента — бромид лития.

Тепло, необходимое для работы абсорбционных холодильников, может быть получено, в частности, и от солнечных нагревательных систем. Недостатками относительно недорогих систем с плоскими пластинчатыми солнечными нагревателями являются сложность изготовления и низкая эффективность

$$C_T = \frac{\text{Тепло, отобранное холодильником от помещения}}{\text{Тепло, потребляемое генератором}} = 0,7. \quad (6.7)$$

Существует множество холодильников, использующих солнечную энергию, в том числе и такие устройства, которые могут работать в 24-часовом цикле.

Лучшими устройствами для охлаждения зданий в районах с жарким климатом также являются пассивные. В них используются или естественные потоки охлажденного воздуха (во влажных районах), холодный воздух, запасенный ночью или зимой (в сухих районах), или в некоторых случаях принудительная конвекция охлажденного воздуха.

Для охлаждения пищевых продуктов, по крайней мере в малых количествах, питание промышленных компрессионных холодильников и морозильников может осуществляться от солнечных элементов или батарей (см. § 7.5). В настоящее время это экономически выгодно только в районах, удаленных от стандартных энергосетей.

## 6.6. Опреснение воды

Для обеспечения жизнедеятельности человека в пустынных районах необходимо снабжение их питьевой водой, пресной водой для полива и других целей. Многие пустынные районы, например в центральной Австралии, имеют значительные подземные запасы соленой воды, и обычно намного дешевле опреснить эту воду, чем привозить достаточное количество пресной воды. Так как в пустынях облученность поверхности Земли Солнцем достаточно высока, имеет смысл использовать солнечную энергию для опреснения воды.

Самым простым устройством является солнечный дистиллятор-бассейн (рис. 6.7). Он состоит из неглубокого бассейна с черными стенками и дном, заполненного водой и накрытого прозрачной паронепроницаемой крышкой, которая полностью закрывает пространство над бассейном. Крышка наклонена по направлению к потоку излучения. Во время работы дистиллятора поток солнечной энергии, прошедший через крышку, нагревает воду, часть которой при этом испаряется. Водяной пар вследствие тепловой конвекции поднимается вверх с нагретой поверхности (1) и конденсируется на холодной крышке (2). Затем капли сконденсированной влаги скатываются по крышке в приемный желоб.

*Пример 6.4. Производительность идеального солнечного дистиллятора.* Поток излучения в сухих солнечных районах составляет  $20 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$  в день. Удельная теплота парообразования воды  $2,4 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Поэтому если все солнечное тепло расходуется на испарение и собирается вся испаренная вода, то произ-

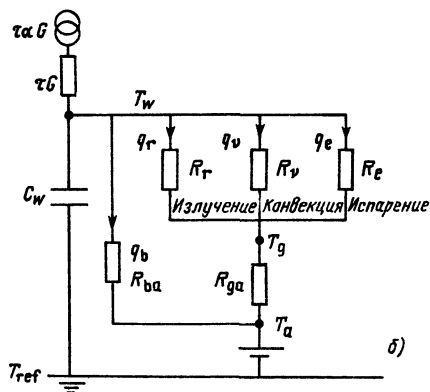
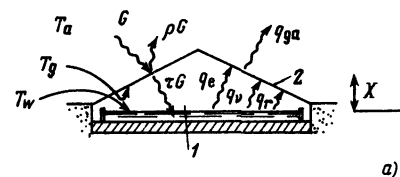


Рис. 6.7. Потоки тепла в солнечном дистилляторе: схема (а) и диаграмма (б). Обозначения прежние, индексы: *b* — основание; *e* — испарение; *v* — конвекция; *r* — излучение; *w* — вода; *a* — окружающая среда; *1* — нагретая поверхность, *2* — холодная стенка

водительность дистиллятора составляет

$$\frac{20 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}}{2,4 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}} = 8,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}.$$

Отсюда видно, что для снабжения даже небольшого числа людей достаточным количеством пресной воды необходимы опреснители с большими площадями поверхности стекла.

Чтобы вычислить производительность реального солнечного дистиллятора, необходимо определить, какая часть приходящей солнечной энергии расходуется на испарение. Тепловой баланс для единицы поверхности воды (рис. 6.7, а) описывается выражением

$$mc \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w \tau G - q_b - q_r - q_v - q_e, \quad (6.8)$$

которое отличается от подобных уравнений из гл. 5, во-первых, включением члена, характеризующего теплоперенос при испарении  $q_e$ , и, во-вторых, гораздо меньшей величиной  $\tau$  вследствие того, что капли воды под крышкой дистиллятора также отражают солнечное излучение. Для простоты полагаем, что дистиллятор хорошо изолирован, так что потери через дно пренебрежимо малы.

Радиационный поток определяется (3.44) для больших параллельных поверхностей с единичной излучательной способностью

$$q_r = 4\sigma_w \left[ \frac{T_w + T_g}{2} \right]^3 (T_w - T_g). \quad (6.9)$$

Конвективный тепловой поток можно записать в виде

$$q_v = h_v (T_w - T_g), \quad (6.10)$$

где  $h_v$  — коэффициент теплопередачи (определен в § 3.4). Теплоперенос в процессе испарения зависит от движения пара от поверхности воды к крышке, на которой конденсируется влага, так как нагретый пар, перемещаясь вверх, переносит и тепло. Результирующий тепловой поток на единицу площади

$$q_v = 2\rho c (Q/A) \Delta T. \quad (6.11)$$

Множитель 2 появляется вследствие того, что происходит движение нагретого пара вверх и охлажденного пара вниз. Результирующую массу пара, которая переносится через единицу площади в единицу времени в процессе свободной конвекции воздуха, с учетом (6.10) и (6.11) представим в виде

$$W = \dot{m}/A = 2(Q/A) \Delta \chi = h_v \rho^{-1} c^{-1} \Delta \chi. \quad (6.12)$$

Тепловой поток через единицу площади, возникающий вследствие испарения воды, равен

$$q_e = W \Lambda. \quad (6.13)$$

Для дистиллятора, показанного на рис. 6.7,

$$q_e = h_v \Delta \rho^{-1} c^{-1} [\chi(T_w) - \chi(T_g)]. \quad (6.14)$$

Для характерного размера  $x$ , показанного на рис. 6.7, а,

$$h_v = \text{Nu}k/x.$$

Используя выражение для числа Нуссельта, получаем

$$h_v = 0,062(x/k)\text{Ra}^{1/3}, \quad (6.15)$$

где число Рэлея

$$\text{Ra} = g\beta x^3(T_w - T_g)k^{-1}\nu^{-1}. \quad (6.16)$$

Строго говоря, все свойства жидкости в данном обсуждении ( $\rho$ ,  $k$  и т. д.) относятся к влажному воздуху при соответствующей концентрации пара. Однако обычно  $\chi \ll \rho$ , поэтому можно с хорошим приближением пользоваться данными для сухого воздуха.

На рис. 6.8 показаны результаты расчетов, основанных на данных уравнениях. Видно, что доля тепла, идущего на испарение, практически не зависит от  $(T_w - T_g)$ , но быстро возрастает при увеличении температуры воды  $T_w$ . Этого следовало ожидать, так как концентрация пара  $\chi(T_w)$  возрастает много быстрее, чем  $T_w$  (см. рис. 6.3). Из рис. 6.8 видно также, что максимальная производительность, достижимая для рассматриваемого дистиллятора с водой в бассейне, нагреваемой примерно до  $50^\circ\text{C}$ , составляет 60% рассчитанной в примере 6.4, т. е.  $5 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2}$  в день.

Альтернативный подход заключается в использовании многоступенчатого дистиллятора, в котором тепло, получаемое при конденсации дистиллированной пресной воды, используется для испарения второй порции соленой воды. Тепло, выделяемое при конденсации второй порции воды, в свою очередь используется

для испарения третьей порции соленой воды и т. д. Практическое применение таких испарителей ограничено неполнотой теплопередачи вследствие сложности системы.

Экономичность солнечного дистиллятора зависит от стоимости других источников пресной воды. В районах с высоким или средним уровнем осадков (более 40 см в год) почти всегда дешевле обходится строительство водохранилищных систем, чем

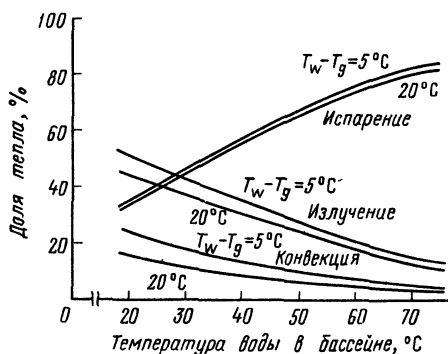


Рис. 6.8. Влияние температуры воды на эффективность солнечного дистиллятора-бассейна

каких-либо солнечных устройств. Другой вариант, который становится все более дешевым, состоит в очистке воды в процессе, когда вода прокачивается сквозь специальную мембрану, отгораживающую поток от растворенного вещества, в направлении, противоположном осмотическому переносу.

## 6.7. Солнечные пруды

В случаях, требующих нагрева больших объемов жидкости до температур ниже  $100^{\circ}\text{C}$ , применение стандартных нагревателей, описанных в гл. 5, часто оказывается слишком дорогостоящим. Солнечный пруд представляет собой оригинальный нагреватель, в котором теплозащитной крышкой является вода. Достаточно большой водоем может быть вырыт просто в Земле, что относительно недорого. Если учесть, что солнечные пруды содержат в себе и накопители тепла, то область их использования может быть довольно широкой.

В солнечный пруд заливается несколько слоев воды различной степени солености, причем наиболее соленый слой толщиной около 0,5 м располагается на дне (рис. 6.9). Солнечное излучение поглощается дном водоема, и придонный слой воды нагревается. В обычных однородных водоемах нагретая вода, более легкая, чем окружающая ее, поднимается вверх и в процессе свободной конвекции передает тепло воздуху над водоемом (ср. с § 3.4). В неоднородном водоеме придонный слой воды обычно берется настолько более соленым, чем слой над ним, что плотность его хотя и уменьшается при нагревании, но все-таки остается выше плотности более высокого слоя. Поэтому конвекция подавляется и придонный слой нагревается все сильнее. Существуют некоторые растворы, плотность которых возрастает при повышении температуры. Использование таких растворов позволяет иметь стабильные солнечные пруды.

Повышение температуры в придонном слое ограничивается тепловыми потерями при прохождении солнечного излучения через неподвижные верхние слои воды. Расчеты показывают, что сопротивление теплопотерям в данном случае сравнимо с термическим сопротивлением стандартного плоского нагревателя (см. задачу 6.3). В солнечных прудах достигается равновесная температура до  $90^{\circ}\text{C}$  и выше, в некоторых наиболее эффективных

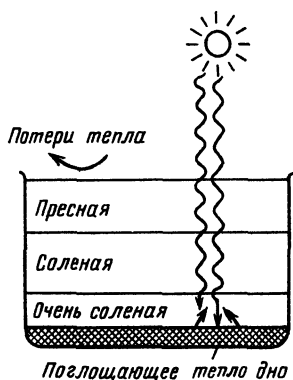


Рис. 6.9. В солнечном пруду конвекция подавлена и придонные слои жидкости сохраняют тепло, полученное от Солнца

системах наблюдалось кипение воды. Следует отметить, что для заполнения солнечного пруда требуется несколько месяцев, поскольку если верхние слои заливать слишком быстро, то в результате турбулентности взболтаются нижние слои и разрушится созданная стратификация.

Теплоемкость и термическое сопротивление большого солнечного пруда могут быть достаточными для того, чтобы сохранить тепло в придонном слое до зимы (см. задачу 6.3). Это тепло можно использовать для отопления зданий зимой. Солнечные пруды имеют, кроме того, множество возможных применений в промышленности как стационарные источники тепла умеренно высокой температуры, а также как источники электроэнергии.

Солнечный пруд в Эйн-Бореке, Израиль, производит 150 кВт электроэнергии с площади 0,74 га при стоимости 0,10 долл. за 1 кВт·ч.

## 6.8. Концентраторы солнечной энергии

**Основные положения.** Многие возможные приложения требуют более высоких температур, чем те, которые можно получить даже с помощью лучших плоских пластинчатых нагревателей. Так, рабочая жидкость при 500°С может приводить в движение стандартный тепловой двигатель для совершения механической работы и, следовательно, если требуется, для производства электроэнергии. Еще более высокие температуры (примерно 2000°С) требуются при изготовлении и очистке отражающих материалов.

Концентрирующий коллектор включает в себя приемник, поглощающий излучение и преобразующий его в какой-либо другой вид энергии, и концентратор, который представляет собой оптическую систему, направляющую поток излучения на приемник (например, такой, как показан на рис. 6.10). Обычно концентратор требуется непрерывно поворачивать, чтобы он во время работы был обращен к Солнцу. (Ниже в этом параграфе обсуждается нетипичный случай.)

Апертура системы  $A_a$  есть площадь поверхности концентратора, обращенной к потоку излучения. Определим коэффициент концентрации  $X$  как отношение апертуры к площади поверхности приемника:

$$X = A_a / A_r. \quad (6.17)$$

Для идеального коллектора  $X$  представляет собой отношение плотности потока излучения на приемнике к плотности потока на концентраторе, на практике плотность потока сильно меняется вдоль приемника. Температуру приемника простым увеличением  $X$  неограниченно повышать невозможно, так как по закону Кирхгофа (см. § 3.5) температура приемника  $T_r$  не может достигнуть

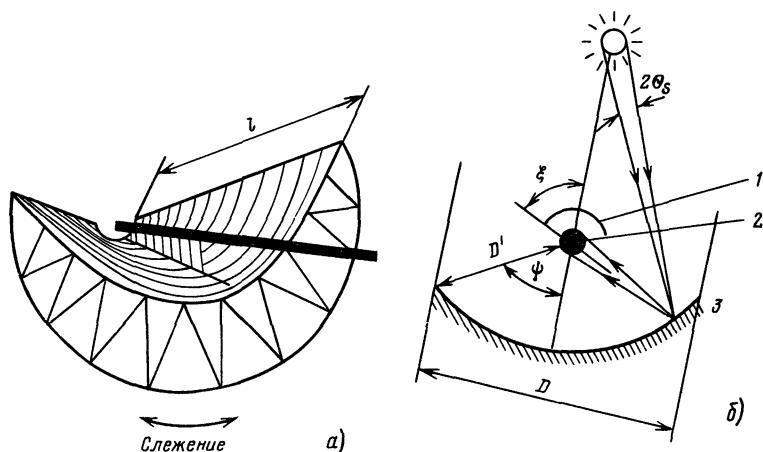


Рис. 6.10 Параболический концентратор. Общий вид. Показаны приемник, проходящий вдоль оси, и опоры, поддерживающие приемник и зеркало (а) и сечение устройства, которое обсуждается в тексте (б) (не в масштабе): 1 — экран, 2 — поглотитель, 3 — зеркало

эквивалентной температуры Солнца  $T_s$ . Более того, расстояние до Солнца  $L$  и радиус его  $R_s$  определяют конечный угол на поверхности Земли, который ограничивает коэффициент концентрации величиной

$$X < (L/R_s)^2 = 45\,000 \quad (6.18)$$

(см. задачу 6.4). Ниже показано, как сильно это ограничивает реально достижимые  $T_r$  и  $X$ . В гл. 7 обсуждаются концентраторы для солнечных фотоэлементов (см. рис. 7.24).

**Параболический вогнутый концентратор.** На рис. 6.10, а показан типичный коллектор. Концентратор представляет собой параболическое зеркало длиной  $l$  с приемником, расположенным вдоль его оси. Это дает концентрацию энергии только в одном направлении, поэтому коэффициент концентрации меньше, чем для параболоида, однако одномерное расположение осуществить проще. Кроме того, обычно необходимо, чтобы коллектор следил за Солнцем только в одном направлении. Ось располагают с запада на восток, и зеркало автоматически поворачивается вокруг оси, отслеживая наклон в сторону Солнца.

Энергия, поглощаемая приемной трубкой, равна

$$P_{abs} = \rho_c \alpha l D G_b, \quad (6.19)$$

где  $\rho_c$  — коэффициент отражения концентратора;  $\alpha$  — коэффициент поглощения приемника;  $lD$  — площадь;  $G_b$  — средняя облученность зеркала.

Экран, показанный на рис. 6.10, б, уменьшает тепловые потери поглотителя, а также закрывает его от прямого излучения,



которое, впрочем, незначительно по сравнению с концентрированным излучением, приходящим с другой стороны. Приемник теряет энергию только в направлениях, не защищенных экраном. Следовательно, он излучает

$$P_{rad} = \varepsilon (\sigma T_r^4) (2\pi r l) (1 - \zeta/\pi), \quad (6.20)$$

где  $T_r$ ,  $\varepsilon$  и  $r$  — соответственно температура, излучательная способность и радиус поглощающей трубки. Для минимизации потерь необходимо уменьшать радиус  $r$ , а для увеличения полной энергии  $P_{abs}$  необходимо иметь трубку по крайней мере такого же размера, как изображение солнечного диска, поэтому обычно выбирают

$$r = D'\theta_s, \quad (6.21)$$

(обозначения те же, что и на рис. 6.10, б). Все тепловые потери, кроме радиационных, в принципе можно исключить, поэтому полагаем  $P_{rad} = P_{abs}$  и находим температуру

$$T_r = \left[ \frac{\alpha \rho_c \tau_a G_0 \cos \omega}{\varepsilon \sigma} \right]^{1/4} \left[ \frac{D}{2\pi r (1 - \zeta/\pi)} \right]^{1/4}. \quad (6.22)$$

Эта величина максимальна, когда тень от экрана на зеркале наименьшая, т. е. когда  $\zeta \rightarrow \pi - \psi$ . Геометрический член во второй скобке уравнения (6.22) можно привести к виду  $1/\theta_s$ , так что максимальная температура составит

$$T_r^{(max)} = \left[ \frac{\alpha \rho_c \tau_a G_0 \cos \omega}{\varepsilon \sigma \theta_s} \right]^{1/4} = 1160 \text{ К} \quad (6.23)$$

для типичных условий  $G_0 = 600 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $\rho_c = 0,8$ ;  $\alpha/\varepsilon = 1$ ;  $\theta_s = R_s/L = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ ;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ . Температура  $T_r = 1160 \text{ К}$  намного выше той, которую можно получить с помощью плоского пластинчатого приемника (ср. с табл. 5.1). Практически достижимые температуры ниже максимальной  $T_r^{(max)}$  по двум причинам: 1) реальные зеркала не являются строго параболическими, поэтому полуугол, под которым с Земли наблюдается солнечный диск,  $\theta'_s > \theta_s = R_s/L$ ; 2) полезное тепло выводится посредством прокачки жидкости через поглотитель, следовательно,

$$T_r^4 \alpha P_{rad} = P_{abs} - P_u < P_{abs}.$$

Тем не менее при благоприятных условиях жидкость можно нагреть примерно до  $700^\circ \text{С}$  (см. задачу 6.5).

Из выражения (6.22) следует, что  $T_r$  можно повысить еще, если использовать селективную поверхность с  $\alpha/\varepsilon > 1$ , однако преимущества такой поверхности невелики, так как селективность определяется тем, что  $\alpha$  и  $\varepsilon$  — средние значения в различных областях спектра (см. § 5.6).

Действительно, согласно определениям (3.27)

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} \varphi_{\lambda, in} d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{\lambda, in} d\lambda}; \quad \varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \varphi_{\lambda, B} d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{\lambda, B} d\lambda}. \quad (6.24)$$

С увеличением  $T_r$  соответствующее излучателю распределение энергии абсолютно черного тела  $\varphi_{\lambda, B}(T_r)$  приближается к распределению энергии в солнечном спектре  $\varphi_{\lambda, in} = \varphi_{\lambda, B}(T_s)$ . Так как согласно закону Кирхгофа (3.30)  $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$  для любой длины волны  $\lambda$ , из (6.24) следует, что при  $T_r \rightarrow T_s$   $\alpha/\varepsilon \rightarrow 1$ .

**Параболический объемный концентратор.** Концентрация энергии может осуществляться в двух направлениях, если использовать объемный концентратор. Это требует проектирования более сложной системы слежения за Солнцем, чем для одномерного случая, подобной системе, применяемой в астрономических телескопах.

Наилучшая фокусировка обеспечивается, если зеркало имеет форму параболоида вращения. Его параметры можно найти из расчетов, аналогичных проделанным выше, причем в данном случае рис. 6.10, б соответствует сечению параболоида. Форма приемника предполагается сферической. Максимально достижимая температура определяется при  $\zeta \rightarrow 0$ ,  $\psi \rightarrow \pi/2$  как

$$T_r^{(\max)} = \left[ \frac{\alpha \rho_c \tau_a G_0 \sin^2 \psi}{4 \varepsilon \sigma \theta_s^2} \right]^{1/4}. \quad (6.25)$$

Сравнивая это выражение с (6.23), видим, что в данном случае весь концентратор поворачивается вслед за Солнцем и  $\theta_s$  заменено на  $(2\theta_s/\sin \psi)^2$ , поэтому  $T_r^{(\max)}$  значительно возрастает. Действительно, в идеальном случае, когда  $\sin \psi = \alpha = \rho_c = \tau_a = \varepsilon = 1$ , мы получаем температуру  $T_r = T_s$  большую, чем в одномерном случае. Даже несмотря на точность слежения и возможные отклонения профиля зеркала от параболического при всех трудностях конструирования приемника, на практике возможно достижение температуры до 3000 К.

**Концентраторы, не следящие за Солнцем.** Выше были описаны устройства, в которых высокая точность изготовления и слежения позволяет получить высокий коэффициент концентрации. Однако в некоторых случаях могут быть полезны также и дешевые коллекторы с низким коэффициентом концентрации. Так, иногда дешевле и удобнее использовать концентратор площадью 5 м<sup>2</sup> с коэффициентом концентрации 5 на каждом солнечном элементе системы площадью 1 м<sup>2</sup>, чем систему солнечных элементов общей площадью 5 м<sup>2</sup> без концентрации энергии. Такая установка будет еще дешевле, если концентраторы

не следят за Солнцем. Однако необходимо учитывать, что в этом случае освещенность солнечных элементов будет неравномерной. (см. гл. 7).

### 6.9. Солнечные системы для получения электроэнергии

Концентрация солнечной энергии позволяет получать температуры ( $T \geq 700^\circ \text{C}$ ), достаточно высокие для работы теплового двигателя с приемлемым коэффициентом полезного действия. Изготовление параболических концентраторов с диаметром, превышающим 30 м, довольно сложно, тем не менее мощность одного такого устройства составляет

$$\pi (15 \text{ м})^2 (1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}) = 700 \text{ кВт},$$

что позволяет получить до 200 кВт электроэнергии. Этого достаточно для небольших энергосистем, но не для стационарных коммунальных сетей.

Так каким же образом можно построить солнечную электростанцию достаточно большую для того, чтобы получать, скажем, 10 МВт электроэнергии? Для этого существуют два варианта: рассредоточенные коллекторы и системы с центральной солнечной башней.

**Рассредоточенные коллекторы.** На рис. 6.11 показана система, состоящая из множества небольших концентрирующих коллекторов, каждый из которых независимо следит за Солнцем. Концентраторы не обязательно должны иметь форму параболоидов, но обычно это предпочтительнее. Каждый коллектор передает солнечную энергию жидкости — теплоносителю, горячая жид-

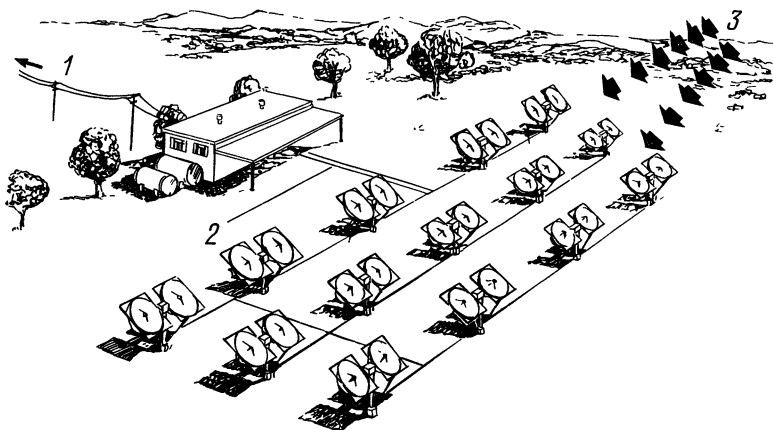


Рис. 6.11. Схема получения электроэнергии от системы распределенных коллекторов:  
1 — электроэнергия, 2 — трубы под землей, по которым протекает аммиак или пар, 3 — солнечные лучи

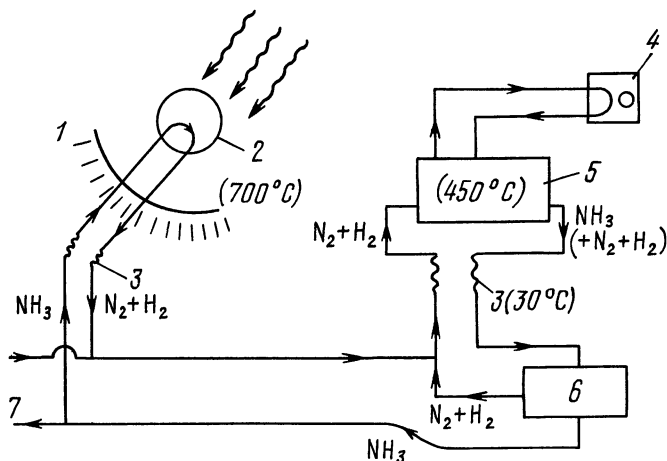


Рис. 6.12. Диссоциация и синтез аммиака как накопителя солнечной энергии: 1 — зеркало, 2 — приемник, 3 — теплообменник; 4 — тепловой двигатель; 5 — камера синтеза; 6 — сепаратор; 7 — к другим зеркалам

кость от всех коллекторов собирается в центральной энергостанции. Теплонесущая жидкость может быть водяным паром, если она будет прямо использована в паровой турбине, или какой-либо термохимической средой — такой, как, например, диссоциированный аммиак. Схема устройства, основанного на диссоциации и синтезе аммиака, показана на рис. 6.12.

Преимуществом последней системы является то, что в случае использования химического реагента отсутствуют потери между коллектором и тепловым двигателем, так что тепло может передаваться на большие расстояния или в течение длительного времени (например, с вечера в течение всей ночи, что позволяет осуществить непрерывную генерацию электроэнергии). В этой системе солнечные лучи фокусируются на приемнике, в котором газообразный аммиак при высоком давлении (около 30 МПа) диссоциирует на водород и азот. Эта реакция — эндотермическая, дефект энергии составляет  $\Delta H = -46$  кДж/моль  $\text{NH}_3$ ; солнечное излучение снабжает систему энергией, необходимой для протекания этой реакции. В присутствии катализатора в камере синтеза  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2$  частично рекомбинируют, выделяемое при этом тепло можно использовать для подключения внешнего теплового двигателя или другого устройства. Выходящий из камеры синтеза поток охлаждается, что приводит к сжижению аммиака. Подробнее данная система обсуждается в задачах 6.6 и 6.7.

**Солнечные башни.** Альтернативный вариант состоит в использовании расположенных на большой площади следящих за Солн-

цем плоских зеркал, отражающих солнечные лучи на центральный приемник, помещенный на вершине башни.

### Задачи

**6.1. Вытяжная труба.** Вертикальная труба высотой  $h$  выводит наружу горячий воздух от источника тепла при температуре  $T_h$ . Вычислив интеграл (5.17) внутри и снаружи трубы, подсчитайте давление  $P$  для следующих условий:

- а)  $T_a = 30^\circ \text{C}$ ,  $T_h = 45^\circ \text{C}$ ,  $h = 4$  м (соответствует солнечной зерносушилке);  
 б)  $T_a = 5^\circ \text{C}$ ,  $T_h = 300^\circ \text{C}$ ,  $h = 100$  м (соответствует промышленной трубе).

**6.2. Поток через слой зерна.** Поток через слой зерна аналогичен потоку через сеть трубок.

а) На рис. 6.13, а показано сечение твердого блока, пронизанного  $n$  параллельными трубками, радиус каждой из них  $a$ . По формуле Пуазейля определим объем жидкости, протекающей через каждую трубку в секунду:

$$Q_1 = \frac{\pi a^4}{8\mu} \left( \frac{dp}{dx} \right),$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость (см. гл. 2) и  $dp/dx$  — градиент давления в потоке. Покажите, что объемный расход жидкости через твердый блок сечения  $A_0$

$$\bar{v} = \frac{Q_{total}}{A_0} = \frac{\varepsilon a^2}{8\mu} \left( \frac{dp}{dx} \right),$$

где пористость  $\varepsilon$  есть доля объема, занимаемая жидкостью, а  $Q_{total}$  — полный объем жидкости, протекающей через блок в секунду.

б) Слой зерна в солнечной зерносушилке имеет полный объем  $V = A_0 \Delta x$  (рис. 6.13, в). Сушилка рассчитана на 1000 кг зерна, занимающего объем  $V = 1,3 \text{ м}^3$ . Зерно необходимо просушить за 4 дня, что равняется 30 ч работы. Покажите, что для этого требуется по крайней мере  $Q = 0,12 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  (обратитесь к примеру 6.1).

в) На рис. 6.13, б показано, как слой зерна может быть представлен в виде блока сечением  $A_0$ , пронизанного трубками, диаметр которых сравним (или меньше) с радиусом зерен. Объемный расход в этом случае будет на коэффициент  $k (< 1)$  меньше, чем в п. а) задачи, вследствие того, что трубки здесь имеют некруглые сечения и расположены произвольным образом. Если перепад давлений равен  $\Delta p$ , покажите, что толщина  $\Delta x$ , через которую поток  $Q$  может

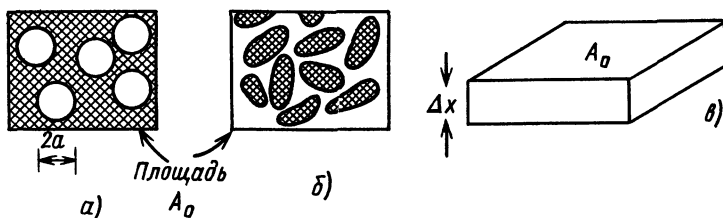


Рис. 6.13. Блок, пронизанный параллельными трубками (а), поры в слое зерна (б) и объем слоя зерна (в) (к задаче 6.2)

Рис. 6.14. Концентрирующая нагревательная система (к задаче 6.5):

1 — концентратор (линзы Френеля); 2 — окно; 3 — селективно поглощающая поверхность; 4 — вакуум, 5 — жидкость; 6 — отражающая поверхность



подняться, есть

$$\Delta x = \left( \frac{k \varepsilon a^2 V \Delta p}{8 \mu Q} \right)^{1/2}.$$

Для слоя риса приближенно  $\varepsilon = 0,2$ ;  $a = 1$  мм;  $k = 0,5$ . Вычислите  $\Delta x$  и  $A_0$  с учетом  $Q$  из п. б) данной задачи, и  $\Delta p$  из задачи 6.1, а).

6.3. Солнечный пруд. В идеальном случае размеры солнечного пруда составляют  $100 \cdot 100 \cdot 1,2$  м<sup>3</sup>. Придонный слой толщиной 20 см (накопительный слой) имеет эффективный коэффициент поглощения  $\alpha = 0,7$ . Изолирующий слой воды над ним толщиной 1 м имеет коэффициент пропускания  $\tau = 0,7$ , и плотность его возрастает так, что конвекция не возникает. Предполагается, что температура накопительного слоя будет поддерживаться на уровне 80° С. Температура на поверхности водоема и дном и ночью составляет 27° С.

а) Рассчитайте термическое сопротивление изолирующего слоя и сравните его с сопротивлением типичного плоского пластинчатого приемника.

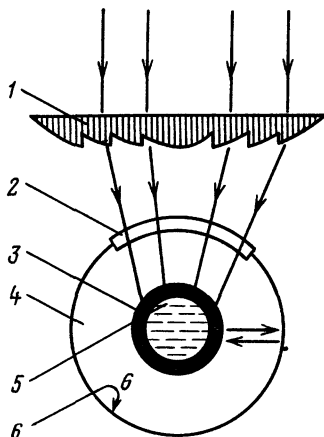
б) Рассчитайте термическое сопротивление аналогичного слоя пресной воды при наличии свободной конвекции. Сравните эту величину с полученной в предыдущем пункте и поясните отличие.

в) Плотность раствора поваренной соли возрастает на  $0,75$  г·л<sup>-1</sup> при добавлении каждого грамма NaCl к 1 кг H<sub>2</sub>O. Насыщенный раствор NaCl содержит около 370 г NaCl на 1 кг воды. Объемный коэффициент термического расширения раствора поваренной соли равняется  $4 \times 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>. Подсчитайте минимальную концентрацию  $C_{\min}$  NaCl, требуемую для того, чтобы в накопительном слое была подавлена конвекция. (Предположите, что на поверхности водоема — пресная вода.) Насколько легко на практике получить такую концентрацию?

г) Определите характерное время потерь тепла от накопительного слоя через изолирующий слой. Если температура накопительного слоя на закате Солнца (в 6 часов вечера) равна 80° С, какова будет температура на восходе (в 6 ч утра)?

д) Коэффициент диффузии в воде молекул NaCl составляет  $1,5 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Предположим, что в накопительном слое концентрация молекул NaCl в 2 раза превышает критическую, т. е. равна удвоенной величине  $C_{\min}$ , полученной в п. в) задачи. Определите время, необходимое для того, чтобы в процессе диффузии эта концентрация понизилась до  $C_{\min}$ .

е) На основании ответов на вопросы пп. в) — д) обсудите практический смысл строительства таких водоемов и возможность их применения.



**6.4.** Концентрирующая система, описанная в § 6.8, имеет в качестве приемника черное тело с поверхностью площади  $A_c$ , которая находится в равновесии при температуре  $T_r = T_s$  ( $T_s$  — эквивалентная температура Солнца). Используя энергетический баланс приемника, покажите, что эти условия соответствуют отношению, ограничивающему коэффициент концентрации

$$X^{(m)} = (L/R_s)^2,$$

где  $R_s$  — радиус Солнца;  $L$  — расстояние от Солнца до Земли.

**6.5.** На рис. 6.14 показан принцип действия одной из возможных систем, использующих солнечную энергию. Солнечный свет концентрируется на трубке (перпендикулярной плоскости рисунка), поглощается сильно поглощающей селективной наружной поверхностью трубки, в результате жидкость в трубке нагревается до температуры  $T_f \approx 500^\circ \text{C}$ . Получаемый пар приводит в движение паровую турбину, от которой в свою очередь работает электрогенератор.

а) Почему желательно получать  $T_f$  как можно более высокой?

б) Предположим, что внутренняя трубка имеет длину 10 м, диаметр 50 мм и толщину стенки 2 мм и что от жидкости требуется получить мощность 12 кВт. Если трубка изготовлена из меди, покажите, что разность температур поперек трубки меньше  $0,1^\circ \text{C}$ . (Считайте, что жидкость в трубке нагрета однородно.)

в) Предположим, что селективная поверхность при рабочей температуре  $500^\circ \text{C}$  имеет  $\alpha/\varepsilon = 10$ . Какой необходим коэффициент концентрации для получения такой температуры с помощью вакуумированного коллектора, показанного на рис. 6.14? Осуществимо ли это технически с помощью двумерной системы?

г) Предположим, что медная трубка не защищена вакуумной системой, а просто находится в воздухе. Полагая скорость ветра равной нулю, определите конвективные теплопотери от трубки в секунду.

д) Предположим, что вся система должна генерировать 50 МВт электроэнергии. Оцените необходимую в этом случае площадь приемника.

е) Кратко обсудите достоинства и недостатки такой схемы, сравните ее с работающей на нефти электростанцией такой же мощности и с небольшой установкой, использующей солнечную энергию, такой, как водонагреватели для домашнего хозяйства.

**6.6.** Предположим, что система, показанная на рис. 6.12, должна обеспечивать среднюю производительность электроэнергии в 10 МВт.

а) Оцените требуемую для этого полную площадь приемника. Сравните с системой, использующей фотоэлементы.

б) Кратко объясните, почему требуются химические (или другие) накопители энергии и почему зеркала должны быть наведены на Солнце. Как они должны быть расположены?

в) Для достижения достаточно высокой скорости диссоциации необходимо поддерживать температуру около  $700^\circ \text{C}$ . В задаче 6.7 требуется, чтобы приемник, содержащий химический реагент, имел диаметр около 15 см. Найдите радиационные потери энергии от такого приемника, предполагая для простоты, что он имеет сферическую форму.

г) Апертура каждого зеркала составляет  $10 \text{ м}^2$ . Если плотность потока солнечного излучения  $1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ , то какова при этом облученность приемника?

Покажите, что в этих условиях может быть диссоциировано около  $2,5 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1} \text{ NH}_3$ .

6.7. Система, показанная на рис. 6.12, требует, чтобы к каждому концентратору приходило по  $2,5 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1} \text{ NH}_3$  (см. задачу 6.6.). Предположим, что аммиак находится под давлением 30 МПа, при этом плотность его  $\rho = 600 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  и вязкость  $\mu = 1,5 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Аммиак проходит по трубке, длина которой  $L$  и диаметр  $d$ . Для того чтобы трение в трубке было достаточно малым, необходимо поддерживать число Рейнольдса в потоке  $Re < 6000$ .

а) Рассчитайте диаметр  $d$  и энергетические потери на трение при прокачке через трубку  $2,5 \text{ г}$  аммиака на расстоянии  $L = 50 \text{ м}$ .

б) Сравните эти потери с переносимой энергией. Почему предпочтительнее поддерживать давление аммиака примерно равным 30 МПа а не 0,1 МПа. *Рекомендация:* оцените размеры системы, работающей при давлении 0,1 МПа.

### Решения

6.1. а)  $2,7 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ; б)  $650 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$

6.2. а)  $\varepsilon = n \pi a^2 / A_0$ ; в) 0,13 м, 10 м<sup>2</sup>.

6.3. а)  $r_n = 1,7 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1} > 0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$  (для хорошего плоского пластинчатого приемника).

б)  $r_v = 0,0018 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1} \ll r_n$ , полученного в п. а).

в)  $c \sim 30 \text{ г NaCl}$  на 1 кг  $\text{H}_2\text{O}$  значительно меньше концентрации при насыщении.

г)  $RC \approx 1,3 \times 10^6 \text{ с} = 15$  дней (потерями через дно пренебрегаем). Температура на восходе Солнца равна

$$T_a + (T_{store} - T_a) \exp \{-t/(RC)\} = 78,3^\circ \text{ C}.$$

д) Время диффузии  $X^2/D \approx 5$  лет.

е) Градиент солёности быстро устанавливается и противодействует диффузии. Тепло хорошо сохраняется, поэтому система теоретически жизнеспособна. Практические применения описаны в тексте.

6.5. а) Выше  $\eta$ .

б) Используйте  $P = -A k \partial T / \partial r$ .

в) Используйте  $P_u = \alpha G X A - \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_a^4) A$ ;  $X = 10$ ; легко осуществимо.

г) Используйте формулы из табл. 3.1  $Ra = 10^5$ ,  $P = 6 \text{ кВт}$ .

д)  $0,2 \text{ км}^2$  (при  $\eta = 0,25$ ).

6.6. а)  $50 \times 10^3 \text{ м}^2$  (предполагая  $\eta = \eta_{carnot}$  и среднюю мощность равной 1/3 пиковой), примерно 40% площади фотоэлементов.

б) Ночное время; направленное излучение; приемник солнечного излучения должен быть расположен в фокусе.

в) 3 кВт.

г)  $560 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

6.7. а) 4 мм, 2 кДж.

б) Высокая  $T \rightarrow$  высокий  $X \rightarrow$  высокая плотность (энергия).



## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ

## 7.1. Введение

Фотоэлектрическая генерация энергии обусловлена пространственным разделением положительных и отрицательных носителей заряда при поглощении в полупроводнике электромагнитного излучения. В присутствии электрического поля эти заряды могут создавать во внешней цепи электрический ток. В местах переходов или неоднородностей материала существуют внутренние электростатические поля. Внутренние поля фотоэлементов на основе структур полупроводник — полупроводник или металл — полупроводник создают разность потенциалов около 0,5 В и плотность тока порядка  $200 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$  при плотности потока солнечного излучения около  $1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Промышленные фотоэлементы имеют КПД от 10 до 20% при средней облученности и могут вырабатывать от 1 до  $2 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  электроэнергии в день.

Устройства на полупроводниковых переходах обычно называются *фотоэлементами* или *солнечными элементами*. Они сами являются источниками ЭДС. Важно подчеркнуть, что фотоэлектрические устройства представляют собой источники электрической энергии, работающие от потока излучения. Солнечные элементы генерируют электрический ток в прямой зависимости от суточных, сезонных и случайных изменений облученности. Эффективность использования солнечной энергии зависит не только от КПД фотоэлемента, но и от согласованности динамической нагрузки во внешней цепи. В этом отношении фотоэлектрические устройства подобны другим преобразователям энергии, хотя в деталях могут отличаться [например, использованием преобразователей постоянного тока в качестве устройств регулировки нагрузки по максимальной мощности (см. § 7.5)].

Большинство фотоэлементов представляют собой кремниевые полупроводниковые фотодиоды (рис. 7.1). Первые фотодиоды были изготовлены в 1954 г. Технология их изготовления быстро совершенствуется. В настоящее время с помощью солнечных полупроводниковых батарей обеспечиваются энергией искусственные спутники Земли.

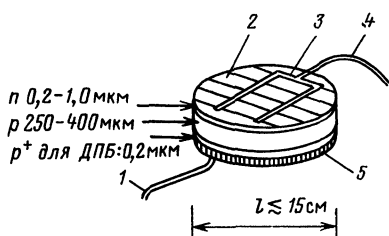


Рис. 7.1. Типичная структура солнечного элемента с  $p-n$ -переходом. Крышка (стеклянная или пластиковая) элемента и фильтр между элементом и крышкой не показаны. ДПБ — добавочный потенциальный барьер: 1 — от лицевой поверхности предыдущего элемента; 2 — противоотражательное покрытие, 3 — лицевой контакт, 4 — к тыльному контакту следующего элемента, 5 — металлический контакт с тыльной стороны

Полная стоимость фотоэлемента с 1974 по 1984 г. упала примерно со 100 долл. (США) на 1 Вт максимальной мощности примерно до 4 долл. на 1 Вт максимальной мощности. Предполагается снижение до 0,8 долл. на 1 Вт. Однако даже при полной стоимости фотоэлементов 4 долл. на 1 Вт, вспомогательной аппаратуры (батарей, измерительных приборов и т. д.) 2 долл./ $W_p$  при облученности местности около 20 МДж·м<sup>-2</sup> в день и долговечности фотоэлементов около 20 лет стоимость выработанной электроэнергии составляет примерно 16 центов (США) за 1 кВт·ч (4,4 цента/МДж). (Это может конкурировать с электроэнергией, полученной от дизель-генераторов, особенно в отдаленных районах, где стоимость доставки топлива и обслуживания может быть высокой.)

Основная область применения фотоэлементов — искусственные спутники Земли, удаленные станции радиосвязи и морские сигнальные огни. Ожидается, что в ближайшие несколько лет фотоэлементы будут широко использоваться развивающимися странами в сельских местностях в осветительных системах и системах водоснабжения.

В следующих параграфах будут рассмотрены основные принципы работы и технологии изготовления фотоэлектрических систем. Предварительный анализ будет проведен для монокристаллических кремниевых фотоэлементов с  $p-n$ -переходом, поскольку они являются наиболее простыми и широко распространенными. На этой основе могут быть изучены и другие модификации фотоэлементов. В § 7.5 даны рекомендации для практического использования солнечных фотоэлементов.

## 7.2. Кремниевый $p-n$ -переход

Свойства полупроводниковых материалов описаны во многих работах по физике твердого тела и электронике. Предполагается, что солнечные фотоэлементы представляют сугубо специальный интерес, поэтому внимания им уделяется мало. В большинстве книг описаны свойства  $p-n$ -переходов без освещения (темновые параметры), рассмотренные в данном параграфе. Ниже, в § 7.3, обсуждаются свойства освещенных  $p-n$ -переходов.

**Кремний.** Технически чистый кремний с собственной проводимостью имеет концентрацию примесных атомов не выше  $10^{18}$  м<sup>-3</sup> (меньше 1 на  $10^9$ ) и удельное сопротивление  $\rho_e \approx \approx 2500$  Ом·м. Электрические свойства полупроводников описываются зонной теорией, согласно которой между валентной зоной и зоной проводимости существует энергетический зазор, называемый запрещенной зоной (рис. 7.2). Плотность носителей заряда — электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне — чистого материала с собственной проводимостью пропорциональна  $\exp(-E_g/2kT)$ , если влиянием атомов примеси

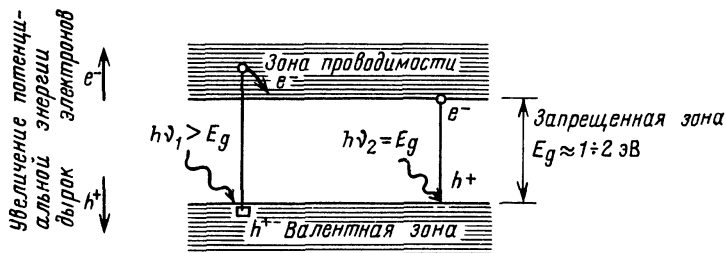


Рис. 7.2. Зонная структура беспримесного полупроводника с собственной проводимостью. Поглощение фотонов:

$h\nu < E_g$  — фотопоглощение отсутствует:  $h\nu_1 - E_g$  — избыток энергии, который выделяется в виде тепла;  $h\nu_2 = E_g$  — энергия фотона, равная ширине запрещенной зоны,  $h$  — постоянная Планка;  $\nu$  — частота

можно пренебречь. Это эквивалентно отсутствию электронов и дырок на энергетических уровнях в пределах запрещенной зоны.

**Легирование полупроводников.** Если в полупроводник с собственной проводимостью ввести определенное число примесных ионов, то в полупроводнике возникнет примесная проводимость. Кремний относится к элементам IV группы Периодической системы Д. И. Менделеева, валентность его равна 4. Если четырехвалентный атом кремния замещен в кристаллической решетке атомом с меньшей валентностью (например, трехвалентным бором), то возникает *акцепторный* узел в решетке, захватывающий свободные электроны. Энергетические уровни акцепторных атомов располагаются в запрещенной зоне, вблизи валентной зоны. Отсутствие свободных электронов приводит к появлению положительно заряженных состояний, называемых *дырками*, которые перемещаются через вещество как свободные носители. Полупроводники с примесью акцепторных атомов имеют в качестве *основных носителей* дырки и называются *полупроводниками p-типа*.

И наоборот, атомы большей валентности (например, фосфор из V группы) являются *донорами* электронов. Полупроводники с примесью донорных атомов имеют основными носителями электроны проводимости и называются *полупроводниками n-типа*.

И в том и в другом случае в полупроводниках также имеются носители заряда противоположного знака, но их концентрация намного меньше, чем основных носителей. Они называются *неосновными носителями* (электроны для материала p-типа, дырки — для n-типа). Свободные электроны и дырки могут рекомбинировать, что приводит к исчезновению носителей, кроме того, в местах дефектов кристалла возможен захват носителей.

Материалы с примесной проводимостью того или другого типа характеризуются более высокой электропроводностью, чем химически чистые исходные материалы. В самом деле, по значению

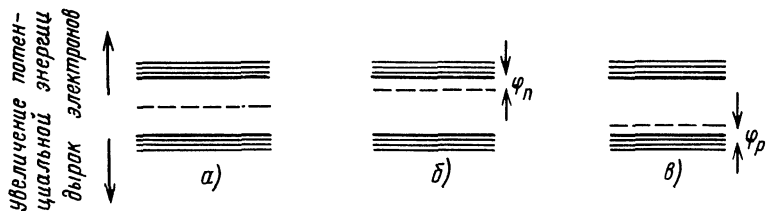


Рис. 7.3. Уровень Ферми в полупроводниках (показан пунктиром). Беспримесный полупроводник (а), примесь  $n$ -типа (б), примесь  $p$ -типа (в)

удельного сопротивления  $\rho_e$  можно дать характеристику материалу. Средние значения удельного сопротивления для кремниевых фотоэлементов  $\rho_e \approx 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  ( $N_d \approx 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ) и  $\rho_e \approx 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  ( $N_d \approx 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ) (здесь  $N_d$  — концентрация примесных ионов).

**Уровень Ферми.** Проводимость полупроводников  $n$ -типа выше, чем материалов с собственной проводимостью, так как энергия ионизации доноров меньше ширины запрещенной зоны, и при термическом возбуждении электроны легче переходят в зону проводимости. Аналогично в материалах  $p$ -типа дырки легче попадают в валентную зону. Для наглядного объяснения этого явления введено понятие *уровня Ферми* (рис. 7.3). Уровень Ферми представляет собой условный уровень энергии в запрещенной зоне, с которого возбуждаются основные носители (электроны в материалах  $n$ -типа и дырки в материалах  $p$ -типа). Вероятность возбуждения пропорциональна  $\exp[-e\varphi/(kT)]$ , где  $e$  — заряд электрона и дырки,  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ ;  $\varphi$  — разность потенциалов между уровнем Ферми и валентной зоной или зоной проводимости соответственно.

Следует отметить, что электроны возбуждаются «вверх» в зону проводимости, а дырки — «вниз» в валентную зону. На энергетической диаграмме потенциальная энергия возрастает вверх для электронов и вниз для дырок.

**Электронно-дырочные переходы.** В некоторых областях материала  $p$ -типа возможно появление избытка атомов донорной примеси, так что проводимость в них определяется электронами, и наоборот. Область, в которой имеет место пространственное изменение типа проводимости от электронной к дырочной, называется *электронно-дырочным переходом* ( $p$ — $n$ -переходом). Переход не сформируется, если физически соединить два отдельных куска материала.

Представим, что в изолированном материале мгновенно сформировался переход (рис. 7.4, а). Избыток донорных электронов из материала  $n$ -типа перейдет к акцепторам  $p$ -типа, а дырки — в обратном направлении. Через определенное время установится равновесие. Электрическое поле, возникшее вследствие ак-

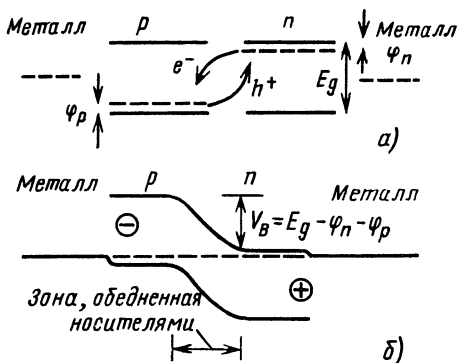


Рис. 7.4. Схема формирования  $p-n$ -перехода в фотоэлементе; уровни Ферми изолированных компонент показаны пунктиром (а). Диаграмма энергетических уровней  $p-n$ -гомоперехода с металлическими невыпрямляющими контактами (омическими). Электроны и дырки диффундируют до установления равновесия (б)

кумуляции зарядов противоположного знака по обе стороны перехода, уравнивает диффузию, возникающую вследствие различия концентрации свободных электронов и дырок. В результате уровень Ферми оказывается под постоянным потенциалом. Теперь результирующее движение зарядов происходит с преобладанием отрицательных зарядов в  $p$ -области и положительных в  $n$ -области.

Запрещенная зона  $E_g$  существует во всем материале, и между энергиями зоны проводимости и валентной зоны возникает скачок потенциала, как показано на рис. 7.4, б. Глубина скачка в шкале энергий равна  $eV_B$  ( $V_B$  — разность потенциалов);  $V_{B(I=0)}$  — скачок потенциала при нулевом токе через переход, т. е. соответствует потенциалу внутреннего поля изолированного перехода. Следует отметить, что  $V_B < E_g$ , так как

$$V_{B(I=0)} = E_g - (\varphi_n + \varphi_p). \quad (7.1)$$

Сумма  $(\varphi_n + \varphi_p)$  уменьшается с увеличением концентрации примеси. Для сильно легированного кремниевого  $p-n$ -перехода (концентрация ионов примеси около  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ )  $E_g = 1,11 \text{ эВ}$  и  $(\varphi_n + \varphi_p) \approx 0,3 \text{ В}$ . Таким образом, в отсутствие тока в неосвещенном кремниевом переходе контактная разность потенциалов

$$V_{B(I=0)} \approx 0,8 \text{ В}. \quad (7.2)$$

**Область, обедненная носителями.** Баланс потенциальной энергии носителей по обе стороны  $p-n$ -перехода, представленный постоянством уровня Ферми в пределах перехода, приводит к тому, что область  $p$ -типа приобретает общий отрицательный заряд, а область  $n$ -типа — общий положительный. Суммарный эффект заключается в том, что электроны и дырки перемещаются от границы перехода, оставляя эту область сильно обедненной носителями. Пусть  $n$  и  $p$  — плотности электронов и дырок соответственно. Тогда произведение  $np = C$  постоянно по всему материалу. Например,

1) область  $p$ :

$$np = C = (10^{11} \text{ м}^{-3}) (10^{21} \text{ м}^{-3}) = 10^{32} \text{ м}^{-6}, \quad n + p = 10^{21} \text{ м}^{-3}; \quad (7.3)$$

2) область  $n$ :

$$np = C = (10^{21} \text{ м}^{-3}) (10^{11} \text{ м}^{-3}) = 10^{32} \text{ м}^{-6}, \quad n + p = 10^{21} \text{ м}^{-3}; \quad (7.4)$$

3) область потенциального барьера: по определению  $n = p$ , поэтому

$$n^2 = p^2 = C = 10^{32} \text{ м}^{-6}, \quad n = p = 10^{16} \text{ м}^{-3}, \quad n + p = 2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}. \quad (7.5)$$

Типичные данные этого примера показывают, что общая плотность носителей заряда в обедненной зоне понижена примерно на  $10^5$  по сравнению с  $n$ - и  $p$ -областями.

Ширина  $w$   $p$ - $n$ -перехода приблизительно равна

$$w \approx \left[ \frac{2\epsilon_0\epsilon_r V_B}{e \sqrt{np}} \right]^{1/2}, \quad (7.6)$$

где  $\epsilon_0$ —диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon_r$ —диэлектрическая проницаемость материала.

Для кремния при концентрации доноров  $10^{22} \text{ м}^{-3}$   $w \approx 0,5 \text{ мкм}$  и напряженность электрического поля  $V_B/w \sim 2 \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ . Фотоэлектрические свойства перехода зависят от способности неосновных носителей диффундировать через потенциальный барьер. Необходимым условием этого является  $w < L$ , где  $L$ —длина пробега неосновных носителей. Этот критерий легко выполняется в солнечных элементах с  $p$ - $n$ -переходом [см. (7.11)].

**Смещение.** Электронно-дырочный переход может быть снабжен металлическими контактами, соединенными с батареей (рис. 7.5). Контакты, называемые омическими, представляют собой невыпрямляющие переходы с низким по сравнению с объемом материала сопротивлением. При прямом смещении положительное направление тока соответствует переходу от  $p$ -к

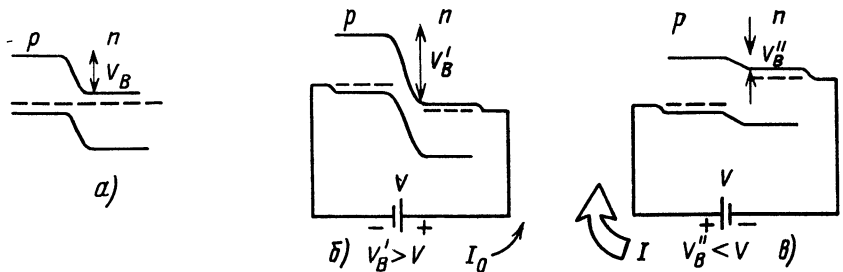


Рис. 7.5. Изолированный переход, нулевое смещение (а). Обратное (б) и прямое (в) смещения  $p$ - $n$ -перехода. Ток  $I_0 \ll I$

$n$ -материалу через пониженный потенциальный барьер  $V_B$ . При обратном смещении потенциальный барьер повышается. Таким образом,  $p$ — $n$ -переход работает как выпрямляющий диод, вольт-амперная характеристика которого будет описана ниже.

**Генерация носителей.** На атомном уровне вещество находится в состоянии непрерывного движения. Атомы в твердом теле осциллируют в колебательных модах с квантованной энергией (кванты энергии упругих колебаний называются *фононами*). В полупроводниковых материалах электроны и дырки спонтанно генерируются из связанных состояний и попадают в валентную зону и в зону проводимости как носители зарядов. Это — процесс термического возбуждения, вероятность которого определяется бoльцмановским фактором  $\exp[-E/(kT)]$  ( $E$  — энергия, которую необходимо затратить для отрыва электрона или дырки от связанного состояния;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура). Для беспримесных материалов с собственной проводимостью  $2E = E_g$  — ширине запрещенной зоны. Для легированных материалов с примесной проводимостью  $|E| = |e\phi|$ , где  $\phi$  — разность потенциалов, необходимая для возбуждения электронов в материалах  $n$ -типа в зону проводимости или дырок в материалах  $p$ -типа в валентную зону. Заметим, что  $\phi$  определяется локально в области легирования и  $|e\phi| < E_g$  (рис. 7.4, а). Обычно  $\phi$  уменьшается при увеличении концентрации примеси. Для сильно легированного кремния ( $\rho_e \approx 0,01$  Ом·м,  $N_d \approx 10^{22}$  м<sup>-3</sup>)  $|e\phi| \approx 0,2$  эВ.

**Характерное время релаксации (рекомбинации) и диффузионная длина.** Возбужденные термически или иным способом электроны и дырки спускаются некоторое характерное время  $\tau$  рекомбинируют, пройдя за это время в кристалле путь, равный характерной диффузионной длине пробега  $L$ . В особо чистых материалах с собственной проводимостью времена релаксации могут быть большими ( $\tau \sim 1$  с), но в промышленных легированных материалах времена релаксации намного меньше ( $\tau \sim 10^{-2} \div 10^{-8}$  с). Времена жизни носителей ограничены вследствие рекомбинации на примесных центрах, неоднородностях кристалла, на поверхности и других дефектах. Таким образом, сильно легированные материалы характеризуются малыми временами релаксации. Вследствие больших площадей поверхности и конструктивных особенностей солнечных фотоэлементов поверхностная рекомбинация существенно влияет на их эксплуатационные характеристики. Скорость поверхностной рекомбинации  $S_v$  (для кремния эта скорость обычно составляет  $10$  м·с<sup>-1</sup>) определяется из соотношения

$$J = S_v N, \quad (7.7)$$

где  $J$  — плотность рекомбинационного потока, перпендикулярного поверхности, м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $N$  — концентрация носителей в полупроводнике, м<sup>-3</sup>.

Вероятность рекомбинации носителей в единицу времени равна  $1/\tau$ . Для  $n$  электронов число актов рекомбинации в единицу времени есть  $n/\tau_n$ , для  $p$  дырок —  $p/\tau_p$ . В одном материале в равновесии эти величины должны быть равны, так что

$$\frac{n}{\tau_n} = \frac{p}{\tau_p}, \quad \tau_n = \frac{n}{p} \tau_p, \quad \tau_p = \frac{p}{n} \tau_n. \quad (7.8)$$

В  $p$ -материале, если  $p \sim 10^{22} \text{ м}^{-3}$  и  $n \sim 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , то  $\tau_n \ll \tau_p$  и наоборот. Следовательно, в материалах, из которых изготавливаются солнечные элементы, времена жизни неосновных носителей на много порядков величины короче, чем основных носителей, т. е. имеется большое количество основных носителей, с которыми могут рекомбинировать неосновные.

Диффузия носителей в полупроводниках, обусловленная наличием градиента концентрации  $dN/dx$ , приводит к возникновению тока в направлении  $x$ , плотность которого

$$\tau_x = -D \left( \frac{dN}{dx} \right), \quad (7.9)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии. Типичное значение  $D$  для кремния составляет  $35 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  для электронов и  $12 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  для дырок.

В пределах времени релаксации  $\tau$  диффузионная длина определяется из соотношения Эйнштейна

$$L = (D\tau)^{1/2}. \quad (7.10)$$

Таким образом, диффузионная длина неосновных носителей в кремнии  $p$ -типа ( $D \sim 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\tau \sim 10^{-5} \text{ с}$ ) составляет

$$L \approx (10^{-3} \cdot 10^{-5})^{1/2} \text{ м} \approx 100 \text{ мкм}. \quad (7.11)$$

Видно, что  $L \gg \omega$  — ширины  $p$ — $n$ -перехода в кремнии.

**Токи  $p$ — $n$ -перехода.** Свободные носители появляются в материале при нагревании или освещении. Неосновные носители, возникшие в области потенциального барьера, переносятся под действием контактного поля через границу перехода. Как только эти носители пересекли границу перехода, они становятся основными носителями (см. рис. 7.5 и 7.6). Движение неосновных носителей создает генерационный ток  $I_g$ , который для данного перехода без освещения определяется преимущественно температурой.

В изолированном переходе генерационный ток уравновешивается возникающим в объеме материала противоположно направленным рекомбинационным током такой же величины  $I_r$ . Потенциал контактного поля под влиянием токов перехода несколько понижается. Повышение температуры приводит к увеличению  $I_g$  и, следовательно, к снижению  $V_B$  (ниже описано понижение напряжения фотоэлектрической цепи  $V_{oc}$  при увеличении температуры).



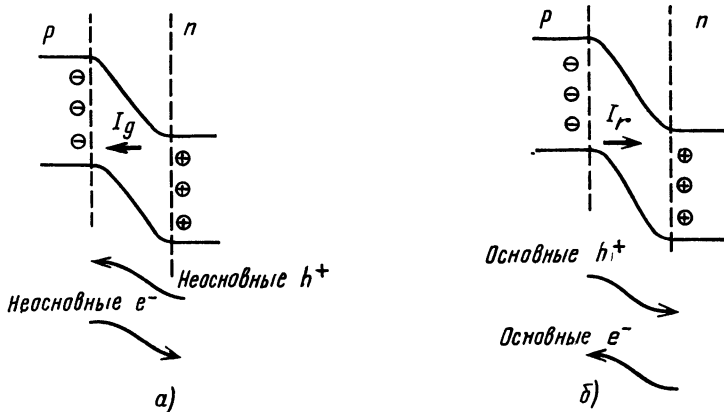


Рис. 7.6. Токи генерации (а) и рекомбинации (б) в  $p-n$ -переходе

Для данного материала ток генерации  $I_g$  определяется температурой, а ток рекомбинации может изменяться при приложении внешнего смещения, как показано на рис. 7.5 и 7.7.

В отсутствие освещения  $I_g$  определяется выражением

$$I_g = eN_i^2 \left( \frac{1}{p} \frac{L_p}{\tau_p} + \frac{1}{n} \frac{L_n}{\tau_n} \right), \quad (7.12)$$

где  $N_i$  — концентрация собственных носителей. На практике трудно с достаточной точностью контролировать рост кристалла и концентрацию примесей для того, чтобы предсказать, какими будут  $L$  и  $\tau$  в зависимости от свойств материала, поэтому  $I_g$  не контролируется.

Следует отметить, что вероятность рекомбинации в области контактного поля очень мала, так как время  $t$ , в течение которо-

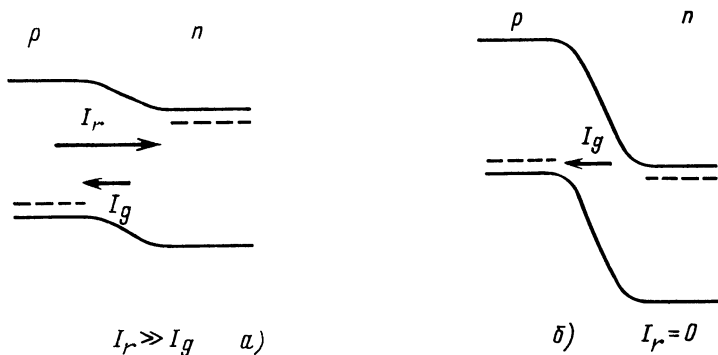
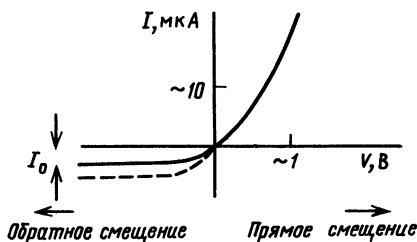


Рис. 7.7. Токи генерации и рекомбинации при наличии внешнего смещения: прямого (а) и обратного (б)

Рис. 7.8. Темновая характеристика  $p-n$ -перехода. При повышении температуры ток насыщения  $I_0$  возрастает (пунктир)



го носители проходят сквозь эту область, составляет

$$t \approx \frac{\omega}{u} = \frac{\omega}{\mu(V_B/\omega)} = \frac{\omega^2}{\mu V_B} \sim 10^{-12} \text{ с}, \quad (7.13)$$

где  $u$  — скорость дрейфа;  $\mu$  — подвижность носителей ( $\sim 0,1 \text{ м}^2 \times \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ) в электрическом поле  $V_B/\omega$ , где  $V_B \sim 0,6 \text{ В}$ ,  $\omega \sim 0,5 \text{ мкм}$ .

Таким образом,  $t \ll \tau_r$  ( $\tau_r$  — время рекомбинации,  $\tau_r = 10^{-2} \div 10^{-8} \text{ с}$ ).

**Вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода.** На рис. 7.8 показана вольт-амперная характеристика неосвещенного  $p-n$ -перехода. В отсутствие внешнего смещения ( $V=0$ )

$$I_r = I_g. \quad (7.14)$$

При положительном прямом смещении  $V$  рекомбинационный ток возрастает экспоненциально с ростом  $V$ :

$$I_r = I_g \exp [eV/(kT)]. \quad (7.15)$$

Эта закономерность объясняется в теории физики твердого тела.

Полный ток через переход (без освещения) равен

$$I_D = I_r - I_g = I_g \{ \exp [eV/(kT)] - 1 \}. \quad (7.16)$$

Это — уравнение Шокли, обычно записываемое в виде

$$I_D = I_0 \{ \exp [eV/(kT)] - 1 \}, \quad (7.17)$$

где  $I_0 (= I_g)$  — ток насыщения (ток через переход при обратном смещении, меньшем напряжения пробоя). Он также называется током утечки или диффузионным током. Для хороших солнечных фотоэлементов  $I_0 \sim 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ .

### 7.3. Поглощение фотонов

Основным процессом, к которому приводит поглощение электромагнитного излучения в полупроводниках, является генерация электронно-дырочных пар. При поглощении фотонов с энергиями

$$h\nu \geq E_g \quad (7.18)$$

возможны *прямые* переходы электронов через запрещенную зону

(здесь  $h$  — постоянная Планка,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\nu$  — частота излучения;  $E_g$  — ширина запрещенной зоны; полупроводниковые материалы солнечных элементов имеют  $E_g \approx 1$  эВ). Переходы, в которых одновременно с поглощением фотона происходит поглощение или испускание фонона, называются *непрямыми*. В этом случае

$$h\nu \pm h\Omega \geq E_g, \quad (7.19)$$

где энергия фононов  $h\Omega \sim 0,02$  эВ,  $\Omega$  — частота колебаний атомов в кристаллической решетке.

В случае прямых переходов через запрещенную зону полупроводники (например, GaAs) имеют резкую границу полосы поглощения ( $\nu > E_g/h$ ) и относительно большие коэффициенты ослабления излучения, в случае не прямых переходов (например, Si) — менее резкую границу полосы поглощения и меньший коэффициент ослабления (рис. 7.9).

Для кремния граница полосы поглощения соответствует

$$\nu > E_g/h \approx \frac{(1,1 \text{ эВ}) (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot \text{эВ}^{-1})}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 0,27 \cdot 10^{15} \text{ Гц}; \quad (7.20)$$

$$\lambda \approx \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{0,27 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}} = 1,1 \text{ мкм}. \quad (7.21)$$

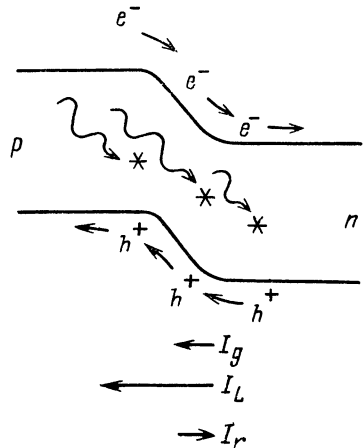
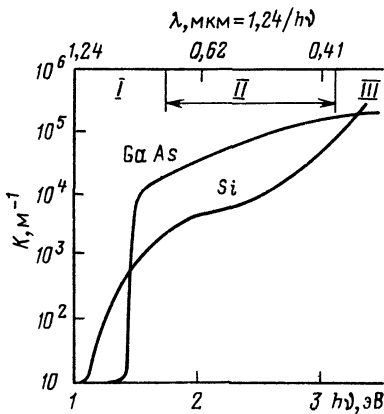


Рис. 7.9. Показатель экстинкции  $K$  материалов с прямыми (GaAs) и непрямыми (Si) переходами через запрещенную зону. Интенсивность излучения меняется по закону  $I(x) = I_0 \exp(-Kx)$ , где  $x$  — глубина проникновения излучения в материал. Зависимость изображена в логарифмическом масштабе, что маскирует резкую границу полосы поглощения:

$I$  — инфракрасный диапазон;  $II$  — видимый;  $III$  — ультрафиолетовый  
Рис. 7.10. Схема возникновения фототока при поглощении активных фотонов:  $I_g$  — ток генерации,  $I_L$  — фототок;  $I_r$  — ток рекомбинации

Солнечное излучение характеризуется высокой плотностью потока фотонов ( $1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2} / [(2 \text{ эВ}) (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot \text{эВ}^{-1})] \approx \approx 3 \cdot 10^{21} \text{ фотон} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), поэтому поглощение его полупроводниковыми материалами может резко увеличить скорость возникновения электронно-дырочных пар (в дополнение к термической генерации). Если генерация носителей происходит вблизи  $p-n$ -перехода, то под действием контактного поля происходит пространственное разделение зарядов и возникает фото-эдс, которая приводит к появлению тока в замкнутой внешней цепи (рис. 7.10). Таким образом, генерация носителей фотонами при освещении Солнцем полупроводника суммируется (и преобладает) с всегда присутствующей термической генерацией. В темноте, естественно, существует только термическая генерация.

Поглощающий фотоны  $p-n$ -переход является источником постоянного тока (и энергии) с положительным полюсом в материале  $p$ -типа. Условия генерации энергии солнечным элементом аналогичны условиям в диоде с прямым смещением. Разность потенциалов составляет  $V_B$  (исключая малые контактные потенциалы) и определяется как величиной смещения, так и расположением энергетических зон. Напряжение на контактах фотоэлемента  $V_B$  будет меняться в зависимости от силы тока во внешней цепи  $I$  в пределах от 0 (условие короткого замыкания  $I_{sc}$ ) до  $V_{oc}$  (открытая цепь,  $I=0$ ). Максимум энергии передается внешней нагрузке, если ее сопротивление  $R_L$  равняется внутреннему сопротивлению источника  $R_{int}$ . Однако  $R_{int}$  определяется потоком поглощаемых фотонов, поэтому для хорошего энергетического согласования в солнечном элементе необходимо, чтобы  $R_L$  менялось в соответствии с облученностью.

Ток  $I$  солнечного элемента определяется вычитанием индуцированного фотонами тока  $I_L$  из темнового тока  $I_D$  фотодиода (рис. 7.11, ср. с рис. 7.8). При обратном смещении  $I_D$  отрицателен и равен термически генерируемому току  $I_g$ . Токи  $I_g$  и  $I_L$  складываются, так как они оба возрастают при генерации электронно-дырочных пар.

Из рис. 7.11 видно, что сила тока во внешней цепи  $I$  всегда определяется разностью

$$I = I_D - I_L; \quad (7.22)$$

учитывая (7.17), получаем

$$I = I_0 \exp[eV/(kT) - 1] - I_L. \quad (7.23)$$

Более подробно вольт-амперные характеристики обсуждаются в § 7.5.

Фототок определяется количеством фотонов, поглощенных вблизи области  $p-n$ -перехода. Пусть  $G_0$  — плотность потока приходящего к поверхности фотоэлемента излучения, тогда на глубине  $x$  поглощенная единицей площади энергия

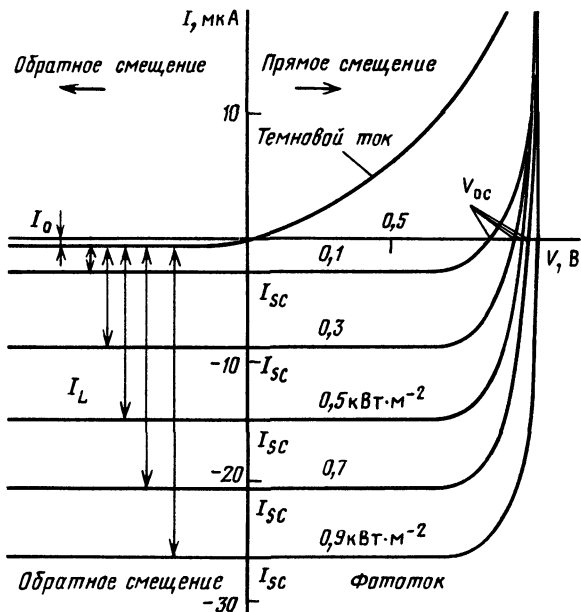


Рис. 7.11. Вольт-амперные характеристики  $p-n$ -перехода при различных облучениях приемной поверхности:  
 $I_{sc}$  — ток короткого замыкания

$$G = G_0 - G_x = G_0 \{1 - \exp [K(\nu)x]\}, \quad (7.24)$$

где

$$dG/dx = -K(\nu)G_x, \quad (7.25)$$

$K(\nu)$  — показатель ослабления (экстинкции) (рис. 7.9), сильно зависящий от частоты. Фотоны с энергиями, меньшими ширины запрещенной зоны, практически не поглощаются. Если частота падающего излучения превышает границу полосы поглощения материала, то на глубине  $1/K$  поглощается 63% потока энергии, на глубине  $2/K$  — 86%, на глубине  $3/K$  — 95%. Для кремния глубина  $2/K$  равняется примерно 400 мкм, это значение ограничивает минимальную толщину материала солнечного элемента.

#### 7.4. Потребляемая солнечная энергия

Характеристики солнечного излучения подробно обсуждались в гл. 4. Для генерации фототока в типичном солнечном элементе, например кремниевом, наиболее существенно следующее.

1. Поглощение фотонов, энергия которых недостаточна для генерации фототока ( $h\nu < E_g$ ) (область А на рис. 7.12), приводит к нагреву материала.

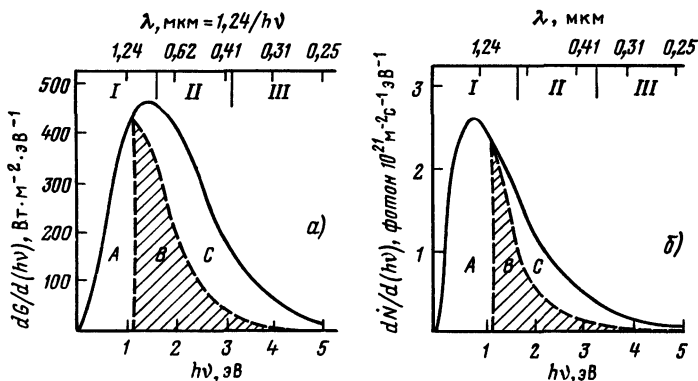


Рис. 7.12. Спектральное распределение солнечного излучения. Зависимость интенсивности от энергии фотонов (АМО) (а) и плотности потока фотонов от энергии фотонов (АМ1) (б). Область А — энергия фотонов недостаточна для генерации фототока в кремниевом элементе; область В — энергия фотонов достаточна для генерации фототока; область С — неиспользуемый избыток энергии фотонов (I, II, III — то же, что и на рис. 7.9)

2. При частотах излучения, превышающих границу полосы поглощения ( $h\nu > E_g$ ), избыток энергии фотонов ( $h\nu - E_g$ ) также расходуется на нагрев.

3. Таким образом, существует оптимальная ширина запрещенной зоны, при которой поглощаемое солнечное излучение максимально используется для генерации электроэнергии (рис. 7.13). Следует отметить, что спектральное распределение приходящего к фотоэлементу солнечного излучения меняется в зависимости от угла прохождения сквозь атмосферу (см. § 4.6, где было дано определение оптической массы; АМ1 соответствует солнцу в зените, АМ2 — зенитный угол  $60^\circ$ , АМ0 — в космосе), от облачности, влажности, загрязненности атмосферы и

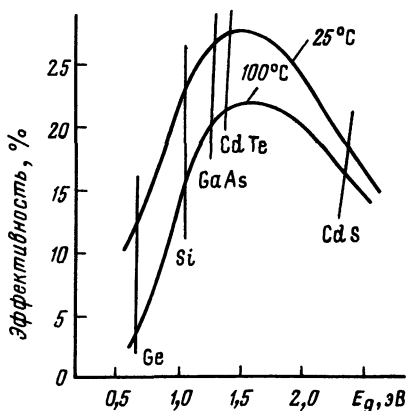


Рис. 7.13. Зависимость максимальной ожидаемой эффективности гомопереходных солнечных элементов от ширины запрещенной зоны. Видно, что при повышении температуры эффективность снижается. Отмечены значения ширины запрещенной зоны для основных материалов

т. д. Условия АМ1 обычно выбираются в качестве стандартных для разрабатываемых солнечных элементов.

4. Только фотоны, энергия которых соответствует области  $B$  на рис. 7.12, участвуют в генерации фототока в солнечном элементе. Доля энергии этих фотонов в полной энергии приходящего солнечного излучения  $[B/(A+B+C)]$ , где  $A, B, C$  — площади областей  $A, B, C$ , составляет примерно 47%. Точное значение несколько меняется в зависимости от спектрального распределения.

Если распределение плотности фотонов ( $N$ ) по энергиям ( $E = h\nu$ ) есть  $dN/dE$ , то максимальное теоретическое значение энергии, генерируемой фотоэлементом при поглощении фотонов, энергия которых больше ширины запрещенной зоны, определяется по формуле

$$P = \int_{E_g}^{\infty} \left( \frac{dN}{dE} \right) E_g dE, \quad (7.26)$$

но

$$dP = h\nu dN = E dN, \quad (7.27)$$

поэтому

$$P = \int_{E_g}^{\infty} \left( \frac{dP}{dE} \right) \frac{E_g}{E} dE. \quad (7.28)$$

## 7.5. Фотоэлектрические свойства цепи и нагрузки

Фотоэлементы, как и другие преобразователи, можно использовать для получения электроэнергии. На эквивалентной диаграмме приведены основные макроскопические характеристики генератора (рис. 7.14).

Положительное направление тока  $I$  устройства в целом совпадает с положительным направлением тока в фотоэлементе. При постоянном радиационном потоке асимметрия вольт-амперной характеристики (рис. 7.15) определяется наличием темного тока  $I_D$ . Это относится к области диодной характеристики, где  $V$  — положительно, а  $I$  — отрицательно (ср. с рис. 7.8 и 7.11).

Максимум энергии достигается, если поддерживать значения  $V$  и  $I$  такими, чтобы их произведение совпадало с линией максимальной мощности (рис. 7.15) при изменении облученности и сопротивления нагрузки. Это соответствует почти постоянному напряжению в пределах 25%  $V_{oc}$ . В отличие от чисто омической нагрузки, когда падение напряжения на нагрузке зависит от силы тока в цепи, в случае аккумуляторной батареи при изменении силы тока разность потенциалов остается практически

постоянной. Поэтому для аккумуляторной батареи можно регулировать  $V$  и  $I$  так, чтобы находиться вблизи линии максимальной мощности на вольт-амперной характеристике. Тем не менее, как показано в § 16.5, ЭДС батареи меняется в зависимости от заряда в диапазоне около 10% максимума. Таким образом, при любой нагрузке, включая аккумуляторные батареи, наилучшее сочетание параметров достигается при использовании устройств регулировки нагрузки по максимальной мощности. Эти устройства представляют собой по существу преобразователи постоянного тока. Использование их в цепи позволяет достигать полезного потребления в нагрузке 95% максимальной выходной мощности при различных условиях освещения.

Из эквивалентной диаграммы (рис. 7.14) получаем

$$I = I_L - I_D - \frac{(V - IR_s)}{R_{sh}}. \quad (7.29)$$

С учетом (7.17) запишем выражение для темнового тока:

$$I_D = I_0 \{ \exp [e(V - IR_s) / (AkT)] - 1 \}. \quad (7.30)$$

Для кремния  $I_0 \approx 10^{-7}$  А·м<sup>-2</sup>.

Для более точного описания реальных характеристик здесь введен коэффициент идеальности  $A$ . Для всех фотоэлементов

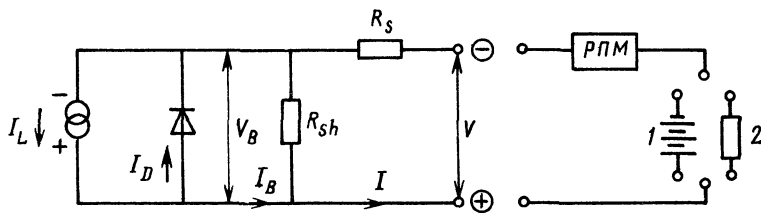


Рис. 7.14. Эквивалентная цепь солнечного элемента. Показаны также примеры нагрузок с устройством регулировки по максимальной мощности (РПМ):

1 — батарея аккумуляторов, 2 — омическая нагрузка

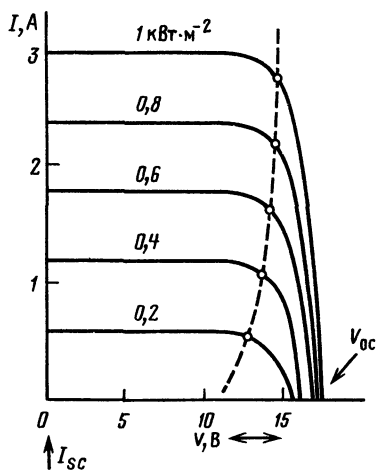


Рис. 7.15. Вольт-амперная характеристика типичной солнечной батареи из 33 кремниевых элементов. Видно, что линия пиковой мощности (штриховая кривая), соответствующая максимуму произведения  $IV$ , хорошо согласуется с областью напряжений, требуемых для зарядки аккумуляторных батарей ( $\leftrightarrow$ ), даже без использования устройства контроля нагрузки



$A \gg 1$ . Более высокие значения  $A$  приводят к появлению большей кривизны вольт-амперной характеристики и, следовательно, к снижению максимальной мощности. Этот эффект называется добавочным фактором. Он является следствием усиления рекомбинации электронов и дырок на дефектах кристалла. В § 7.6 этот вопрос обсуждается более подробно.

Нагрев фотоэлемента приводит к понижению  $V_{oc}$  и повышению  $I_{sc}$  с соответствующим изменением вольт-амперной характеристики. При повышении температуры материала элемента  $\theta$  уменьшаются  $R_{sh}$  (обычно берется бесконечно большим) и  $R_s$  (делается возможно малым). Эмпирические соотношения, описывающие влияние нагрева кремниевого элемента при облученности  $1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ , имеют вид:

$$V_{oc}(\theta) = V_{oc}(\theta_1)[1 - a(\theta - \theta_1)], \quad (7.31)$$

$$I_{sc}(\theta) = I_{sc}(\theta_1)[1 + b(\theta - \theta_1)], \quad (7.32)$$

где  $\theta_1 = 25^\circ \text{C}$  — реперная температура;  $\theta$  — температура материала; температурные коэффициенты:

$$a = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad b = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Повышение температуры в итоге приводит к снижению достижимой мощности. Эмпирическая зависимость  $P(\theta)$  для кремниевого фотоэлемента имеет вид

$$P(\theta) = P(\theta_1)[1 - c(\theta - \theta_1)], \quad (7.33)$$

где  $c = 4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Из анализа эквивалентной цепи следует, что высокая эффективность получения энергии может быть обеспечена при выполнении следующих условий.

1. Ток  $I_L$  должен быть максимальным. Это может быть реализовано, например, если свести к минимуму потери фотонов, при поглощении вблизи области потенциального барьера, снижении коэффициента отражения поверхности, уменьшении площади поверхности электрического контакта, повышении концентрации доноров и понижении концентрации центров рекомбинации.

2. Темновой ток  $I_D$  должен быть минимальным (например, вследствие высокой концентрации доноров).

3. Сопротивление  $R_{sh}$  должно быть как можно выше. Этого можно добиться, например, тщательной обработкой поверхностей фотоэлемента.

4. Сопротивление  $R_s$  должно быть малым. Это возможно, например, при малых длинах пробега носителей к электрическим контактам и при использовании контактов и нагрузок с низким сопротивлением.

5. Для получения оптимальной мощности должно выполняться условие  $R_{load} = R_{int} = V/I$ .

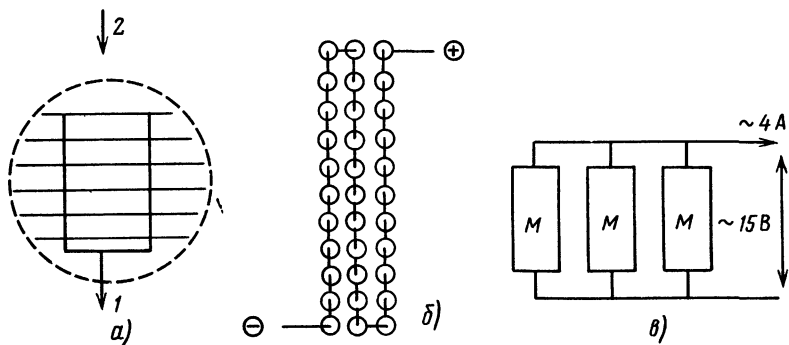


Рис. 7.16. Схемы устройств типичных промышленных кремниевых солнечных элементов: элемент (а), модуль из 33 элементов (б) и батарея (в): 1 — лицевой контакт; 2 — тыльный

Батарея солнечных элементов обычно представляет собой комбинацию соединенных параллельно модулей. Каждый модуль в свою очередь является комбинацией последовательно соединенных фотоэлементов. А каждый фотоэлемент состоит из параллельно соединенных поверхностных элементов (рис. 7.16). Максимальное падение напряжения на контактах открытой цепи модулей составляет примерно 15 В, максимальный ток через модуль — около 1,5 А. Очевидно, что может сложиться ситуация, когда один из элементов выйдет из строя или поверхность устройства будет неравномерно освещена вследствие различной степени концентрации света или наличия тени. В этом случае фотоэлемент будет работать в режиме диода с прямым или обратным смещением, причем может перегреваться. Для предотвращения лавинного пробоя параллельно каждой серии цепочек фотоэлементов необходимо устанавливать шунтирующие диоды. Однако предполагается, что при правильной эксплуатации безаварийная работа промышленных солнечных элементов будет достаточно длительной. Ожидаемый срок службы составляет по крайней мере 20 лет.

## 7.6. Ограничения эффективности солнечных элементов

Эффективность солнечных элементов ограничена вследствие различного рода потерь; некоторых из них можно избежать, другие заключены в самих системах. Одни ограничения очевидны и могут контролироваться независимо, другие являются сложными и не могут контролироваться без воздействия на материал. Например, увеличение концентрации примеси может давать как положительный, так и отрицательный эффект. В табл. 7.1 перечислены типичные потери в солнечных элементах с кремниевым  $p$ — $n$ -переходом при облученности в условиях

Таблица 7.1. Ограничения эффективности кремниевых солнечных элементов (пояснения см. в § 7.6)

Данные на 1983 г				Планируемые данные		
Энергия, оставшаяся после учета потерь в данном процессе, %	Потери мощности, %	Эффективность	Примечание	Эффективность	Потери мощности, %	Энергия, оставшаяся после учета потерь в данном процессе, %
77	23	0,77	Нет фотопоглошения: $h\nu < E_g$	0,77	23	77
44	33	0,57	Избыток энергии фотонов переходит в тепло: $h\nu - E_g$	0,57	33	44
43	1	0,97	Отражение от поверхности	0,99	1	43
42	0,4	0,99	Квантовый КПД	0,99	0,4	43
39	3	0,92	Ограниченная площадь контактов на лицевой поверхности	0,95	1,6	41
19	20	0,5	Потери потенциала: $eV_B < E_g$	0,7	12	29
15	4	0,81	Фактор кривизны-максимальная мощность/ $I_{sc}V_{oc}$	0,87	4	25
10	5	0,65	Добавочный фактор кривизны А, рекомбинационные потери	0,9	2,4	23
9,7	0,3	0,97	Добавочное сопротивление	0,97	0,6	22
9,6	0,1	0,99	Шунтирующее сопротивление	0,99	0,2	21
10	—	—	Полезная мощность	—	—	20

АМ1. К сожалению, общепринятых названий для обозначения различных видов потерь нет. В таблицу не включены данные о стоимости производства солнечных элементов и сроках службы. Если учитывать все факторы, то оптимизация промышленного производства солнечных элементов представляет значительные трудности.

В следующих параграфах потери приведены в процентном отношении к полной облученности, которая в условиях АМ1 полагается равной 100%. Потери перечислены в направлении от поверхности к основанию фотоэлемента. Коэффициенты полезного действия в табл. 7.1 отнесены к полезной доле приходящего потока излучения, поглощаемого при фотоэлектрической генерации энергии.

**Ограниченная площадь контактов на лицевой поверхности фотоэлемента** (потери около 3%). Для снижения потерь, связанных с добавочным сопротивлением поверхности, электрический ток собирается с поверхности фотоэлемента сеткой металлических контактов. Эти контакты имеют ограниченную площадь и закрывают только часть активной поверхности. Этот вид потерь не всегда учитывается в расчетах КПД.

**Отражение от лицевой поверхности** (потери около 1%). Если не принимать специальных мер предосторожности, коэффициент отражения приходящего солнечного излучения от поверхности полупроводника будет довольно высоким — около 40%. Это зна-

чение можно снизить до 3% и ниже, если поверхность полупроводника покрыть тонкой пленкой или как-либо иначе обработать.

Рассмотрим систему воздух — покрытие — полупроводник с коэффициентами преломления  $n_0$ ,  $n_1$  и  $n_2$ . Для диэлектрических материалов коэффициент отражения на границе двух сред определяется в виде

$$\rho_{ref} = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2}. \quad (7.34)$$

При переходе от воздуха ( $n_0 = 1$ ) к какому-либо материалу с коэффициентом преломления  $n_1 = 1,6$  получаем  $\rho = 5,3\%$ . Коэффициент преломления полупроводников характеризуется комплексной величиной (так как они частично поглощают излучение), которая зависит от частоты излучения и равняется в среднем примерно 3,5 в пределах активного спектра. Коэффициент отражения на границе воздух — полупроводник меняется от 34% при  $E_g = 1,1$  эВ до 54% при  $E_g = 5$  эВ.

Тонкая пленка (толщиной  $t$ ) из вспомогательного материала, коэффициент преломления которого имеет промежуточное значение между коэффициентами для воздуха и для полупроводника, значительно уменьшит отражение (рис. 7.17), если для нормального падения главные составляющие отраженного луча  $a$  и  $b$  имеют равную интенсивность и отличаются по фазе на  $\pi$  рад (разность хода лучей равна  $\lambda/2$ ). Для выполнения этого условия коэффициенты отражения от каждой поверхности должны быть равны, так что  $n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$ , а толщина пленки должна равняться  $t = \lambda/(4n_1)$ . Существует только одна длина волны, для которой это условие выполняется точно, однако коэффициент отражения снижается в широком диапазоне спектра. Так, для кремния при толщине пленки  $t = 0,08$  мкм с коэффициентом преломления  $n = 1,9$  коэффициент отражения уменьшается до 6%. Многослойные пленочные покрытия позволяют снизить его до 3% и ниже.

Потери на отражение также можно уменьшить, если поверхности полупроводника придать такой профиль, что отраженный луч также будет поглощаться (рис. 7.18). Текстурированную поверхность (рис. 7.18, а) можно получить химическим травлением кристалла.

**Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны** (потери около 23%). Фотоны с энергиями  $h\nu < E_g$  не могут участвовать в генерации электрического тока. Для кремния с  $E_g = 1,1$  эВ неактивные длины волн ( $\lambda \geq 1,1$  мкм) составляют 23% облученности в условиях АМ1. Поглощение этих фотонов приводит к нагреву фотоэлемента, следствием чего является еще большее снижение производительности системы. Теоретически эти фотоны могут быть отделены с помощью фильтров. Однако более «энергетически эффективным» было бы использование избыточного

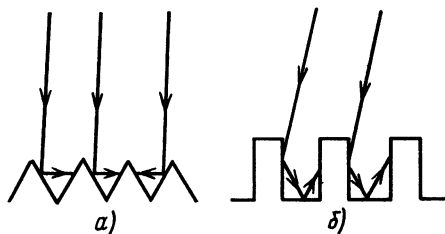
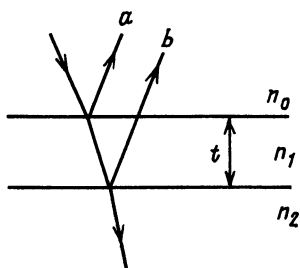


Рис. 7.17. Ход лучей в противоотражательной тонкой пленке

Рис. 7.18. Типы поверхностей с повышенной поглощательной способностью: текстурированная (а) и структурированная (б)

тепла в комбинированных тепло- и энергосистемах.

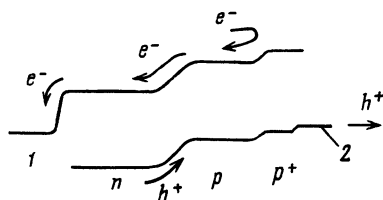
**Фотоны с избыточной энергией** (потери около 33%). Избыток энергии активных фотонов ( $h\nu - E_g$ ) также переходит в тепло.

**Квантовая эффективность** (потери около 0,4%). Квантовая эффективность — доля поглощенных фотонов, которые участвуют в генерации электронно-дырочных пар, — обычно очень велика. При разработке фотоэлементов необходимо предусмотреть, чтобы материал имел достаточную толщину для поглощения по крайней мере 95% приходящего излучения, как показано в § 7.3. Нанесение отражающего слоя с тыльной стороны фотоэлемента позволяет вернуть излучение для повторного прохода через поглощающий материал.

**Эффективность генерации тока.** Параметр, характеризующий эффективность генерации тока, можно использовать для учета потерь, описанных выше в этом параграфе, или чаще, как и здесь, для определения эффективности сбора зарядов после генерации носителей. Эта составляющая полного КПД определяется, таким образом, как доля появившихся под воздействием потока излучения электронно-дырочных пар, которые участвуют в возникновении тока во внешней цепи солнечного элемента. При полном КПД солнечного элемента 10% эффективность генерации тока составляет обычно около 0,7. Увеличение этого параметра до 0,9 приведет к повышению полного КПД до 20% и выше, поэтому повышение эффективности генерации тока является основной целью усовершенствования солнечных элементов.

Существуют разные способы изменения этого параметра. Одной из возможностей улучшения характеристик полупроводникового фотоэлемента, о которой еще не упоминалось, является формирование добавочного потенциального барьера вблизи металлического контакта с тыльной стороны. За  $p-n$ -переходом формируется слой с повышенной концентрацией примеси (например, слой  $p^+$  толщиной 1 мкм за слоем  $p$ -типа для создания добавочного барьера около  $200 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ ) (рис. 7.19). Неосновные носители — электроны, возникающие в  $p$ -слое вблизи этой  $p^+$ -области, «отра-

Рис. 7.19. Схема движения носителей в элементе с добавочным потенциальным барьером, уменьшающим диффузию электронов к металлическому контакту с тыльной стороны:  
 1 — лицевой контакт; 2 — металлический



жаются» градиентом потенциала по направлению к основному  $p-n$ -переходу быстрее, чем диффундируют против градиента потенциала к металлическому контакту с тыльной стороны элемента. Вследствие этого скорость рекомбинации на тыльном контакте снижается. Такие диодоподобные слои могут быть добавлены и на лицевой поверхности (например,  $n^+$  на  $n$ ) для достижения аналогичного эффекта для дырок. В результате этого коэффициент поглощения приемной поверхности несколько возрастает.

**Потери потенциала** (около 20%). Каждый поглощенный фотон создает электронно-дырочную пару с разностью потенциалов  $E_g/e$  (для Si 1,1 В). Однако только часть ( $V_B$ ) этого потенциала участвует в создании ЭДС во внешней цепи. Это видно из рис. 7.4, на котором показаны расположение зон вдоль перехода и направления диффузии носителей, которые приводят к созданию разности потенциалов  $V_B$ . Потери потенциала характеризует величина  $F_v = eV_B/E_g$ . В кремниевых элементах  $F_v$  меняется от 0,6 (удельное сопротивление 0,01 Ом·м) до 0,5 (удельное сопротивление 0,1 Ом·м), соответственно  $V_B$  меняется от 0,66 до 0,55 В.

Потери ЭДС ( $\varphi_n + \varphi_p$ ) существуют, так как в открытой цепи уровень Ферми вдоль перехода выравнивается с донорным и акцепторным уровнями, которые отстоят от границ зоны проводимости и валентной зоны соответственно на  $\varphi_n$  и  $\varphi_p$ . Увеличение концентрации примесей приводит к повышению  $F_v$  (кремниевые элементы с удельным сопротивлением 0,01 Ом·м имеют большие значения  $V_B$  и  $V_{oc}$ , чем с удельным сопротивлением 0,1 Ом·м). Максимально возможная концентрация примесей в Si составляет примерно  $10^{22} \text{ м}^{-3}$  для материала с удельным сопротивлением 0,01 Ом·м. В фотоэлементах из GaAs  $F_v \approx 0,8$ .

Выделение тепла в процессе движения носителей при прямом смещении, связанное с преодолением внутреннего сопротивления материала, может быть учтено в потерях потенциала введением фактора  $A$  или через добавочное сопротивление (см. ниже в этом параграфе).

**Фактор кривизны**  $F_c$  (потери около 4%). Вольт-амперная характеристика солнечного элемента сильно зависит от характеристики  $p-n$ -перехода (см. рис. 7.8). Если напряжение на выходе солнечного элемента возрастает до  $V_{oc}$ , то увеличивается прямое смещение, приложенное к переходу, в результате чего растет внутренний рекомбинационный ток через переход  $I_r$ . Этот эффект

является основной причиной потерь в системе. Пиковая мощность  $P_{\max}$  меньше произведения  $I_{sc}V_{oc}$  вследствие экспоненциальной формы характеристики (7.23).

Фактор кривизны  $F_c$  (также называемый *параметром насыщения*) равняется  $P_{\max}/(I_{sc}V_{oc})$ . Максимальное значение для кремния  $F_c=0,88$ .

**Добавочный фактор кривизны** (потери около 5%). Вольт-амперные характеристики реальных солнечных элементов описываются отличной от (7.23) зависимостью

$$I = I_0 \exp[eV/(AkT) - 1] - I_L \quad (7.35)$$

[см. (7.17) и (7.30)].

Появление коэффициента  $A$  ( $A > 2$  для многих промышленных фотоэлементов) связано с усилением рекомбинации в зоне перехода. Это приводит также к изменению  $V_{oc}$  и  $I_0$ , поэтому, вообще говоря, optimum выходной мощности реализуется только при  $A = 1$ .

Выше уже упоминалось о возможности снижения скорости рекомбинации при формировании добавочного потенциального барьера. В фотоэлементах скорость рекомбинации также уменьшается при выполнении следующих условий.

1. Диффузионная длина велика (в Si  $> 50 \div 100$  мкм). Это требует большого времени жизни носителей (в Si — до 100 мкс).

2. Переход расположен вблизи поверхности. Предпочтительнее располагать переход в пределах 0,15 мкм от поверхности, как в «фиолетовых» элементах, чем до 0,35 мкм, как в нормальных кремниевых элементах.

3. Материал имеет мало дефектов, не связанных с наличием примеси.

Процессы поверхностной рекомбинации зависят также от дефектов, которые могут возникать при резке кристалла или при напылении.

**Добавочное сопротивление** (потери около 0,3%). В солнечных элементах носители заряда из всего объема материала диффундируют к контактными проводникам. С тыльной стороны контакт может закрывать всю поверхность элемента, и вклад поверхности в сопротивление будет очень малым. Но лицевая поверхность элемента должна быть максимально освещена Солнцем, поэтому площадь, занятая контактами, должна быть сведена к минимуму. Это приводит к увеличению длин пробега носителей и появлению добавочного сопротивления. В настоящее время достигнуты значительные успехи в изготовлении и оптимальном размещении на поверхности этих контактов. Добавочное сопротивление лицевой поверхности снижено до 0,1 Ом в элементах, сопротивление которых составляет 20 Ом при пиковой мощности.

**Шунтирующее сопротивление** (потери незначительны, около 0,1%). Появление шунтирующего сопротивления является следствием дефектов структуры в объеме и на поверхностях фотоэле-

мента. Современная технология позволяет избежать появления этих дефектов и сделать их влияние незначительным, так что для монокристаллического кремниевого элемента шунтирующим сопротивлением можно пренебречь. В поликристаллических элементах шунтирующее сопротивление может быть больше.

**Полезная мощность** (в кремниевых элементах от 10 до 14%). В табл. 7.1 приведено значение полезной мощности, вырабатываемой фотоэлементом, с учетом всех потерь. Предполагается, что для получения пиковой мощности при полной облученности нагрузка согласована оптимально.

Кроме того, в табл. 7.1 (справа) приведены данные о предполагаемых усовершенствованиях, которые позволят поднять эффективность монокристаллических кремниевых фотоэлементов до 22%. Большинство авторов предполагают, что максимальный КПД кремниевых солнечных элементов может достигать 22—25%, элементов на гетеропереходах или ступенчатых переходах — 30% (см. § 7.7), систем с концентрацией энергии и другими приспособлениями — до 40%. Следует отметить, что спектр входящего солнечного излучения устанавливает абсолютные ограничения эффективности (см. выше). Для кремниевых элементов предельный КПД составляет около 47%.

## 7.7. Конструкции солнечных элементов

Существует много вариантов и промышленных разработок фотоэлементов и методов их изготовления. Опишем кратко конструкцию одного из них — стандартного монокристаллического кремниевого солнечного элемента. Общий вид солнечного элемента показан на рис. 7.1.

### **Основные технические требования.**

1. Исходный материал должен быть химически высоко чистым с устойчивыми свойствами.

2. Фотоэлементы должны производиться в большом количестве при минимальной стоимости. Необходимо обеспечить общий контроль за процессом их изготовления и высокий уровень точности.

3. Солнечные элементы должны иметь срок службы не менее 20 лет в условиях воздействия (часто вредного) окружающей среды. Следует учитывать, что даже без концентрации солнечного излучения рабочая температура фотоэлемента может меняться в диапазоне от  $-30$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . Электрические контакты должны быть стабильными и защищенными от всех видов коррозии. Устройство должно быть водозащищенным.

4. Конструкция должна быть такова, что разрушение одного из элементов не должно приводить к выходу из строя всей системы. Для этого используются параллельные и последовательные соединения, которые в случае выхода из строя каких-либо эле-



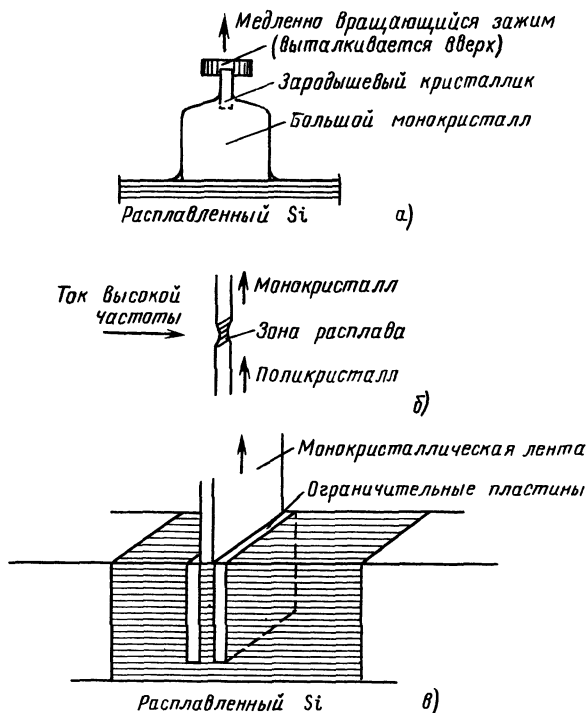


Рис. 7.20. Схемы некоторых методов выращивания монокристаллов: метод Чохральского (а), зонная рекристаллизация или лазерный нагрев (б), ленточный метод (в)

ментов должны исключать возможность выхода из строя других элементов.

5. Сборные модули должны быть пригодными для транспортировки даже в труднодоступные и отдаленные районы.

**Выращивание кристаллов.** Для получения монокристаллов используют исходные высокочистые электронные материалы в виде поликристаллических заготовок, концентрация примесей в которых должна быть меньше, чем 1 атом на  $10^9$ , т. е. меньше, чем  $10^{18}$  атомов в  $1 \text{ м}^3$ .

**Метод Чохральского.** Эта хорошо отработанная техника выращивания монокристаллов состоит в погружении небольшого затравочного кристаллика в расплавленный материал (рис. 7.20, а). Примеси (например, бор — акцептор для получения монокристалла *p*-типа) добавляются в расплав. Постепенно выросший из зародыша кристалл выталкивается из расплава. Диаметр такого кристалла может достигать 15 см. Выращенный таким (как, впрочем, и любым другим) способом монокристалл затем разрезается на части толщиной примерно 300 мкм. При этом

теряется около 40—50% кристаллического материала, что делает выращивание монокристаллов недостаточно эффективным.

**Зонная плавка (рекристаллизация).** Поликристаллическому материалу придают форму стержня. Зона расплава проходит вдоль стержня вследствие нагрева током высокой частоты или лазером (рис. 7.20, б). Этот процесс и очищает материал, и формирует монокристалл. Монокристалл требуется разрезать и обработать, как и в других способах.

**Ленточный метод.** Этот метод исключает резку кристалла и появление неизбежных отходов, поскольку сразу выращивается тонкая лента монокристалла до 10 см шириной и толщиной 300 мкм (рис. 7.20, в). Лента может храниться намотанной на барабан большого диаметра. По мере необходимости от нее отрезаются полосы для изготовления фотоэлементов.

**Вакуумное напыление.** Этот метод можно использовать на разных стадиях изготовления фотоэлемента, например для формирования поверхностного слоя металла в диодах Шоттки. Вакуумное напыление самого кремния является сложным и не всегда бывает успешным.

**Литье.** В этом методе получается поликристаллический материал. Дешевизна процесса может компенсировать низкую эффективность полученных в результате фотоэлементов.

**Обработка тонких слоев.** Пленки толщиной 300—400 мкм подвергают химическому травлению. Тонкий слой материала *n*-типа формируется в процессе диффузии доноров (например, фосфора) в поверхностный слой. Один из способов состоит в нагревании пленок до 1000° С в вакуумной камере, в которую напускается Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub>, но чаще всего пленки нагревают в атмосфере азота с добавкой РОСl<sub>3</sub>.

Для формирования сетки электрических контактов используется метод фотолитографии. Первым для создания низкоомного контакта с кремнием испаряют титан, затем очень тонкий слой палладия, чтобы предупредить химическое взаимодействие титана с серебром, слой которого осаждают последним для получения токопроводящей сетки. Другие методы основаны на применении печатного монтажа и гальваностегии.

Последними в процессе вакуумного испарения наносятся противоотражательные слои. В процессе диффузии алюминия у тыльной поверхности образуется добавочный потенциальный барьер из  $p^+$  в материале *p*-типа. На него наносится электрический металлический контакт в виде относительно толстого внешнего слоя. Для текстурированных поверхностей противоотражательные свойства создаются химическим травлением.

**Модули и цепочки.** Отдельные фотоэлементы площадью примерно 10×10 см<sup>2</sup> каждый по 30 шт. собирают в модули. Каждый модуль обычно состоит из трех — пяти колонок последовательно соединенных элементов. Такое устройство создает ЭДС порядка

15 В, что вполне достаточно для зарядки батарей до 12 В. (Лучше, если такие батареи специально изготовлены для использования в фотоэлектрических цепях.)

При плотной компоновке круглых фотоэлементов теряется до 15% площади модуля. Элементы располагают в инертном наполнителе между прозрачной передней крышкой, обычно изготовленной из пластика, не пропускающего ультрафиолетовое излучение, и пластиной с тыльной стороны, которая должна быть достаточно прочной и иметь низкое термическое сопротивление. Крышка должна быть герметично запаяна и водонепроницаема при любых внешних воздействиях, включая термические нагрузки.

## 7.8. Типы и конструкции фотоэлементов

Наиболее распространенными из выпускаемых промышленностью солнечных элементов являются плоские пластинчатые кремниевые элементы. Существуют также разнообразные альтернативные типы и конструкции, которые разрабатываются для повышения эффективности и снижения стоимости производимой энергии уменьшением полной стоимости солнечных элементов. В данном параграфе кратко суммированы сведения о различных фотоэлементах (табл. 7.2).

Таблица 7.2 Параметры основных материалов солнечных элементов, условия АМ1

Основной материал	Ширина запрещенной зоны $E_g$ , эВ	Характер межзонных переходов: прямые (П) или непрямые (Н)	Примеры солнечных элементов	$V_{oc}$ , В	$I_{sc}$ , $A \cdot m^{-2}$	Реальная эффективность, %. Данные за 1983 г.	Планируемая эффективность, %
Ge	0,6	—	Не используется	—	—	—	—
Si	1,1	Н	$n/p$ (0,1 Ом·м)	0,55	340	14	20
GaAs	1,4	П	$n/p$ (0,01 Ом·м)	0,6	—	15	22
CdTe	1,4	П	$p/n$	0,9	—	12	25
$Ga_{1-x}Al_xAs$ ( $0 < x < 0,34$ )	1,4—1,9	П	Гетеропереход на основе GaAs	0,95	—	16	25
$Ga_{1-x}Al_xAs$ ( $0,34 < x < 1$ )	1,9—2,2	Н	То же	0,95	—	16	25
CdS	2,4	—	Сложная тонкопленочная структура	0,5	—	10	15

Примечания. 1 В условиях АМ1 облученности оптимальная ширина запрещенной зоны составляет от 1,4 до 1,5 эВ (см рис 7.13)

2 При повышении температуры ширина запрещенной зоны уменьшается. В таблице приведены данные для температуры окружающего воздуха

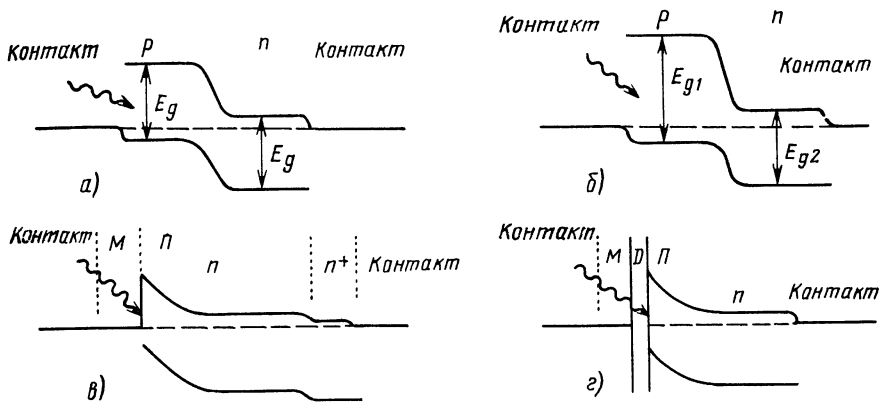


Рис. 7.21. Типы переходов, используемых в солнечных элементах: гомопереход (а) — основной материал и ширина запрещенной зоны постоянны; гетеропереход (б) — основной материал и ширина запрещенной зоны меняются; структура Шоттки металл — полупроводник (МП), например Au/Si (в), показана с  $n/n^+$  добавочным потенциальным барьером; имеющий важное значение противоотражательный слой не показан; структура Шоттки металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) (г)

**Варианты структуры твердого тела. Гомопереходы.** Гомопереходы возникают, если в одном и том же кристалле полупроводника формируется контакт двух областей с разными типами проводимости или различными концентрациями примеси. Рассмотренные выше кремниевые фотоэлементы содержат гомопереходы. В таких фотоэлементах ширина запрещенной зоны постоянна (рис. 7.21, а).

**Гетеропереходы.** В этом случае переход возникает при контакте двух различных по химическому составу полупроводников, поэтому на границе раздела меняется ширина запрещенной зоны (рис. 7.21, б). В гетеропереходах возможна генерация носителей при поглощении фотонов сразу на двух частотах. При этом увеличивается доля фотонов, участвующих в генерации фототока, и уменьшаются потери, связанные с избытком энергии фотонов ( $h\nu - E_g$ ). Обычно полупроводники с более широкой запрещенной зоной располагаются на лицевой поверхности фотоэлемента, а с более узкой — под ними.

Образование гетероперехода, требующее стыковки кристаллических решеток, возможно только при совпадении типа, ориентации и периода кристаллической решетки сращиваемых материалов. Примерами фотоэлементов с гетеропереходом являются  $Ga_{1-x}Al_xAs$  на GaAs (КПД около 12%) и  $SnO_2$  на Si  $n$ -типа (КПД около 10%).

Предлагается также создавать элементы с монотонно уменьшающейся шириной запрещенной зоны (элементы со ступенчатой запрещенной зоной). Производство таких фотоэлементов доста-

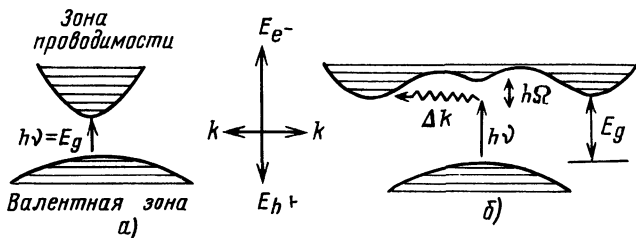


Рис. 7.22. Зоны Бриллюэна, диаграммы энергии носителей — квазиимпульс. Прямые переходы через запрещенную зону, например в GaAs (а); непрямые переходы, например в Si (б);  $E_g$  — энергия электронов;  $E_{h^+}$  — энергия дырок;  $h\Omega$  — энергия фонона ( $\Omega$  — частота фонона)

точно сложно, но возможно (например, материалов с  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x$ ). Контактная разность потенциалов  $V_B$  в этом случае будет низкой.

**Прямые и непрямые межзонные переходы.** Рассмотрим зависимости энергии носителей ( $E$ ) от их квазиимпульса ( $k$ ) (рис. 7.22). Если в процессе собственного поглощения света квазиимпульс электрона меняется незначительно при переходе из валентной зоны в зону проводимости, то такие переходы называются *прямыми* (переходы возможны при условии  $h\nu = E_g$ ). В случае, когда дно зоны проводимости и потолок валентной зоны соответствуют различным квазиимпульсам (рис. 7.22, б), переход также оказывается возможным, если электрон, поглощая фотон, одновременно поглощает или испускает фонон. Это — *непрямые переходы*. Условие перехода имеет вид (см. § 7.3)

$$h\nu \pm h\Omega = E_g, \quad (7.36)$$

где  $h\Omega$  — энергия фонона.

Необходимость испускания или поглощения фонона делает непрямые переходы значительно менее вероятными, чем прямые, поэтому коэффициент поглощения света, обусловленный прямыми переходами, намного меньше. Так, для Si (переходы через запрещенную зону — непрямые) показатель поглощения ниже, чем для GaAs (прямые межзонные переходы), в связи с этим кремниевые фотоэлементы приходится изготавливать большей толщины.

**Барьер Шоттки, структуры МП и МДП.** При контакте металла и полупроводника (МП) образуется  $p$ - $n$ -переход (рис. 7.21, в). Преимуществом такой схемы является простота конструкции, так как металл может быть осажден в виде тонкой пленки на основной материал. Недостатки заключаются в том, что от металлической поверхности выше отражение и, следовательно, больше потери на входе, кроме того, высоки рекомбинационные потери в зоне перехода.

В процессе изготовления бывает трудно избежать появления тонкого изолирующего слоя оксида, формирующегося между металлом и полупроводником. Этот изолирующий слой способствует подавлению поверхностной рекомбинации, поэтому, контролируя его толщину, можно получать фотоэлементы с лучшими характеристиками [металл — оксид — полупроводник (МОП) или металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) структуры, рис. 7.21, з].

*Поликристаллические элементы.* До сих пор предполагалось, что в качестве основного материала фотоэлемента берется монокристалл. Это не является необходимым, и если использовать поликристаллические материалы, можно значительно снизить стоимость изготовления элементов. Однако наличие границ между кристаллическими зернами приводит к усилению рекомбинации электронов и дырок, следовательно, поликристаллические элементы характеризуются меньшей эффективностью, чем монокристаллические.

Поликристаллические фотоэлементы можно получить с помощью недорогой техники изготовления тонких пленок, которая, тем не менее, может существенно изменять свойства твердого тела.

*Аморфные элементы.* Аморфные материалы — это твердые тела, структура которых характеризуется ближним порядком (стекло имеет аморфную структуру). Материалы, считающиеся полупроводниковыми, например кремний, могут в обычных условиях обладать полупроводниковыми свойствами в аморфном состоянии. Удельное сопротивление их может быть таким же, как у кристаллических материалов, точно так же за счет введения примесей можно управлять проводимостью. Обычно, однако, аморфность структуры приводит к появлению большого количества ненасыщенных «свободных» химических связей, которые действуют как неконтролируемые ловушки для электронов и дырок. Изготовление материала в присутствии большого количества водорода позволяет резко уменьшить число таких связей.

Усовершенствование аморфных фотоэлементов позволило повысить их эффективность до 10% и получить довольно недорогие конструкции.

*Жидкая лицевая поверхность.* Лицевая поверхность солнечного элемента может быть жидким электролитом. Преимуществом является потенциально хороший электрический контакт и возможность химических изменений в жидкости для накопления энергии. К недостаткам можно отнести трудности в использовании, низкую эффективность и быстрое загрязнение.

*Органические материалы.* Органические материалы на основе углерода могут обладать полупроводниковыми свойствами (углерод находится в той же группе периодической системы, что

и кремний, но сам полупроводником не является). Обширные сведения по органической химии и сравнительная дешевизна органических материалов делают развитие этой области весьма интересным. Достигнут КПД фотоэлемента на основе органических материалов около 1%, однако с учетом данных современных исследований это значение может быть повышено до 10%.

*Использование промежуточных переходов (фосфоры).* В принципе лицевая поверхность фотоэлемента может быть покрыта флуоресцирующим или фосфоресцирующим слоем, поглощающим фотоны с энергиями, значительно большими ширины запрещенной зоны ( $h\nu_1 \gg E_g$ ). Эмитированные фотоны с энергиями  $h\nu_2 \geq E_g$  будут активно поглощаться. Избыток энергии первичных фотонов ( $h\nu_1 - h\nu_2$ ) будет рассеиваться на поверхности, и можно надеяться, что температура элемента существенно не возрастет. Выдвигаются и другие подобные идеи, в которых предполагается либо высвободить два активных фотона от каждого первичного, либо поглощать два неактивных фотона ( $h\nu < E_g$ ) для получения одного активного фотона так же, как это происходит в процессе фотосинтеза. Для изготовления промышленных образцов эти идеи пока не применяются.

**Материалы для фотоэлементов.** В табл. 7.2 перечислены основные характеристики материалов, используемых для изготовления солнечных элементов, а также приведены некоторые параметры  $p-n$ -переходов в фотоэлементах, для которых данный материал является основным. Наибольшее промышленное использование имеет кремний. Кроме того, для производства солнечных элементов большое значение имеют GaAs и CdS.

*Арсенид галлия (GaAs).* Это полупроводниковый материал, имеющий запрещенную зону шириной  $E_g = 1,43$  эВ. Такая ширина запрещенной зоны близка к оптимальной (1,5 эВ) для солнечного элемента в условиях AM1 освещенности. Гетеропереходы с  $Ga_{1-x}Al_xAs$  могут иметь промышленное значение. Теоретически эффективность элементов на основе GaAs может достигать почти 25%, реальные устройства имеют КПД около 16%. Высокий показатель поглощения требует тщательного контроля глубины слоев, кроме того, может быть высокой скорость поверхностной рекомбинации.

*Сульфид кадмия (CdS).* В случае использования сульфида кадмия фотоэлементы могут быть изготовлены вакуумным напылением тонких пленок или химическим осаждением. Нижний слой CdS делается  $p$ -типа, а слой  $n$ -типа из  $Cu_xS$  формируется в процессе химического травления. Граница между  $n$ - и  $p$ -слоями представляет собой гетеропереход, который, к сожалению, легко разрушается вследствие диффузии ионов Cu в CdS и различных химических изменений в процессе изготовления.

**Варианты конструкций.** *Составные элементы.* Такие элементы представляют собой совокупность  $p-n$ -переходов с последова-

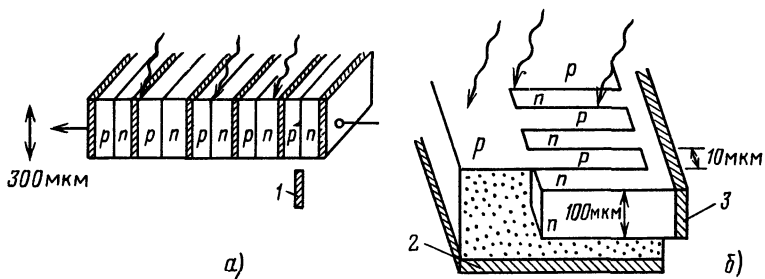


Рис. 7.23. Последовательное (а) и параллельное (б) соединения вертикальных многопереходных элементов (ВМЭ):

1 — металлические контакты; 2 — металлический контакт с  $p$ -областью, 3 — металлический контакт с  $n$ -областью

тельно уменьшающейся шириной запрещенной зоны, соединенных так, что свет приходит к материалу с наибольшей шириной запрещенной зоны. Фотоны с энергиями, меньшими, чем ширина первой запрещенной зоны ( $h\nu < E_{g1}$ ), проходят до следующего  $p$ — $n$ -перехода и т. д.

#### Вертикальные многопереходные элементы (ВМЭ).

а) Последовательное соединение. В столбик последовательно соединяются до 100 сходных  $p$ — $n$ -переходов (рис. 7.23, а). Свет проникает через боковые поверхности переходов, так что разность потенциалов на выходе (около 50 В) представляет собой сумму последовательных потенциалов переходов. Ток определяется только поглощенным боковой поверхностью радиационным потоком, поэтому является небольшим.

б) Также возможно параллельное соединение переходов. В этом случае элемент обычно изготавливается в виде решетки, так, чтобы фотоны более эффективно поглощались в зонах переходов (рис. 7.23, б).

*Тонкопленочные элементы.* Основным недостатком традиционных кремниевых элементов являются высокая стоимость выращивания монокристаллов и необходимость резки и обработки поверхностных слоев, поэтому представляется интересной конструкция из напыленных при испарении или распыленных слоев. Кремний имеет высокую температуру кипения ( $2620^\circ \text{C}$ ) и в парообразном состоянии химически очень активен и сложен в обращении. Для напыления тонких пленок при испарении, когда требуется высокий вакуум ( $p < 1,3 \cdot 10^{-6}$  Па) для удаления кислорода и загрязнений, кремний является не самым удачным материалом. Тем не менее возможно напыление аморфных соединений кремния в электрическом разряде в газообразном силане  $\text{SiH}_4$ . Предлагаются и другие альтернативные методы вакуумного напыления.

Наиболее распространенным тонкопленочным фотоэлементом является элемент на основе  $\text{CdS}$ . В принципе все типы элементов



могут быть тонкопленочными, однако получить достаточно высокий КПД удастся с трудом. Очевидно, в будущем окажется возможным промышленное изготовление таких элементов.

**Отражающие или текстурированные поверхности.** Лицевая поверхность солнечного элемента может быть сконструирована таким образом, чтобы отраженное от поверхности излучение возвращалось к ней обратно (рис. 7.18). Некоторые системы могут быть изготовлены механически, другие — текстурированы химическим травлением, в результате которого проявляется анизотропия свойств, соответствующая ориентация осей кристалла.

**Вспомогательные системы. Концентраторы** (см. § 6.8). Активный материал солнечного элемента обычно является наиболее дорогостоящим компонентом устройства. Для более эффективного его использования приходящее излучение собирают на его поверхности с помощью концентрирующих систем (рис. 7.24). При увеличении радиационного потока характеристики элемента не ухудшаются, если температура его поддерживается близкой к температуре окружающего воздуха посредством активного или пассивного охлаждения. Тепло, отбираемое в процессе активного охлаждения, можно использовать для увеличения полной энергетической эффективности системы.

Коэффициент концентрации  $X$  хорошо сфокусированной системы есть отношение входной апертуры концентратора к площади поверхности приемника. На практике концентрация энергии достигает 80—90% этого геометрического фактора. Не следящие за Солнцем системы с низким  $X$  ( $X \leq 5$ ) регистрируют как прямое, так и диффузное излучение. Системы с более высокими  $X$  должны следить за Солнцем, так как они чувстви-

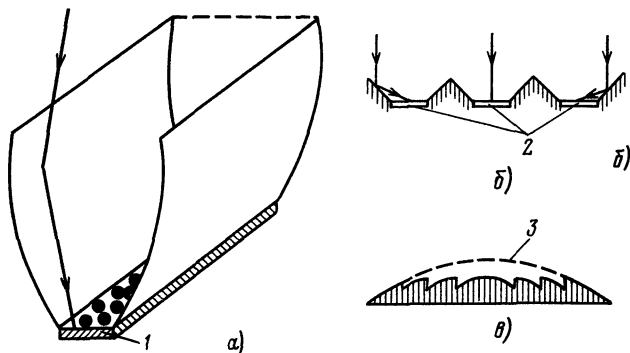


Рис. 7.24. Схемы некоторых концентрирующих систем: линейный параболический отражатель (а) может быть изготовлен в виде твердого блока из прозрачного пластика; боковые отражатели (б); линзы Френеля (в). Следует помнить, что сильно неравномерная облученность фотоэлементов или модулей может привести к разрушению солнечного элемента:

1 — элементы; 2 — модули, 3 — поверхность эквивалентной выпуклой линзы

тельны только в тех случаях, когда доля направленного излучения велика (более 70%).

Существует большое количество концентрирующих систем, основанных на линзах (обычно плоских линзах Френеля), зеркалах, призмах полного внутреннего отражения и т. д. (рис. 7.24) (см. также § 6.8).

*Разложение в спектр.* Для получения наилучшего частотного соответствия солнечные элементы с возрастающей шириной запрещенной зоны могут быть расположены вдоль солнечного спектра (например, после призмы, в направлении от инфракрасного диапазона к ультрафиолетовому). Основные потери (около 50%), связанные с несоответствием энергии фотонов ширине запрещенной зоны могут быть, таким образом, значительно уменьшены. В итоге можно получить КПД до 60%, если коэффициент концентрации энергии перед разложением в спектр достаточно высок. Использование трех дихроических зеркал позволило создать системы, основанные на этом принципе.

*Термофотоэлементы.* Солнечное излучение может быть сконцентрировано с высоким  $X$  на поглощающей поверхности, которая затем переизлучает его в соответствии со своей температурой. Максимум частоты излучения сдвигается в инфракрасную область спектра, что приводит к лучшему согласованию с небольшой шириной запрещенной зоны фотоэлемента. В лабораторных системах получены КПД до 40%.

## 7.9. Фотоэмиссионные и термоэмиссионные системы

Фотоэлектрическая генерация определена в данном тексте как генерация электрического тока в случае, когда процесс поглощения фотонов непосредственно приводит к появлению электронно-дырочных пар. Ток во внешней цепи может быть получен только при наличии источника ЭДС. В фотоэлектрических устройствах ЭДС возникает из-за наличия контактного поля  $p-n$ -перехода или перехода металл — полупроводник. Фотоэмиссионные системы также могут быть источниками электрической энергии. Поглощенные фотоны вызывают эмиссию электронов с поверхности в соответствии с условием Эйнштейна

$$\text{Кинетическая энергия электрона} = h\nu - \varphi, \quad (7.37)$$

где  $h\nu$  — энергия фотона;  $\varphi$  — работа выхода электрона с поверхности металла или полупроводника. Фотоэмитирующие поверхности, соединенные последовательно вдоль градиента внешнего потенциала, могут генерировать электрическую энергию. Однако квантовый выход фотоэмиссии низок, и маловероятно, что будут предложены эффективные промышленные устройства для генерации электроэнергии таким способом.

Для непосредственного преобразования тепловой энергии

солнечного излучения в электрическую используются термоэлектронные преобразователи, действие которых основано на явлении термоэлектронной эмиссии. В вакууме поверхность нагретого металлического или полупроводникового катода испускает электроны, которые, пройдя межэлектродный промежуток, собираются на аноде; во внешней цепи течет ток. Плотность тока насыщения определяется уравнением Ричардсона

$$I/A = A_R T^2 \exp[-\varphi/(kT)], \quad (7.38)$$

где  $A$  — площадь поверхности эмиттера;  $A_R$  — постоянная Ричардсона для данного материала;  $T$  — температура поверхности;  $\varphi$  — работа выхода. Хорошим термоэлектронным эмиттером является цезий, покрытый вольфрамом ( $A_R \sim 10^4 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ ,  $\varphi \sim 2 \text{ эВ}$ ). Для генерации тока не требуется внешней ЭДС, если слой другого металла с более низкой работой выхода нанесен на нагреваемую поверхность. Такая система подобна  $p$ — $n$ -переходу и может генерировать электроэнергию. Однако соответствующие устройства, использующие солнечное тепло, имеют небольшой срок службы и низкую эффективность.

Электроэнергию можно получить и с помощью термоэлектрических устройств, основанных на эффекте Зеебека, который заключается в возникновении ЭДС в цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют различную температуру. В этом случае также используется тепловая энергия солнечного излучения. Термоэлектрическая генерация наиболее эффективна при нагревании полупроводниковых переходов. В термоэлектрической системе горячий контакт термоэлемента располагается в фокусе солнечного концентратора. Энергетическая эффективность такой системы низка, а конструкция сложна. Теория этих устройств подробно изложена в работах по термодинамике.

### Задачи

7.1. Ширина запрещенной зоны  $\text{CaAs}$   $E_g = 1,4 \text{ эВ}$ . Подсчитайте оптимальную длину волны излучения для фотоэлектрической генерации в солнечном элементе из арсенида галлия.

7.2. а) Запишите уравнение для вольт-амперной характеристики диода с  $p$ — $n$ -переходом в темноте.

б) Если плотность тока насыщения составляет  $10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ , какова будет вольт-амперная характеристика элемента? Рассчитайте и начертите ее в виде графика до  $0,2 \text{ В}$ .

7.3. а) Определите приблизительно плотность потока фотонов ( $\text{фотон} \cdot \text{с}^{-1} \times \text{м}^{-2}$ ) при плотности потока солнечного излучения в условиях  $\text{AM1} \sim 0,8 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

б) Солнечное излучение с плотностью потока энергии  $0,8 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  приходит на одиночный кремниевый солнечный элемент площадью  $100 \text{ см}^2$ . Пусть  $10\%$

фотонов участвуют в генерации электронно-дырочных пар в зоне перехода, ведущей к появлению тока во внешней цепи. Каков будет ток короткого замыкания  $I_{sc}$  элемента? Нарисуйте вольт-амперную характеристику элемента.

7.4. Небольшая домашняя осветительная система питается от аккумуляторной батареи напряжением 8 В, заряженной до 30 А·ч. Освещение включается каждый вечер на 4 ч, потребляемый ток 3 А.

Какой должна быть фотоэлектрическая энергетическая система, содержащая кремниевые солнечные элементы, чтобы заряжать аккумуляторную батарею?

- Как будут расположены солнечные элементы?
- Как будет собрана электрическая цепь?
- Как Вы будете проверять цепь и определять КПД?

### Решения

7.1.  $h\nu = E_g$ ;  $\lambda = 0,88$  мкм.

7.2. График  $I = (10^{-8} \text{ А} \cdot \text{ м}^{-2}) [\exp(eV/kT) - 1]$ .

7.3. а) Из рис. 7.12, б следует, что энергия фотонов, соответствующая средней плотности потока, составляет примерно 1-эВ, поэтому

$$N \approx \frac{(0,8 \text{ кВт} \cdot \text{ м}^{-2})(10^3 \text{ Вт} \cdot \text{ кВт}^{-1})(1 \text{ фотон}/1 \text{ эВ})}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot \text{ эВ}^{-1})} \approx 0,5 \times 10^{22} \text{ фотон м}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}.$$

б) Положим, что из 10% фотонов каждый генерирует по одному электрону и по одной дырке, тогда

$$I = (0,5 \times 10^{21} \text{ фотон} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}) (2 \text{ носитель/фотон}) \times (10^{-2} \text{ м}^{-2}) (1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл/носитель}) = 1,6 \text{ А}.$$

*Примечание.* Эти решения являются очень приближенными.

7.4. Для того чтобы зарядить аккумуляторную батарею до 8 В, солнечные элементы должны давать напряжение 10 В. ЭДС каждого элемента при пиковой нагрузке — около 0,5 В, следовательно, требуется параллельное соединение 20 последовательных цепочек элементов. Каждый вечер расходуется 12 А·ч, поэтому от элементов требуется ежедневно 12 А·ч/0,8 = 15 А·ч. Пусть элементы освещены Солнцем каждый день в течение 3 ч, тогда требуемый ток заряда составляет 5 А. При последовательном соединении такой ток может быть получен с площади  $(5 \text{ А}) / (2 \times 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{ см}^{-2}) = 250 \text{ см}^2$ , тогда на каждый из 20 элементов приходится площадь около 12,5 см<sup>2</sup> (радиус элемента 2,5 см).

Таким образом, последовательно соединенных 20 элементов радиусом 2,5 см каждый достаточно для зарядки батареи в условиях предполагаемого в задаче радиационного потока.

Проверяются  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  при условии нормального падения направленного солнечного излучения на приемную поверхность элементов.

## ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

## 8.1. Введение

Термин «гидроэнергетика» определяет область энергетики, использующей энергию падающей воды. Эта энергия преобразуется или в механическую, или чаще всего в электрическую. Помимо гидроэнергетики водными источниками энергии являются волны и приливы (см. гл. 12 и 13).

Гидроэнергетика является, несомненно, наиболее развитой областью энергетики на возобновляемых ресурсах. С самого начала (примерно с 80-х годов прошлого столетия) для производства электроэнергии в гидроэнергетике использовались в основном гидравлические турбины, и их суммарная мощность возрастает во всем мире сейчас примерно на 5% в год, т. е. удваивается каждые 15 лет. В 1980 г. мощность всех гидроэлектростанций составляла примерно 500 000 МВт (0,5 ТВт) и большая часть станций имела мощность более 10 МВт. Потенциальные возможности гидроэнергетики оцениваются суммарной мощностью 1,5 ТВт, при этом они наиболее велики в Африке, Китае и Южной Америке. Но на эти глобальные оценки не всегда можно опираться при локальном планировании гидроэнергетики, так как, во-первых, в глобальных оценках часто пренебрегают маломощными установками (от 10 кВт до 1 МВт) несмотря на то, что число их может быть очень большим, и, во-вторых, экономическая сторона планирования очень сильно зависит от специфики местных условий, которую в глобальных оценках учесть сложно. В результате из-за невозможности при слишком общем рассмотрении учесть потенциал малых рек глобальные оценки гидроэнергетического потенциала сильно занижены.

Гидроэлектростанции и их оборудование используются очень долго, турбины, например, — около 50 лет. Это объясняется условиями их эксплуатации: равномерный режим работы при отсутствии экстремальных температурных и других нагрузок. Вследствие этого стоимость вырабатываемой на гидроэлектростанциях электроэнергии низка (примерно 4 цента США за 1 кВт·ч) и многие из них работают с высоким экономическим эффектом. Например, Норвегия, производящая 90% электроэнергии на гидроэлектростанциях, имеет от этого немалую прибыль (см. рис. 1.3). В табл. 8.1 приведены данные о гидроэнергетическом потенциале некоторых стран и регионов и об его использовании. Как правило, в первую очередь осваиваются наиболее выгодные гидроресурсы, поэтому с течением времени темпы прироста мощности гидроэлектростанций в любой стране падают.

Вырабатываемую гидроэлектростанциями энергию очень легко ре-

гулировать, что очень важно при их использовании в энергосистемах с большими колебаниями нагрузки. Коэффициент полезного действия гидротурбин достигает 90%. Они бывают двух типов: *реактивные гидротурбины*, рабочее колесо которых полностью погружено в воду и вращается в основном за счет разности давлений до и за колесом; *активные гидротурбины*, рабочее колесо которых вращается в воздухе натекающим на его лопасти потоком воды, т. е. кинетической энергией этого потока.

Реактивная гидротурбина может работать при реверсировании генератора как насос, закачивая воду обратно в водохранилище с коэффициентом полезного действия около 80%.

Наиболее сложными проблемами гидроэнергетики являются ущерб, наносимый окружающей среде; заиливание плотин; коррозия гидротурбин и в сравнении с тепловыми электростанциями большие капитальные затраты на их сооружение. Поэтому, например, не прекращаются споры о достоинствах и недостатках Асуанской ГЭС в Египте.

Ниже рассмотрены только некоторые основополагающие вопросы гидроэнергетики, особенно касающиеся малой гидроэнергетики.

Таблица 8.1. Потенциальные гидроэнергетические ресурсы различных регионов мира и их использование (по данным ООН, 1979 г., и других источников, для гидростанций мощностью более 5 МВт)

Регион	Потенциальные гидроэнергетические ресурсы, ГВт	Годовое производство электроэнергии при использовании 50% ресурсов, ТВт·ч	Доля от мирового потенциально-го производства энергии, %	Используемая часть гидроэнергетических ресурсов, %	Неиспользуемая часть гидроэнергетических ресурсов, %
Азия (без СССР)	630	2720	28	10	90
Южная Америка	440	1940	20	17	83
Африка	350	1550	16	5	95
Северная Америка	350	1550	16	46	54
СССР	240	1070	11	21	79
Европа (без СССР)	150	680	7	65	35
Австралия и Океания	40	190	2	20	80
По всему миру	2200	9700	100	21	79

## 8.2. Основные принципы использования энергии воды

Пусть  $Q$  есть объем воды, падающей на лопасть в единицу времени,  $\rho$  — плотность воды, тогда масса падающей воды равна  $\rho Q$ , а теряемая ею энергия равна

$$P_0 = \rho Q g H, \quad (8.1)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $P_0$  — изменение в единицу вре-

мени потенциальной энергии воды (мощность);  $H$  — высота падения жидкости.

Целью гидроэнергетической установки является преобразование этой энергии в механическую. В отличие от других энергетических установок никакие принципиальные ограничения (термодинамические или динамические) не мешают энергии падающей воды полностью превратиться в механическую энергию, исключая потери на удаление воды из турбины. Возможности гидроэнергии видны непосредственно из (8.1). При заданном местоположении гидростанции  $H$  есть известная постоянная величина и расход воды при заполненных водоводах практически постоянен. Так как реальная мощность гидротурбины близка к теоретической, уравнение (8.1) определяет максимальную мощность требуемого энергетического оборудования. Местоположение гидростанции должно обеспечивать достаточно высокий расход  $Q$  и высоту  $H$ . Обычно для этого требуется годовой уровень осадков не менее 40 см, выпадающих достаточно равномерно в течение года, определенный рельеф местности и территория для водохранилища. Если эти условия выполняются, гидроэнергия почти наверняка будет наиболее подходящим источником электроэнергии. Однако для того чтобы направить воду в турбины, необходимо выполнить большой объем строительных работ (сооружение плотины, водоводов и т. п.). Стоимость этих работ часто превышает стоимость гидроэнергетического оборудования электростанции.

### 8.3. Оценка гидроресурсов для небольших станций

Пусть мы имеем водный поток, который можно было бы использовать в гидроэнергетике. Прежде всего надо хотя бы грубо (с точностью около 50%) оценить его гидроэнергетический потенциал. Если полученная оценка нас удовлетворяет, необходимо провести более детальные исследования, включающие сбор данных по крайней мере за несколько лет. Из (8.1) видно, что для оценки теоретической мощности  $P_0$  необходимо знать расход потока  $Q$  и возможную высоту его падения  $H$ , называемую *напором* (см. § 2.2). Например, при  $Q=40$  л/с и  $H=20$  м максимальная мощность равна 8 кВт. Эта мощность вполне удовлетворяет потребности в энергии ряда бытовых потребителей.

**Измерение напора  $H$ .** В потоках с большим уклоном для измерения напора  $H$  подходит метод триангуляции, для более равнинных мест используют нивелир или теодолит и рейки (геодезические).

Следует заметить, что мощность натекающего на турбину потока определяется не геометрическим (или полным) напором  $H_i$ , измеренным описанным выше способом, а располагаемым или

рабочим напором  $H_a$ , равным

$$H_a = H_t - H_f, \quad (8.2)$$

где  $H_f$  — потери напора на трение в каналах и водоводах на пути к турбине (см. § 2.6).

При рациональном выборе водоводов можно добиться, чтобы  $H_f \leq H_t/3$ . Как следует из (2.12),  $H_f$  пропорционально длине водовода, поэтому лучше всего, чтобы он был отвесным.

**Измерение расхода воды  $Q$ .** Поток воды, поступающей на турбины, как правило, меньше расхода реки, который в свою очередь различен в периоды засухи и паводка. Для энергетики важен минимальный расход реки (в сухой сезон), с тем чтобы рассчитанные по нему турбины работали круглый год в нормальном режиме. Необходимо знать также и максимальный расход (в период паводка), для того чтобы избежать повреждений гидростанции.

Методы измерения расхода  $Q$  гораздо сложнее методов измерения напора  $H$  и зависят от величины и скорости рассматриваемого потока:

$$\begin{aligned} \text{расход } Q &= (\text{объем воды, прошедшей за время } \Delta t) / \Delta t = \\ &= (\text{средняя скорость } \bar{u}) \times (\text{поперечное сечение } A) = \\ &= \int \mathbf{u} n dA, \end{aligned} \quad (8.3)$$

где  $\mathbf{n}$  — единичная нормаль элементарной площадки  $dA$ .

Методы измерения расхода, в основе которых лежат данные уравнения, назовем соответственно основным, модифицированным и расчетным. Известно также, что если поперек потока расположить порог или водослив, то уровень воды в этом месте будет зависеть от ее расхода. На этом основан еще один метод определения расхода.

**Основной метод** (рис. 8.1, а). Весь поток перекрывается дамбой или направляется в какой-либо резервуар. В обоих случаях можно определить расход, зная наполненный объем и время его наполнения. Этот метод точен, не требует никакой информации о параметрах потока и наиболее пригоден для малых потоков, особенно для небольших водопадов.

**Модифицированный метод I** (рис. 8.1, б). В уравнение (8.3) входит средняя скорость потока  $\bar{u}$ . Так как на дне реки скорость течения из-за трения равна нулю, значение  $\bar{u}$  будет несколько меньше скорости течения на поверхности  $u_s$ . Например, для прямоугольного поперечного сечения русла реки  $\bar{u} \approx 0,8u_s$ , а скорость  $u_s$  нетрудно определить по перемещению находящегося на поверхности воды предмета. Для получения наиболее точного результата скорость  $u_s$  определять следует на прямолинейном участке русла и постоянном его сечении. Площадь поперечного сечения  $A$  можно вычислить, промерив глубину потока в нескольких точках сечения и просуммировав площади составляющих



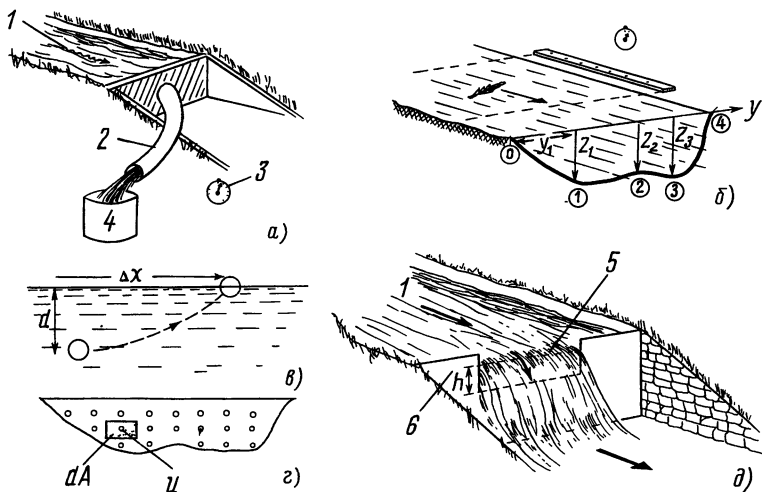


Рис. 8.1. Методы измерения расхода: основной метод (а); модифицированный метод I (б); модифицированный метод II (в); расчетный метод (г); водосливный метод (д); 1 — поток; 2 — отводная труба; 3 — секундомер; 4 — емкость; 5 — вырез; 6 — водослив

его треугольников и трапеций (рис. 8.1, б), а именно:

$$A \approx (1/2)y_1z_1 + (1/2)(y_2 - y_1)(z_1 + z_2) + (1/2)(y_3 - y_2) \times (z_2 + z_3) + (1/2)(y_4 - y_3)z_3.$$

**Модифицированный метод II** (рис. 8.1, в). Этот метод определения скорости течения не требует измерений времени и пригоден для быстрых потоков. Метод состоит в том, что плавучий предмет (например, теннисный мяч) погружают на определенную глубину и затем опускают. Время его всплытия на поверхность с заданной глубины не зависит от скорости горизонтального перемещения и может быть определено в лабораторных условиях. Измеряя горизонтальное перемещение предмета к моменту всплытия и зная время всплытия, определяем скорость течения. Нетрудно заметить, что этим способом мы определяем среднюю скорость (точнее, среднюю по глубине, а не сечению, но это различие невелико).

**Расчетный метод** (рис. 8.1, г). Этот метод наиболее точный и используется профессиональными гидрологами на больших реках. В нем поперечное сечение потока разбивается на большое число ячеек площадью  $dA$  и в каждой измеряется скорость  $u_i$ . Интеграл (8.3), определяющий расход, заменяется суммой величин  $u_i dA$  во всех ячейках.

**Водосливный метод** (рис. 8.1, д). Если необходимы систематические замеры расхода потока в течение, например, года, можно построить дамбу с вырезом определенной формы. Такая дамба

называется *тонким водосливом*. Высота потока воды в плоскости выреза пропорциональна расходу. Для определения величины расхода в лабораторных условиях проводится тарировка модели такого водослива, и результаты тарировочных измерений помещают в справочное пособие. В задаче 8.2 этот метод поясняется более детально.

#### 8.4. Активные гидротурбины

Понять принцип работы гидротурбины проще всего на примере типичной активной турбины — колеса Пельтона (ковшовой турбины).

**Силы, действующие на гидротурбину.** Работа активной гидротурбины основана на использовании кинетической энергии потока. Для этого потенциальную энергию воды перед плотиной превращают в кинетическую энергию струи, которую направляют в ковши, расположенные на ободу колеса, как показано на рис. 8.2. Взаимодействие с ковшем изменяет направление движения струи, следовательно, со стороны ковша на струю действует сила, а значит, такая же по величине сила действует и на ковш. Эта тангенциальная сила и вращает гидротурбину. Статическое давление в любой точке струи при этом постоянно и равно атмосферному.

На рис. 8.3, *а* показано взаимодействие струи с ковшем в лабораторной (связанной с неподвижным наблюдателем) системе отсчета. Ковш движется вправо с постоянной скоростью  $u$ . Как видно из рисунка, струя, обтекая поверхность ковша, разворачивается почти на  $180^\circ$ . В идеальном случае разворота потока на  $180^\circ$  скорость отраженной от ковша струи будет меньше скорости набегающей струи из-за трения воды о поверхность ковша, зависящего от качества обработки поверхности.

На рис. 8.3, *б* показаны векторы скорости набегающей и отраженной струй в системе координат, связанной с ковшем. В этом

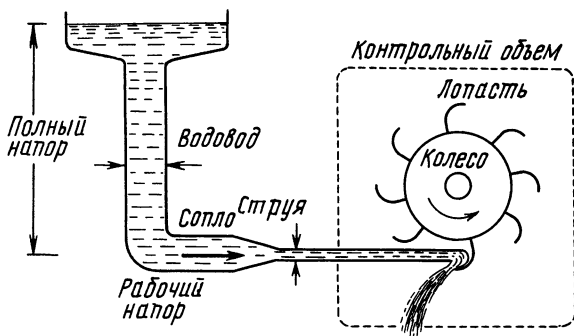


Рис. 8.2. Схема активной гидротурбины (турбины Пельтона)

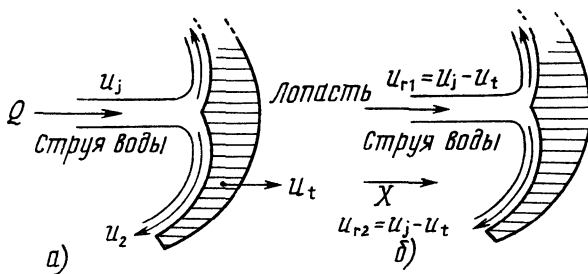


Рис. 8.3. Скорости потока и лопасти в лабораторной системе отсчета (а) и в системе отсчета, связанной с лопастью (б)

случае исходя из закона сохранения количества движения потока жидкости постоянного сечения имеем

$$\mathbf{u}_{r1} - \mathbf{u}_{r2} = (u_j - u_t) \mathbf{x},$$

где  $\mathbf{x}$  — единичный вектор направления набегающей струи.

В лабораторной системе отсчета скорость набегающего потока также будет изменяться. В этом случае действующая на ковш сила, равная изменению количества движения потока жидкости в единицу времени, равна

$$\mathbf{F} = 2\rho Q(u_j - u_t) \mathbf{x}, \quad (8.4)$$

где  $Q$  — объемный расход рассматриваемого потока жидкости.

Эта сила, перемещая лопасти колеса в отсутствие трения со скоростью  $u_t \mathbf{x}$ , совершает в единицу времени работу (мощность), равную

$$P(u_t) = F u_t = 2\rho Q(u_j - u_t) u_t. \quad (8.5)$$

Это выражение для  $P(u_t)$  при постоянной скорости  $u_j$  имеет максимум, когда

$$u_t/u_j = 0,5. \quad (8.6)$$

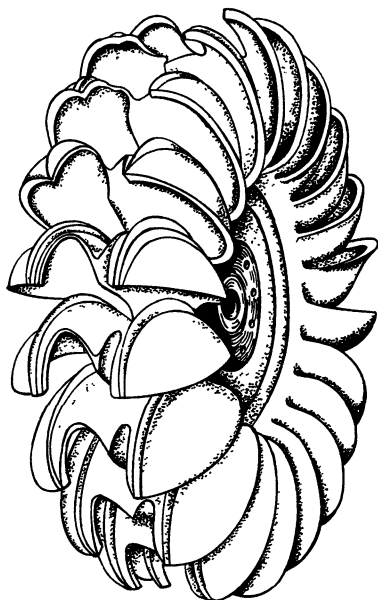
В этом случае мощность гидротурбины равна

$$P_j = (1/2) \rho Q u_j^2. \quad (8.7)$$

Напомним, что в рассматриваемом идеальном случае (без трения) мощность  $P_j$  равна полной кинетической энергии набегающего потока и КПД гидротурбины равен 100%. Горизонтальная составляющая скорости потока  $u_2$  в этом случае за колесом должна равняться нулю, т. е. вода будет стекать с колеса вертикально вниз.

В реальных конструкциях активных гидротурбин стремятся максимально приблизиться к ее идеальному варианту. Например, сопла регулируют так, чтобы струи воды набежали на лопасти перпендикулярно и с оптимальной относительной скоростью, но реализовать эти условия на практике в полной мере не удастся.

Рис. 8.4. Внешний вид колеса турбины Пельтона



Ряд усовершенствований активной турбины был сделан еще Пельтоном (1860 г.). Вырез в центре лопасти способствует лучшему взаимодействию ее струей, так же как и разделяющее лопасть по центру ребро, позволяющее наиболее эффективно отражать набегающую на лопасть струю. Оценка механического КПД гидротурбины с колесом Пельтона (рис. 8.4) приведена в задачах 8.3 и 8.4. Величина КПД реальных турбин колеблется от 50% для небольших агрегатов до 90% для больших энергоустановок.

**Скорость струи и размер сопла.** Как видно из рис. 8.2,

статическое давление на поверхности водохранилища и в струе равно атмосферному. В этом случае из теоремы Бернулли (2.3) следует, что при отсутствии трения в водоводах скорость набегающего потока  $u_j^2 = 2gH_i$ . Потери на трение можно учесть, заменив полный напор  $H_i$  располагаемым напором  $H_a$ , тогда

$$u_j^2 = 2gH_a. \quad (8.8)$$

На практике размер водоводов выбирают таким, чтобы скорость  $u_j$  не зависела от площади среза сопла. Для  $n_j$  сопел площадью  $A'_j$  каждый суммарный расход равен

$$Q = n_j A'_j u_j. \quad (8.9)$$

Мощность на валу турбины, как следует из (8.6) и (8.7), равна

$$P_m = \eta_{jm} P_j = \eta_{jm} (1/2) \rho Q u_j^2 = (1/2) \eta_{jm} n_j A'_j \rho (2gH_a)^{3/2}. \quad (8.10)$$

Отсюда следует, что надо стремиться сохранять располагаемый напор  $H_a$  максимально большим.

Снимаемая мощность пропорциональна суммарной площади сопел  $A_j = n_j A'_j$ . Площадь среза сопла  $A'_j$  ограничена размером лопасти, поэтому увеличение  $A'_j$  ведет к увеличению размера гидротурбины. Как правило, проще увеличить число сопел  $n_j$ , чем общий размер турбины, однако использование более четырех сопел невыгодно из-за чрезмерного усложнения конструкции турбины. В небольших турбинах используют два сопла. Очевидно,

что общий расход через турбину ограничен расходом реки, определенным в § 8.3, т. е.

$$n_j A_j' \leq Q / (2gH_a)^{1/2}. \quad (8.11)$$

**Размер колеса турбины и его угловая скорость.** Предположим, что число сопл и их размер выбраны в соответствии с (8.9), а (8.10) определяет максимальную мощность, которую при этом можно снять с турбины. Размер сопл задает размеры лопастей турбины, но не ее диаметр. Последний определяется из конструктивных соображений, а также требуемой частотой вращения турбины. Выходные характеристики электрогенератора (напряжение, частота, КПД) зависят от угловой скорости его вращения. Большинство электрогенераторов обладают высокими КПД при больших частотах вращения (более 1500 об/мин). Турбина Пельтона очень хорошо сопрягается с такими генераторами, обеспечивая без каких-либо дополнительных преобразователей необходимую частоту вращения.

Если колесо турбины радиусом  $R$  вращается с угловой скоростью  $\omega$ , то согласно (8.4) и (8.5) мощность равна

$$P = FR\omega, \quad (8.12)$$

т. е. при заданной выходной мощности угловая скорость обратно пропорциональна радиусу колеса. Так как  $u_t = R\omega$ , то из (8.6), (8.8) и (8.12) следует, что

$$R = 0,5(2gH_a)^{1/2} / \omega. \quad (8.13)$$

Сопла обычно имеют круглое сечение радиуса  $r_j$ , тогда  $A_j' = \pi r_j^2$  и с учетом (8.9)

$$r_j^2 = \frac{P_m}{\eta_{jm} \rho n_j \pi (gH_a)^{3/2} \sqrt{2}}. \quad (8.14)$$

Окончательно из (8.13) и (8.14) имеем

$$\frac{r_j}{R} = 0,68 (n_j \eta_{jm})^{-1/2} \mathcal{L}, \quad (8.15)$$

где

$$\mathcal{L} = \frac{P_m^{1/2} \omega}{\rho^{1/2} (gH_a)^{5/4}} \quad (8.16)$$

есть безразмерный коэффициент, зависящий от ряда определяющих условия работы турбины параметров и называемый *коэффициентом быстроходности*. Уравнение (8.15) связывает параметры собственно турбины  $r_j/R$  и  $n_j$  с параметром  $\mathcal{L}$ , характеризующим условия ее работы, и определяет ее КПД при этих условиях.

При выводе (8.15) использовалось соотношение (8.6) между скоростью струи и скоростью лопасти. Если соотношение  $u_t/u_j$  одинаково для двух колес одной формы, но разного размера, то картины обтекания этих колес будут подобны. Отсюда сле-

дует, что все безразмерные характеристики, такие как  $\eta_{jm}$  и  $\mathcal{L}$ , будут одинаковыми у всех активных турбин с одинаковым соотношением  $u_t/u_j$ . Как следствие для конкретной турбины с параметрами  $r_j/R$  и  $n_j$  однозначно определяются параметры, характеризующие условия ее работы (коэффициент быстроходности  $\mathcal{L}$ ), при которых достигается максимальный КПД.

*Пример 8.1.* Определить диаметр колеса активной гидротурбины с одним соплом мощностью 160 кВт при значениях рабочего напора  $H_a$  равных 81 и 5 м и соответствующие им оптимальные угловые скорости, при которых достигаются максимальные значения КПД.

*Решение.* Считаем, что рабочей жидкостью является вода. Далее, на практике, как правило, используются колеса с размером лопасти  $r_j < R/10$ , так как при большем размере лопастей ухудшаются условия их обтекания из-за взаимного влияния соседних лопастей друг на друга. Поэтому положим  $r_j = R/12$ . Из рис. 8.6 (см. § 8.5) следует, что максимальный КПД активных турбин  $\eta_{jm} \approx 0,9$ . Тогда из (8.15) находим

$$\mathcal{L} = 0,11. \quad (8.17)$$

Из (8.16) определяем оптимальную угловую скорость вращения колеса для  $H_a = 81$  м:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \mathcal{L} \rho^{1/2} (gH_a)^{5/4} p^{-1/2} = \\ &= \frac{0,11 (10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3})^{1/2} ((9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}) (81 \text{ м}))^{5/4}}{(16 \cdot 10^4 \text{ Вт})^{1/2}} = 36 \text{ рад/с}. \end{aligned}$$

Из (8.8) имеем

$$u_j = (2gH_a)^{1/2} = 40 \text{ м/с},$$

тогда

$$R = (1/2) u_j / \omega_1 = 0,55 \text{ м}.$$

Точно так же для  $H_a = 5$  м находим

$$\omega_2 = \omega_1 (5/81)^{5/4} = 1,1 \text{ рад/с};$$

$$u_j = 10 \text{ м/с}; R = 4,5 \text{ м}.$$

Сравнивая эти результаты, видим, что при одинаковой мощности турбины, работающие при малом напоре, вращаются медленнее. Они имеют большие габариты, следовательно, и стоят дороже. Поэтому на практике активные турбины используют при небольших расходах и высоких напорах воды.

## 8.5. Реактивные гидротурбины

Из основополагающего уравнения (8.1) следует, что при заданной мощности турбины чем меньше напор, тем большим будет расход жидкости. Если оперировать параметром  $\mathcal{L}$  (8.16), то это означает, что при заданной мощности  $P$  и угловой скорости  $\omega$  чем меньше напор, тем большее значение коэффициента

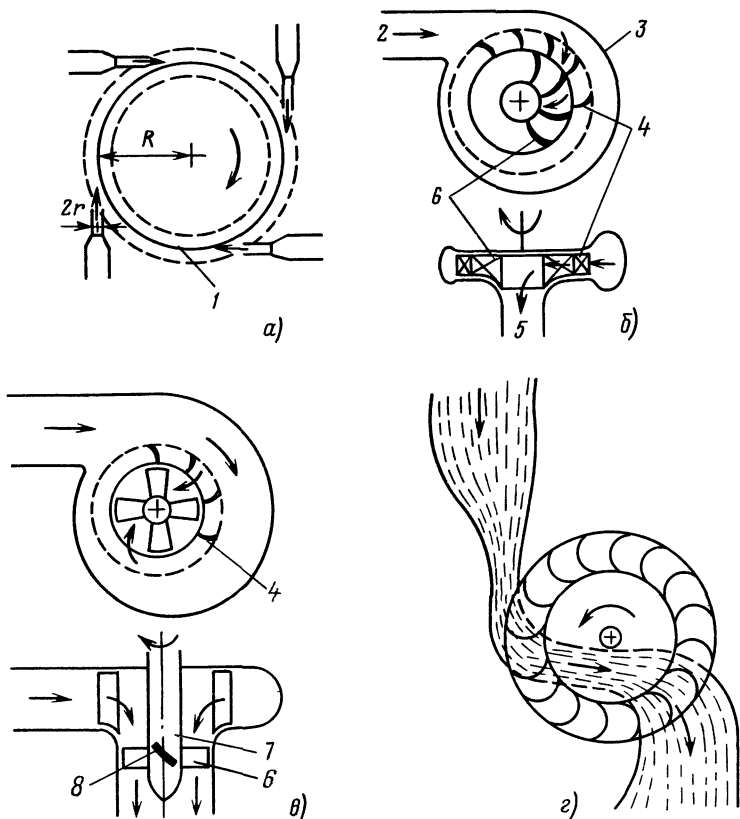


Рис. 8.5. Способы повышения эффективности гидротурбины за счет совершенствования ее конструкции:

*a* — четырехсопловая турбина Пельтона, мощность которой в 4 раза выше односопловой турбины такого же размера; *б* — радиально-осевая турбина (турбина Фрэнсиса), все лопасти которой непрерывно обтекаются поступающим из направляющего аппарата потоком, *в* — пропеллерная гидротурбина (турбина Каплана). Максимальный коэффициент быстроходности достигается увеличением размера струи до размера рабочего колеса; *г* — гидротурбина двукратного действия (турбина Банки), у которой струя воды взаимодействует с лопастями колеса дважды; 1 — средний диаметр колеса, 2 — вход; 3 — спиральная камера; 4 — неподвижные лопасти направляющего аппарата; 5 — выход, 6 — вращающиеся лопасти; 7 — втулка; 8 — вид лопасти с торца

быстроходности  $\mathcal{L}$  должно быть у турбины. Одним из способов повышения  $\mathcal{L}$  является увеличение числа сопел [см. (8.16) и рис. 8.5, *a*]. Однако уже при  $n_j > 4$  струи начинают влиять друг на друга, что приводит к уменьшению КПД колеса. Таким образом, для увеличения расхода воды через турбину необходимы существенные изменения в ее конструкции. Например, колесо помещают в специальный кожух (спиральную камеру) с некоторым зазором, в который по касательной к колесу поступает

вода (рис. 8.5, б). Такая турбина называется *реактивной*. В отличие от активной турбины, когда струя то воздействует на лопасть, то нет, в реактивной она воздействует на лопасти практически все время. Конструкция рабочего колеса реактивной турбины (ротора) такова, что вода поступает в него радиально, а выходит в направлении оси ротора. На рис. 8.5, б показан один из вариантов такой конструкции, известный как турбина Фрэнсиса. Из рисунка видно, что поступающая в рабочее колесо вода, пройдя через направляющий аппарат, приобретает дополнительно к тангенциальной радиальную составляющую скорости. Это осложняет анализ ее работы. Более подробно такой анализ можно найти в специальных учебных пособиях.

Для еще большего увеличения расхода воды через турбину размер струи можно увеличить до размера ее колеса. Этот принцип лежит в основе пропеллерных гидротурбин (рис. 8.5, в). Скорость потока в таких турбинах имеет преимущественно осевое направление. Направляющий аппарат на входе турбины несколько закручивает поступающий на рабочее колесо поток, увеличивая этим КПД турбины.

Так как пропеллерные гидротурбины с преимущественно осевым направлением потока в рабочем колесе являются наиболее компактными, возникает вопрос, почему же они не вытеснили, например, турбины Пельтона или Фрэнсиса. Основная причина — большие перепады давлений, возникающие при движении жидкости в таких турбинах. В отличие, например, от активных турбин поток в них изолирован стенками спирального аппарата от атмосферы. Используя уравнение Бернулли (2.2), можно показать, что минимальное давление воды в реактивной гидротурбине существенно меньше атмосферного (задача 8.7). Более того, это давление может быть даже меньше давления насыщенных паров воды. Если такое происходит, в потоке образуются пузырьки пара, т. е. возникает кавитация. Если затем в потоке давление воды резко возрастает, пузырьки схлопываются. Возникающие в этот момент громадные давления могут вызвать разрушение находящихся поблизости элементов турбины. Эти явления усиливаются с увеличением скорости потока и напора, поэтому осевые турбины используются в основном при низких напорах  $H$ . Кроме того, характеристики реактивных турбин, и в частности пропеллерных, очень чувствительны к изменениям скорости потока. Например, их КПД резко падает при уменьшении скорости из-за изменения угла обтекания потоком лопастей колеса. В принципе с помощью системы автоматического управления можно поддерживать оптимальный угол обтекания, поворачивая лопасти, но это достаточно сложно и дорого. Тем не менее такие системы оправдывают себя на больших установках, как, например, гидротурбинах Каплана (рис. 8.5, в), а в последнее время они стали экономически вы-



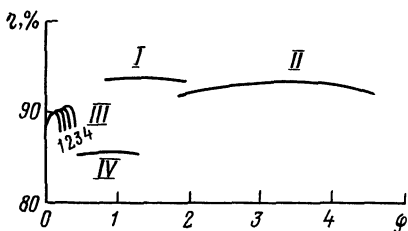


Рис. 8.6. Диапазоны максимальной эффективности гидротурбин различных типов:  
 I — турбина Фрэнсиса, II — пропеллерная турбина; III — турбина Пельтона (1, 2, 3, 4-сопловая); IV — турбина Банки

годными и на небольших установках.

Турбина Пельтона, а также промежуточная по типу турбина Банки (турбина двукратного действия, рис. 8.5, з) не так чувствительны к параметрам потока, как пропеллерные турбины. Турбина Банки к тому же очень проста в изготовлении, так как не требует сложного технологического оборудования.

На рис. 8.6 представлена зависимость КПД гидротурбины от коэффициента быстроходности  $\mathcal{L}$ , позволяющая выбрать оптимальный тип турбины по заданным значениям расхода и напора. Для каждого типа турбины в свою очередь существуют зависимости между параметром  $\mathcal{L}$ , определяющим условия работы турбины с максимальным КПД, и параметрами самой турбины. Одним из таких параметров является отношение  $r_i/R$  (8.15), которое определяется теоретически или экспериментально и используется при оптимизации конструкции турбин. Более детально этот вопрос рассмотрен в специальной литературе.

## 8.6. Гидроэлектростанции

В основном современные гидроэнергетические установки используются для производства электроэнергии, хотя имеются установки и другого назначения (например, гидравлический таран, см. § 8.7). На рис. 8.7 показана схема типичной гидроэлектростанции. В нее входят водохранилище, подводящий водовод, регулятор расхода воды, гидротурбина, электрогенератор, система контроля и управления параметрами генератора, электрораспределительная система. Водоохранилище, т. е. источник потенциальной энергии, создается с помощью плотины, которая позволяет также обеспечивать стабильный расход воды через турбину. Водоохранилище помимо этого можно использовать и для других целей, например для судоходства и водоснабжения. Небольшие гидроэлектростанции, расположенные в стороне от основного русла реки и соединенные с ней подводящим и отводящим каналами (так называемые *деривационные гидроэлектростанции*), имеют вместо плотин невысокую подпорную стенку, т. е. не создают водохранилищ.

Подводящий (напорный) водовод является наиболее дорогим сооружением гидроэлектростанции. Уменьшить его стоимость

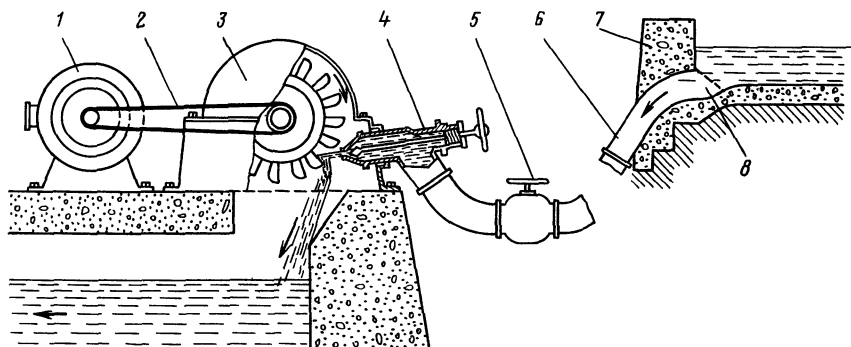


Рис. 8.7. Схема гидроэлектростанции с ковшовой гидротурбиной:

1 — электрогенератор, 2 — приводной ремень; 3 — гидротурбина; 4 — сопло; 5 — вентиль, 6 — водовод; 7 — плотина; 8 — решетка

можно за счет уменьшения его длины, диаметра и толщины стенок, но к сожалению, редко условия эксплуатации позволяют сделать это. Особенно это касается диаметра водовода  $D$ , так как потери напора  $H_f$  пропорциональны  $D^{-5}$  (см. задачу 2.6), т. е. при слишком малом диаметре в водоводе потеряется почти вся потенциальная энергия воды. Поэтому при проектировании водовода следует сопоставлять выигрыш в стоимости его сооружения при уменьшении диаметра и проигрыш из-за увеличения потерь напора в нем. Оптимум обычно определяется условием  $H_f \leq 0,1 H_i$ .

Стенки водовода должны быть достаточно гладкими для уменьшения потерь на трение и прочными, чтобы выдержать значительные статические и динамические (в местах изгиба) давления. На небольших станциях большая часть водовода может изготавливаться из пластмассы, например поливинилхлорида, за исключением небольшой стальной нижней секции, где давления максимальны. Для предотвращения водовода от засорения на его входе устанавливаются защитная сетка, которая регулярно очищается, а также отстойник, в котором осаждаются взвешенные частицы.

Частота вращения колеса турбины, как отмечалось выше, должна быть согласована с характеристиками электрогенератора. Частота вращения существующих гидротурбин недостаточно велика, поэтому обычно переменное напряжение на выходе генератора не превышает 400 В. Мощные (более 1 МВт) электрогенераторы, как правило, находятся на одном валу с гидротурбиной, что позволяет избежать потерь энергии в приводе. Небольшие генераторы (около 10 кВт) соединяются с турбиной приводом, который позволяет повышать обороты генератора. В качестве привода чаще всего исполь-

зуются клиновидные ремни. Потери энергии в таком приводе составляют 10—20%.

**Системы регулирования и управления на гидроэлектростанциях.** Материал, представленный ниже, обсуждается также в § 9.8 и 1.4.

Большие гидроэлектростанции обычно входят в единую энергосистему, поэтому необходимо, чтобы их выходные параметры соответствовали параметрам энергосистемы (напряжению и частоте). Напряжение в энергосистеме для уменьшения джоулевых потерь (пропорциональных  $I^2R$ ) при передаче электроэнергии во много раз превышает напряжение на выходе генераторов, поэтому генератор подключается к энергосистеме через повышающий трансформатор. Предъявляемые при этом требования к отклонениям напряжения и частоты от стандарта составляют  $\pm 2\%$ . Стабилизация частоты обычно осуществляется механической системой регулирования расхода воды с обратной связью. В турбине Пельтона, например, это осуществляется с помощью вентиля с запорной иглой, регулирующего расход воды через сопла (см. рис. 8.7). В реактивных турбинах при изменении расхода необходимо еще и поворачивать лопасти, поэтому здесь механические системы регулирования сложны и дороги, особенно при использовании на небольших гидроэлектростанциях.

Небольшие ГЭС, снабжающие электроэнергией сельские районы, также имеют системы управления и контроля, но так как электроэнергия здесь используется в основном для освещения и питания небольших электродвигателей, допускаются гораздо большие (до 10%) отклонения напряжения и частоты. К тому же на таких ГЭС ввиду их небольшой мощности могут успешно применяться электронные регуляторы (например, тиристорные) вместо традиционных механических.

При электронной системе управления нагрузкой используется и ручное регулирование выходных параметров посредством изменения расхода воды через турбину. Наилучшие результаты достигаются при использовании электронных систем управления с прямой связью, которые распределяют энергию электростанции между основными потребителями и дополнительными, подключаемыми только в периоды спада энергопотребления основными потребителями (см. рис. 1.5, в). При этом суммарная нагрузка генератора, равная сумме основной и дополнительной, все время остается постоянной, следовательно, и гидротурбина работает с постоянной нагрузкой. Поэтому отпадает необходимость в регулировании расхода воды через турбину, что существенно упрощает ее конструкцию. Типичным представителем такой системы управления является тиристорная система, управляющим параметром в которой является разность номинального и фактического значений напряжения на основной нагрузке.

**Полный КПД гидроэнергетической установки.** Каждый из отдельно взятых этапов превращения потенциальной энергии воды (или мощности  $P_0$ ) в электрическую энергию ( $P_e$ ) в гидроэнергетических установках достаточно эффективен, однако в целом потери энергии оказываются значительными. Отношение  $P_e/P_0$  запишем в виде

$$\frac{P_e}{P_0} = \frac{P_j}{P_0} \frac{P_m}{P_j} \frac{P_e}{P_m} = \frac{H_a}{H_i} \eta_{jm} \eta_{me} \approx (0,8) (0,8) (0,8) \approx 0,5. \quad (8.18)$$

Кроме того, потери неизбежны и при распределении и потреблении электроэнергии.

### 8.7. Гидравлический таран

Гидравлический таран успешно заменяет электронасосы в неэлектрифицированных районах для подачи воды из равнинных рек. Гидравлический таран, используя кинетическую энергию потока воды, позволяет поднимать ее на значительную высоту. Например, поток с напором в 2 м способен поднять 10% своего расхода на высоту 12 м. Совершенно ясно, что это очень удобный способ заполнения, например, емкостей водонапорных башен в сельской местности. На рис. 8.8 представлена принципиальная

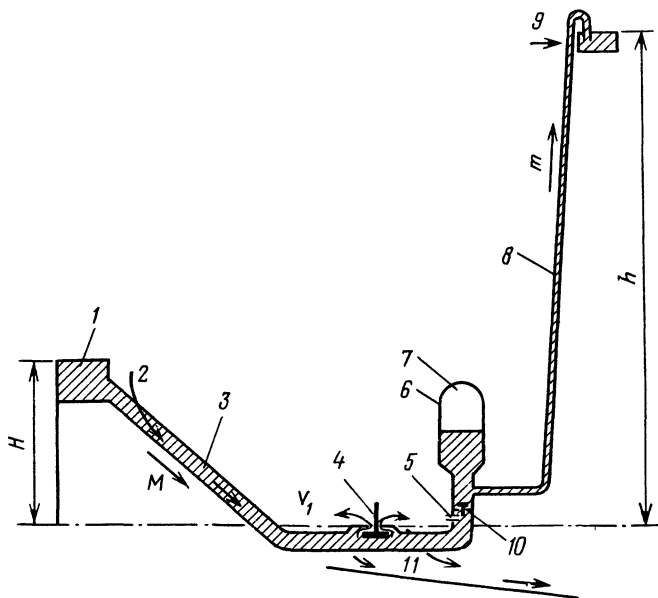


Рис. 8.8. Схема гидравлического тарана:

1 — источник; 2 — поток воды из источника; 3 — питающий трубопровод; 4 — ударный отбойный клапан; 5 — воздушный клапан; 6 — напорный колпак; 7 — воздух; 8 — закачиваемая вода, нагнетательный трубопровод; 9 — верхний бак; 10 — напорный клапан; 11 — сток воды через клапан 4

ная схема такой установки, использующей гидравлический таран. Вода из реки подается вниз по наклонному питающему трубопроводу, при этом ее потенциальная энергия  $MgH$  превращается сначала в кинетическую, а затем снова в потенциальную  $mgh$ . При подробном рассмотрении этот процесс протекает следующим образом.

1. В момент, когда ударный отбойный клапан  $V_1$  открыт, а напорный клапан закрыт, вода из реки по питательному трубопроводу вытекает через клапан  $V_1$  наружу, при этом ее потенциальная энергия  $MgH$  превращается в кинетическую [см. уравнение Бернулли (2.2)].

2. Давление, действующее в этот момент на клапан  $V_1$ , превосходит силу тяжести клапана, и он быстро захлопывается.

3. Вода, продолжающая по инерции поступать в питающую трубу, начинает сжимать находящуюся в ней воду.

4. Давление в трубе резко повышается, напорный клапан открывается, пропуская воду в напорный колпак.

5. Вода, поступающая в колпак, сжимает находящийся в нем воздух.

6. Некоторая часть воды массой  $m$  поступает в нагнетательный трубопровод под действием давления воды и воздуха в колпаке.

7. Скорость потока в питающем трубопроводе резко уменьшится в результате процессов 5) и 6), напорный клапан закроется и вода в питательном трубопроводе совершит волнообразное возвратное движение.

8. Давление в результате возвратного движения на внутренней поверхности ударного клапана  $V_1$  упадет, он откроется, выпуская воду наружу, и весь процесс начнет повторяться.

9. Воздушный клапан откроется одновременно с клапаном  $V_1$ , выпуская небольшую порцию воздуха, который потом вместе с водой попадет в напорный колпак, восполняя потери воздуха в нем из-за поглощения его водой.

При работе тарана описанный цикл непрерывно повторяется с частотой примерно 1 Гц.

В теории расчета таких насосов используется только один экспериментальный параметр — коэффициент сопротивления ударного отбойного клапана. КПД тарана равен  $mh/MH$ . Надежные и удобные в работе гидравлические тараны пользуются большим спросом. Их КПД составляет примерно 60%. Гидравлический таран с несколько меньшим КПД может работать и от водопровода.

### Задачи

8.1. Пользуясь атласом, оцените гидроэнергетический потенциал страны или определенного района, действуя в такой последовательности.

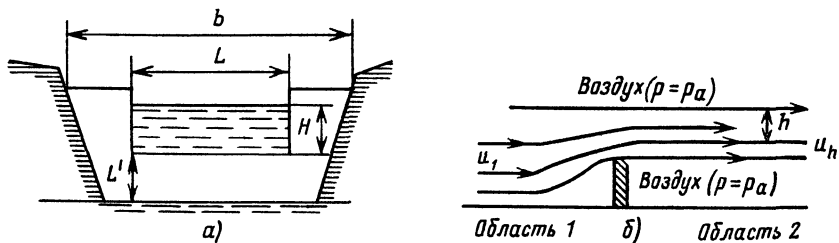


Рис. 8.9. Тонкий водослив: вид спереди (а), вид сбоку (б) (стрелками показаны линии тока идеализированного течения,  $u_h$  — скорость воды за водосливом на глубине, где  $\rho = \rho_h$ )

а) Пусть  $X$  — заданный район. Какова наименьшая высота местности над уровнем моря в  $X$ ? Какая площадь в  $X$  находится на высоте более 300 м над наименьшей? Сколько осадков выпадает в год на этой площади? Какой потенциальной энергией относительно наименьшей высоты обладает эта масса воды? Выразите эту энергию в мегаваттах.

б) Уточните оценку гидроэнергетического потенциала, учитывая, что: 1) не все атмосферные осадки стекают в ручьи и реки; 2) не на всех реках возможно сооружение плотин; 3) на реках с очень маленьким уклоном практически невозможно создать необходимый напор.

в) Если в  $X$  есть гидроэлектростанции, сравните их мощность с полученной оценкой и объясните различие, если оно велико.

8.2. На рис. 8.9 представлена идеализированная картина течения жидкости в окрестности U-образного тонкого водослива. В области 1 перед водосливом скорость потока  $u_1$  одинакова на любой глубине. В области 2 за водосливом скорость с глубиной увеличивается.

а) Используя уравнение Бернулли, покажите, что для произвольной линии тока скорость жидкости в ней определяется выражением

$$u_h = (2g)^{1/2} (h + u_1^2/2g)^{1/2}.$$

Указание: используйте равенство  $\rho_h = \rho_a$ , вытекающее из картины течения. Считайте, что скорость  $u_1$  достаточно мала и можно положить давление  $p_1$  равным гидростатическому.

б) Покажите затем, что расход через идеальный водослив равен

$$Q_{th} = (8g/9)^{1/2} LH^{3/2}.$$

в) Фактический расход  $Q_{exp}$  связан с теоретическим соотношением

$$Q_{exp} = C_w Q_{th},$$

где  $C_w \approx 0,6$  (более точно величина  $C_w$  зависит от  $H/L'$  и  $L/b$ ). Объясните, почему  $C_w < 1$ .

г) Вычислите  $Q_{exp}$  для случая  $L' = 0,3$  м,  $L = 1$  м,  $b = 4$  м,  $H = 0,2$  м. Определите также  $u_1$  и проверьте обоснованность допущений относительно  $u_1$ , принятых в пп. а) и б).

8.3. Падающий на лопасти турбины Пельтона поток и отраженный образуют угол  $\theta$  в системе координат, связанной с лопастью. Скорость  $u_1$  — тангенциаль-

ная скорость лопасти в лабораторной системе отсчета (см. рис. 8.3). Потери энергии на трение воды о лопасти турбины можно определить через коэффициент потерь  $k$  по формуле

$$u_1^2 = u_{r2}^2(1+k).$$

Покажите, что мощность на валу колеса  $P$  равна

$$P = \rho Q u_i (u_j - u_i) \left[ 1 + \frac{\cos \theta}{\sqrt{1+k}} \right].$$

Сравните эту мощность с мощностью идеальной турбины при  $\theta = 7^\circ$ ,  $k = 0,1$ .

8.4. Падающий на турбину Пельтона поток имеет параметры  $H = 20$  м,  $Q_{min} = 0,05$  м<sup>3</sup>/с.

а) Пренебрегая трением, определите: 1) скорость потока; 2) максимальную мощность турбины; 3) радиус сопл, если их два.

б) Предполагая далее, что коэффициент быстроходности колеса равен

$$\mathcal{L} = \frac{\omega P_1^{1/2}}{\rho^{1/2} (gH)^{5/4}} = 0,1,$$

где  $P_1$  — мощность одной струи, определите: 4) число лопастей; 5) диаметр колеса; 6) угловую скорость вращения колеса.

в) Если напорный водовод имеет длину 100 м, то как изменится ответ на пп. а) и б) при наличии трения, если: 7) водовод поливинилхлоридный диаметром 15 см; 8) водовод — обычный пластиковый шланг диаметром 5 см? В обоих случаях определите число Рейнольдса.

8.5. Проверьте, что коэффициент быстроходности — безразмерный параметр. В чем преимущества представления характеристических параметров турбин в безразмерном виде?

8.6. Пропеллерная турбина с коэффициентом быстроходности  $\mathcal{L} = 4$  имеет мощность на валу 400 кВт при рабочем напоре воды 6 м. Ее КПД при этом — около 70%. Рассчитайте: а) скорость потока; б) угловую скорость вращения турбины; в) передаточное число редуктора, если турбина вращает четырехполюсный генератор переменного тока частотой 50 Гц.

### Решения

8.2. а) Используйте указание к задаче.

$$б) Q = \int_{h=0}^H u_h L dh.$$

Полагаем, что  $u_1^2/2g \ll h$ .

в) Из-за турбулизации потока перед и за водосливом коэффициент  $C_w < 1$ .

г)  $Q = 0,16$  м<sup>3</sup>/с,  $u_1 = 0,03$  м/с.

8.3. Используйте результаты § 2.3. Мощность меньше, чем в идеальной турбине, на 3%. Угол в лабораторной системе равен примерно 1/2 угла в системе, связанной с лопастью.

8.4. а) 1) 20 м/с; 2) 9,8 кВт; 3) 2,0 см.

б) Положим, например,  $\eta = 0,9$ , тогда: 4) 25 лопастей; 5) 52 см, 6) 33 рад/с.

в) 7)  $Re = 4 \cdot 10^5$ ,  $H_u = 16$  м,  $P = 7,2$  кВт, 8) в первом приближении  $H_f = 800$

(см. задачу 2.5), поэтому  $P=0$  (вся потенциальная энергия уйдет на преодоление силы сопротивления).

8.6. а) 2,4 м<sup>3</sup>/с; б) 65 рад/с; в) 2,4, редуктор повышающий.

## Глава 9

# ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

## 9.1. Введение

Ветроэнергетика с ее современным техническим оснащением является вполне сложившимся направлением энергетики. Ветроэнергетические установки мощностью от нескольких киловатт до мегаватт производятся в Европе, США и других частях мира. Большая часть этих установок используется для производства электроэнергии — как в единой энергосистеме, так и в автономных режимах.

Ниже будет показано, что при скорости ветра  $u_0$  и плотности воздуха  $\rho$  ветроколесо, ометающее площадь  $A$ , развивает мощность

$$P = C_p A \frac{\rho u_0^3}{2}. \quad (9.1)$$

Здесь  $C_p$  — параметр, характеризующий эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока и называемый коэффициентом мощности. Из (9.1) видно, что мощность  $P$  пропорциональна ометаемой площади  $A$  и кубу скорости  $u_0$ . Коэффициент мощности  $C_p$  зависит от конструкции ветроколеса и скорости ветра. Так как скорость ветра непостоянна, а мощность очень сильно зависит от скорости, то выбор оптимальной конструкции ветроколеса во многом определяется требованиями потребителя энергии. Обычно среднегодовая мощность, снимаемая с единицы площади ветроколеса, пропорциональна  $C_p$ , плотности воздуха и кубу средней скорости, т. е.  $P \sim C_p \rho (u)^3$ .

Максимальная проектная мощность ветроэнергетической установки (ВЭУ) определяется для некоторой стандартной скорости ветра. Обычно эта скорость равна примерно 12 м/с, при этом снимаемая с 1 м<sup>2</sup> ометаемой площади мощность — порядка 300 Вт при значениях  $C_p$  от 0,35 до 0,45. В табл. 9.1 и 9.2 представлены классификация силы ветра по шкале Бофорта и основные характеристики ВЭУ различных классов. В районах с благоприятными ветровыми условиями среднегодовое производство электроэнергии составляет 25—33% его максимального проектного значения. Срок службы ветрогенераторов обычно не менее 15—20 лет, а их стоимость колеблется от 1000 до 1500 долл. США за 1 кВт проектной мощности.



Таблица 9.1. Сила ветра по шкале Бофорта и ее влияние на ветроустановки и условия их работы

Баллы Бофорта	Скорость ветра, м/с	Характеристика силы ветра	Наблюдаемые эффекты действия	Воздействие ветра на ВЭУ	Условия для работы ВЭУ при средней в данном диапазоне скорости ветра
0	0,0—0,4	Штиль	Дым из труб поднимается вертикально	Нет	Отсутствуют
1	0,4—1,8	Тихий	Дым поднимается не совсем отвесно, но флюгеры неподвижны. На воде появляется рябь	»	»
2	1,8—3,6	Легкий	Ветер ощущается лицом, шелестят листья, на воде отчетливое волнение	»	Плохие для всех установок
3	3,6—5,8	Слабый	Колеблются листья на деревьях, развеваются легкие флаги, на отдельных волнах появляются барашки (гребни)	Начинают ерзаться тихходные ветроколеса	Удовлетворительные для работы насосов и некоторых аэрогенераторов
4	5,8—8,5	Умеренный	Колеблются тонкие ветки деревьев, поднимается пыль и клочки бумаги, на воде много барашков	Начинают вращаться колеса аэрогенераторов	Хорошие для аэрогенераторов
5	8,5—11	Свежий	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в барашках	Мощность ВЭУ достигает 30% проектной	Очень хорошие
6	11—14	Сильный	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пенятся гребни волн	Мощность в расчетном диапазоне близка к максимальной	Приемлемы для прочных малогабаритных установок
7	14—17	Крепкий	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена	Максимальная мощность	Предельно допустимые
8	17—21	Очень крепкий	Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра, с волн срываются клочки пены	Ряд ветроустановок начинает отключаться	Недопустимые
9	21—25	Шторм	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы	Все установки отключаются	»
10	25—29	Сильный шторм	Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем	Предельные нагрузки	»
11	29—34	Жестокий шторм	Широкомасштабные разрушения	Повреждения некоторых установок	»
12	Более 34	Ураган	Опустошительные разрушения	Серьезные повреждения, вплоть до разрушения установок	»

Энергия ветра в механических установках, например на мельницах и в водяных насосах, используется уже несколько столетий. С 1930 г. до середины 50-х годов интенсивно разрабатываются различные конструкции ВЭУ, но в то время такие установки не находили широкого применения из-за доступности дешевой нефти. После резкого скачка цен на нефть в 1973 г. интерес к таким установкам вспыхнул вновь. К этому времени еще сохранили работоспособность несколько старых установок (например, в Дании установка Gedser мощностью 100 кВт с диаметром колеса 24 м, построенная в 1957 г.), но большая их часть была построена в конце 70-х—начале 80-х годов на современном техническом уровне при широком использовании микроэлектроники для контроля и управления ими. Одно из основных условий при проектировании ветровых установок — обеспечение их защиты от разрушения очень сильными случайными порывами ветра. Ветровые нагрузки пропорциональны квадрату скорости ветра, а раз в 50 лет бывают ветры со скоростью, в 5—10 раз превышающей среднюю, поэтому установки приходится проектировать с очень большим запасом прочности. Кроме того, скорость ветра очень колеблется во времени, что может привести к усталостным разрушениям, а для лопастей к тому же существенны переменные гравитационные нагрузки (порядка  $10^7$  циклов за 20 лет эксплуатации).

Таблица 9.2. Параметры ветроэнергетических установок различной проектной мощности при скорости ветра 12 м/с. Параметры рассчитаны для коэффициента мощности  $C_p=30\%$ , плотности воздуха  $1,2 \text{ мг/м}^3$ , быстроходности  $Z=6$ . Расчетная мощность  $P=(1/2)\rho \times (\pi D^2/4)u_0^3 C_p$ , тогда  $D=(2,02 \text{ м}) \sqrt{P/1 \text{ кВт}}$ ,  $T=0,0436 \text{ с/м}$

Класс ВЭУ	Расчетная (проектная) мощность, кВт			Диаметр ветроколеса $D$ , м			Период вращения $T$ , с		
	10	25		6,4	10		0,3	0,4	
Малые	10	25		6,4	10		0,3	0,4	
Средние	50	100	150	14	20	25	0,6	0,9	1,1
Большие	250	500	1000	32	49	64	1,4	2,1	3,1
Очень большие	2000	3000	4000	90	110	130	3,9	4,8	5,7

Причиной возникновения ветров является поглощение земной атмосферой солнечного излучения, приводящее к расширению воздуха и появлению конвективных течений. В глобальном масштабе на эти термические явления накладывается эффект вращения Земли, приводящий к появлению преобладающих направлений ветра (рис. 9.1). Кроме этих общих, или синоптических, закономерностей многое в этих процессах определяется местными особенностями, обусловленными определенными географическими или экологическими факторами. Скорость ветров увеличивается

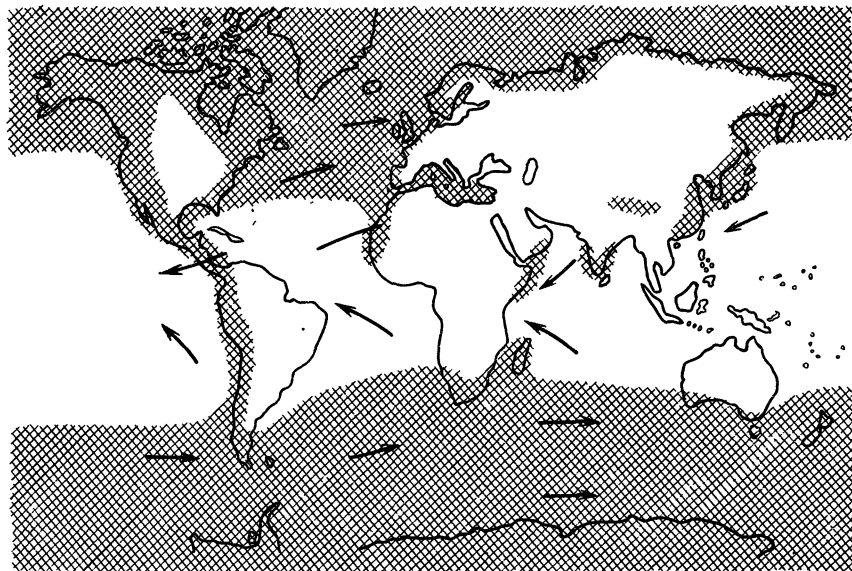


Рис. 9.1. Карта ветров. Заштрихованы районы, благоприятные для развития ветроэнергетики, со средней скоростью ветра более 5 м/с и средней мощностью более 1/3 установленной (проектной) мощности. Обратите внимание на долю морей и океанов в заштрихованных районах. Помните о недостатках слишком общей информации о ветрах

с высотой, а их горизонтальная составляющая значительно больше вертикальной. Последнее обстоятельство является основной причиной возникновения резких порывов ветра и некоторых других мелкомасштабных эффектов. Суммарная кинетическая энергия ветров оценивается величиной порядка  $0,7 \cdot 10^{21}$  Дж. Вследствие трения, в основном в атмосфере, а также при контакте с земной и водной поверхностями эта энергия непрерывно рассеивается, при этом рассеиваемая мощность — порядка 1200 ТВт ( $1,2 \cdot 10^{15}$  Вт), что равно примерно 1% поглощенной энергии солнечного излучения.

Достоверно оценить, какая доля энергии ветра может быть использована, вряд ли возможно, так как эта оценка очень сильно зависит от уровня развития ветроэнергетики и ее потребителей. Тем не менее официальные оценки возможной доли ветроэнергетики в энергетике в целом, например, в Великобритании и Западной Германии, не предполагающие каких-либо серьезных изменений в сложившейся инфраструктуре энергопотребления, дают не менее 20%. При определенных изменениях инфраструктуры доля ветроэнергетики может быть существенно большей. Автономные ветровые энергоустановки весьма перспективны для вытеснения дизельных электростанций и отопительных устано-

вок, работающих на нефтепродуктах, особенно в отдаленных районах и на островах.

## 9.2. Классификация ветроустановок

Ветроэнергетические установки классифицируются по двум основным признакам—геометрии ветроколеса и его положению относительно направления ветра. На рис. 9.2 показаны взаимодействие воздушного потока с лопастью ветроколеса и возникающие при этом силы.

Пусть воздушный поток, имеющий скорость  $u$ , набегают на лопасть, перемещающуюся со скоростью  $v$ , тогда скорость потока относительно лопасти будет  $v_r$ . При взаимодействии потока с лопастью возникают: 1) сила сопротивления  $F_D$ , параллельная вектору относительной скорости набегающего потока  $v_r$ ; 2) подъемная сила  $F_L$ , перпендикулярная силе  $F_D$ . Слово «подъемная» в этом термине, конечно, не означает, как в аэродинамике, что эта сила направлена вверх; 3) завихрение обтекающего лопасти потока. В результате это приводит к закрутке воздушного потока за плоскостью ветроколеса, т. е. к его вращению относительно вектора скорости набегающего потока; 4) турбулизация потока, т. е. хаотические возмущения его скорости по величине и направлению. Турбулентность (подробнее это явление рассмотрено в § 2.5) возникает как за колесом, так и перед ним, в результате лопасть часто оказывается в потоке, турбулизированном другими лопастями; 5) препятствие для набегающего потока. Это его свойство характеризуется параметром, называемым *геометрическим заполнением* и равным отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой ими площади. Так, например, при одинаковых лопастях четырехлопастное колесо имеет вдвое большее геометрическое заполнение, чем двухлопастное.

Основные классифицирующие признаки ветроэнергетических установок можно определить с помощью приведенного ниже оп-

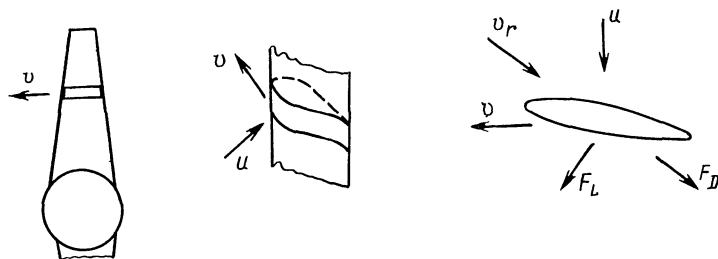


Рис. 9.2. Скорости элемента лопасти и действующие на него силы:

$u$  — скорость ветра,  $v$  — скорость элемента лопасти;  $v_r$  — скорость элемента лопасти относительно ветра;  $F_D$  — сила лобового сопротивления, действующая в направлении скорости  $v_r$ ,  $F_L$  — подъемная сила, перпендикулярная силе  $F_D$

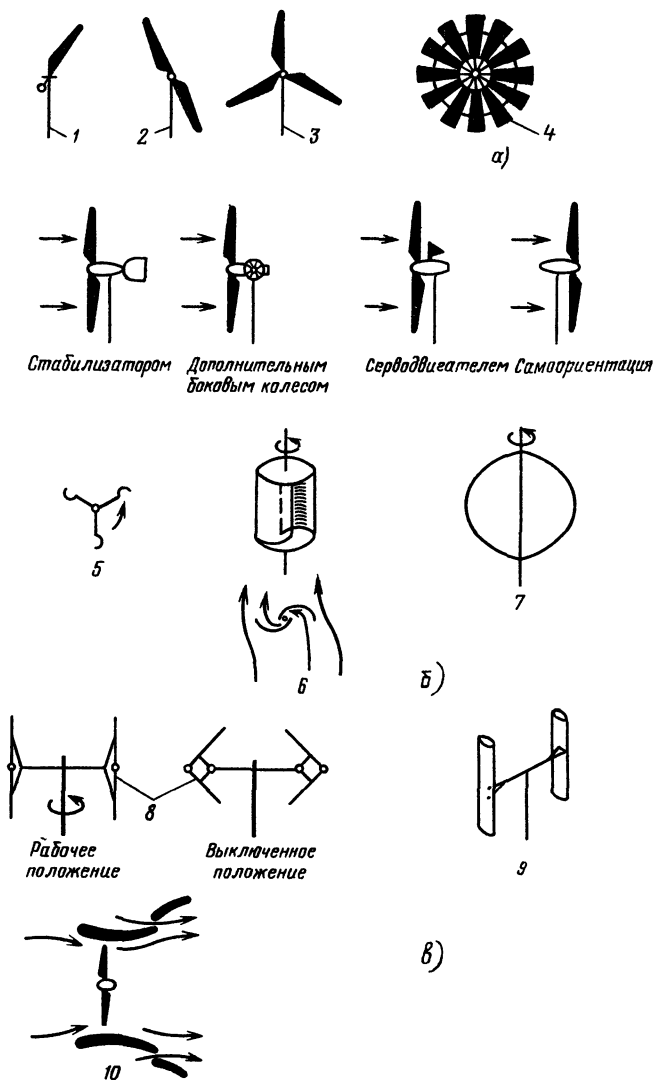


Рис. 9.3. Классификация ветроколес: с горизонтальной осью (а), приведены способы ориентации при переднем расположении ветроколеса; с вертикальной осью (б); с концентраторами (усилителями) ветрового потока (в); 1 — однолопастное колесо; 2 — двухлопастное; 3 — трехлопастное; 4 — многолопастное; 5 — чашечный анемометр; 6 — ротор Савониуса; 7 — ротор Дарье; 8 — ротор Масгрува; 9 — ротор Эванса; 10 — усилитель потока

росника (рис. 9.3). В дальнейшем эти признаки будут рассмотрены более подробно.

1. Ось вращения ветроколеса параллельна или перпендикулярна воздушному потоку? В первом случае установка будет го-

ризонгально-осевой, во втором — обычно вертикально-осевой.

2. Вращающей силой является сила сопротивления или подъемная сила? Установки, использующие силу сопротивления (драг-машины), как правило, вращаются с линейной скоростью, меньшей скорости ветра, а установки, использующие подъемную силу (лифт-машины), имеют линейную скорость концов лопастей, существенно бóльшую скорости ветра. Здесь та же ситуация, как с парусными судами типа яхт, которые могут передвигаться быстрее ветра.

3. Чему равно геометрическое заполнение ветроколеса? Для большинства установок оно определяется числом лопастей. ВЭУ с большим геометрическим заполнением ветроколеса развивают значительную мощность при относительно слабом ветре и максимум мощности достигается при небольших оборотах колеса. ВЭУ с малым заполнением достигают максимальной мощности при больших оборотах и дольше выходят на этот режим. Поэтому первые установки используются, например, в качестве водяных насосов и даже при слабом ветре сохраняют работоспособность, вторые — в качестве электрогенераторов, где требуется высокая частота вращения.

4. Для какой цели предназначена ветроэнергетическая установка? Установки для непосредственного выполнения механической работы часто называют *ветряной мельницей* или *турбиной*, установки для производства электроэнергии, т. е. совокупность турбины и электрогенератора, называют *ветроэлектрогенераторами*, *аэрогенераторами*, а также *установками с преобразованием энергии*.

5. Частота вращения ветроколеса постоянна или зависит от скорости ветра? У аэрогенераторов, подключенных напрямую к мощной энергосистеме, частота вращения постоянна вследствие эффекта автосинхронизации, но такие установки менее эффективно используют энергию ветра, чем установки с переменной частотой вращения.

6. Ветроколесо соединено с электрогенератором напрямую (жесткое сопряжение) или через промежуточный преобразователь энергии, выполняющий роль буфера? Наличие буфера уменьшает последствия флуктуаций частоты вращения ветроколеса, позволяет более эффективно использовать энергию ветра и мощность электрогенератора. Кроме того, существуют частично развязанные схемы соединения колеса с генератором, называемые *мягкосопряженными*. Таким образом, нежесткое соединение наряду с инерцией ветроколеса уменьшают влияние флуктуаций скорости ветра (см. § 9.6) на выходные параметры электрогенератора. Уменьшить это влияние позволяет также упругое соединение лопастей с осью ветроколеса, например с помощью подпружиненных шарниров.

Классификация ветроэлектрогенераторов на основе перечис-

ленных выше признаков представлена на рис. 9.3, который, конечно, не исчерпывает всего многообразия возможных конструкций ветроустановок. Особенно это касается наиболее перспективных установок, использующих специальные устройства для увеличения скорости набегающего ветрового потока.

**Ветроколесо с горизонтальной осью.** Рассмотрим горизонтально-осевые ветроколеса пропеллерного типа. Основной вращающей силой у колес этого типа является подъемная сила. Относительно ветра ветроколесо в рабочем положении может располагаться перед опорной башней или за ней. При переднем расположении ветроколесо должно иметь аэродинамический стабилизатор или какое-либо другое устройство, удерживающее его в рабочем положении. При заднем расположении башня частично затеняет ветроколесо и турбулизирует набегающий на него поток. При работе колеса в таких условиях возникают циклические нагрузки, повышенный шум и флуктуации выходных параметров ветроустановки. Направление ветра может изменяться довольно быстро, и ветроколесо должно четко отслеживать эти изменения. Поэтому в ВЭУ мощностью более 50 кВт для этой цели используются электрические серводвигатели.

В ветроэлектродогенераторах обычно используются двух- и трехлопастные ветроколеса, последние отличаются очень плавным ходом. Электродогенератор и редуктор, соединяющий его с ветроколесом, расположены обычно на вершине опорной башни в поворотной головке. В принципе их удобнее размещать внизу, но возникающие при этом сложности с передачей крутящего момента обесценивают преимущества такого размещения. Многолопастные колеса, развивающие большой крутящий момент при слабом ветре, используются для перекачки воды и других целей, не требующих высокой частоты вращения ветрового колеса.

**Ветроэлектродогенераторы с вертикальной осью.** Ветроэлектродогенераторы с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Кроме того, такая схема позволяет за счет только удлинения вала установить редуктор с генераторами внизу башни.

Принципиальными недостатками таких установок являются: 1) гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за более часто возникающих в них автоколебательных процессов и 2) пульсация крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора. Из-за этого подавляющее большинство ветроэлектродогенераторов выполнено по горизонтально-осевой схеме, однако исследования различных типов вертикально-осевых установок продолжаются.

Наиболее распространенные типы вертикально-осевых установок следующие (см. рис. 9.3).

*Чашечный ротор (анемометр).* Ветроколесо этого типа вращается силой сопротивления. Форма чашеобразной лопасти обеспе-

чивает практически линейную зависимость частоты вращения колеса от скорости ветра.

*Ротор Савониуса.* Это колесо также вращается силой сопротивления. Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы, т. е. отличаются простотой и дешевизной. Вращающий момент создается благодаря различному сопротивлению, оказываемому воздушному потоку вогнутой и выгнутой относительно него лопастями ротора. Из-за большого геометрического заполнения это ветроколесо обладает большим крутящим моментом и используется для перекачки воды.

*Ротор Дарье.* Вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или трех тонких изогнутых несущих поверхностях, имеющих аэродинамический профиль. Подъемная сила максимальна в тот момент, когда лопасть с большой скоростью пересекает набегающий воздушный поток. Ротор Дарье используется в ветроэлектростанциях. Раскручиваться самостоятельно ротор, как правило, не может, поэтому для его запуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя.

*Ротор Масгрива.* Лопасти этого ветроколеса в рабочем состоянии расположены вертикально, но имеют возможность вращаться или складываться вокруг горизонтальной оси при отключении (см. рис. 9.3). Существуют различные варианты роторов Масгрива, но все они отключаются при сильном ветре.

*Ротор Эванса.* Лопасти этого ротора в аварийной ситуации и при управлении поворачиваются вокруг вертикальной оси.

**Концентраторы.** Мощность ветроэнергостановки зависит от эффективности использования энергии воздушного потока. Одним из способов ее повышения является использование специальных концентраторов (усилителей) воздушного потока (см. рис. 9.3). Для горизонтально-осевых ветроэлектростанций разработаны или предложены различные варианты таких концентраторов. Это могут быть диффузоры или конфузоры (дефлекторы), направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади, большей ометаемой площади ротора, и некоторые другие устройства. Широкого распространения в промышленных установках концентраторы пока не получили.

### 9.3. Основы теории ветроэнергетических установок

Ниже рассмотрены принципы действия ветроустановок. Получены соотношения для мощности, крутящего момента, силы сопротивления. В анализе используются линейные приближения. Более строго некоторые вопросы рассмотрены ниже.

**Преобразование энергии ветра.** В отсутствие турбулентности объем воздуха, проходящего в единицу времени через поперечное сечение ветроколеса площадью  $A$  (через ометаемую площадь) (рис. 9.4) обладает кинетической энергией, равной



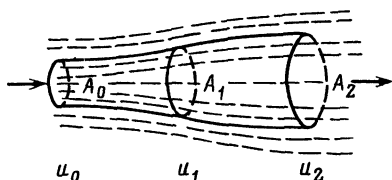
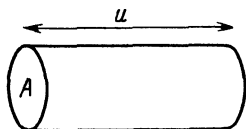


Рис. 9.4. К расчету мощности ветрового потока: масса выделенного объема

$$\rho A u; \text{ кинетическая энергия } \frac{1}{2}(\rho A u) u^2$$

Рис. 9.5. Модель взаимодействия ветрового потока с ветроколесом

$$P_0 = (1/2) (\rho A_1 u_0) u_0^2 = (1/2) \rho A_1 u_0^3. \quad (9.2)$$

Здесь  $\rho$  и  $u_0$  — плотность и скорость набегающего воздушного потока. Таким образом,  $P_0$  есть энергия ветрового потока.

Плотность воздуха  $\rho$  зависит от высоты и метеорологических условий. Скорость ветра увеличивается с высотой, зависит от местных географических условий и в любом случае сильно меняется во времени. Более подробно об этом сказано в § 9.6. Будем считать скорость  $u_0$  и плотность  $\rho$  постоянными во времени и в любом поперечном сечении рассматриваемого воздушного потока. Пример такого течения несжимаемой жидкости рассмотрен в основах механики жидкости (см. гл. 2). На уровне моря плотность воздуха равна примерно  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , а необходимая для эффективной работы ветроустановки скорость ветра — порядка  $10 \text{ м/с}$ . При этих условиях располагаемая энергия ветра  $P_0 = 600 \text{ Вт/м}^2$ . При штормовом ветре  $u_0 \approx 25 \text{ м/с}$ , тогда  $P_0 \approx 10\,000 \text{ Вт/м}^2$ . Таблицы 9.1 и 9.2 дают представление об эффективности работы ветроустановок в различных метеорологических условиях, а в § 9.7 рассмотрена зависимость их эффективности от характеристик ветра.

В теории ветроколеса предполагается, что проходящие через него линии тока не терпят разрыва, а само колесо заменяется тонким пронцаемым диском, при взаимодействии с которым воздушный поток отдает ему часть энергии, в результате давление в потоке и его импульс уменьшаются. Кроме того, в процессе взаимодействия в набегающий ламинарный поток вносятся различные возмущения, но здесь мы ими пренебрегаем. Такая модель, несмотря на целый ряд допущений, чрезвычайно полезна.

На рис. 9.5  $A_1$  — площадь, ометаемая ветроколесом,  $A_0$  и  $A_2$  — площади поперечных сечений проходящего через ветроколесо ветрового потока соответственно до и за ним, причем сечение  $A_0$  расположено за пределами возмущенной ветроколесом области, а сечение  $A_2$  — в месте наименьшей скорости потока. Положение площади сечений  $A_0$  и  $A_2$  можно определить по результатам экспериментальных измерений поля скоростей в окрестности ветроколеса. Непосредственно в сечении  $A_1$  провести такие измерения невозможно из-за вращения ветроколеса.

Действующая на ветроколесо сила  $F_1$  равна изменению количества движения массы проходящего через него в единицу времени воздуха  $\dot{m}$ , т. е. можно считать, что

$$F = \dot{m}u_0 - \dot{m}u_2. \quad (9.3)$$

Эта сила действует на ветроколесо со стороны протекающего через него воздушного потока, который можно считать однородным и имеющим скорость  $u_1$ . Мощность, развиваемая этой силой, т. е. мощность ветроколеса,

$$P = Fu_1 = \dot{m}(u_0 - u_2)u_1. \quad (9.4)$$

Но эта мощность  $P$  есть энергия, теряемая в единицу времени ветровым потоком, взаимодействующим с ветроколесом, которая равна

$$P_{\Psi} = \frac{1}{2} \dot{m}(u_0^2 - u_2^2). \quad (9.5)$$

Приравнявая их друг другу, получаем

$$(u_0 - u_2)u_1 = 1/2(u_0^2 - u_2^2) = 1/2(u_0 - u_2)(u_0 + u_2), \quad (9.6)$$

откуда

$$u_1 = \frac{u_0 + u_2}{2}. \quad (9.7)$$

Таким образом, из линейной теории следует, что скорость воздушного потока в плоскости ветроколеса не может быть меньше половины скорости набегающего потока.

Масса воздуха, проходящего через сечение  $A_1$  в единицу времени, равна

$$\dot{m} = \rho A_1 u_1. \quad (9.8)$$

Тогда (9.4) принимает вид

$$P = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_2), \quad (9.9)$$

а после замены  $u_2$  из (9.7) окончательно

$$P = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - (2u_1 - u_0)) = 2\rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_1). \quad (9.10)$$

Выразим через коэффициент торможения потока  $a$  относительное уменьшение в ветроколесе скорости набегающего потока, т. е.

$$a = (u_0 - u_1)/u_0. \quad (9.11)$$

Тогда

$$u_1 = (1 - a)u_0. \quad (9.12)$$

С учетом (9.7)

$$a = (u_0 - u_2)/(2u_0). \quad (9.13)$$

Коэффициент  $a$  называют также коэффициентом индукции или возмущения.

Подставляя  $u_1$  из (9.12) в (9.10), получаем

$$P = 2\rho A_1 (1-a)^2 u_0^3 [u_0 - (1-a)u_0] = (1/2)\rho A_1 u_0^3 [4a(1-a)^2]. \quad (9.14)$$

Сравнивая это выражение с (9.2), имеем

$$P = C_p P_0, \quad (9.15)$$

где  $P_0$  — мощность набегающего ветрового потока;  $C_p$  — часть этой мощности, передаваемая ветроколесу, или коэффициент мощности, равный

$$C_p = 4a(1-a)^2. \quad (9.16)$$

Вместо коэффициента  $a$  иногда используют коэффициент  $-b = u_2/u_0$ , также называемый *коэффициентом торможения потока* (см. задачу 9.2).

Максимального значения коэффициент  $C_p$  достигает при  $a = 1/3$  (см. задачу 9.1 и рис. 9.6):

$$C_{p_{\max}} = 16/27 = 0,59, \quad (9.17)$$

т. е. в лучшем случае только немногим более половины энергии набегающего ветрового потока можно использовать в ветроустановке. Это объясняется тем, что воздушный поток должен обладать определенной кинетической энергией, чтобы покинуть окрестность ветроколеса. Условие (9.17) называется *критерием Бетца*, которое справедливо для любой энергетической установки, обтекаемой свободным потоком жидкости или газа, например для приливных станций (см. гл. 13). В традиционных гидростанциях турбина обтекается не свободным, а ограниченным стенками водотока потоком, поэтому данный критерий здесь не применим. В лучших промышленных аэрогенераторах коэффициент мощности достигает 0,4 (см. § 9.4). Так как максимальное значение коэффициента мощности равно 0,59, можно считать, что КПД таких генераторов равен  $0,4/0,59 = 68\%$ .

Коэффициент мощности  $C_p$  характеризует эффективность использования ветрогенератором энергии воздушного потока, проходящего через ометаемую ветроколесом площадь  $A_1$ . В невозмущенной области вверх по течению площадь поперечного сечения этого потока равна  $A_0$  (см. рис. 9.5). Удельная мощность ветрового потока, т. е. мощность, снимаемая с единицы его поперечного сечения, будет больше, если поперечным сечением считать сечение  $A_0$ , а не  $A_1$ , так как

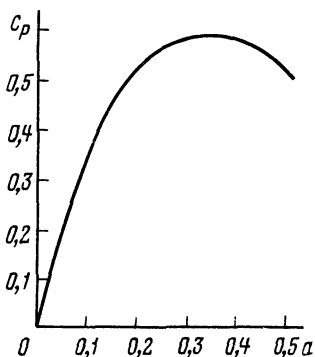


Рис. 9.6. Зависимость коэффициента мощности  $C_p$  от коэффициента торможения потока  $a$ :

$$C_p = 4a(1-a)^2, \quad a = (u_0 - u_1)/u_0, \quad C_{p_{\max}} = 16/27 = 0,59, \quad u_1 = 0 \text{ при } a = 0,5$$

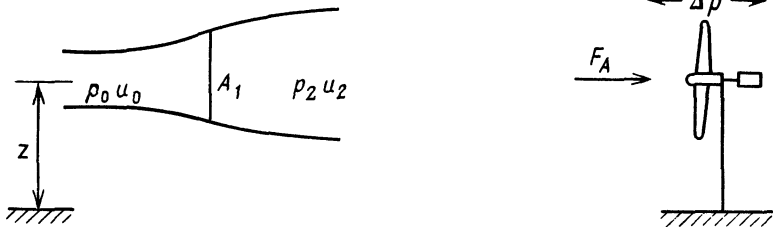


Рис. 9.7. Лобовое давление на ветроколесо:

$u$  — скорость ветрового потока,  $p$  — давление;  $z$  — высота;  $F_A$  — осевая нагрузка;  $\Delta p$  — перепад давлений

$A_0 < A_1$ . Можно показать (см. задачу 9.3), что удельная мощность в этом случае, используемая ветроустановкой, составит  $8/9$  удельной мощности ветрового потока, т. е. максимальное значение КПД ВЭУ равно  $89\%$ . Эту особенность в определении КПД следует помнить при сопоставлении удельных характеристик ветроустановок различных типов.

**Лобовое давление на ветроколесо** (рис. 9.7). Течение идеальной несжимаемой жидкости описывается уравнением Бернулли [см. (2.2) и (2.3)]. Воспользуемся им для определения нагрузки, испытываемой ветроколесом. Эта нагрузка возникает вследствие разности давлений  $\Delta p$  в набегающем потоке непосредственно до и после ветроколеса, которое, как и раньше, будем считать пронизываемым диском площадью  $A_1$ .

Согласно (2.2)

$$\rho_0/\rho_0 + gz_1 + u_0^2/2 = \rho_2/\rho_2 + gz_2 + u_2^2/2. \quad (9.18)$$

Изменения значений  $z$  и  $p$  в рассматриваемом течении пренебрежимо малы в сравнении с изменениями остальных параметров, поэтому можно написать

$$\Delta p = p_0 - p_2 = (u_0^2 - u_2^2)\rho/2, \quad (9.19)$$

где  $\Delta p$  — перепад статического давления на диске;  $\rho u^2/2$  — динамическое давление. Максимальный перепад давления будет в случае, если  $u_2 = 0$  [ср. с (9.13) и рис. 9.6], т. е.

$$\Delta p_{\max} = \rho u_0^2/2, \quad (9.20)$$

а максимальная нагрузка, действующая на ветроколесо, соответственно равна

$$F_{A \max} = \rho A_1 u_0^2/2. \quad (9.21)$$

В горизонтально-осевых установках эта сила действует по оси ветроколеса и называется лобовым давлением.

Действующая на ветроколесо сила равна, очевидно, скорости изменения количества движения набегающего потока, т. е.

$$F_A = \dot{m} (u_0 - u_2). \quad (9.22)$$

Используя (9.8), (9.11) и (9.13), получаем

$$F_A = (\rho A_1 u_1) (2u_0 a) = \rho A_1 (1-a) u_0 (2u_0 a) = \frac{\rho A_1 u_0^2}{2} 4a(1-a). \quad (9.23)$$

В приближении используемой модели член  $\rho A_1 u_0^2/2$  равен силе, действующей на находящийся в потоке непроницаемый диск площадью  $A_1$ . Силу, действующую на конкретное ветроколесо, можно поэтому представить в виде

$$F_A = C_F \rho A_1 u_0^2/2,$$

где  $C_F$  — коэффициент лобового давления, зависящий от параметров ветроколеса, и, как следует из (9.23),

$$C_F = 4a(1-a). \quad (9.24)$$

Здесь согласно (9.13)

$$a = (u_0 - u_1) / u_0 = (u_0 - u_2) / 2u_0. \quad (9.25)$$

Максимальное значение  $C_F = 1$  при  $a = 1/2$ , что соответствует значению  $u_2 = 0$ . Согласно критерию Бетца максимальный КПД ветроколеса достигается при  $a = 1/3$  [см. рис. 9.6 и (9.17)] и ему соответствует значение  $C_F = 8/9$ .

Из-за краевых эффектов коэффициент лобового сопротивления непроницаемого диска на самом деле превышает единицу и равен примерно 1,2. Тем не менее используемая здесь линейная теория показывает, что представление ветроколеса почти непроницаемым диском в теоретических расчетах вполне оправдано. Более того, совершенно неудовлетворительным оказывается представление об обтекании ветроколеса как о течении невозмущенного потока воздуха в промежутках между лопастями. Особенно порочно такое представление при работе ветроколеса с высоким КПД, когда оно оказывает максимальное сопротивление ветровому потоку.

Член  $A_1 u_0^2/2$  в (9.23) и соответственно ветровая нагрузка быстро возрастают с увеличением скорости ветра, и, как правило, ветроколеса не выдерживают нагрузок ветра со скоростью выше 15—20 м/с. Для предупреждения их разрушения в этом случае используют: поворот ветроколеса или его лопастей в нерабочее положение; уменьшение снимаемой мощности и соответственно лобового давления; в ветроколесе неподвижные лопасти такого профиля, который обеспечивает его самоторможение при большой скорости ветра; принудительную остановку ветроколеса. Использование в ветроколесе неподвижных самотормозящихся лопастей, наверное, наиболее просто и дешево обеспечивает безаварийную работу ветроустановки, но при этом не всегда удается достичь высоких значений КПД при нормальных ветровых условиях.

**Крутящий момент.** Для определения крутящего момента на выходном валу ветроколеса можно воспользоваться результатами

расчетов лобового давления. При таком подходе не используется условие сохранения момента количества движения в системе ветроколесо — набегающий поток, хотя очевидно, что воздушный поток будет закручиваться в противоположную вращению ветрового колеса сторону, и при строгом подходе необходимо учитывать эту закрутку потока (см. § 9.5).

Максимальный крутящий момент ветроколеса  $T$ , очевидно, не может превышать значения, равного произведению максимальной действующей на ветроколесо силы на максимальный его радиус  $R$ , т. е.

$$T_{\max} = F_{\max} R. \quad (9.26)$$

Так как [см. (9.21)]

$$F_{\max} = \rho A_1 u_0^2 / 2, \quad (9.27)$$

то

$$T_{\max} = \rho A_1 u_0^2 R / 2. \quad (9.28)$$

В общем случае крутящий момент ветроколеса  $T$  можно представить в виде

$$T = C_T T_{\max}, \quad (9.29)$$

где  $C_T$  — коэффициент крутящего момента.

Ниже, в § 9.4, введен параметр  $Z$ , называемый *быстроходностью ветроколеса* и равный отношению окружной скорости конца лопастей  $v_R$  к невозмущенной скорости набегающего потока  $u_0$ , т. е.

$$Z = v_R / u_0 = R\omega / u_0, \quad (9.30)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения ветроколеса.

Тогда, заменяя в (9.28) значение  $R$  его выражением из (9.30), получаем

$$T_{\max} = \rho A_1 u_0^2 (u_0 Z) / 2\omega = P_0 Z / \omega, \quad (9.31)$$

где  $P_0$  — мощность ветрового потока из (9.2).

Так как мощность на валу есть мощность, развиваемая ветроколесом  $P$ , то

$$P = T\omega. \quad (9.32)$$

Но согласно (9.15)  $P = C_P P_0$ . С учетом уравнений (9.29) и (9.31) уравнение (9.32) принимает вид

$$C_P P_0 = C_T T_{\max} \omega; \quad C_P P_0 = C_T P_0 Z; \quad C_P = Z C_T. \quad (9.33)$$

Заметим, что на практике коэффициенты  $C_P$  и  $C_T$  не постоянны, а являются функциями  $Z$ .

Согласно критерию Бетца (9.17) максимальное значение коэффициента  $C_P$  равно 0,59, поэтому в идеальном случае имеем

$$(C_T)_{\max} = 0,59 / Z. \quad (9.34)$$

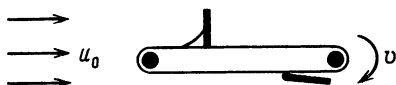
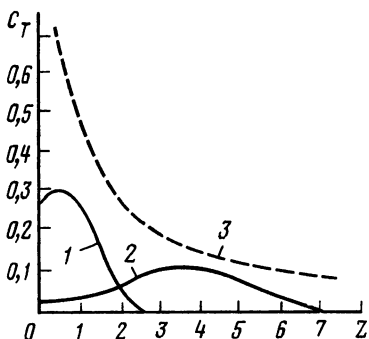


Рис. 9.8. Зависимость коэффициента крутящегося момента  $C_T$  от быстроходности  $Z$  для ветроколес с высоким геометрическим заполнением (1), низким (2) и критерий Бетца (3)

Рис. 9.9. Принципиальная схема ветроустановки, использующей силу лобового сопротивления и состоящей из укрепленных на перемещающемся ремне откидывающихся пластин

На рис. 9.8 представлены характеристики реальных ветроколес. Из рисунка видно, что ветроколеса с высоким геометрическим заполнением развивают большой крутящий момент при относительно низких окружных скоростях, и наоборот, ветроколеса с небольшим заполнением (например, с двумя узкими лопастями) имеют небольшой начальный крутящий момент и даже не всегда могут самостоятельно раскрутиться. С увеличением значений  $z$  коэффициент момента, а следовательно, и сам момент стремятся к нулю. Максимальные значения коэффициента  $C_T$  для обоих типов ветроколес реализуются при высоких скоростях ветра, при которых лобовые давления велики — вплоть до разрушающих. Следует также отметить, что максимальным значениям крутящего момента и КПД соответствуют различные значения  $Z$ . Зависимость коэффициента мощности  $C_p$  от  $Z$  рассматривается в § 9.4.

#### **Ветроустановки, использующие силу лобового сопротивления.**

Идеальная ветроустановка этого типа представляет собой устройство, рабочие поверхности которого перемещаются параллельно вектору скорости набегающего потока (рис. 9.9). Разность давлений на передней и задней поверхностях пластинки, расположенной перпендикулярно набегающему потоку, при игнорировании концевых эффектов определяется уравнением (9.20). Если пластинка площадью  $A$  перемещается со скоростью  $v$ , то действующая на нее максимальная сила лобового сопротивления равна

$$F_{\max} = \rho A (u_0 - v)^2 / 2. \quad (9.35)$$

В реальных установках сила сопротивления  $F_D$  отличается от (9.35), и это отличие учитывается безразмерным коэффициентом

том  $C_D$ , а именно

$$F_D = C_D \rho A (u_0 - v)^2 / 2. \quad (9.36)$$

Энергия, передаваемая пластинке в единицу времени (т. е. мощность), равна

$$P_D = F_D v = C_D \rho A (u_0 - v)^2 v / 2. \quad (9.37)$$

Максимальное значение этой энергии достигается при  $v = u_0 / 3$  и равно

$$P_{D \max} = \frac{4}{27} C_D \rho A u_0^3. \quad (9.38)$$

Коэффициент мощности  $C_P$  определится из (9.15):  $P_{D \max} = C_P P_0 = C_P \rho A u_0^3 / 2$ , откуда

$$C_{P \max} = \frac{4}{27} C_D. \quad (9.39)$$

Значение коэффициента лобового сопротивления  $C_D$  зависит от формы обтекаемого тела и изменяется практически от нуля до 1,5, как, например, для вогнутых чашек стандартного анемометра. Соответствующий этому значению  $C_D$  коэффициент мощности  $C_P$  равен

$$C_{P \max} \approx (4/27)(1,5) = (6/27) = 22\%. \quad (9.40)$$

Напомним, что по критерию Бетца коэффициент мощности идеального ветроколеса равен 59% [см. (9.17)]. В § 9.4 показано, что ветроколеса, использующие подъемную силу, имеют коэффициент мощности порядка 40% и выше, т. е. достаточно близкий к предельному значению. Следовательно, при одинаковых сечениях набегающего потока у ветроколес, использующих силу сопротивления, значения коэффициента мощности почти в 3 раза меньше, чем у ветроколес, использующих подъемную силу, и это различие еще более возрастает из-за возвратных перемещений лопастей в первом случае. Несколько увеличить КПД ветроколес драг-машин можно за счет увеличения числа лопастей и использования направляющих аппаратов, однако на практике первый способ не всегда применим из-за усиления взаимного влияния лопастей друг на друга, снижающего КПД. Поэтому наиболее эффективным способом повышения КПД таких ветроколес является совместное использование силы сопротивления и подъемной силы, что и реализуется в некоторых конструкциях ротора Савониуса.

#### 9.4. Режимы работы ветроколеса

**Быстроходность.** Ветроколесо в отличие от гидротурбины обтекается практически безграничным потоком воздуха, поэтому здесь нет возможности отвести прошедший через ветроколесо



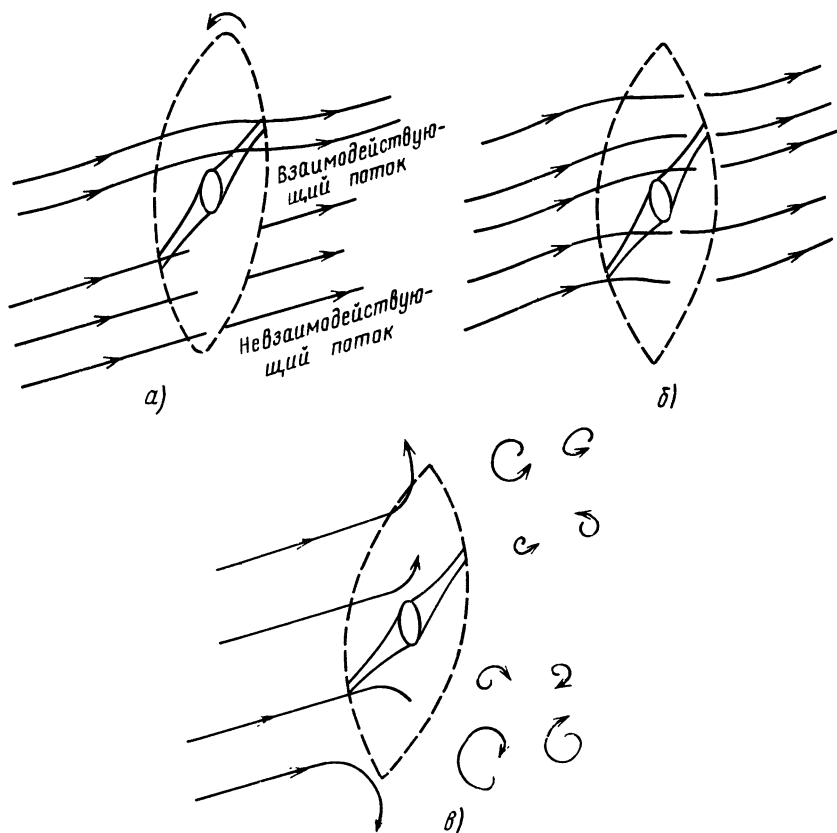


Рис. 9.10. Взаимодействие ветрового потока с ветроколесом при различной частоте его вращения: частота вращения мала, поэтому часть ветрового потока проходит через плоскость ветроколеса, не взаимодействуя с его лопастями (а); частота вращения оптимальна, весь поток взаимодействует с ветроколесом (б); частота вращения слишком велика, в этом случае ветровой поток интенсивно турбулизует, т. е. его энергия рассеивается (в)

воздух за пределы набегающего потока, и это определенным образом ограничивает эффективность ветроустановок. Наиболее существенное ограничение связано с тем, что «отработанный» воздушный поток должен обладать определенной скоростью, чтобы покинуть окрестность ветроколеса, не создавая помех набегающему потоку. Согласно критерию Бетца ветроколесо может преобразовать не более 59% энергии набегающего потока, но представленный в § 9.3 вывод этого критерия не позволяет определить условий работы ветроколеса, необходимых для достижения такого энергосъема. Данный раздел посвящен определению этих условий и их качественному анализу.

Эффективность преобразования ветроколесом энергии ветрового потока будет ниже оптимальной, если (рис. 9.10): 1) лопасти расположены так тесно или ветроколесо вращается так быстро, что каждая лопасть движется в потоке, турбулизованным расположенными впереди лопастями; 2) лопасти расположены так редко или ветроколесо вращается так медленно, что значительная часть воздушного потока будет проходить через поперечное сечение ветроколеса, практически не взаимодействуя с его лопастями.

Отсюда следует, что для достижения максимальной эффективности частоты вращения ветроколеса заданной геометрии должна как-то соответствовать скорости ветра.

Эффективность работы ветроколеса зависит от соотношения двух характерных времен: времени  $\tau_b$ , за которое лопасть перемещается на расстояние, отделяющее ее от соседней лопасти, и времени  $\tau_w$ , за которое создаваемая лопастью область сильного возмущения переместится на расстояние, равное ее характерной длине. Время  $\tau_w$  зависит от размера и формы лопастей и изменяется обратно пропорционально скорости ветра.

Характерное время  $\tau_b$  для  $n$ -лопастного ветроколеса, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ , равно

$$\tau_b \approx \frac{2\pi}{n\omega}. \quad (9.41)$$

Характерное время существования в плоскости ветроколеса создаваемого лопастью возмущения  $\tau_w$  примерно равно

$$\tau_w \approx d/u_0. \quad (9.42)$$

Здесь  $u_0$  — скорость набегающего потока воздуха;  $d$  — характерная длина возмущенной лопастью области.

Эффективность использования ветроколесом энергии ветра максимальна, когда на конце лопастей выполняется условие  $\tau_w \approx \tau_b$  или с учетом (9.41) и (9.42) условие

$$n\omega/u_0 \approx 2\pi/d. \quad (9.43)$$

Используя выражение для коэффициента быстроходности (9.30)

$$Z = \frac{\text{Скорость конца лопасти}}{\text{Скорость ветра}} = \frac{R\omega}{u_0} \quad (9.44)$$

и домножая обе части (9.43) на радиус ветроколеса  $R$ , получаем условие, определяющее максимальную эффективность его работы:

$$Z \approx \frac{2\pi}{n}(R/d). \quad (9.45)$$

Из общих соображений можно ожидать, что  $d \approx kR$  и  $k \approx 1$ , тогда оптимальная быстроходность ветроколеса

$$Z_0 \approx (2\pi/kn). \quad (9.46)$$

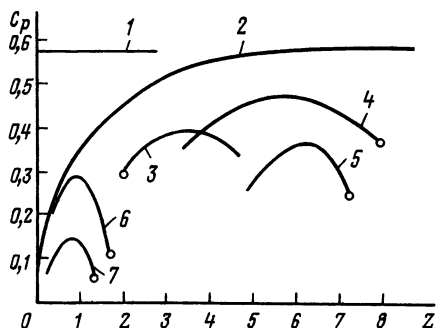


Рис. 9.11. Зависимость коэффициента мощности  $C_p$  от быстроходности  $Z$ :  
 1 — критерий Бетца, 59%;  
 2 — критерий Глауэрта; 3 — трехлопастное ветроколесо; 4 — двухлопастное; 5 — вертикально-осевые ветроколеса типа Дарье; 6 — многолопастные ветронасосы; 7 — ротор Савониуса

Практика показывает, что в действительности  $k \approx 1/2$ , поэтому для  $n$ -лопастного ветроколеса оптимальная быстроходность

$$Z_0 \approx 4\pi/n. \quad (9.47)$$

Например, для двухлопастного ветроколеса коэффициент мощности  $C_p$  максимален при  $Z_0 \approx 4\pi/2 \approx 6$ , а для четырехлопастного — при  $Z_0 \approx 3$ .

Приведенные выше рассуждения не совсем строги, но тем не менее полученные с их помощью результаты вполне достоверны. Например, у ветроколеса с тщательно спрофилированными лопастями оптимальный коэффициент быстроходности примерно на треть выше даваемого формулой (9.47).

В § 9.5 показано, что от значения быстроходности зависит угол атаки, под которым обтекает лопасть. Из рис. 9.13, а следует, что  $Z = \operatorname{tg} \varphi$ . Поэтому условием максимально эффективной работы конкретного ветроколеса является обеспечение постоянства оптимального для него угла  $\varphi$  при любой скорости ветра.

При выводе критерия Бетца (см. § 9.3) не учитывались динамические эффекты взаимодействия потока с ветроколесом. Одним из наиболее ценных здесь результатов является критерий Глауэрта, связывающий максимальное значение коэффициента мощности  $C_p$  с быстроходностью  $Z$ . На рис. 9.11 представлены критерии Бетца и Глауэрта, а также зависимость  $C_p$  от  $Z$  для различных типов ветроколес. При проектировании очень быстроходных колес следует учитывать, что скорость обтекания конца лопастей должна быть меньше скорости звука (330 м/с) во избежание образования ударных волн, что, например, возможно для достаточно совершенного двухлопастного ветроколеса при скорости ветра около 50 м/с.

Быстроходность ветроколеса является, возможно, самым важным для их характеристики параметром, зависящим от трех основных переменных: радиуса ометаемой ветроколесом окружности, его угловой скорости вращения и скорости ветра. Как

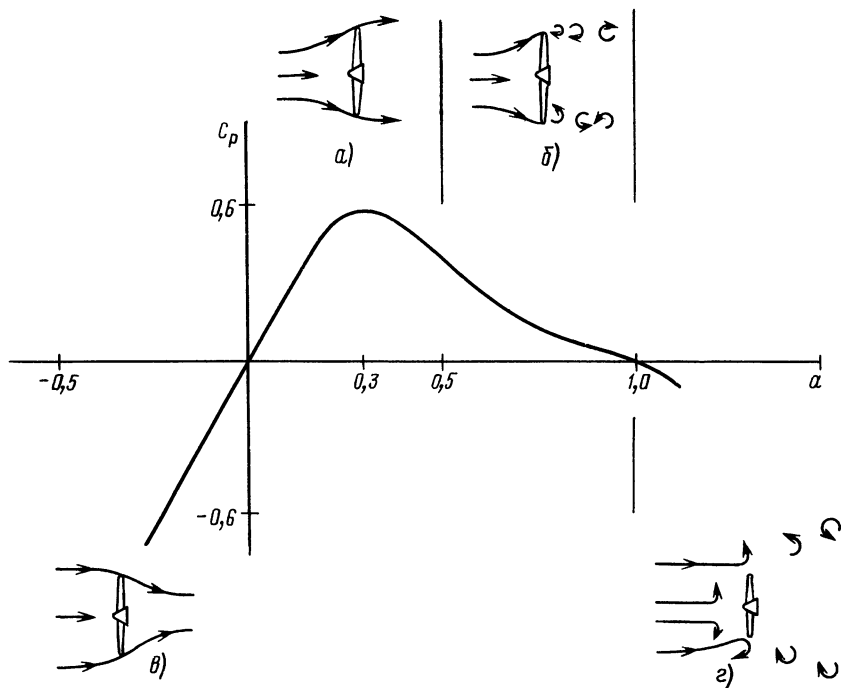


Рис. 9.12. Зависимость коэффициента мощности  $C_p$  от коэффициента потери скорости  $a = 1 - u_1/u_0$  при различных режимах работы ветроколеса: нормальный режим работы ветроколеса в ВЭУ (см. рис. 9.6) (а); малозэффективный режим работы ветроколеса из-за сильной турбулентности ветрового потока (б); работа ветроколеса в режиме воздушного винта, когда энергия передается от винта потоку (в); работа ветроколеса в режиме воздушного винта при реверсе тяги (торможение самолета во время послепосадочного пробега) (г)

безразмерная величина он является основным параметром подобия при исследовании и конструировании ветроэлектрогенераторов.

**Обобщение линейной теории на другие режимы работы ветроколеса.** На рис. 9.6 показана зависимость коэффициента мощности  $C_p$  от параметра  $a$  в диапазоне  $0 < a < 0,5$ , в котором справедлива линейная теория. В этом диапазоне выполняется соотношение (9.16), т. е.

$$C_p = 4a(1 - a)^2, \quad (9.48)$$

где согласно (9.11)

$$a = 1 - u_1/u_0. \quad (9.49)$$

Обобщение линейной теории позволяет расширить диапазон ее применимости и определять с единых позиций характеристики ветроколес и воздушных винтов (авиационных пропеллеров).

На рис. 9.12 представлены характерные режимы работы ветроколеса или пропеллера в зависимости от параметра  $a$ , а именно: 1)  $a < 0$ ,  $C_p$  отрицателен. Это режим работы авиационного пропеллера, создающего тягу. В этом режиме осевая нагрузка пропеллера направлена в сторону набегающего потока, увлекая вперед летательный аппарат; 2)  $0 < a < 0,5$ ,  $C_p$  в этом диапазоне положителен и достигает максимума. При  $a=0$   $u_1=u_0$  и  $C_p=0$ . Это режим свободного вращения ветроколеса в отсутствие нагрузки. При нагружении ветроколеса скорость  $u_1$  уменьшается и коэффициент мощности становится положительным. Максимального значения он достигает при  $a=1/3$ , когда  $u_1=2u_0/3$  [см. (9.17) и (9.12)]. При  $a=1/2$  из линейной теории следует максимум значения осевой нагрузки (9.24) и коэффициент крутящего момента  $C_T=1$ ; 3)  $0,5 < a < 1$ ,  $C_p$  постоянно уменьшается до нуля. Так как из (9.25)  $a=(u_0-u_2)/2u_0$ , то уже при  $a=0,5$   $u_2=0$ , т. е. в этом диапазоне изменения  $a$  линейная теория, вообще говоря, неприменима. На практике границу  $a=0,5$  можно считать началом турбулентного режима обтекания ветроколеса, при котором из-за нарушения линейной зависимости частоты его вращения от скорости ветра коэффициент мощности падает. При  $a=1$   $C_p=0$ , ветроколесо вращается, интенсивно турбулизируя поток и практически не создавая полезного момента на валу. На практике такой режим возникает при отрывном обтекании лопастей ветроколеса; 4)  $a > 1$ , в этой области скорость  $u_1$  отрицательна. В таком режиме работают, например, воздушные винты самолета при его торможении после посадки за счет реверса тяги, осуществляемого изменением угла тангажа лопастей винта. Такая работа винтов сопровождается интенсивным вихреобразованием в набегающем воздушном потоке.

### 9.5. Метод линий тока

При обтекании воздушным потоком лопастей ветроколеса силы, действующие в различных ее сечениях, очевидно, различны. Для определения характеристик горизонтально-осевых ветроколес необходимо знать распределение этих сил по длине лопасти. На рис. 9.13 представлены основные параметры, определяющие взаимодействие потока с отдельным элементом лопасти. Сечение лопасти, находящееся на расстоянии  $r$  от оси вращения, имеет скорость  $r\omega$ , направленную перпендикулярно скорости набегающего потока  $u_1$ . В результате относительно данного сечения лопасти воздушный поток имеет скорость  $v_r$ , при этом, как правило,  $v_r \gg u_0$ ;  $\gamma$  — угол заклинивания;  $\alpha$  — угол атаки (угол между направлением набегающего потока и хордой сечения лопасти);  $\varphi = \gamma + \alpha$ . Напомним, что  $\varphi = u_1/(R\omega) = Z$  — быстротходность ветроколеса.

По определению  $F_D$  — сила лобового сопротивления, дей-

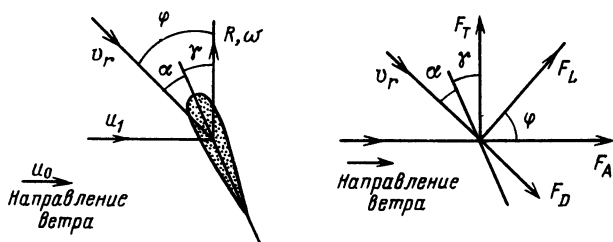


Рис. 9.13. Переменные теории линий тока. Скорость невозмущенного ветрового потока  $u_0$ ; скорость потока в плоскости ветроколеса  $u_1$ ; скорость потока относительно лопасти  $v_r$ ;  $\alpha$  — угол атаки;  $\gamma$  — угол установки лопасти;  $\operatorname{tg} \varphi = u_1(R\omega) = Z$  — быстроходность; сила лобового сопротивления  $F_D$ , параллельная скорости  $v_r$ ; проекции подъемной силы  $F_L$ : на ось вращения  $F_A$ , перпендикулярно ей  $F_T$

ствующая параллельно вектору скорости  $v_r$ ,  $F_L$  — подъемная сила, перпендикулярная скорости  $v_r$ . Действующая по направлению ветра осевая сила  $F_A$  и перпендикулярная ей тангенциальная сила  $F_T$  связаны с силами  $F_D$  и  $F_L$  соотношениями

$$F_A = F_L \cos \varphi + F_D \sin \varphi, \quad (9.50)$$

$$F_T = F_L \sin \varphi - F_D \cos \varphi. \quad (9.51)$$

Метод линий тока применительно к обтеканию ветроколеса предполагает, что набегающий поток можно представить совокупностью не взаимодействующих между собой кольцевых потоков, каждый из которых обтекает находящийся в нем элемент лопасти. Этот метод позволяет построить достаточно аккуратную физическую модель обтекания ветроколеса.

### 9.6. Характеристики ветра

**Основные метеорологические данные.** Во всех странах имеются метеорологические службы, занимающиеся регистрацией и распространением метеосводок, включающих в том числе и данные о направлении и силе ветра. Работа национальных метеослужб координируется находящейся в Женеве Всемирной метеорологической организацией. Следует заметить, что даже наиболее оснащенные метеостанции непрерывного наблюдения регистрируют лишь наиболее важные атмосферные параметры. Интересующие нас параметры ветра регистрируются, как правило, на одной стандартной высоте 10 м на метеостанциях вблизи аэропортов и городов, т. е. мест, возможно, наиболее защищенных от ветра. Поэтому эти данные можно использовать лишь для грубой оценки ветроэнергетических ресурсов рассматриваемого района, но их недостаточно для принятия конкретных технических решений, как, например, выбор оптимальной конструкции ветроустановки. Для этого, как правило, необходимы более детальные наблюдения в большем числе точек местности и на разных высотах в различные месяцы года. Результаты этих наблюдений

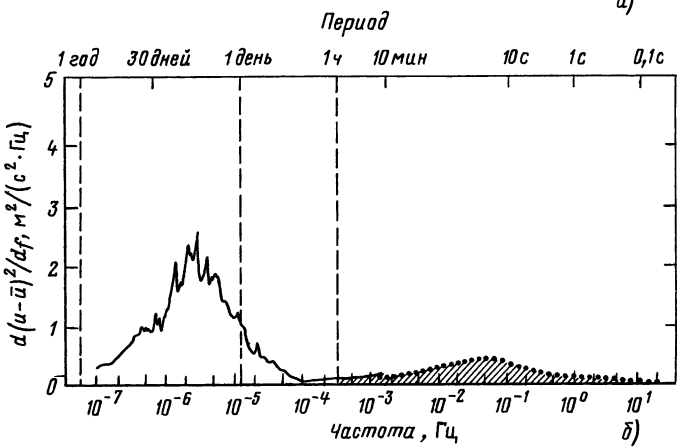
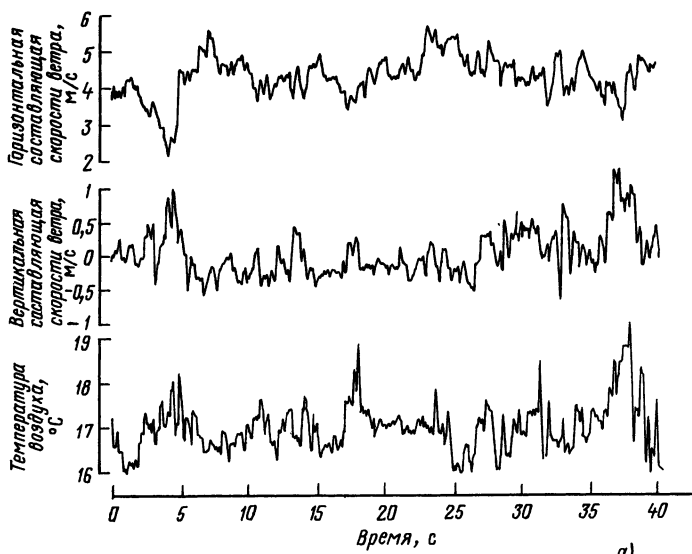


Рис. 9.14. Образец ленты с непрерывной записью горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и температуры воздуха самопишущим анемометром. Следует обратить внимание на положительный коэффициент корреляции между температурой и вертикальной составляющей скорости ветра и отрицательный коэффициент корреляции между составляющими скорости (а). Амплитудно-частотная характеристика порывов ветра (среднеквадратичного отклонения скорости ветра от ее среднего значения  $u$  (б)). Заштрихованная область соответствует информации, теряемой при осреднении за интервал времени более 1 ч

можно сравнить со стандартными метеоданными и в дальнейшем учитывать корреляцию между ними.

Скорость ветра классифицируется метеослужбами по исторически сложившейся шкале Бофорта, в основе которой лежат

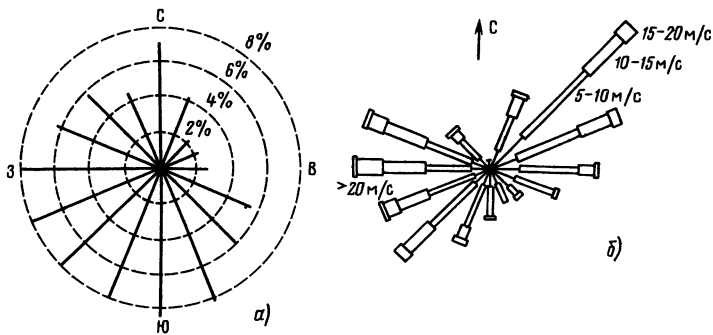


Рис. 9.15. Роза ветров. Данные только о направлении ветра (а). Радиальные линии указывают часть времени года (в процентах), в течение которого ветер дует с данного направления (всего выделено 16 направлений, измерения проводились на высоте 13 м). Данные о направлении и силе ветра (б). Часть времени года, в течение которого ветер имеет скорость в некотором диапазоне, обозначена соответствующей длиной прямоугольника

визуальные наблюдения (табл. 9.1). Скорость ветра при стандартных метеорологических измерениях определяется осреднением за 10-минутный отрезок времени показаний анемометра, находящегося на 10-метровой высоте. Эти измерения могут повторяться каждый час, но обычно они проводятся значительно реже, поэтому по ним трудно судить о флуктуациях скорости ветра и его направления, что необходимо для расчета характеристик ветроустановок. Для непрерывного измерения скорости ветра можно использовать специальные анемометры, но они тоже довольно инерционны. Типичный образец непрерывной записи скорости ветра представлен на рис. 9.14, а. На рис. 9.14, б приведена частотная характеристика (спектр) этого сигнала.

Направление ветра определяется стороной света, откуда дует ветер. Метеоданные о направлении ветра обычно представляют в виде розы ветров (рис. 9.15, а), показывающей среднюю скорость ветра в различных направлениях. На розе ветров вместо средней скорости могут быть показаны для каждого направления распределения ветра по скорости (рис. 9.15, б). Информация о направлении ветра чрезвычайно важна, когда ветроустановки размещают в горной местности, вблизи зданий или других ветроустановок, т. е. в тех случаях, когда возможно их затенение при некоторых направлениях ветра.

**Зависимость параметров ветра от высоты.** Скорости ветра на разных высотах различны, естественно, различны и воздействия ветра на ветроколеса, расположенные на разной высоте. На рис. 9.16 показано типичное распределение скорости ветра по высоте  $z$  с уровня земли до высоты порядка 100 м. На поверхности земли ( $z=0$ ) скорость ветра всегда равна нулю. Затем до высоты, равной примерно высоте расположенных в данном месте



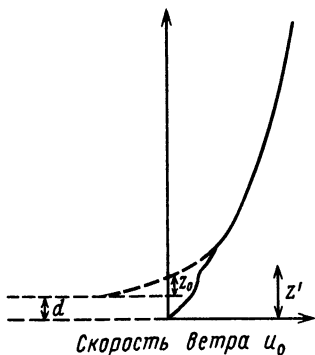


Рис. 9.16. Зависимость скорости  $u_0$  ветра от высоты над поверхностью земли [см. (9.52)]:  
 $z'$  — высота местных препятствий

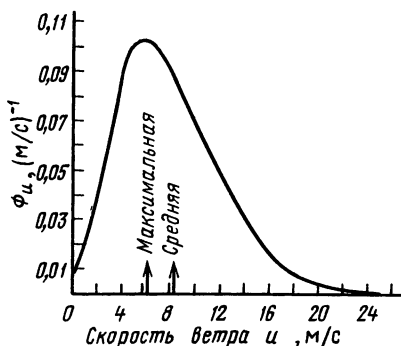


Рис. 9.17. Функция распределения скорости ветра (распределение плотности вероятности)

различных препятствий (зданий, деревьев и т. п.), скорость ветра увеличивается очень сложным образом, при этом его направление может изменяться практически случайно. Выше этой области зависимость скорости ветра от высоты имеет вид

$$z - d = z_0 \exp(u_2/V), \quad (9.52)$$

или в явном виде относительно  $u_z$

$$u_z = V \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right). \quad (9.53)$$

Здесь  $d$  — смещение нулевого уровня, значение которого несколько меньше высоты местных препятствий;  $z_0$  — высота препятствий относительно смещенного нулевого уровня;  $V$  — характерная скорость. Для более детального ознакомления с особенностями параметров ветра в приземном слое следует обратиться к работам по метеорологии, однако основной вывод, понятный и из изложенного, состоит в том, что ветроколесо должно устанавливаться достаточно высоко над местными препятствиями, чтобы набегающий на него ветровой поток был сильным, однородным и с минимальными флуктуациями скорости и направления.

Наилучшим местом для размещения ветроустановки является гладкая, куполообразная, ничем не затененная возвышенность. Вообще желательно, чтобы ветроустановка в радиусе нескольких сотен метров была окружена полями или водной поверхностью.

Как правило, головки ветроустановок находятся на высоте от 5 до 50 м. Для определения скорости  $u_z$  на этих высотах часто используют аппроксимационную формулу, в которую входит значение стандартной скорости ветра  $u_s$ , измеренное на высоте 10 м, а именно

$$u_z = u_s \left( \frac{z}{10 \text{ м}} \right)^{b'}. \quad (9.54)$$

Для открытых мест параметр  $b' = 1/7 = 0,14$ . Чем меньше значение параметра  $b'$ , тем меньше будут различаться нагрузки, испытываемые лопастью ветроколеса в нижнем и верхнем положениях. Очевидно, что значения параметра  $b'$  различны в разное время года и даже в течение одного дня, поэтому (9.54) следует пользоваться очень осмотрительно, особенно для высот  $z > 50$  м.

**Изменение параметров ветра во времени.** В большинстве прикладных задач ветроэнергетики гораздо важнее знать не суммарное количество энергии, которое может выработать ветроустановка, например, за год, а ту мощность, которую она может обеспечивать постоянно. При сильном ветре, большем, например, 12 м/с, ветроустановки вырабатывают вполне достаточно электроэнергии, а зачастую ее приходится сбрасывать или запасать. Трудности, естественно, возникают в периоды длительного затишья или слабого ветра. Поэтому для ветроэнергетики является законом считать районы со средней скоростью ветра менее 5 м/с малопригодными для размещения ветроустановок, а со скоростью более 8 м/с — очень хорошими. Но независимо от этого во всех случаях требуется тщательный выбор параметров ветроустановки применительно к местным метеоусловиям. Прежде чем перейти к дальнейшему теоретическому анализу, рассмотрим необходимую для этого методику анализа параметров ветра на следующем примере.

*Пример 9.1. Анализ результатов измерений скорости ветра на острове Норт Роналдсэй.* Анемометр установлен на высоте 10 м на открытом месте вблизи предполагаемого места установки ветроэлектрогенератора. Ежедневно в течение года проводились пять 10-минутных замеров скорости ветра: в 9 ч, 12 ч, 15 ч, 18 ч и в 21 ч. В табл. 9.3 представлены частично результаты этих измерений и их обработки.

Процедура обработки результатов измерений следующая.

1. Результаты измерений скорости ветра объединяются в группы с интервалом  $\Delta u = 1$  м/с, т. е. в группы со скоростью от 0,0 до 0,9 м/с, от 1,0 до 1,9 м/с и т. д. Общее число измерений  $N = 1763$ , при этом 62 измерения были отброшены как явно ошибочные.

2. В каждой группе подсчитывается число измерений и определяется  $\Delta N(u)/\Delta u$  (в табл. 9.3 она обозначена  $dN/du$ ). Величина  $\Delta N(u)/\Delta u$  — число измерений в единичном скоростном интервале — *плотность функции распределения скорости ветра*. При этом следует помнить, каков скоростной интервал  $\Delta u$  (в рассматриваемом случае  $\Delta u = 1$  м/с, но часто его выбирают большим).

3. Определяется величина  $\Delta N(u)/N = \Phi_u$  — вероятностное распределение скорости ветра. На рис. 9.17 представлена зависимость  $\Phi_u$  от  $u$ . Значение функции  $\Phi$  обратно пропорционально скоростному интервалу. Произведение  $\Phi_u \Delta u$  можно интерпретировать как часть времени года, в течение которого скорость ветра имеет значения, заключенные в интервале от  $u$  до  $u + \Delta u$ .

4. Среднее значение скорости ветра  $u_m$  определяется равенством  $u_m \Sigma \Phi_u = \Sigma \Phi_u u$  при условии, что функция  $\Phi_u$  нормализована так, что  $\Sigma \Phi_u \Delta u = 1$ . Сред-

Таблица 9.3. Статистический анализ результатов измерений скорости ветра (к примеру 9.1)

$u'$ , м/с	$dN/du$ , (м/с) <sup>-1</sup>	$\Phi_{u'}$ , (м/с) <sup>-1</sup>	$\Phi_{u \geq u'}$	$\Phi_u u$	$u^3$ , (м/с) <sup>3</sup>	$\Phi_u u^3$ , (м/с) <sup>2</sup>	$P_u$ , кВт/м <sup>2</sup>	$P_u \Phi_u$ , (Вт/м <sup>2</sup> ) (м/с) <sup>-1</sup>
26	1	0,000	0,000	0,000	17 576	0,0	11,4	0,0
25	1	0,001	0,001	0,025	15 625	15,6	10,2	10,2
24	1	0,001	0,002	0,024	13 824	20,7	9,0	9,0
23	2	0,002	0,004	0,046	12 167	18,3	7,9	15,8
22	4	0,002	0,006	0,044	10 648	21,3	6,9	13,8
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
8	160	0,091	0,506	0,728	512	46,6	0,3	27,3
7	175	0,099	0,605	0,693	343	340	0,2	19,8
6	179	0,102	0,707	0,612	216	22,0	0,1	10,2
5	172	0,098	0,805	0,805	125	12,3	0,1	9,8
4	136	0,077	0,882	0,882	64	4,9	0,0	0,0
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
0	12	0,007	—	0	0	—	0	0
Всего	1763	1,000	—	8,171	—	1044,0	—	—

Примечание. Наиболее вероятная скорость 6,2 м/с,  $u_m = 8,2$  м/с;  $(\bar{u}_3)^{1/3} = 10,1$  м/с.

нее значение скорости  $u_m$ , показанное на рис. 9.17, равно 8,2 м/с. Это значение больше наиболее вероятного значения скорости (6,2 м/с), соответствующего максимуму вероятностного распределения.

5. Для определения вероятности  $\Phi_{u > u'}$  появления ветра со скоростью  $u$ , большей некоторой заданной величины  $u'$ , следует сложить вероятности всех скоростных интервалов  $\Phi_u \Delta u$ , в которых  $u > u'$ . Другая интерпретация вероятности  $\Phi_{u > u'}$  — часть времени года, в течение которого будут ветры со скоростью, большей  $u'$ . Вероятность  $\Phi_{u > u'}$ , как нетрудно заметить, — безразмерная величина. Ее график представлен на рис. 9.18.

6. Мощность ветрового потока единичного сечения (удельная мощность)  $P_0 = (1/2) \rho u^3$ . Если  $\rho = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>, то  $P_0 = k u^3$ , где  $k = 0,65$  Вт·м<sup>-2</sup> (м/с<sup>-1</sup>)<sup>-3</sup>. Очевидно, что  $P_0 \Phi_u$  есть функция распределения энергии ветра (рис. 9.19). Она имеет максимум при  $u = 12,5$  м/с, т. е. при скорости ветра, в 2 раза больше наиболее вероятной скорости, равной 6,2 м/с.

7. На рис. 9.20 показана зависимость мощности ветрового потока единичного сечения от вероятности  $\Phi_{u > u'}$ , которая позволяет определить вероятность ожидания ветрового потока заданной мощности.

Представленный в примере 9.1 анализ основан на статистической обработке результатов систематических измерений скорости ветра в течение года. Точно такую же методику можно использовать и при анализе данных непрерывной записи скорости ветра за более короткий промежуток времени, аналогичных представленным на рис. 9.14, б.

Следует обратить внимание на флуктуации скорости ветра с частотой порядка  $1/10$  с<sup>-1</sup>. Флуктуации такой частоты не только значительны по величине (см. рис. 9.14, б), но и вызы-

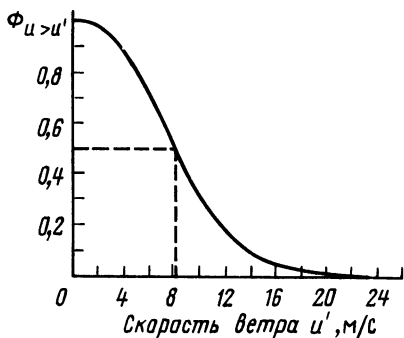


Рис. 9.18. Функция вероятности скорости ветра, большей  $u'$  (для плотности вероятности, вычисленной по рис. 9.17)

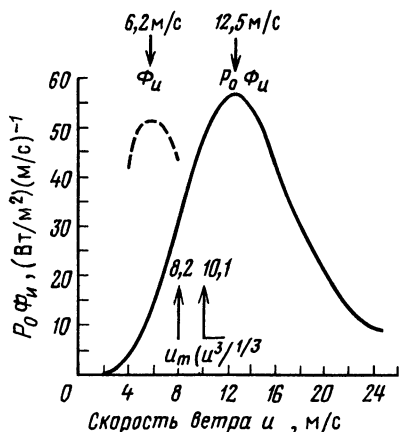


Рис. 9.19. Функция распределения энергии ветра (см. рис. 9.17)

вают наиболее опасные напряжения в элементах конструкции ветроустановки. Характерным масштабом для этих флуктуаций скорости ветра является интенсивность турбулентных пульсаций, равная отношению стандартного отклонения скорости ветра к ее среднему значению, т. е. можно считать, что кратковременные порывы ветра (в пределах нескольких минут) имеют характер турбулентных пульсаций.

**Характерные функции распределения скорости ветра.** Представленный в примере 9.1 анализ характеристик ветра состоял в математической обработке массива экспериментальных данных. Этот анализ существенно упростился бы, если бы мы имели для функции распределения вероятности скорости ветра  $\Phi_u$  аналитическое выражение, соответствующее экспериментальным данным. В этом случае, во-первых, резко сократилось бы необходимое количество замеров скорости ветра и, во-вторых, появилась бы возможность аналитического расчета характеристик ветроустановок.

Используя введенные выше обозначения, напишем

$$\Phi_{u > u'} = \int_{u=u'}^{\infty} \Phi_u(u) du = 1 - \int_0^{u'} \Phi_u du, \quad (9.55)$$

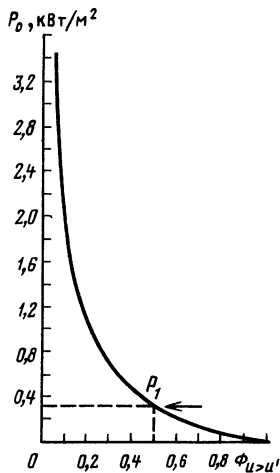


Рис. 9.20. Зависимость удельной мощности ветрового потока от вероятности  $\Phi_{u > u'}$ ,  $P_1$  — мощность при средней скорости ветра 8,2 м/с

откуда следует

$$\frac{d\Phi_{u>u'}}{du'} = -\Phi_u. \quad (9.56)$$

Практика показывает, что двухпараметрическая показательная функция достаточно хорошо аппроксимирует экспериментальные данные. Одной из таких часто используемых функций является функция Вейбулла, получаемая из выражения для  $\Phi_{u>u}$  в форме

$$\Phi_{u>u'} = \exp \left[ -\left(\frac{u'}{c}\right)^k \right], \quad (9.57)$$

или

$$\Phi_u = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ -\left(\frac{u}{c}\right)^k \right]. \quad (9.58)$$

Очень хорошее соответствие экспериментальным данным получается при значениях параметра  $k=1,8 \div 2,3$  и параметра  $c$ , близкого к значению средней скорости ветра  $u_m$ .

Во многих случаях выражение (9.58) можно еще более упростить — свести к однопараметрическому так называемому *распределению Рэля* (или  $\chi$ -квадратичному распределению), полагая  $k=2$ , а именно

$$\Phi_u = \frac{2u}{c^2} \exp \left[ -\left(\frac{u}{c}\right)^2 \right]. \quad (9.59)$$

Выразим среднее значение скорости ветра  $\bar{u}$  через функцию вероятности  $\Phi_u$ :

$$\bar{u} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_u u du}{\int_0^{\infty} \Phi_u du}. \quad (9.60)$$

Подставляя в (9.60), например, функцию Вейбулла, получаем

$$\bar{u} = \frac{\int_0^{\infty} u u^{k-1} \exp[-(u/c)^k] du}{\int_0^{\infty} u^{k-1} \exp[-(u/c)^k] du}. \quad (9.61)$$

Обозначим  $(u/c)^k = v$ , тогда  $dv = (k/c^k) u^{k-1} du$  и уравнение (9.61) принимает вид

$$\bar{u} = \frac{c \int_0^{\infty} v^{1/k} \exp(-v) dv}{\int_0^{\infty} \exp(-v) dv}. \quad (9.62)$$

Здесь знаменатель равен единице, а числитель — стандартная функция, именуемая гамма-функцией или факториалом и обозначаемая так:

$$\Gamma(z+1) = z! = \int_{v=0}^{\infty} v^z e^{-v} dv. \quad (9.63)$$

Так как аргумент в гамма-функции принято обозначать  $(z+1)$ , а не  $z$ , то (9.62) следует представить в виде

$$\bar{u} = c \Gamma(1 + 1/k) = c [(1/k)!]. \quad (9.64)$$

Используя известные свойства гамма-функции, нетрудно вычислить среднее значение переменной  $u^n$ , где  $n$  — целое или дробное число. В общем случае для функции Вейбулла имеем

$$\bar{u}^n = c^n \Gamma(1 + n/k). \quad (9.65)$$

При  $n=3$  имеем

$$\bar{u}^3 = c^3 \Gamma(1 + 3/k), \quad (9.66)$$

откуда можно получить выражение для энергии ветра.

Значения параметров  $c$  и  $k$  определяются на этапе аппроксимации конкретных данных метеонаблюдений распределением Вейбулла. Но если, например, известны  $\bar{u}$  и  $\bar{u}^3$ , то параметры  $c$  и  $k$  определяются системой уравнений (9.64) и (9.66). Современные методы первичной обработки метеоинформации позволяют достаточно просто определять  $\bar{u}$  и  $\bar{u}^3$ , не обращаясь к результатам многочисленных отдельных измерений.

Еще один способ определения  $c$  и  $k$  основан на измерении  $\bar{u}$  и стандартного отклонения (дисперсии)  $u$  от  $\bar{u}$ , что позволяет определить величину  $\overline{u^2} - \bar{u}^2$ , а следовательно, и  $\bar{u}^2$ .

*Пример 9.2. Некоторые свойства распределения Рэлея.* Покажите, что для распределения Рэлея выполняются следующие равенства:

- 1)  $\Phi_{u > u'} = \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{u'}{\bar{u}}\right)^2\right]$ ;
- 2)  $(\bar{u}^3)^{1/3} = 1,24\bar{u}$ ;
- 3)  $\Phi_u$  максимальна при  $u = (2/\pi)^{1/2} \bar{u} = 0,80\bar{u}$ ;
- 4)  $\Phi_u u^3$  максимальна при  $u = 2(2/\pi)^{1/2} \bar{u} = 1,60\bar{u}$ .

*Решение.* Из (9.62) при  $k=2$  следует

$$\bar{u} = c \Gamma(1 + 1/2) = c [(1/2)!], \quad (9.67)$$

где по определению

$$(1/2)! = \int_0^{\infty} u^{1/2} e^{-u} du,$$

и, подставляя известное значение этого интеграла  $(1/2)! = \sqrt{\pi}/2$  в (9.67), получаем

$$c = 2\bar{u}/\sqrt{\pi}. \quad (9.68)$$

Распределение Рэлея (9.59) принимает вид

$$\Phi_u = \frac{\pi u}{2\bar{u}^2} \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u}{\bar{u}} \right)^2 \right], \quad (9.69)$$

а из (9.55) получаем

$$\Phi_{u > u'} = \int_{u=u'}^{\infty} \Phi_u du = \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u'}{\bar{u}} \right)^2 \right]. \quad (9.70)$$

Согласно определению

$$\bar{u}^3 = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_u u^3 du}{\int_0^{\infty} \Phi_u du} = \frac{1}{1} \frac{\pi}{2\bar{u}^2} \int_0^{\infty} u^4 \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u}{\bar{u}} \right)^2 \right] du, \quad (9.71)$$

а через интеграл от гамма-функции

$$\bar{u}^3 = K (\bar{u})^3, \quad (9.72)$$

где  $K$  — коэффициент асимметрии, равный для распределения Рэлея  $K = (6/\pi) = 1,91$ .

Используя (9.72) и полученное значение коэффициента  $K$ , получаем зависимость средней удельной мощности ветрового потока от его средней скорости

$$\frac{\bar{P}_0}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \approx \rho (\bar{u})^3, \quad (9.73)$$

а также соотношение

$$(\bar{u}^3)^{1/3} = 1,2\bar{u}. \quad (9.74)$$

Дифференцируя и используя интегральные соотношения для гамма-функции, определяем скорости  $u$ , соответствующие максимумам функций  $\Phi_u$  и  $\Phi_u u^3$ :

$$\Phi_u \text{ максимальна при } u = (2/\pi)^{1/2} \bar{u} = 0,80\bar{u}, \quad (9.75)$$

$$\Phi_u u^3 \text{ максимальна при } u = 2(2/\pi)^{1/2} \bar{u} = 1,60\bar{u}. \quad (9.76)$$

*Пример. 9.3. Сравнение распределения Рэлея с результатами метеорологических измерений.*

Используем результаты примера 9.2 для сравнения с метеорологическими измерениями из примера 9.1.

*Решение.* В измерениях  $\bar{u} = 8,2$  м/с. Для этого значения  $\bar{u}$  из (9.75) следует, что  $\Phi$  максимальна при  $u = (0,80)(8,2 \text{ м/с}) = 6,6$  м/с. На рис. 9.19 эта величина равна 6,2 м/с.

Из (9.76)  $(\Phi_u u^3)$  максимальна при  $u = (1,60)(8,2 \text{ м/с}) = 13$  м/с. По результатам измерений (см. рис. 9.19) эта величина равна 12,5 м/с.

Из (9.74)  $(\bar{u}^3)^{1/3} = (1,24)(8,2 \text{ м/с}) = 10,2$  м/с, в результате измерений  $(4^3)^{1/3} = 10,1$  м/с.

При любой функции распределения переменные  $u/\bar{u}$  и  $\Phi_u u^3 / \bar{u}^3$  являются безразмерными. В распределении Вейбулла пара-

метр  $k$  также безразмерен. Безразмерные параметры, позволяющие оперировать функциями распределения вне зависимости от конкретных значений скорости ветра, удобны во многих случаях, например когда известна только средняя скорость ветра. В аппроксимационном распределении Вейбулла параметр  $k$ , как правило находится в диапазоне 1,6—3,0. Величина  $c \approx 2\bar{u}/\sqrt{\pi}$  при этом не более чем на 1% отличается от соответствующей величины в распределении Рэлея, в котором  $K=2=\text{const}$ , и поэтому можно показать, что  $\bar{u}^3 = (\sqrt{\pi})(3c^3/k)/2$ . В ряде работ проверялась гипотеза о том, что значение параметра  $k$  зависит только от топографических особенностей рассматриваемого района и общих (синоптических) ветровых характеристик. Если это так, то знание только средней скорости ветра  $\bar{u}$  по результатам долговременных метеонаблюдений позволит оценивать  $\bar{u}^3$  и, возможно, частоту и длительность периодов безветрия.

### 9.7. Использование ветроколесом энергии ветра

Доля энергии, передаваемой ветроколесу воздушным потоком, — так называемый *коэффициент мощности*  $C_p$  — определена в § 9.3 [см. также (9.15)]. Величина  $C_p$  в рабочем диапазоне скорости ветра зависит в основном от быстроходности ветроколеса  $Z$ . Выбор характеристик ветроколеса для ветроустановки в конкретных ветровых условиях определяется теми целями, которые перед ней ставятся. Обычно руководствуются одним из двух основных требований: 1) максимизировать производство энергии за год, чтобы, например, уменьшить потребление топлива тепловыми электростанциями единой энергосистемы, или 2) обеспечить производство определенного минимума энергии даже при слабом ветре, чтобы, например, сохранить работоспособность насосов системы водоснабжения. Кроме того, при выборе характеристик ветроколеса следует учитывать характеристики агрегатов — генераторов, насосов и т. д., с которыми они непосредственно стыкуются. Таким образом, задача эффективного использования ветроустановкой энергии ветрового потока достаточно сложна, зависит от многих факторов, и на практике выбор типа ветроустановки определяется еще и сложившимися в этой области традициями.

Энергией, переданной ветровым потоком ветроустановке, является энергия на валу ветроколеса. Пусть  $E$  — энергия потока, переданная ветроколесу за время  $T$ , а  $E_u$  — часть этой энергии, переданная ветровым потоком со скоростью  $u$  в единичном скоростном интервале. Тогда

$$E = \int_{u=0}^{\infty} E_u du = \int_{u=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} \rho u^3 C_p(\Phi_u T) \right] du. \quad (9.77)$$



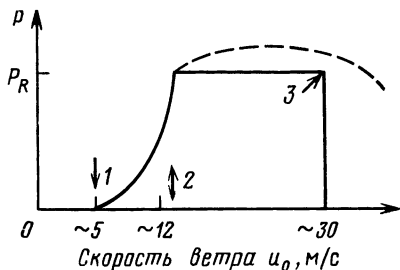


Рис. 9.21. Режимы работы ветроустановки (сплошная кривая — стандартная характеристика, штриховая — реальная характеристика большинства установок):  
1 — включение; 2 — расчетная скорость, 3 — выключение

Если плотность воздуха считать постоянной, то средняя мощность на валу ветроколеса

$$\bar{P} = \frac{E}{T} = \frac{\rho}{2} \int_{u=0}^{\infty} \Phi_u u^3 C_p du. \quad (9.78)$$

Чтобы вычислить значение этого интеграла, надо знать зависимость коэффициента  $C_p$  от скорости набегающего потока. Для этого разобьем, как обычно делают, весь скоростной диапазон на четыре характерных участка (рис. 9.21).

1) Скорость ветра меньше скорости  $u_{ci}$ , при которой ветроустановка включается. В этом диапазоне

$$E_u = 0. \quad (9.79)$$

2) Скорость ветра больше номинальной скорости  $u_R$ , здесь

$$E_u = \Phi_{u > u_R} P_R T, \quad (9.80)$$

где  $P_R$  — расчетная (проектная) выходная мощность.

3) Скорость ветра больше скорости  $u_{ci}$ , при которой ветроустановка отключается, тогда

$$E_u = 0. \quad (9.81)$$

На практике большая часть ветроустановок при сильном ветре не отключается, а продолжает работать, но с низкой эффективностью.

4) Скорость ветра — в интервале  $u_{ci} - u_R$ . Выходная мощность в этом диапазоне зависит от скорости ветра и типа ветроколеса. Для большинства ветроустановок эта зависимость имеет вид

$$P \approx a u_0^3 - b P_R, \quad (9.82)$$

где  $a$  и  $b$  — константы, определяемые из условий:

а) в момент включения ветроустановки  $P=0$ , поэтому

$$u_{ci}^3 = b P_R / a;$$

б) при расчетной скорости  $P=P_R$ , откуда

$$u_R^3 = (1 + b) P_R / a.$$

Отсюда следует

$$(u_{ci}/u_R)^3 = b / (1 + b). \quad (9.83)$$

Таким образом, коэффициенты  $a$  и  $b$  можно выразить через параметры  $u_{ci}$ ,  $u_R$  и  $P_R$ .

На практике ветроустановкам часто приходится работать в этом малоэффективном диапазоне скоростей.

Большими потерями энергии сопровождаются ограничения, накладываемые на режим работы ветроустановки при высокой скорости ветра.

В работе ветроустановки можно выделить два предельных режима (рис. 9.22).

1) Режим с постоянным коэффициентом быстроходности  $Z$  и, следовательно, с постоянным коэффициентом мощности  $C_p$ . При постоянном  $C_p$  и заданном рабочем диапазоне скоростей ветра из (9.78) следует

$$\bar{P} = \frac{\rho C_p}{2} \left( \int_{u_{ci}}^{u_R} \Phi_u u_0^3 du + \Phi_{u_R < u_0 < u_{ci}} P_R \right). \quad (9.84)$$

Для распределения Рэля и достаточно большой скорости  $u_0$  имеем

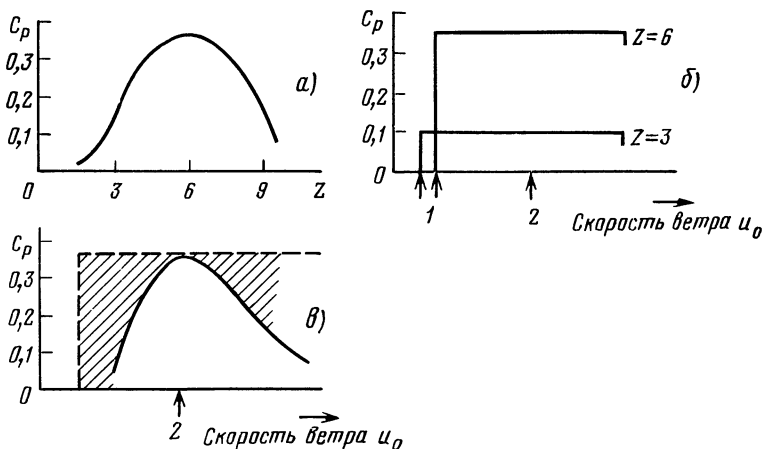


Рис. 9.22. Зависимости коэффициента мощности  $C_p$  от быстроходности  $Z$  (а), скорости ветра при постоянной быстроходности (б), скорости ветра при постоянной скорости вращения ветроколеса (в):

1 — включение; 2 — расчетная скорость. Заштрихованная область соответствует потере мощности из-за непостоянства  $Z$ .

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \frac{\rho C_p}{2} \int_{u=u_i}^{u=u_R} \frac{\pi u^4}{2\bar{u}^2} \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u_0}{\bar{u}} \right)^2 \right] du + \\ & + P_R \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u_R}{\bar{u}} \right)^2 \right] = \frac{\rho C_p}{2} \frac{6}{\pi} (\bar{u})^3 + \\ & + P_R \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{u_R}{\bar{u}} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (9.85)$$

2) Режим с постоянной частотой вращения ветроколеса и, следовательно, с переменным коэффициентом  $C_p$ .

На рис. 9.22, б, в коэффициент мощности  $C_p$  представлен в виде функции от скорости набегающего потока  $u_0$ . В этом случае мощность ветроколеса можно определить численным интегрированием. В режиме с постоянной частотой вращения, как видно из рис. 9.22, в, не при всех скоростях ветра его энергия преобразуется эффективно. Это особенно ощутимо при скоростях ветра, значительно превышающих скорость, соответствующую максимальному значению  $C_p$ .

## 9.8. Производство электроэнергии с помощью ветроэнергетических установок

**Характерные особенности ветрогенераторов.** Использование ветроустановок для производства электроэнергии является наиболее эффективным способом утилизации энергии ветра. Эффективность преобразования механической энергии в электрическую в электрогенераторе составляет обычно 95%, а потери электрической энергии при передаче не превышают 10%. Предъявляемые при этом требования к частоте и напряжению вырабатываемой электроэнергии зависят от особенностей потребителей этой энергии. Эти требования жесткие при работе ветроустановок в рамках единой энергосистемы и достаточно мягкие при использовании энергии ВЭУ в осветительных и нагревательных установках. К настоящему времени разработано много проектов ветроэлектрических установок, включая и генераторы к ним, но в будущем с превращением ветроэнергетики в самостоятельную отрасль энергетики, несомненно, появятся принципиально новые конструкции ВЭУ.

При проектировании ветроэлектрических установок надо учитывать следующие их особенности:

1) для обеспечения максимальной эффективности работы ветроколеса следует изменять частоту его вращения при изменении скорости ветра, сохраняя постоянным коэффициент быстроходности, в то же время для максимально эффективной работы электрогенератора необходима практически постоянная частота вращения;

2) механические системы управления частотой вращения ветроколеса достаточно сложны и дороги. Гораздо эффективнее и дешевле управлять частотой его вращения, изменяя электрическую нагрузку электрогенератора;

3) оптимальная частота вращения ветроколеса тем меньше, чем больше его радиус, поэтому только очень малые ветроколеса (радиусом не более 2 м) удастся соединить с генератором напрямую. При больших размерах ветроколеса приходится использовать повышающие редукторы, удорожающие ветроустановку и ее обслуживание. Альтернативой редукторам могут стать новые типы многополюсных генераторов, работающих при меньших частотах вращения;

4) в конструкции ветроэлектрической установки предусматривается, как правило, возможность отключения генератора от ветроколеса и вращения его от химического или механического аккумулятора энергии, поэтому систему управления генератором не связывают с работой ветроколеса. При отсутствии такой связи даже при «мягком» соединении генератора с ветроколесом необходимы специальные демпфирующие устройства, для того чтобы исключить механические удары, перегрузки и броски напряжений на выходе генератора.

Кроме того, следует учитывать специфические требования, предъявляемые к выходным параметрам ВЭУ, а именно:

а) наиболее благоприятные ветровые условия существуют, как правило, в малонаселенных районах, на островах и в море. Требования к электроэнергии в таких районах весьма специфичны, но почти наверняка ее здесь требуется гораздо меньше, чем в развитых промышленных районах;

б) анализ парка потребителей электроэнергии показывает, что лишь 5—10% из них предъявляют определенные требования к ее параметрам (например, к частоте). Это в основном электродвигатели, электронные устройства и осветительные установки. Поэтому целесообразно так строить систему электроснабжения, чтобы она могла обеспечивать потребителей как дешевой электроэнергией с нестабилизированными параметрами (например, для отопления), так и относительно дорогой, но со стабильными параметрами;

в) энергосистемы в сельской местности обычно маломощные и относительно низковольтные (менее 33 кВ), при передаче энергии на большие расстояния возникает много проблем, связанных с ее потерями, поэтому подключение ВЭУ к таким системам нецелесообразно;

г) так как периоды безветрия неизбежны, то для исключения перебоев в электроснабжении ВЭУ должны иметь аккумуляторы энергии или быть запараллеленными электроэнергетическими установками других типов.

Совершенно очевидно, что развитие ветроэнергетики будет

стимулировать прогресс во всей электроэнергетике, в том числе и в традиционном энергомашиностроении.

**Генераторы для ВЭУ.** Принцип действия любого генератора достаточно прост, все различия в их устройстве и связанные с этим трудности обусловлены стремлением повысить эффективность их работы.

Действие любого промышленного электрогенератора, используемого в ветроустановках, основано на эффекте Фарадея, состоящем в том, что магнитное поле, пересекающее с некоторой скоростью проводник, индуцирует в нем электрический ток. Генератор состоит из двух основных элементов — статора и ротора. Обмотка одного из них (например, статора) является тем проводником, в котором наводится электрический ток, а другой (ротор) состоит из постоянных магнитов или заменяющей их обмотки, создающей магнитное поле. Если магнитное поле создается постоянными магнитами или протекающим по роторной обмотке постоянным током, то в обмотке статора будет индуцироваться переменный ток частоты  $f_1$ , равной частоте вращения вала генератора  $f_s$ . Если ротор имеет  $n$  магнитов или возбуждающих обмоток, то выполняется равенство  $nf_s = f_1$ . Такой генератор называется *синхронным генератором переменного тока*, частота которого жестко связана с частотой вращения ротора.

Распространенным типом электрогенераторов является генератор переменного тока с короткозамкнутым ротором, роторная обмотка которого, создающая магнитное поле, состоит из короткозамкнутых витков. Ток в этих витках в свою очередь наводится электромагнитным полем тока статорной обмотки. При этом разность фаз тока статора и ротора такова, что происходит преобразование механической энергии, вращающей ротор, в электрическую энергию (напряжение) статора. Если ротор, имеющий  $n$  возбуждающих обмоток, вращается с частотой  $f_s$  и при этом в обмотках индуцируется ток частотой  $f_2$ , то на выходе генератора частота тока равна  $f_1 = f_2 - nf_s$ . Коэффициент скольжения  $s = (f_1 - f_s)/f_1$  у генераторов отрицателен, если же генератор работает в режиме электродвигателя, коэффициент скольжения положителен. Значение  $s$  у генераторов обычно меньше 10%. Для создания в момент запуска генератора, когда еще отсутствует ток в статоре, начального магнитного поля в роторе обычно используют два метода: 1) магнитное поле создают посторонним источником тока, например от электросети, к которой подключен генератор, или 2) генератор самовозбуждается посредством замыкания обмотки статора через конденсатор на землю. В этом случае ротор или статор должен обладать остаточным магнетизмом, создающим начальный ток, так как конденсатор лишь обеспечивает необходимый для работы генератора сдвиг фаз. Кроме того, для работы и управления таким генератором можно использовать вспомогательный синхронный генера-

тор, включенный по схеме синхронного автотрансформатора. Такая схема удобна в небольших автономных энергоустановках, в которых вспомогательный генератор может подключаться к дизельному двигателю при слабом ветре, частично обеспечивая электроснабжение потребителей. Достоинствами первого метода являются его простота, дешевизна и безопасность, так как на генераторе отсутствует напряжение, если он отключен от сети.

Генераторы постоянного тока по принципу действия являются синхронной машиной, имеющей коммутирующее устройство в виде кольца с прорезями, называемое коллектором, которое гарантирует однонаправленность выходного тока. При этом ток, являясь однонаправленным, не обязательно постоянен. Постоянный ток можно получать также и из переменного с помощью выпрямителей. В свою очередь и переменный ток с заданными напряжением и частотой можно получить от источника постоянного тока с помощью специальных преобразователей.

**Классификация ветроэлектрических установок.** Различают три класса ветроэлектрических установок в зависимости от относительной мощности ветроэлектроустановки в полной мощности энергосистемы, к которой они подключены. Эти классы представлены в табл. 9.4.

Таблица 9.4. Классы ветроэнергетических систем

Класс	Мощность ВЭУ	Степень автономности ВЭУ	Способы управления
<i>A</i>	$P \gg P_G$	Автономная	а) шагом ветроколеса б) нагрузкой
<i>B</i>	$P \approx P_G$	Ветродизельная	а) раздельная работа ВЭУ и дизель-генератора б) совместная работа ВЭУ и дизель-генератора
<i>C</i>	$P \ll P_G$	Подключенная к мощной энергосистеме	а) параметрами генератора постоянного тока б) преобразованием постоянного тока в переменный в) изменением коэффициента скольжения

Примечание.  $P$  — мощность ВЭУ,  $P_G$  — мощность других генераторов систем.

**Класс A:** мощность ветроэлектрогенератора в энергосистеме является определяющей, т. е.  $P \geq 5 P_G$ .

В основном к этому классу относятся отдельно стоящие одногенераторные ветроустановки, не подключенные к какой-либо энергосистеме. Они могут не иметь никаких других источников энергии или иметь, например, дополнительный аэрогенератор меньшего размера. Мощность таких ветроустановок, предназна-

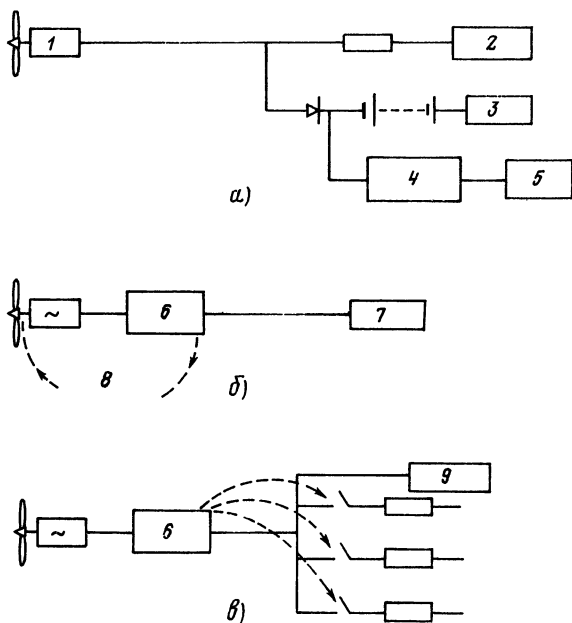


Рис. 9.23. Возможные схемы согласования ветроустановки с потребителями: 1 — нестабилизированное напряжение или частота; 2 — нагревательный элемент; 3 — аккумуляторные батареи; 4 — преобразователь постоянного напряжения в переменное, 5 — стабилизированное напряжение и частота; 6 — регулятор, 7 — стабилизированный постоянный ток; 8 — обратная связь; 9 — приоритетная нагрузка

ченных для использования в отдаленных районах в целях освещения, электропитания маяков, средств связи и т. п., не превышает 5 кВт. Если энергия таких ВЭУ используется более широко, например и для отопления, то их мощность может достигать 20 кВт.

Эффективность работы ветроустановки и ее стоимость во многом зависят от правильности выбора системы управления генератором, которые были рассмотрены в § 1.4 (рис. 9.23). При минимальном управлении генератором напряжение на его выходе (и частота в случае генератора переменного тока) будет нестабильным. Электроэнергию с такими параметрами можно непосредственно применять в нагревательных элементах, а также в выпрямителях для последующего использования (рис. 9.23, а). Во многих случаях такие ветроустановки вполне удовлетворяют потребителей. Относительно небольшие потребности в электроэнергии со стабилизированными параметрами (например, 240 В/50 Гц или 110 В/60 Гц) можно в этом случае удовлетворить специальными преобразователями, питаемыми от аккумуляторных батарей. Преобразуемая таким способом энергия ограни-

чивается лишь стоимостью аккумуляторных батарей и преобразователей.

В некоторых случаях желательно стабилизировать частоту всей вырабатываемой генератором электроэнергии. Для этого существуют два совершенно различных способа.

1. Механическое управление лопастями ветроколеса с целью стабилизации частоты его вращения. При таком управлении шаг лопастей ветроколеса при изменении скорости ветра изменяется так, чтобы частота его вращения оставалась постоянной (рис. 9.23, б). Недостатком метода являются большие потери энергии ветрового потока (см. § 1.4), сложность и невысокая надежность.

2. Электрическое управление, при котором постоянство частоты вращения ветроколеса и генератора обеспечивается изменением электрической нагрузки на выходе генератора (рис. 9.23, в). При таком способе стабилизации частоты энергия ветра используется гораздо эффективнее, так как лопасти ветроколеса работают в оптимальном режиме. Использование современного электронного оборудования делает его также и более дешевым и надежным по сравнению с механическим управлением.

В автономных ВЭУ используются электрогенераторы разных типов. В небольших установках наиболее распространены многополюсные генераторы с постоянными магнитами. Генераторы постоянного тока могут иметь устройства для сглаживания пульсаций тока, а ток можно использовать для зарядки аккумуляторных батарей. Для генерации переменного тока можно применять синхронные генераторы с нестабилизированными и стабилизированными параметрами на выходе. Асинхронные генераторы переменного тока могут быть как самовозбуждаемые, так и со вспомогательным возбуждающим генератором.

*Класс В:* мощность ветроэлектрогенератора — одного порядка с мощностью других генераторов системы, т. е.  $P \approx P_G$ .

Такая ситуация характерна для небольших энергосистем в отдаленных районах. Чаще всего «другим генератором» является дизельный электрогенератор. В этом случае использование аэрогенератора позволяет экономить дизельное топливо. Дизельный генератор может включаться только в безветрие и может работать параллельно с ветрогенератором при слабом ветре.

В ветроустановках этого класса используются две различные схемы распределения вырабатываемой энергии, представленные на рис. 9.24.

1. *Одноканальная схема.* В такой схеме, имеющей один выход (обычно трехфазный, бытовые потребители питаются от какой-то одной фазы), поддерживается стабилизированное напряжение определенной величины (в зависимости от потребностей потребителя), рис. 9.24, а. Круглосуточное снабжение электроэнергией без учета ее потребления требует длительной работы (как прави-



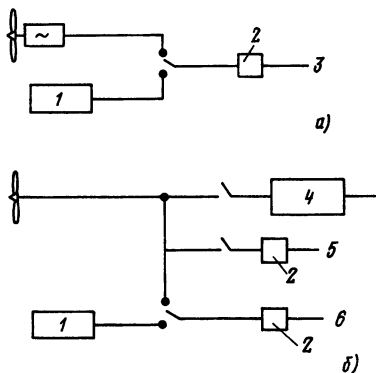


Рис. 9.24. Одноканальная (а) и многоканальная (б) схемы согласования ветродизельной энергоустановки с потребителями: 1 — дизельный электрогенератор; 2 — счетчик; 3 — единая стоимость электроэнергии; 4 — накопитель энергии, 5 — дешевая электроэнергия; 6 — дорогая электроэнергия

ло, не менее полусуток) дизельного генератора в периоды безветрия. Дизель при этом или работает непрерывно (особенно для освещения), или выключается только при очень сильном ветре. На практике в такой схеме при сильном ветре иногда более 70% энергии аэрогенератора гасится на балластных сопротивлениях.

**2. Многоканальная схема.** Целью этой схемы с несколькими выходами является максимально полное использование ветровой энергии. Это достигается снижением цены электроэнергии для определенных потребителей в зависимости от ее качества (рис. 9.24, б). При слабом ветре потребители дешевой электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, автоматически отключаются, уменьшая этим нагрузку на энергосистему. Частоту вращения ветроэлектрогенератора в такой системе можно также регулировать одним из описанных выше способов, и тогда он также будет источником стабилизированной электроэнергии. В периоды безветрия электроэнергией снабжаются только потребители дорогой стабилизированной энергии, вырабатываемой дизельным электрогенератором. Преимуществом такой схемы распределения энергии является максимальное использование в любой момент времени энергии ветра.

**Класс С:** ветроэлектрогенератор подключен к энергосистеме, значительно более мощной, чем его собственная мощность, т. е.  $5P \leq P_G$ .

Это наиболее распространенный случай работы ветроэлектрогенератора любой мощности в районах, где имеются коммунальные или другие энергосистемы большой мощности (рис. 9.25). При этом энергия ВЭУ используется непосредственно, а ее излишки подаются в энергосистему. При слабом ветре и в безветрие потребители снабжаются электроэнергией от энергосистемы. Наиболее дешевым и, возможно, безопасным типом ветроэлектрогенератора в этом случае является асинхронный генератор переменного тока, подключенный непосредственно в энергосистему. При этом частота вращения ветроколеса может не бо-

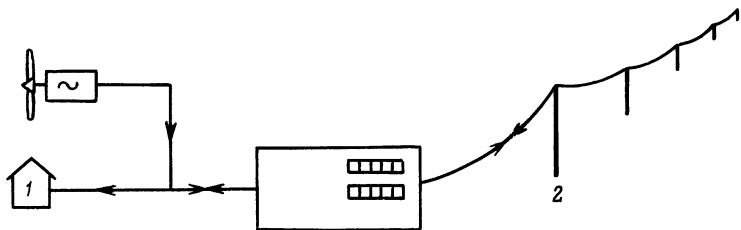


Рис. 9.25. Схема подключения ветроустановки к более мощной энергосистеме: 1 — жилые дома, фермы и т. д., 2 — линия электропередачи

лее чем на 10% превышать частоту, соответствующую номинальной частоте электросети. При слабом ветре, чтобы исключить работу ВЭУ в режиме электродвигателя, его отключают от сети. Необходимость стабилизации частоты вращения ветроколеса при прямом включении аэрогенератора в сеть не позволяет поддерживать постоянной быстроходность ветроколеса, т. е. снижает его КПД. В небольших ВЭУ поэтому часто устанавливают два ВЭУ различной мощности, например 5 и 22 кВт, автоматически включающиеся соответственно при слабом и сильном ветре. Используются и другие приемы, позволяющие изменять частоту вырабатываемой генератором электроэнергии, а именно:

- 1) увеличение числа полюсов генератора за счет перекоммутации его обмоток при падении частоты вращения ветроколеса;
- 2) выпрямление переменного тока ВЭУ и затем преобразование его в переменный ток с заданными стабилизированными параметрами;
- 3) увеличение допустимого отклонения частоты вращения ветроколеса от номинальной за счет включения активной нагрузки в обмотку асинхронного генератора.

## 9.9. Производство механической работы

Исторически использование энергии ветра начиналось с применения ее в механических целях: для передвижения парусных судов, вращения жерновов мельниц, перекачки воды. И в настоящее время эти применения энергии ветра остаются актуальными, и можно ожидать, что в будущем их значение возрастет. Ниже кратко рассмотрены современные способы использования энергии ветра в этих целях, когда энергия сначала преобразуется в электрическую, а затем в механическую.

**Морской транспорт.** Старые морские суда с прямым парусным вооружением использовали в качестве движущей силы силу сопротивления парусов и были малоэффективны. Современные гоночные яхты, использующие подъемную силу, гораздо более эффективны и могут передвигаться быстрее ветра. Сейчас проектируются большие суда для перевозки грузов с автоматизиро-

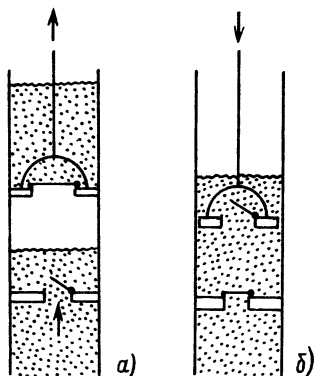


Рис. 9.26. Устройство и принцип работы поршневого насоса (помпы). Поршень приводится в движение ветроколесом: поршень движется вверх (а) и вниз (б)

ваным управлением парусами, почти не требующим ручного труда. Такие паруса заменяют главный двигатель судна мощностью в несколько мегаватт. Для передвижения в гавани или вблизи берегов используются ходовые винты, привод которых можно осуществлять от расположенной на судне ветроэлектрической установки. Особенно перспективно

устанавливать ВЭУ на паромех, курсирующих на непротяженных линиях.

**Мельницы.** Традиционные ветряные мельницы (известные как датские мельницы) вытеснены в настоящее время электрическими или им подобными, использующими в качестве привода какой-либо двигатель. Маловероятно, что в будущем вновь появится интерес к принципу действия традиционных ветряных мельниц.

**Водяные насосы.** Отсутствие проблем при создании необходимых запасов воды позволяет весьма эффективно использовать для ее перекачки водяные насосы, питаемые от такого не очень надежного источника энергии, каким является ветер. Водяные насосы можно устанавливать в емкости для хранения воды или погружать в скважину или водоем. В сельском хозяйстве большинства стран, включая США и Австралию, используются насосы мощностью до 10 кВт. Вода используется в основном для полива и водоснабжения скотных дворов. Для повышения надежности работы насосов используются многолопастные ветроколеса с большим геометрическим заполнением, развивающие большой крутящий момент при слабом ветре. Низкая частота вращения не очень подходит для привода центробежного насоса. В этом случае лучше использовать традиционный поршневой насос (помпу), рис. 9.26. В идеальном случае мощность водяного насоса  $P'$  пропорциональна частоте вращения ветроколеса  $\omega$ , а мощность на валу ветроколеса  $P$  при постоянном коэффициенте быстроходности пропорциональна  $\omega^3$ , поэтому эффективность системы насос — ветроколесо  $P'/P$  пропорциональна величине  $1/\omega^2$ . Для повышения эффективности этой системы необходимы более совершенные насосы. Как правило, источник воды расположен относительно низко, а скорость ветра с уменьшением высоты падает, поэтому целесообразно устанавливать ВЭУ на возвышенном месте, а электронасос — непосредственно у источника воды.

**Производство тепла.** Эффективность превращения в тепло

механической энергии ветра в процессе ее диссипации составляет 100%. Используемые для этой цели различные турбулизирующие ветроустановки производят тепло непосредственно на самой установке, однако такие установки очень шумят и ими трудно управлять. Значительно выгоднее для этих целей использовать тепловые насосы, однако при широком распространении аэрогенераторов наиболее предпочтительным, очевидно, является преобразование в тепло вырабатываемой ими электроэнергии.

### 9.10. Перспективы использования ВЭУ

Ниже кратко изложены полученные в предыдущих параграфах основные выводы и рекомендации, касающиеся ветроэнергетических систем.

**Использование энергии ветра в общественных энергосистемах.** В Америке и Европе правительственные организации субсидируют научные разработки и исследования, направленные в первую очередь на использование ВЭУ в региональных энергосистемах высокого напряжения. Уже в течение нескольких лет успешно функционируют ВЭУ мощностью до 200 кВт и созданы установки мощностью до 3 и 4 МВт. Считают, что срок службы таких генераторов превысит 20 лет и вырабатываемая ими электроэнергия будет дешевле, чем на тепловых электростанциях на жидком топливе. В ранних исследованиях считали, что ВЭУ следует устанавливать на возвышенностях, но практика показала, что еще лучшие условия для их работы могут быть на открытых равнинных местах, особенно если рядом установлены сразу несколько ветроустановок. Позднее на основе этой новой концепции выбора места размещения ВЭУ было предложено устанавливать системы из многих установок в море на мелководных участках, как, например, в Северном море около восточного побережья Великобритании.

**Автономные ВЭУ.** Ветроустановки мощностью от 10 до 100 кВт могут быть использованы для энергоснабжения жилых помещений, ферм, различных организаций. Их использование экономически оправдано там, где дороги другие источники энергии (например, нефть), или если вырабатываемая ими электроэнергия по крайней мере вдвое дешевле электроэнергии в общественной сети. Наибольший спрос на ветроустановки такой мощности — в странах с высоким жизненным уровнем и большими затратами энергии, в которых средняя скорость ветра более 6 м/с и велико сельское население.

**Новая технология.** Основы энергетики на возобновляемых источниках, изложенные в гл. 1, показывают, что она налагает на производственные процессы совершенно другие ограничения, чем традиционная тепловая и ядерная энергетика. Наиболее

наглядно это видно на примере ветроэнергетики. Использование рассеянной и очень непостоянной по своей природе энергии ветра основано на принципиально других подходах, чем использование энергии от стабильных и интенсивных источников, и главное здесь — необходимость варьировать потребление энергии в соответствии с ее производством. Для преодоления этого ограничения необходимы эффективные и дешевые способы аккумуляирования энергии.

Изложенный в этом параграфе материал иллюстрируется примером и задачами.

*Пример 9.4. Многоканальная ВЭУ на острове Фэйр.* Остров Фэйр расположен в Северном море между островами Шетланд и Оркней. Население острова (70 чел.) живет в условиях суровой, но прекрасной природы. До недавнего времени здесь использовали для отопления уголь и нефть, для производства электроэнергии — дизельное топливо, бензин для автомобилей. В настоящее время электротехнический кооператив установил здесь ветроэлектрическую установку мощностью 50 кВт, которая действует в условиях постоянных ветров со средней скоростью 8 м/с. Система управления ВЭУ описана в гл. 1 (см. рис. 1.6).

Дорогая стабилизированная электроэнергия используется для освещения и питания электронной аппаратуры, а дешевая нестабилизированная энергия — для отопления и подогрева воды (см. § 9.8, класс В, многоканальная схема снабжения электроэнергией). В периоды очень сильного ветра энергия ВЭУ используется для отопления теплиц или подогрева воды в плавательном бассейне. Электроэнергию ВЭУ применяют также для зарядки аккумуляторов батарей автомобилей. Несмотря на сильные ветры вырабатываемой ВЭУ энергии все же недостаточно, и удовлетворительные условия жизни обеспечиваются благодаря хорошо утепленным домам, экономному расходованию электроэнергии и специальным системам ее распределения.

### Задачи

9.1. Как следует из (9.16), доля преобразуемой ВЭУ энергии ветра равна коэффициенту мощности  $C_p = 4a(1-a)^2$ . Продифференцировав это выражение по  $a$ , покажите, что максимальное значение  $C_p = 16/27$  и достигается при  $a = 1/3$ .

9.2. Выражение для коэффициента мощности можно представить в виде функции от  $b = u_2/u_0$  (см. § 9.3). Покажите, что: а)  $C_p = (1-b^2)(1+b)/2$ , б)  $C_{p \max} = 16/27$  при  $b = 1/3$ , в)  $a = (1-b)/2$ , где  $a = (u_0 - u_1)/u_0$ .

9.3. Используя отношение площадей  $A_0$  и  $A_1$  (см. рис. 9.5), покажите, что в оптимальном случае согласно линейной теории доля преобразованной энергии равна  $8/9$  энергии набегающего потока.

9.4. Покажите, что при рэлеевском законе распределения скорости ветра выполняются соотношения: а) наиболее вероятная скорость ветра равна  $0,80 \bar{u}$ ; б) наиболее вероятное значение энергии ветра достигается при скорости ветра, равной  $1,60 \bar{u}$

9.5. Покажите, что при рэлеевском законе распределения скорости ветра выполняется равенство  $\bar{u}^3 = \frac{6}{\pi} (\bar{u})^3$ , где  $\bar{u}^3$  — среднее значение  $u^3$ ;  $\bar{u}$  — среднее значение скорости  $u$ .

9.6. Сравните результаты решения задач 9.4 и 9.5 с параметрами ветра на рис. 9.17 и 9.19 и определите, насколько хорошо эти параметры соответствуют распределению Рэля.

9.7. В некоторых схемах ветроустановок ветровой поток, пройдя через одно ветроколесо, сразу же поступает на такое же второе колесо (например, два противоположно вращающихся соосных ветроколеса). Используя линейную теорию и располагая два ветроколеса последовательно, покажите, что результирующий максимальный коэффициент мощности  $C_p = 0,64$ .

*Замечание:* это максимальное значение (0,64) коэффициента мощности лишь немногим больше соответствующего значения для одного ветроколеса (0,59). Таким образом, наличие второго колеса в ветроколесах встречного вращения очень мало увеличивает их эффективность.

9.8. а) Ветроэлектрическая установка при любой скорости ветра поддерживает постоянным коэффициент быстроходности, равный 8. При какой скорости ветра скорость концов лопастей ветроколеса достигнет скорости звука?

б) Крупная ВЭУ имеет ветроколесо диаметром 100 м, вращающееся с постоянной угловой скоростью. При какой угловой скорости вращения скорость концов лопастей достигнет скорости звука?

### Решения

9.3. Из уравнения сохранения массы  $\rho A_0 u_0 = \rho A_1 u_1$ . Из (9.11) при  $a = 1/3$  [для максимального коэффициента мощности (9.17)]  $2u_0 = 3u_1$ , откуда  $A_1 = 3A_0/2$ . При максимальном коэффициенте мощности имеем

$$\frac{\text{Мощность ветроколеса}}{\text{Мощность набегающего потока}} = \frac{(16/27) A_1 u_0^3}{A_0 u_0^3} = \frac{16}{27} \frac{3}{2} = \frac{8}{9}.$$

9.4. а) См. (9.69):

$$\Phi(u) = au \exp(-bu^2), \text{ где } b = \pi/(4\bar{u}^2),$$

$$\frac{d\Phi(u)}{du} = 0 \text{ при } u^2 = 2\bar{u}^2/\pi, \quad u = 0,80\bar{u}.$$

б)  $\Phi(u)u^3 = au^4 \exp(-bu^2), \frac{d[\Phi(u)u^3]}{du} = 0$  при  $u^2 = 8\bar{u}^2/\pi, \quad u = 1,60\bar{u}.$

9.5. См. (9.71):

$$\bar{u}^3 = \frac{\pi}{2\bar{u}^2} \int_0^{\infty} u^4 \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{u}{\bar{u}}\right)^2\right] du,$$

обозначим  $bu^2 = v$ , где  $b = \pi/4\bar{u}^2$ . Тогда

$$u = (v/b)^{1/2} \text{ и } du = (1/2)\left(\frac{1}{bv}\right)^{1/2} dv.$$

Отсюда

$$\bar{u}^3 = \frac{\pi}{2\bar{u}^2} \int_0^{\infty} \frac{v^2}{b^2} \exp(-v) \frac{1}{2(bv)^{1/2}} dv = \frac{\pi}{4\bar{u}^2 b^{5/2}} \int_0^{\infty} v^{3/2} e^{-v} dv = \frac{\pi}{4\bar{u}^2} \times$$

$$\times \left( \frac{4\bar{u}^2}{\pi} \right)^{5/2} \left( \frac{3}{2} \right)! = \left( \frac{4\bar{u}^2}{\pi} \right)^{3/2} \frac{3}{2} \left( \frac{1}{2}! \right) = \frac{8(\bar{u})^3}{\pi^{3/2}} \frac{3}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{2} = \frac{6}{\pi} (\bar{u})^3 = 1,91(\bar{u})^3.$$

Следовательно,  $(\bar{u}^3)^{1/3} = 1,24\bar{u}$ .

9.6.

Сопоставление результатов	$\frac{u[\Phi(u)_{\max}]}{\bar{u}}$	$\frac{u[\Phi(u)u^3]_{\max}}{\bar{u}}$	$\frac{(\bar{u}^3)^{1/3}}{\bar{u}}$	$\frac{u[\Phi(u)u^3]_{\max}}{u[\Phi(u)]_{\max}}$
Результаты расчета (распределение Рэлея)	0,80	1,60	1,24	2,00
Результаты измерений	0,76	1,53	1,24	2,00

9.7. Обозначим одним штрихом параметры первого колеса, двумя — второго. Полная мощность двойного ветроколеса  $P = (1/2)\rho Au_0^3 C_p$ , но

$$P = P' + P'' = (1/2)\rho A (u_0^3 C_p' + (u_2')^3 C_p'') = (1/2)\rho A u_0^3 \left[ C_p' + \left( \frac{u_2'}{u_0} \right)^3 C_p'' \right],$$

отсюда

$$C_p = C_p' + \left( \frac{u_2'}{u_0} \right)^3 C_p''.$$

Но  $a' = \frac{u_0 - u_2}{2u_0}$ , откуда  $\frac{u_2'}{u_0} = 1 - 2a'$  и,

$$C_p = 4a'(1 - a')^2,$$

$$C_p = 4a'(1 - a')^2 + (1 - 2a')^3 C_p''.$$

$C_p''$  не зависит от  $a'$ , поэтому  $C_p$  максимально при максимальном значении  $C_p'' = 16/27$ , т. е.

$$C_p = 4a'(1 - a')^2 + (1 - 2a')^3 (16/27).$$

Это выражение максимально при  $a' = 0,2$ , откуда максимальное значение  $C_p$  равно

$$C_p = 0,8^3 + (0,6^3)(16/27) = 0,640.$$

9.8. а)  $v_R = Zu_0$ . Если  $v_R = 330$  м/с, то  $u_0 = \frac{330 \text{ м/с}}{8} = 41$  м/с.

б)  $\omega = v_R/R = (330/50) \text{ с}^{-1} = 6,6 \text{ рад}^{-1}$ ,  $f = \omega/2\pi = 1,1$  Гц.

## ФОТОСИНТЕЗ

## 10.1. Введение

Фотосинтез — это процесс образования органических веществ и аккумуляции химической энергии под действием солнечного излучения. Это важнейший процесс, связанный с возобновлением энергии, так как все живые организмы состоят из материала, получаемого в результате фотосинтеза, а наша жизнедеятельность основана на потреблении кислорода, образующегося в процессе усвоения растениями солнечной энергии. Поток фотосинтетической энергии на нашу планету составляет примерно  $0,9 \times 10^{14}$  Вт (250 кВт на человека, что эквивалентно выработке 100 000 крупных атомных электростанций). Зависимость использования этой энергии от потребностей в ней обсуждается в гл. 11, посвященной биотопливу.

Солнечная радиация, падающая на зеленые растения и другие фотосинтезирующие организмы, определенным образом связана с двумя доминирующими процессами: обеспечением определенных температурных условий для протекания химических реакций и фотовозбуждением электронов для получения кислорода из воды и «строительного материала» из углерода. Для изолированного растения важно поддерживать температурные условия в определенных пределах, поэтому солнечное излучение должно в большей мере отражаться и пропускаться, нежели поглощаться для стимуляции и ускорения процесса фотосинтеза. В результате фотосинтеза образуются в основном углеводы, состоящие из углерода в окисленно-восстановительном состоянии (например, глюкоза  $C_6H_{12}O_6$ ). Если синтезируемое вещество (в обезвоженном состоянии) сжигать в кислороде, то выход тепла составит примерно 16 МДж/кг (4,8 эВ на один атом углерода; 470 кДж на моль углерода). В зеленых растениях, включая водоросли, в процессе образования углеводов происходит фиксация атмосферного углерода из  $CO_2$ , которая является результатом нескольких реакций:

1) реакций на свету (световые реакции), в которых фотоны света продуцируют  $O_2$  из  $H_2O$  и в две стадии возбуждают электроны для образования сильно восстановленных химических соединений;

2) реакций, не требующих света (темновые реакции), в процессе которых ранее образованные сильно восстановленные соединения восстанавливают  $CO_2$  до углеводов, белков и жиров. Если опустить ряд внутренних переходов, то комбинацию световых и темновых реакций в обобщенном виде можно представить следующим образом:





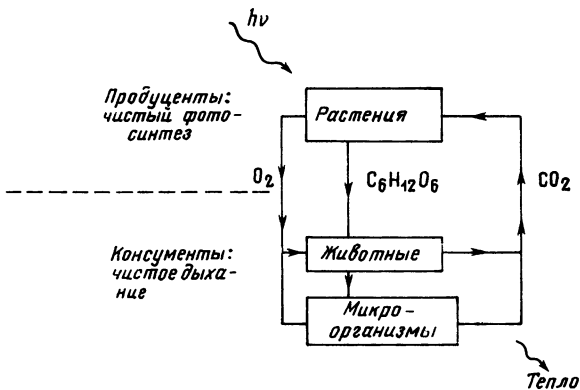


Рис. 10.1. Трофические уровни глобального фотосинтеза: потоки: энергии,  $10^{14}$  Вт; углерода,  $10^{11}$  т/год; кислорода,  $3 \cdot 10^{11}$  т/год. Объемная доля кислорода 20%, углекислого газа — 0,03%

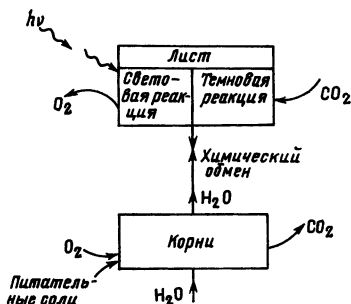
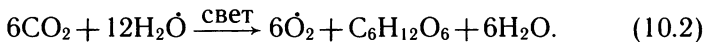


Рис. 10.2. Фотосинтез на уровне растения

Энергия, приходящаяся на атом углерода в конечных продуктах этой реакции, примерно на 5 эВ больше, чем у исходного материала. Это происходит в результате поглощения по крайней мере 8 фотонов.  $CH_2O$  представляет собой основной компонент углеводов, для получения глюкозы реакцию надо записать так:



В этих уравнениях атомы кислорода, первоначально принадлежавшие  $CO_2$  и  $H_2O$ , различаются, что и помечено точками над  $O$ .

Большинство стадий фотосинтеза включает протекание целого ряда биохимических процессов, однако в этой главе основное внимание обращено на физическую сторону явлений, изучаемую подразделом спектроскопии, называемой *фотофизикой*. Здесь будет интересно выявить сходство и дать сравнение с фотоэлектрическими устройствами (см. гл. 7). Рассмотрены три уровня протекания процессов: уровень пищевых цепей — трофический (рис. 10.1); уровень растений (рис. 10.2); молекулярный уровень (рис. 10.3), являющийся наиболее сложным; он рассмотрен в § 10.6.

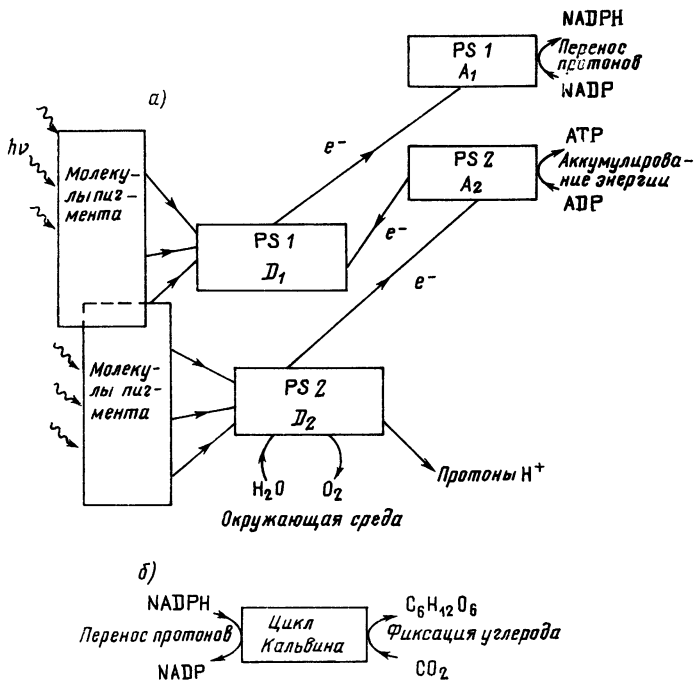


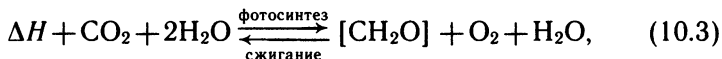
Рис. 10.3. Фотосинтез на молекулярном уровне. Разнесение по вертикали соответствует энергии возбуждения электрона. Световая реакция (а), характеризующаяся переносом энергии и вещества в двух взаимодействующих фотосистемах  $PS1$  и  $PS2$  зеленых растений. Темновая реакция (б), использующая восстановленные реагенты, которые образуются в процессе световой реакции фотосистемой  $PS1$ ;  $A_1$ ,  $A_2$  — аккумуляторы электронов;  $D_1$ ,  $D_2$  — доноры электронов

Существует масса разновидностей и деталей на всех уровнях описания фотосинтеза как в масштабах целого растения, так и на молекулярном уровне. И не надо полагать, что этот вариант описания, имеющий целью лишь ввести читателя в курс дела, претендует на полноту изложения.

## 10.2. Трофический уровень фотосинтеза

Животные существуют за счет прямого или косвенного получения энергии и вещества от растений. Это и называют *трофической* (пищевой) *системой*. На рис. 10.1 представлена предельно упрощенная диаграмма, выделяющая лишь основные процессы в этой системе.  $CO_2$  и  $H_2O$  растениями преобразуются в углеводы, белки и жиры. Обобщенный символ  $[CH_2O]$  используется лишь для обозначения основного «строительного блока» этих веществ;  $CO_2$  выделяется в процессе дыхания и растений и жи-

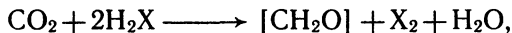
вотных, при сжигании биологического сырья. Эта упрощенная схема вполне достаточна для изучения энергетики процессов, однако она отрицает (точнее, не учитывает) роль азота, питательных солей, параметров среды на соответствующих этапах. Всю энергию, полученную в результате поглощения солнечного излучения в процессе фотосинтеза, можно определить при сжигании конечных продуктов:



где  $\Delta H = 470$  Дж/моль  $\text{C} \approx 5,8$  эВ/атом  $\text{C} \approx 16$  МДж/кг сухого углеводного материала.

Здесь  $\Delta H$  — изменение энтальпии в процессе сгорания, равное энергии, поглощаемой от фотонов солнечного излучения при фотосинтезе и меньшей, чем энергия дыхания в процессе роста. Отметим, что сжигание требует температуры примерно равной  $400^\circ \text{C}$ , в то время как процесс дыхания обеспечивается за счет каталитических реакций при температуре около  $20^\circ \text{C}$ . Усвоение  $\text{CO}_2$  листьями растений зависит от многих факторов, особенно от температуры, содержания  $\text{CO}_2$ , интенсивности и спектрального состава света (рис. 10.4).

Фотосинтез может идти за счет восстановления  $\text{CO}_2$  и в процессе реакций с компонентами, отличающимися от воды. В общем виде подобная реакция имеет вид



например,  $\text{X} = \text{S}$ . Соответствующие фотосинтезирующие бактерии могут благодаря этому механизму развиваться в отсутствие кислорода.

Эффективность (КПД) фотосинтеза  $\eta$  точно определяется для широкого диапазона условий. Этот показатель равен отношению полной энтальпии, полученной с единицы площади био-

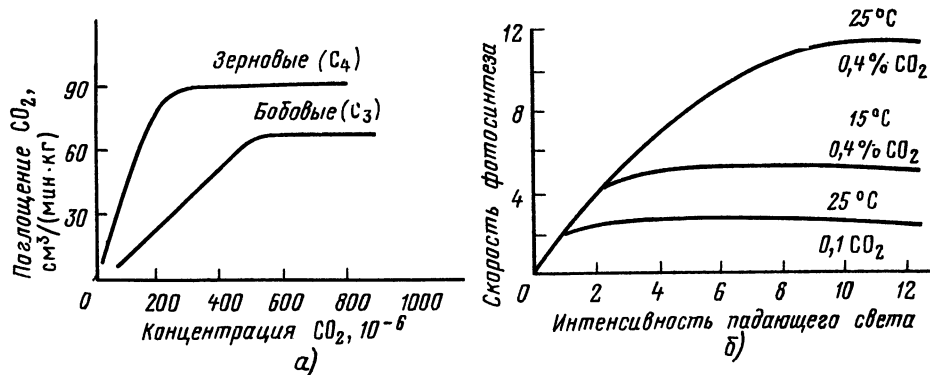


Рис. 10.4. Зависимость усвоения  $\text{CO}_2$  живыми листьями от концентрации  $\text{CO}_2$  (а) и воздействие внешних факторов на скорость фотосинтеза (б)

массы ( $H/A$ ), к начальной солнечной энергии, приходящейся на ту же единицу площади ( $E/A$ ) в течение специфического для каждого растения периода роста:

$$\eta = (H/A)/(E/A). \quad (10.4)$$

При этом площадь  $A$  может меняться в зависимости от площади, занимаемой поверхностью планеты (включая пустыни), от площади, занимаемой лесами, полями зерновых, облучаемой или полной поверхности листа. Период облучения может изменяться от нескольких лет до минут, а условия могут быть или естественными, или лабораторными. Для культур, дающих урожай, особенно важно указать, за какой из рассматриваемых периодов роста производится оценка — только за сезон роста или за весь год. В табл. 10.1 приведены значения  $\eta$  для различных условий.

Таблица 10.1. Приближенные значения эффективности фотосинтеза для различных условий

Условия	Эффективность фотосинтеза, %
<i>Неповрежденные растения (полный фотосинтез)</i>	
В целом по планете за усредненный год (инициирующее излучение распределено по поверхности суши и океана)	0,1
Леса: годовая усредненная	1
Пастбища: годовая (тропики, средняя; умеренная зона, при хорошей обработке)	2
Зерновые культуры: плотная посадка, качественная обработка, только за сезон роста, умеренная или тропическая зона	3
Культуры с постоянным сбором урожая например маниок	2
Лабораторные условия: повышенная концентрация $CO_2$ , оптимальные температура и освещенность, достаток воды и питательных солей	10
<i>Исходный фотосинтетический процесс</i>	
Фотосинтетически активная радиация, контролируемые условия, дыхание растений не включается, теоретический максимум первичного фотосинтетического процесса	30

Количественную оценку трофического уровня описания фотосинтеза можно продемонстрировать на следующем примере. Здоровые зеленые сбрасывающие листву растения на солнечном свету производят около 3 л  $O_2$  в час на 1 кг сырой массы листьев. Это соответствует энергетическому потоку мощностью около 16 Вт и достигается при облучаемой площади листьев, примерно равной 1 м<sup>2</sup>. Процессы метаболизма человека соответствуют мощности примерно 100 Вт при отдыхе и 200 Вт во время работы. Таким образом, в расчете на одного человека, потребляющего энергию в течение 24 ч, необходимо обеспечить от 15 до 30 м<sup>2</sup>

площади листьев. В странах умеренного климата эта потребность обеспечивается за счет примерно одного достаточно крупного дерева на человека. В тропических странах одно дерево может обеспечить кислородом около трех человек. Затраты его на промышленные, транспортные и хозяйственные нужды приводят к существенному увеличению расхода кислорода в расчете на одного человека.

Изучение энергетических связей при фотосинтезе показывает, что поглощенная солнечная энергия прежде всего аккумулируется молекулами кислорода, а не компонентами, содержащими углерод. Кислород в виде газа в результате рассеяния может свободно перемещаться в атмосфере, и конечное распределение этого аккумулятора энергии выравнивается по всей поверхности планеты. Аналогичный процесс происходит с  $\text{CO}_2$ . В процессе реакции соединения кислорода с углеродсодержащими составляющими биомассы накопленная энергия выделяется. Таким образом, общепринятое, но не соответствующее действительности представление о том, что пища и биомасса являются источником запасаемой в результате фотосинтеза энергии, оказывается вполне допустимым.

### 10.3. Фотосинтез на уровне растений

**Поглощение света.** Солнечное излучение, падающее на листья, частично отражается, частично пропускается и поглощается. В результате фотосинтеза небольшая часть поглощенной радиации (менее 5%) обеспечивает аккумуляцию энергии и производство кислорода. Оставшееся тепло проявляется через повышение температуры или в виде скрытой теплоты при испарении жидкости (кинетические и потенциальные энергетические изменения пренебрежимо малы). Образование кислорода является функцией, зависящей от длины волны излучения, и может быть описано спектральными характеристиками фотосинтеза.

На рис. 10.5 приведены типичные спектры поглощения и спектры действия для зеленого листа. Отметим, что фотосинтез, о чем свидетельствует экспериментальное определение выделения кислорода, происходит практически во всем диапазоне видимой части спектра. Поглощение же света наиболее заметно в синей и красной частях спектра — отсюда зеленый цвет листьев большинства растений. В настоящее время существуют высокоточная спектроскопическая техника и методики, позволяющие исследовать самые тонкие детали процесса, однако фундаментальными остаются следующие два результата.

1. Спектр поглощения пигментов живого листа отличается от суммы индивидуальных спектров поглощения тех же пигментов, выделенных химическими методами. Таким образом, внутри сложной структуры связанных пигментов *in vivo* спектры поглощения отдельных составляющих изменяются.

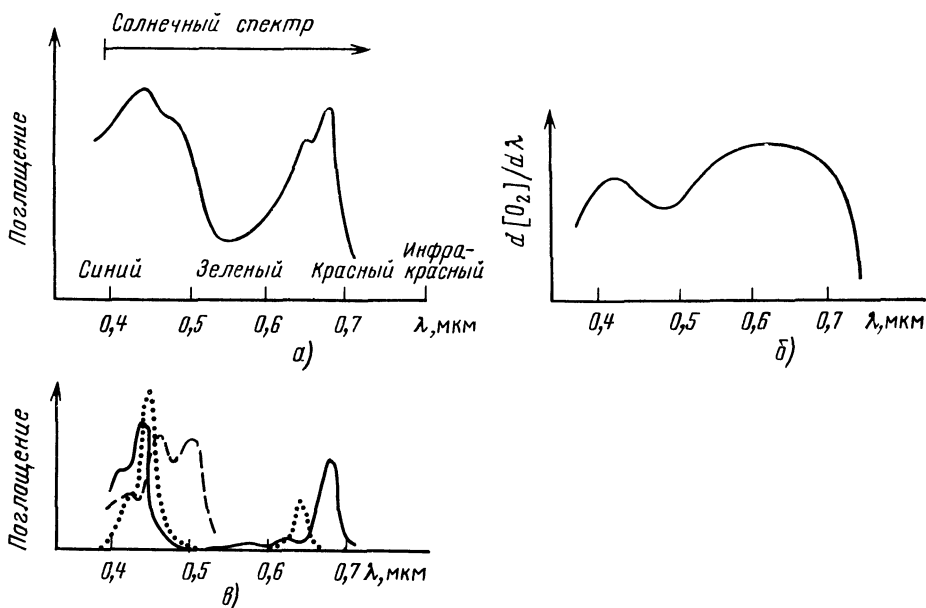


Рис. 10.5. Спектры фотосинтеза листьев растений и пигментов. Спектр поглощения зеленого листа *in vivo* (а). Спектр действия типичного зеленого растения  $d[O_2]/d\lambda$  — спектральное распределение скорости образования кислорода на единицу поверхности и интенсивности излучения (б). Спектры поглощения наиболее важных пигментов (в), выделенных в лабораторных условиях (*in vitro*). Наблюдается отсутствие комбинационного спектра, характерного для условий *in vivo* (а), подтверждающее изменение свойств пигментов при отделении от взаимодействующей структуры. Сплошная кривая — хлорофилл а; пунктирная кривая — хлорофилл в; штриховая — каротины

2. Для зеленых растений характерно увеличение фотосинтеза при поглощении света длиной волны 700 и 650 нм. В этом проявляется еще один коллективный эффект, называемый *эффектом Эммерсона*, подтверждающий, что фотосинтез в зеленых растениях идет при участии двух взаимодействующих между собой фотосистем.

**Строение листьев растений.** Из рис. 10.6 можно сделать общее представление о внутренней структуре и размерах отдельных элементов. На самом деле, если перейти к описанию на молекулярном уровне, все окажется еще сложнее и разнообразнее, но это уже вопрос физиологии растений. Рассмотрим здесь лишь основные моменты.

1. Фотосинтез происходит в растительных тканях, обычно в зеленых листьях и водорослях, о которых здесь и идет речь. Это явление также свойственно нескольким видам простейших организмов (например, пурпурным бактериям), живущим в отсутствие кислорода.

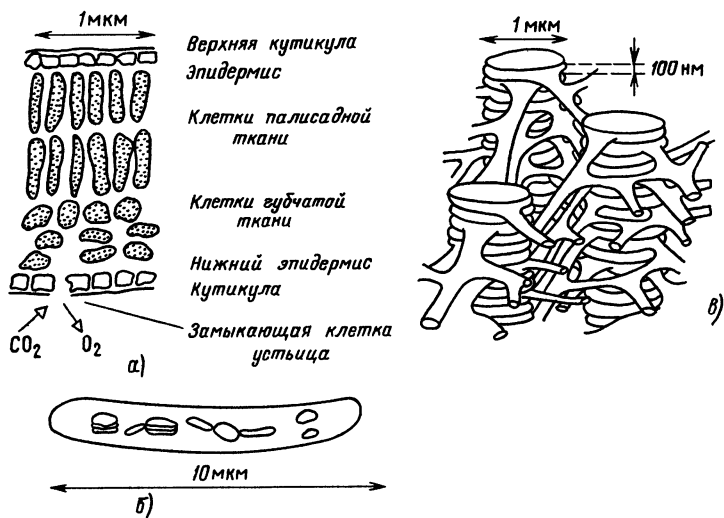
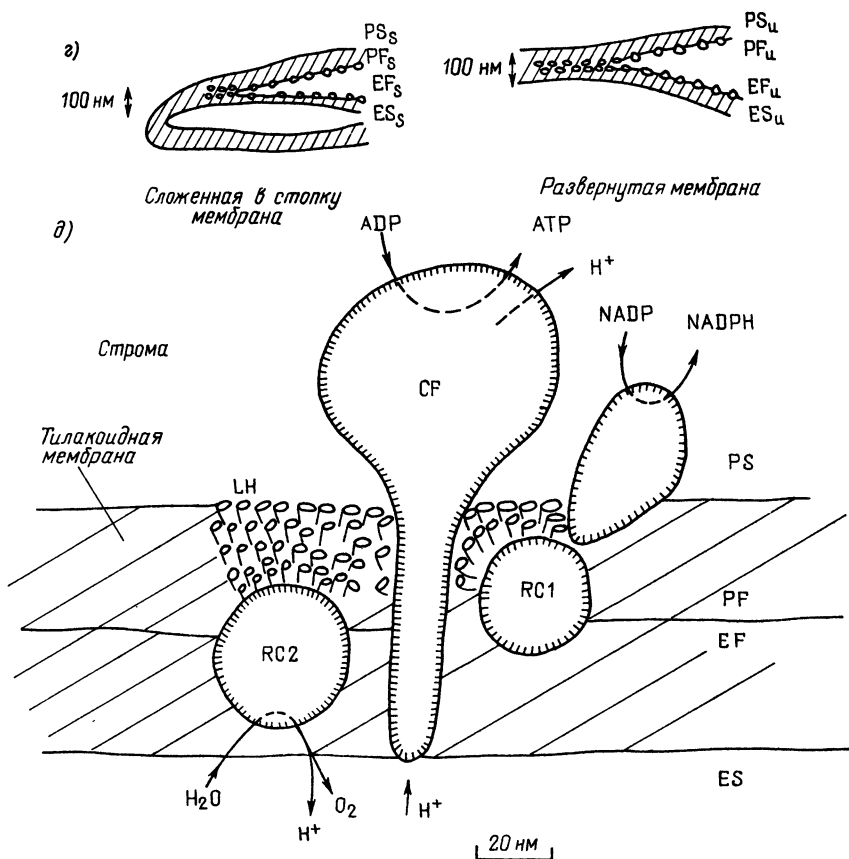


Рис. 10.6. Строение и характерные масштабы листьев растений. Срез типичного листа широколистного растения (а). Фотосинтетически активные клетки заполнены хлоропластами (точки). Указан примерный масштаб. В реальном листе клетки плотно прилегают друг к другу — пробелы между ними показаны для наглядности. Строение хлоропласта (боковое сечение, б). В жидкой строме видны мембраны тилакоидов. Стопки тилакоидов — граны — соединены плоскими мембранами тилакоидов строма. Показано объемное изображение тилакоидной системы (в). Внутри органеллы в жидкой строме находится система связанных между собой гран. Показана выделенная методом замораживания — скальвания расщепленная мембрана тилакоида с четырьмя характерными поверхностями (г): специфической поверхностью мембраны со стороны строма *PS* (протоплазматическая поверхность), поверхностью мембраны со стороны внутренней полости тилакоида *ES*, поверхностью мембраны со стороны внутреннего липидного монослоя, примыкающего к строме, *PF*, и поверхностью мембраны с внутренней стороны монослоя, примыкающего к внутреннему пространству тилакоида, *EF*. Мембраны гран обозначены индексом *S*, соединительных тилакоидов строма — индексом *и*. На внутренних поверхностях показаны особые наросты, видимые с помощью электронного микроскопа. Есть мнение, что именно они связаны с образованием *АТФ* и *НАДФН*. Белковые структуры, усваивающие  $CO_2$ , находятся на внешних *PS*-поверхностях мембран, а связанные с получением  $O_2$  и  $H^+$  — на внутренних поверхностях *ES*. Дано схематическое представление о тилакоидной мембране грана, внешняя поверхность которого примыкает к строме (д), *LH* —

2. Активные клетки зеленых растений палисадной и губчатой тканей, расположенные внутри листа длиной примерно 0,5 мм, имеют мембраны, проницаемые для газов и воды (рис. 10.6, а). Эти клетки содержат особые внутриклеточные тела — органеллы, также обладающие мембранами.

3. Фотосинтетически активные эллипсоидальные органеллы называются хлоропластами. Их длина — примерно 10 мкм, они содержат полужидкую среду (строма) и мембранную структуру в виде пластин (рис. 10.6, б).



светособирающая система из пигментных молекул, длина около 5 нм, примерно 20—400 таких молекул приходится на один реакционный центр *RC* (его диаметр примерно 20 нм). Реакционный центр содержит белковые молекулы с молекулярной массой примерно 50 000. Цифрами 1 и 2 обозначены соответствующие этим центрам фотосистемы; *CF* — соединительный фактор, обеспечивающий получение *АТФ* и «прокачку» протонов  $H^+$  через мембрану

4. Эти пластины, в которых локализованы пигменты, уплотнены, и большая их часть собрана в стопки (граны), а часть не собрана (пластины стромы) и связывает граны между собой, образуя внутри хлоропласта сеть взаимосвязанных полостей (рис. 10.6, в).

5. Пластины — не что иное, как тилакоиды. Они подобны сплюснутым дисковидным баллонам с оболочками из сдвоенных мембран, у которых можно выделить четыре специфические поверхности, обозначенные на рис. 10.6, г. Структура пластин



делит внутренний объем хлоропласта так, что жидкость с каждой стороны тилакоида может быть разной. Это деление не легко различить на двумерном срезе хлоропласта.

6. Тилакоидные мембраны содержат компоненты фотосинтезирующих систем, в которых идут световые реакции (рис. 10.6). Эти системы включают молекулы пигмента, по большей части хлорофилла, абсорбирующие фотоны в своих структурных элементах, подобных антеннам телекоммуникационных систем. Эти устройства и называют антеннами. Действуя совместно, молекулы пигмента направляют «сгустки» абсорбированной энергии (называемые экситонами) в реакционные центры. Улавливающие и передающие энергию элементы в целом называют светособирающим комплексом (*LH*).

7. Реакционные центры содержат оконечные молекулы пигментов *LH*-систем, находящиеся в контакте с молекулами белков с большой молекулярной массой. Полученная энергия вызывает в них протекание последовательности сложных каталитических окислительно-восстановительных реакций.

8. Зеленые растения обладают двумя типами реакционных центров (*RC1* и *RC2*), каждый из которых получает только свою часть энергии от *LH*-системы. Эти центры включают в себя две различные фотосистемы *PS1* и *PS2*.

9. В реакционном центре *RC1* образуется сильный восстановитель NADPH (восстановленный никотинамидадениндинуклеотидфосфат).

10. В реакционном центре *RC2* образуется газообразный кислород, а избыток энергии идет на синтез энергоаккумулирующей молекулы ATP (аденозинтрифосфат).

11. NADPH способен инициировать реакцию фиксации  $\text{CO}_2$  снаружи тилакоидной мембраны во внешней среде стромы. Эти реакции могут идти на свету или в темноте, так как образование NADPH отделяет во времени процесс усвоения  $\text{CO}_2$  от акта поглощения квантов света. Эти реакции называются темновым циклом Кальвина.

12. Протоны, высвободившиеся при образовании  $\text{O}_2$  и ATP, удерживаются тилакоидными мембранами во внутренних полостях. В течение образования ATP они «прокачиваются» через мембраны фактором сопряжения CF, обеспечивая полный цикл процесса.

13. В цикле Кальвина  $\text{CO}_2$ , поглощенный из раствора, утилизируется и идет на синтез углеводов, белков и жиров.

14. Фотосинтезирующие бактерии являются прокариотическими клетками (не имеющими внутренних ядерных мембран и органелл), и их пигменты расположены непосредственно на внутриклеточных мембранах. Действует лишь одна фотосистема *PS1*, поэтому кислород не образуется.

## 10.4. Термодинамический анализ

Здесь фотосинтез рассматривается в аспекте термодинамики, что важно для понимания стратегии энергетики на возобновляемых ресурсах и дает основу для общего понимания вопроса.

Предположим, что имеется идеальная тепловая машина Карно, приводимая в действие солнечной энергией (см. § 6.9) и производящая работу с КПД  $\eta$  со сбросом тепла в окружающую среду при температуре, скажем,  $27^\circ\text{C}$  ( $300\text{ K}$ ). Источник тепла питается солнечным излучением. В случае горизонтального плоского поглощающего коллектора максимальная температура источника достигается примерно  $200^\circ\text{C}$  ( $473\text{ K}$ ), а максимальный КПД  $\eta = (473 - 300)/473 = 37\%$ . В случае использования энергетической башни с концентратором излучения на коллектор максимальный КПД может быть  $\eta = (773 - 300)/773 = 61\%$ . Если бы можно было использовать тепло при температуре внешней оболочки Солнца, то КПД был бы равен  $\eta = (5300 - 300)/5300 = 95\%$ . Таким образом, с инженерной точки зрения значительно выгоднее вести процесс при наивысшей возможной температуре, т. е. при температуре на поверхности Солнца.

Из предыдущего абзаца может показаться разумным добиваться осуществления теплового процесса именно за счет повышения температуры коллектора солнечного излучения. Однако это будет подобно осуществлению теплопередачи в задачах, связанных с ядерным синтезом, и приведет к подобным же трудностям. При столь высоких температурах конструкционные материалы теряют прочность, и срок эксплуатации установок сокращается. Поэтому интересно реализовать возможность поглощения излучения через посредство процессов, идущих на уровне преобразования энергии фотонов в электронные состояния материалов без непосредственного увеличения температуры конструкций. Соответствующий процесс реализуется при фотоэлектрической генерации энергии (см. гл. 7). Сравним два процесса — тепловое и фотонное возбуждения электронов.

На рис. 10.7 представлен материал, который может находиться в двух электронных состояниях — основном и возбужденном. Различие между этими состояниями определяется исключительно

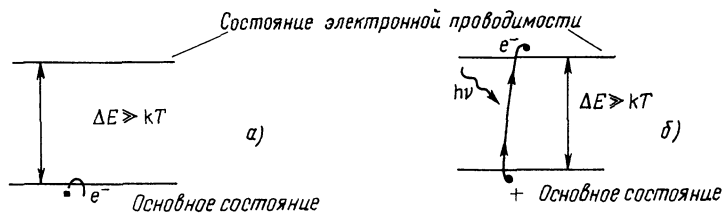


Рис. 10.7. Возбуждение электронов в процессе нагрева (а) и в процессе поглощения фотонов (б). Вертикальный масштаб соответствует энергии возбуждения

различием в положении электронов при неизменном состоянии ядер.

Состояние на рис. 10.7, а получено за счет нагревания всего материала. Отношение концентрации возбужденных состояний  $N_e$  к числу основных  $N_n$  можно рассчитать по аналогии с естественными полупроводниками:

$$N_e/N_n = \exp(-\Delta E/kT). \quad (10.5)$$

Если взять за основу молекулу пигмента, для которой  $\Delta E \approx 2$  эВ, а  $T \sim 373 \text{ К} = 100^\circ \text{ С}$ , поскольку клеточный материал находится в воде, то  $N_e/N_n \sim 10^{-14}$ . Даже при температуре Солнца отношение  $N_e/N_n = 0,02$ . Это позволяет сделать вывод, что тепловое возбуждение не дает возможности получить достаточной концентрации возбужденных состояний.

В то же время на рис. 10.7, б возбужденные электронные состояния образуются за счет электромагнитного поглощения фотонов с энергией  $h\nu \geq \Delta E$ . Этот процесс не связан с выделением энергии в момент возбуждения: энергия сохраняется в атомной решетке при первоначальной температуре. Заселенность возбужденных состояний зависит от скорости абсорбции фотонов и взаимодействия возбужденных электронов с решеткой.

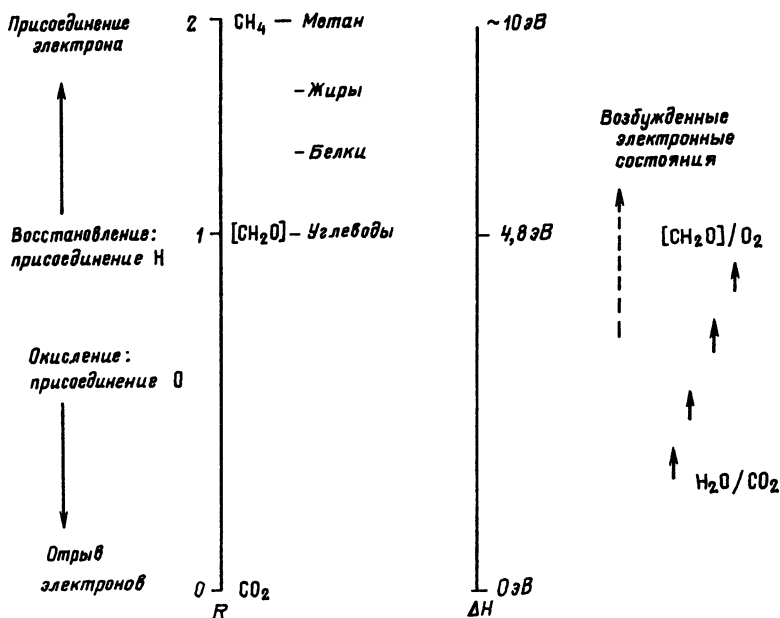


Рис. 10.8. Уровни восстановления углеродных соединений R (изменение энтальпии  $\Delta H$  на атом углерода химических соединений по отношению к образованию  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ ; на один атом углерода переносится четыре электрона)

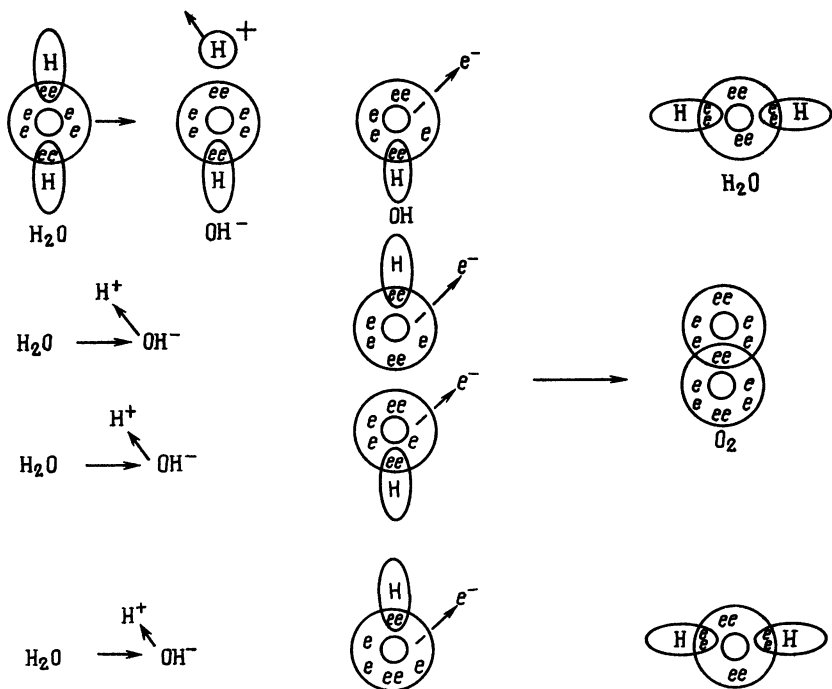
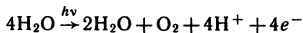


Рис. 10.9. Восстановление воды до кислорода и протонов в реакционном центре фотосистемы PS2. Образуются четыре электрона:



В соответствии с нашей идеальной моделью предел заселенности наступит при  $N_e = N_n$ . При этом излучение полностью пойдет на повышение заселенности возбужденных состояний, а электронная температура устремится к бесконечности. Конечно, такой случай не может реализоваться на практике, но тем не менее модель показывает, что прямое преобразование энергии фотонов в возбужденные состояния электронов позволяет получить заселенности последних, в  $10^{10}$  раз превышающие аналогичные величины при тепловом нагреве.

Термодинамический анализ не полон до тех пор, пока не рассмотрена цепочка энергетических превращений. При фотосинтезе энергия фотонов преобразуется в энергию возбужденных состояний электронов за счет электромагнитных процессов, а в конечном итоге энергия аккумулируется в химических соединениях. При этом не производится «работа» в обычном механическом смысле, но работа в смысле перегруппировки электронных состояний происходит, и в результате этого создаются энергоемкие органические вещества.

Химические изменения, происходящие в процессе фотосинтеза, в некоторой степени подобны изменениям электронных состояний в физике полупроводников. В химических реакциях изменения энергии происходят за счет окисления и восстановления. Уровень восстановленности определяется числом молекул кислорода на атом углерода, необходимым для превращения вещества в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Для углеродсодержащих веществ типа  $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_0$  уровень восстановленности определяется следующим образом:

$$R = (c + 0,25h - 0,05o) / c. \quad (10.6)$$

Энергия формирования подобных веществ из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  составляет примерно 460 кДж/моль углерода на единицу уровня восстановленности.

Зависимость уровня восстановленности от энергии состояний при фотосинтезе показана на рис. 10.8. Фотосинтез — это по существу восстановление  $\text{CO}_2$  в присутствии  $\text{H}_2\text{O}$  до углеводов и кислорода. При этом четыре электрона отбираются от четырех молекул воды (рис. 10.9). Более детально этот процесс рассмотрен в § 10.6.

## 10.5. Фотофизика

Физические процессы при фотосинтезе включают поглощение фотонов света электронами молекул пигмента. При этом молекулы переходят в возбужденное состояние. Если молекула изолирована, то энергия обычно переизлучается в виде флуоресценции. Если же молекулы пигмента «вмонтированы» в структуры хлоропластов, то большая часть энергии согласованно переносится в реакционные центры для превращения в химическую и только часть ее тратится на флуоресценцию.

Свойства изолированного пигмента объясняются диаграммой Франка — Кондона (рис. 10.10). На ней показаны зависимости основного и возбужденного состояний молекулы от относительного положения ее атомов, определяемого с помощью некоторой пространственной координаты — расстояния между двумя определенными соседними атомами. Следует отметить, что минимумы энергии возникают и достигаются при различных  $x$  вследствие изменения положения или размеров молекул после возбуждения. Фотон перемещается в молекуле со скоростью  $3 \times 10^8$  м/с на расстояние примерно  $10^{-9}$  м, что занимает примерно  $10^{-18}$  с. За это время происходит электромагнитное взаимодействие фотона с электронами молекул и поглощение фотонов с энергией около 2 эВ. В результате в молекулах возбуждаются колебательные и вращательные степени свободы с тепловой энергией  $kT \sim 0,03$  эВ и периодом около  $10^{-13}$  с. Соответствующие состояния обозначены на диаграмме горизонталь-

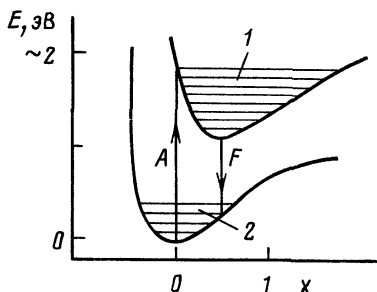


Рис. 10.10. Диаграмма Франка — Кондона, иллюстрирующая стоксовское смещение энергии поглощенного  $A$  и флуоресцентного  $F$  фотонов. Обобщенная координата  $x$  (порядка  $10^{-10}$  м) обозначает изменение положения или размера возбужденной системы (возбужденный синглет 1) относительно ее основного состояния (2)

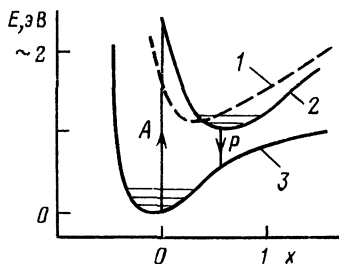


Рис. 10.11. Триpletное состояние и фосфоресцентный фотон  $P$ . Так как различные состояния могут частично совпадать, то возвращение в основное состояние может происходить и без испускания излучения:

1 — возбужденный синглет; 2 — метастабильный триплет; 3 — основное состояние

ными линиями, характеризующими колебания вблизи положения с минимальной энергией. Поглощение фотона ( $A$ ) происходит так быстро, что молекулярная структура не успевает прореагировать. За счет этого возбужденное состояние не соответствует минимуму энергии. Если возбужденный электрон был первоначально в паре с другим электроном (что вполне возможно), то возбужденное состояние будет синглетным (спин- $1/2-1/2=0$ ) со временем жизни около  $10^{-8}$  с.

За это время происходит примерно  $10^6$  молекулярных колебаний, и в результате могут иметь место два процесса: либо молекула находится в контакте с другими ей подобными и поглощенная энергия (называемая *экситоном*) передается им путем резонансной проводимости, связанной с тепловым движением (основной процесс *in vivo*) либо возбужденное состояние релаксирует к минимуму энергии и примерно через  $10^{-8}$  с в результате флуоресценции ( $F$ ) возвращается в основное состояние. Длина волны испускаемого при этом излучения больше длины волны поглощенного света, как это и предсказывается стоксовским смещением. В качестве альтернативы в результате взаимодействия с магнитным полем ядра электрон в возбужденном состоянии может изменить ориентацию, образуя триплет (спин- $1/2+1/2=1$ ). Время жизни триплета значительно больше (около  $10^{-3}$  с), а соответствующая потеря энергии достигается уже за счет фосфоресценции ( $P$  на рис. 10.11) или путем резонансной передачи. Последняя может происходить между молекулами, когда они оказываются на расстоянии  $5 \cdot 10^{-10}$  м и частота флуоресцентного излучения передающей молекулы ле-

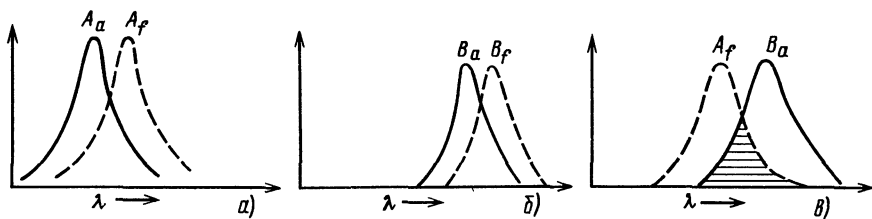


Рис. 10.12. Резонансная передача энергии. По оси абсцисс отложены длины волн полос флуоресценции и абсорбции различных молекул, по оси ординат — интенсивности полос. Абсорбция (*a* в индексе) и флуоресценция (*f* в индексе) молекул *A* (*a*); то же молекул *B* (*b*); частичное перекрытие полос флуоресценции и абсорбции молекул *A* и *B*, создающее возможность резонансной передачи энергии при их контакте (*в*)

жит в полосе поглощения соседней (рис. 10.12). При таких условиях энергия возбужденных электронных состояний (экситонов) может передаваться без излучения в окружающую среду соседним молекулам. Этот способ иллюстрируется диаграммой передачи возбуждения между отдельными энергетическими уровнями в форме, показанной на рис. 10.13, *a*, или, если молекулы расположены очень близко, ступенчатой кривой, приведенной на рис. 10.13, *б*. В обоих из этих процессов происходит частичный перенос энергии вдоль градиента потенциала через ансамбль молекул. Этот процесс подобен движению электронов в материале фотоэлементов с переменной шириной запрещенной зоны (см. § 7.8). Отличие состоит в том, что при фотосинтезе энергия переносится молекулой в целом в процессе возбуждения и релаксации, а не простой передачей свободного электрона.

Однако существует и более серьезное различие между переносом электронов в полупроводниковых фотоэлементах и энергетическим транспортом в молекулах пигмента. Полупроводники изготавливаются с заранее заданными свойствами проводящих

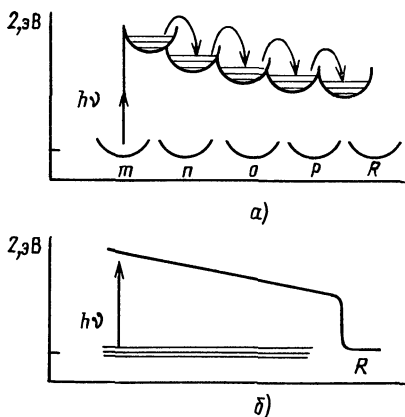


Рис. 10.13. Передача энергии молекулами пигмента светособирающей системы в реакционный центр. Пространственное положение светособирающих молекул пигмента (*m*, *n*, *o*, *p*), последовательно передающих энергию в реакционный центр *R* (*a*) и модель непрерывной передачи возбуждения в реакционный центр *R* (*б*)

слоев во всем объеме элемента. Каждый элементарный объем имеет определенную концентрацию примесей и заданную локализацию их в кристаллической решетке. Если такой фотоэлемент разбить на отдельные кусочки, то каждый из них продолжает сохранять свои свойства. Фотосинтезирующая же система является коллективным ансамблем взаимодействующих молекул пигмента, и при этом не столь важно, где находится конкретная молекула: она вносит определенный вклад в преобразование энергии излучения не в зависимости от ее положения, а в соответствии с ее электронным состоянием. Поэтому если клетку разрушить, то каждый пигмент будет проявлять свои индивидуальные свойства. Это и является причиной различия свойств молекул пигмента *in vivo* и *in vitro* в процессах поглощения излучения и флуоресценции.

### 10.6. Фотосинтез на молекулярном уровне

Выше дано представление о фотосинтезе в целом. В данном параграфе уточняются физические детали, хотя надо понимать, что некоторые утверждения носят умозрительный характер. Авторами не ставилась цель включения сведений из биологии и химии, так как на уровне данной книги вполне достаточно чисто физического понимания. Кроме того, детали фотосинтеза хорошо описаны в специальной литературе.

**Сбор световой энергии и реакционный центр.** Фотосинтетически активное излучение поглощается молекулами пигментов, из которых наиболее распространен хлорофилл типа *a*; некоторые другие пигменты имеют схожие структуру и форму. Молекула хлорофилла состоит из гидрофобного (отталкивающего воду) хвоста и гидрофильного (притягивающего воду) кольца. Хвост — это длинная цепочка углеводов (фитильный остаток  $C_{20}H_{39}$ ), по длине в 4 раза превышающая «диаметр» кольца. Хвост предназначен для фиксации внутри внешней поверхности тилакоидной мембраны, кольцо же непосредственно контактирует с полужидкой средой стромы хлоропласта (рис. 10.6, *д*).

Фотоны поглощаются достаточно близко расположенными друг к другу молекулами пигмента, создающими в результате коллективного взаимодействия достаточно широкополосную систему, направляющую за счет резонансной передачи экситоны по градиенту потенциала в реакционный центр. На 200—400 молекул пигмента в клетке приходится один реакционный центр. Ансамбли с меньшим или большим количеством молекул пигмента на один реакционный центр имеются у различных растений, водорослей или фотосинтезирующих бактерий. Чем выше пороговая чувствительность системы к свету, тем больше, как правило, молекул пигмента на реакционный центр они содержат. Фотоны могут быть поглощены внешними или внутренними



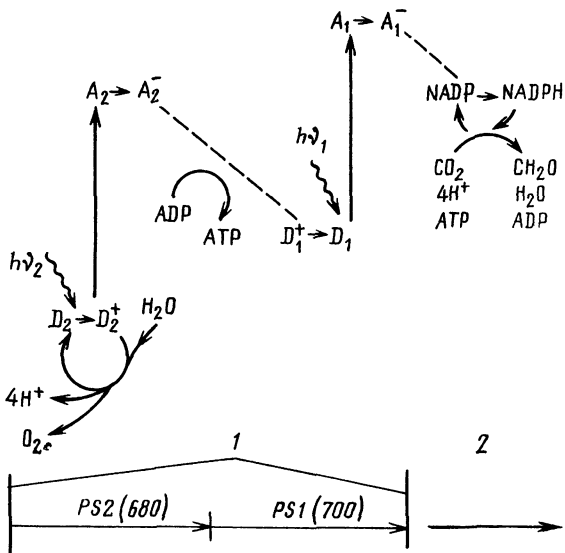


Рис. 10.14. Z-диаграмма фотосинтеза: 8 фотонов необходимо для фиксации одного атома углерода. Вертикальный масштаб соответствует энергии возбуждения электронов:

1 — световые реакции, происходящие внутри мембраны, 2 — темновые реакции вне мембраны

светособирающими молекулами, а результирующий экситон попадает в реакционный центр по пути наименьшего сопротивления. Сам центр включает конечную молекулу пигмента и несколько весьма крупных (с молекулярной массой около 50000) специализированных молекул, в которых идут химические реакции. Основанием для утверждения о таком параллельном сборе световой энергии в общий центр служат данные по исследованию возбуждения спектров действия, абсорбции и флуоресценции под воздействием световых вспышек с различными длинами волн и длительностями. Наблюдения показывают, что существует два типа ансамблей, специфических для каждой из двух фотосистем *PS1* и *PS2*, которые обеспечивают необходимое разделение падающего света по частотным диапазонам.

**Световые реакции.** Физические процессы, происходящие в фотосистемах *PS1* и *PS2*, подобны (рис. 10.14). Светособирающая система (*LH*) направляет энергию в реакционный центр к особым образом расположенной молекуле хлорофилла *a*, которая является индикатором центра. Для *PS2* эта молекула *P680* и для *PS1* — *P700*. Они избирательно абсорбируют излучение на длине волны  $680 \pm 10$  нм (1,82 эВ) и  $700 \pm 10$  нм (1,77 эВ). Заметим, что обе эти молекулы поглощают в красной

области спектра, определяя тем самым свое положение при минимуме потенциальной энергии  $LH$ -системы.

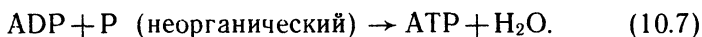
В реакционном центре имеются донорные и акцепторные молекулы. (Эти названия используются по аналогии с физикой полупроводников. Однако буква  $p$  может быть использована для обозначения молекул-доноров в противоположность смыслу  $p$ -типа проводимости у полупроводников.) Канализированный в результате каждого акта поглощения фотона экситон в реакционном центре вызывает отрыв электрона от определенного донора ( $D$ ) и подъем его на энергетический уровень акцептора ( $A$ ). С участием же радикалов  $A^-$  и  $D^+$  происходят химические реакции, причем они являются циклическими, в результате чего  $D^+$  получает новый электрон,  $A^-$  отдает возбужденный электрон и процесс вновь повторяется. Соответственно и химические реакции с участием доноров и акцепторов идут в две стадии: на первой  $D^+$  превращается в  $D$ , а на второй —  $A^-$  в  $A$ . На самом деле эти реакции значительно сложнее и еще не полностью определены из-за множества отклонений в деталях. Однако физика процесса ясна. Для зеленых растений характерны пять совершенно определенных этапов, обозначенных на  $Z$ -схеме (рис. 10.14 и, кроме того, рис. 10.3).

1.  $D_2^+ \rightarrow D_2$ ,  $D_2^+$  образуется путем электронного возбуждения  $PS2$ . Это сильный окислитель (отбирающий электроны) с окислительно-восстановительным потенциалом  $+0,9$  В. Согласно имеющимся данным  $D_2^+$  — молекула хлорофилла  $a$  или молекулярная пара в безводной среде тилакоидной мембраны. Окислительное действие  $D_2^+$  проявляется в отрыве электрона от молекулы  $H_2O$  с непременным участием четырех  $D_2^+$  в образовании одной молекулы  $O_2$  (см. § 10.4 и рис. 10.9). Молекула  $O_2$  проникает через все мембраны клеточных структур и покидает растение. Протон  $H^+$  удерживается двойной мембраной тилакоида.

2. Поглощение фотона в  $PS2$ . Донор  $D_2$  освобождает электрон, поднимающийся к акцептору  $A_2$  и образующий  $A_2^-$ . Сам  $A_2$ , на схемах обычно обозначаемый меткой  $Q$ , — реагент пока неизвестной природы. Возможно, это пластохинон.  $A_2^-$  — слабый восстановитель с окислительно-восстановительным потенциалом  $-0,1$  В, т. е. фотонное возбуждение, передаваемое от  $D_2^+$ , составляет от 1,0 до 1,1 эВ. При этом  $D_2$  поглощает кванты с длиной волны  $680 \pm 10$  нм.

3. Связь между  $PS2$  и  $PS1$ ; образование  $ATP$ . От  $A_2^-$  через серию реакций осуществляется передача электрона к  $D_1^+$ , имеющему окислительно-восстановительный потенциал  $+0,4$  В. Разница в энергиях идет на образование энергоаккумулирующего вещества —  $ATP$  (аденозинтрифосфат) из  $ADP$  (аденозиндифосфат). Расход энергии на молекулу  $ATP$  составляет 0,34 эВ. Минимальное образование  $ATP$  составляет три моле-

кулы на четыре акта взаимодействия между *PS2* и *PS1*. Именно такое количество АТФ требуется для осуществления цикла Кальвина (см. ниже). Реакция образования АТФ имеет вид



4. *Поглощение фотона в PS1*. Результатом передачи фотона *LH* системой к реакционному центру *PS1* является образование  $D_1^+$  и  $A_1^-$ .  $D_1$  — разновидность хлорофилла *a* в виде мономера или пары (поглощает на длине волны  $700 \pm 10$  нм);  $A_1$  — белок ферродоксин.

5. Образование NADPH. Электрон, поднимаемый на энергетический уровень  $A_1^-$ , далее идет на образование NADPH из  $\text{NADP}^+$ . NADP — это никотинамидадениндинуклеотидфосфат. Его восстановленная форма — NADPH, а окисленная —  $\text{NADP}^+$ , иногда записываемая как NADP,



Таким образом, каждый акт восстановления  $\text{NADP}^+$  требует двух электронов, поступающих от двукратного «срабатывания» *PS1*.

**Темновые реакции (цикл Кальвина)**. Образованием NADPH в *PS1* создается основной восстановитель, необходимый для фиксации  $\text{CO}_2$  в виде углеводов. Соответствующие реакции описываются уже обычной химией, а не фотохимией, и могут протекать как в темноте по окончании периода поглощения света, так и в процессе поглощения света. Эти реакции — цикл Кальвина — идут в строме хлоропластов за пределами тилакоидных структур. Их ход можно проследить, используя радиоуглеродный метод с помощью изотопа  $^{14}\text{C}$ . У фотосинтезирующих бактерий *PS1* является единственной фотосистемой, и поэтому фиксация  $\text{CO}_2$  не сопровождается образованием  $\text{O}_2$  (так как *PS2* отсутствует). В зеленых растениях химические продукты всех трех стадий реакций, связанных с *PS2* и *PS1* ( $D_2^+$ ,  $A_2^-$ ,  $D_1^+$ ,  $A_1^-$ ), используются в темновых реакциях. Таким образом, основными изначальными веществами для цикла Кальвина являются NADPH, АТФ и  $\text{H}^+$ , поставляемые фотосистемами, и  $\text{CO}_2$  с  $\text{H}_2\text{O}$  из окружающей среды. В процессе цикла Кальвина происходит целый ряд сложных промежуточных реакций, однако обобщенно его можно описать так:



Таким образом, для фиксации одного атома восстанавливаемой  $\text{CO}_2$  необходимы три молекулы АТФ, два протона  $\text{H}^+$  и две молекулы NADPH. Для того чтобы вновь восстановить молекулу NADP до NADPH, требуется два электрона, вырабатываемых за два акта действия *PS1*. Восстановление одной

молекулы  $\text{CO}_2$  требует примерно девять квантов света, преобразуемых в фотосистемах *PS2* и *PS1*. Протоны для этой реакции поставляются из тилакоидов с помощью различных «насосных» механизмов (см. рис. 10.6, д);  $\text{P}_1$  — неорганический фосфат.

У большинства растений первичным продуктом цикла Кальвина является соединение, содержащее три атома углерода ( $\text{C}_3$ ). Некоторые тропические растения (сахарный тростник, маис, сорго) имеют предварительный химический цикл образования  $\text{C}_4$  — компонент до осуществления цикла Кальвина. Такие  $\text{C}_4$ -растения обладают двумя различными типами фотосинтезирующих клеток, функционирующих совместно. При высоких уровнях освещенности (около  $0,5 \text{ кВт/м}^2$ ) и высоких температурах (примерно равных  $40^\circ \text{C}$ ) фиксация углерода и, следовательно, образование биомассы идет у  $\text{C}_4$ -растений примерно в 2 раза быстрее, чем у обычных  $\text{C}_3$ -растений.

**Число фотонов на фиксацию одного атома углерода.** Основное требование при поглощении света растениями заключается в том, чтобы абсорбировались отдельные фотоны и на определенное время накапливалась энергия для осуществления последующих химических реакций и подготовки новых актов фотонного возбуждения. Каждая фотосистема запускается одиночным фотоном. Если молекулы одной из систем уже задействованы (насыщены), то возможна передача экситона к другим ненасыщенным молекулам. В *PS2* должны произойти минимум четыре акта поглощения для образования одной молекулы  $\text{O}_2$  (это соответствует возбуждению четырех электронов молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ ). Еще четыре фотона необходимы для получения молекулы  $\text{NADPH}$ , восстанавливающей  $\text{CO}_2$ . Таким образом, в зеленых растениях со сдвоенными системами *PS2* и *PS1* для фиксации одного атома углерода в углеводе необходимо по крайней мере поглощение восьми фотонов. На практике оказывается, что их необходимо больше: все процессы обладают конечной эффективностью, есть потери энергии, кроме того, некоторое количество энергии необходимо затратить на образование  $\text{ATP}$ . По этим причинам большинство растений в оптимальных условиях расходуют на фиксацию одного атома углерода, по всей вероятности, 10 фотонов.

**Энергетические состояния.** В упрощенной реакции (10.1) разность энергетических состояний  $\text{C}$  в  $\text{CH}_2\text{O}$  и в  $\text{CO}_2$  составляет 4,8 эВ. На каждой из четырех циклов, происходящих совместно в *PS2* и *PS1*, в среднем приходится 1,2 эВ. Это значение можно получить для обоих реакционных центров суммированием затрат энергии по этапам, эВ:

Образование $\text{O}_2$ с помощью $D_2^+$ .....	—0,2
Поглощение <i>PS2</i> .....	+1,1
Связь между <i>PS2</i> и <i>PS1</i> , образование $\text{ATP}$ .....	—0,5
Поглощение <i>PS1</i> .....	+1,0
Образование $\text{NADPH}$ .....	—0,2

Знаки соответствуют физическим процессам, идущим при электронном возбуждении. Химические окислительно-восстановительные потенциалы имеют противоположные знаки, но суть остается той же. Вступающим в реакцию  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  соответствует нулевой уровень энергии.

**Эффективность фотосинтеза.** Эту величину можно определить различными способами. Минимум энергии фотонов, попадающих на внешние антенны молекул пигмента (но не в реакционный центр!), составляет для четырех из них по 1,77 эВ (*PS2* абсорбирует для  $D_2$  на длине волны 700 нм) и для других четырех — по 1,82 эВ (*PS1* абсорбирует для  $D_1$  на волне 680 нм), т. е. всего 14,4 эВ. Реальная передача возбуждения от  $D_2$  к  $A_2$  и от  $D_1$  к  $A_1$  требует по 1,1 эВ (см. рис. 14.10). Соответственно четыре акта требуют затраты энергии 8,8 эВ. Энергетический выход можно оценить по энергии, необходимой, чтобы передать четыре электрона от молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  к молекуле NADP против окислительно-восстановительного потенциала 1,15 эВ (4,6 эВ) плюс образование трех молекул АТФ по 0,34 эВ на каждую (1,02 эВ), что в сумме дает 5,6 эВ. Выход также можно оценить по энергии на образование молекулы  $\text{O}_2$  и фиксацию атома углерода в углеводе, требующих 4,8 эВ.

Вполне резонно оценить максимальную эффективность фотосинтеза (КПД) от момента поглощения света до получения конечных продуктов как  $4,8/14,4 = 33\%$ . Однако и другие значения (5,6/14,4; 5,6/8,8 и 4,8/8,8) следует учитывать.

При анализе вопросов взаимодействия фотонов с веществом в качестве единицы измерения энергии часто используется 1 эйнштейн (1 Э), определяемый как энергия моля фотонов одной частоты.

Однако в солнечном спектре содержится масса фотонов со слишком малой для фотосинтеза энергией ( $\lambda > 700$  нм,  $h\nu < 1,8$  эВ) и с энергией, значительно превышающей требуемый порог ( $h\nu > 1,8$  эВ). Сходная ситуация отмечается у фотоэлектрических преобразователей (см. рис. 7.12). За счет этого максимальная эффективность фотосинтеза снижается примерно на половину (16%). Если учесть еще и отражение и пропускание растительных тканей, то эта величина должна быть уменьшена до 12%. Подобное значение и было получено в контролируемых лабораторных условиях, однако его не удалось достичь ни в условиях выращивания высокоурожайных культур, ни в природных условиях (см. табл. 10.1).

## 10.7. Искусственный фотосинтез

Ниже приведены некоторые соображения о перспективах использования фотосинтеза в будущем.

**Физиология растений и биомасса.** Несомненно, будет продолжаться селекция и выведение новых сортов, наилучшим обра-

зом соответствующих условиям среды. В качестве примера, уже давшего результаты, можно привести понимание того, почему  $C_4$ -растения более продуктивны в условиях повышенной интенсивности облучения, чем  $C_3$ -растения (см. § 10.6). Так как важность поступления энергии от переработки биомассы нарастает (см. гл. 11), направленный поиск будет осуществляться в области повышения топливных свойств растений, а не только в направлении увеличения урожайности фруктов, зерновых и т. п. Вполне можно вообразить, что с помощью фотосинтеза в промышленных условиях будут получаться искусственные углеродсодержащие структуры, различные материалы и пищевые продукты.

**Производство водорода.** Три протона, образующиеся в процессе фотосинтетического цикла, могут в некоторых отдельных случаях быть выделены в виде газообразного водорода. Ион  $H^+$  восстанавливается (присоединяет электрон) с помощью акцептора  $A^-$  системы *PSI*. Этой реакции в естественных условиях способствуют некоторые естественные ферменты (гидрогеназы), и она идет в природе, например с участием бактерий *bacterio-rhodopsin*, и в процессах метаболизма человека, связанных с разложением остатков пищи. Обычно, однако, гидрогеназы бездействуют в присутствии  $O_2$ , и если даже и выделяется  $H_2$ , то в очень малых концентрациях. Тем не менее перспектива получения значительных количеств водорода с помощью химических реакций, активизируемых солнечным излучением, настолько важна с экономической точки зрения, что усиление исследований в этом направлении весьма заметно.

**Фотохимическое производство электроэнергии.** Процесс фотосинтеза приводится в действие за счет молекулярного возбуждения *PS2* и *PSI*, вызываемого фотонами. Это электронное возбуждение, происходящее внутри молекулярных структур, нельзя в точности считать аналогом электронно-дырочной проводимости фотоэлектронных устройств с пространственным разделением зарядов под воздействием излучения. Однако эти молекулярные экситоны имеют энергию достаточную, чтобы создавать ток во внешней электрической цепи; следовательно, оба процесса можно связать. Преимущество фотосинтезирующих систем по сравнению с традиционными фотоэлектрическими заключается в том, что соответствующая среда может производиться в больших количествах в виде растворов химических реагентов, а электрические системы могут служить для них аккумуляторами энергии. Исследования и разработки в области фотохимии представляют сейчас первостепенный интерес.

#### Задача

10.1. Приблизительно определите, сколько деревьев требуется для производства кислорода, необходимого для полного удовлетворения потребностей в топливе из расчета на одного жителя Вашей местности.

Глава 11  
**БИОТОПЛИВО**

**11.1. Введение**

То, из чего состоят растения и животные, принято называть биомассой. Основа биомассы — органические соединения углерода, которые в процессе соединения с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют тепло. Посредством химических или биохимических процессов биомасса может быть трансформирована в такие виды топлива, как газообразный метан, жидкий метанол, твердый древесный уголь. Первоначальная энергия системы биомасса — кислород, как показано в гл. 10 и на рис. 11.1, возникает в процессе фотосинтеза под действием солнечного излучения, являющегося естественным вариантом преобразования солнечной энергии. При сгорании энергия биотоплива рассеивается, но продукты сгорания могут вновь преобразовываться в биотопливо путем естественных экологических или сельскохозяйственных процессов (см. гл. 1 и рис. 11.1). Таким образом, использование промышленного биотоплива, будучи хорошо увязанным с природными экологическими циклами, может не давать загрязнений и обеспечивать непрерывный процесс получения энергии. Подобные системы называются агропромышленными. Для них наибольшие успехи достигнуты в отраслях, перерабатывающих сахарный тростник и древесину.

В пересчете на сухую массу образование биологических материалов в биосфере идет со скоростью около  $250 \cdot 10^9$  т/год. При этом ежегодно связывается примерно  $100 \cdot 10^9$  т углерода. Энергия, потребляемая при фотосинтезе, составляет  $2 \cdot 10^{21}$  Дж/год ( $0,7 \cdot 10^{14}$  Вт). Из общего количества биомассы только 0,5% употребляется человечеством в виде пищи. Образование биомассы изменяется в зависимости от местных условий, и на

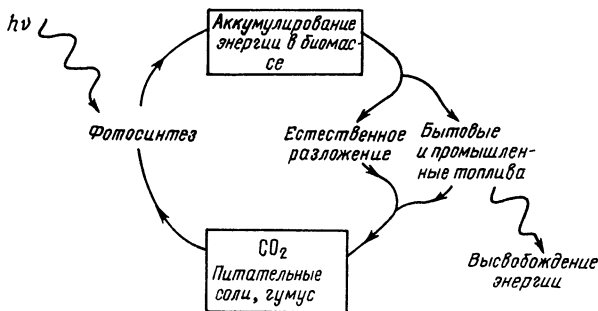


Рис. 11.1. Система планетарного круговорота биомассы

единице площади суши ее образуется примерно в 2 раза больше, чем на единице площади моря. Промышленное использование энергии биомассы может быть весьма значительным, например за счет отходов производства сахара в поставляющих его странах покрывается до 40% потребностей в топливе. Применение биотоплива в виде дров, навоза и ботвы растений имеет первостепенное значение в домашнем хозяйстве примерно 50% населения планеты, обеспечивая выработку в целом около 300 ГВт. Но если предположить, что биомасса возобновляется, то необходимо обеспечить ее производство по крайней мере на одном уровне с потреблением. Для человечества губительно то обстоятельство, что в настоящее время расход древесного топлива значительно опережает его воспроизводство.

Использование биомассы и биотоплива в качестве аккумуляторов энергии имеет фундаментальное значение. Цель всех процессов, описанных в этой главе,— обеспечить производство различных видов топлив, подходящих для самого разнообразного применения, включая жидкое топливо для транспорта. Чистая удельная энергия, которую можно получить при сжигании, варьируется от 10 МДж/кг (сырая древесина) до 40 МДж/кг (жиры, нефтеподобные вещества) и 55 МДж/кг для метана. Теплота сгорания сухой биомассы, являющейся по преимуществу углеводами, составляет около 20 МДж/кг.

Успешное развитие систем, основанных на переработке биомассы, возможно лишь в том случае, если следовать определенным принципам, которые часто недооценивают.

1. Каждый вид производства биомассы способен дать широкий спектр разнообразных продуктов. Например, при производстве тростникового сахара от переработки отходов патоки и волокна можно получить массу имеющих коммерческую ценность веществ. Даже простое сжигание волокна позволяет получать тепло и преобразовывать его в электроэнергию. Золу же можно вернуть в почву в качестве удобрения и т. п.

2. При некоторых технологиях отдельные виды топлива, получаемого из биомассы, могут потребовать для своего производства больше энергии, чем смогут дать. Это касается, например, этилового спирта, если его получать из крахмала растений. Ясно, что такая технология стала бы бременем для экономики, тем более что существуют способы получения того же спирта по более дешевой цене из отходов соломы, растительного волокна, хвои и листьев деревьев.

3. Общий экономический эффект для агропромышленных отраслей от внедрения комплексной переработки биомассы трудно оценить. Границы рекомендаций необходимо точно представлять. Надо различать, например, рост национального дохода от увеличения занятости в сельском хозяйстве, самообеспечение, снижение импорта и т. д. и повышение благосостояния села за



счет самостоятельного удовлетворения собственных нужд без централизованной помощи.

4. Производство биотоплива экономически оправдано только в том случае, если используются ритмично пополняемые запасы дешевого сырья. Аналог — гидроэнергетика, где выработка энергии пропорциональна величинам потоков воды, заранее сконцентрированной за счет естественных процессов. В качестве примеров подходящих запасов можно привести навоз скотных дворов, обрезки и опилки лесопилок, городские стоки, солому злаковых культур и т. п. При разработке стратегии ресурсосберегающих технологий и в государственном, и в местном масштабе очень важно качественно и количественно оценить возможные потоки соответствующего сырья. Если предварительная концентрация сырья отсутствует, то его сбор может оказаться технически слишком сложным и дорогостоящим.

5. Основные опасности экстенсивного использования топлива из биомассы — уничтожение лесов, эрозия почв, замена урожая, идущих в пищу, «урожаями» топлива.

6. Биотоплива — это производные органических соединений, и всегда существует альтернатива использования последних в качестве химического сырья или конструкционных материалов. Например, пальмовое масло — один из компонентов мыла; из натурального сырья можно производить пластмассы и фармакологические препараты; композитные материалы на основе растительных волокон можно использовать в строительстве и т. д.

## 11.2. Классификация биотоплива

В качестве топлива биомасса характеризуется содержанием влаги и углерода. Если  $m$  — общая масса материала, а  $m_0$  — его масса в обезвоженном состоянии, то влагосодержание по сухому основанию есть  $\omega = (m - m_0) / m_0$ , а влагосодержание по сырому основанию (просто влажность) —  $\omega = (m - m_0) / m$ . Влага присутствует в материале биомассы в виде внутриклеточной и межклеточной воды, поэтому сушка биомассы может оказаться обязательной (см. § 6.3). В момент сбора урожая влажность растительной биомассы составляет обычно 50%, а у водорослей может достигать 90% (имеются в виду водоросли, обитающие в водоемах, а не на суше). Материал считается «сухим», если находится в длительном равновесии со средой, обычно при этом он содержит от 10 до 15% влаги.

Углеродные топлива могут классифицироваться по уровню восстановления энергии (§ 10.4). В процессе превращения биомассы в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  выделяющаяся полезная энергия составляет примерно 450 кДж на моль углерода (38 МДж на 12 кг углерода) при единичном уровне восстановления  $R = 1$ . Это не-

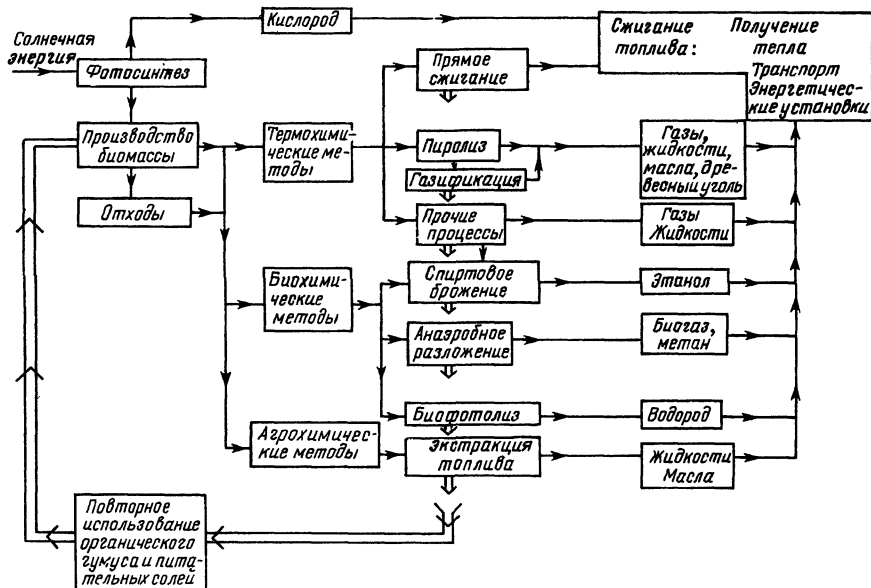


Рис. 11.2. Процесс производства биотоплива

точная цифра: идут и другие превращения энергии. Так, сахар ( $R=1$ ) имеет теплоту сгорания около 450 кДж на 12 г углерода, содержащегося в нем. Полностью преобразуемый материал, например метан  $\text{CH}_4$  ( $R=2$ ), имеет теплоту сгорания около 900 кДж на 12 г углерода (или на 16 г самого метана).

Присутствие влаги в топливе из биомассы часто ведет к значительным потерям выхода тепловой энергии в связи с тем, что испарение воды требует 2,3 МДж/кг.

Важна и плотность биомассы. Обычно сухие биологические материалы имеют плотность в 3—4 раза ниже, чем уголь. Доставка и переработка таких материалов из-за этого оказывается трудоемкой и дорогостоящей, особенно если утилизация ведется вдали от источников производства биомассы.

Ниже дана классификация основных типов энергетических процессов, связанных с переработкой биомассы (рис. 11.2).

### Термохимические

#### 1. Прямое сжигание для непосредственного получения тепла.

Предпочтительно введение сухого гомогенного топлива.

2. Пиролиз. Биомассу нагревают либо в отсутствие воздуха, либо за счет сгорания некоторой ее части при ограниченном доступе воздуха или кислорода. Состав получающихся при этом продуктов чрезвычайно разнообразен. Здесь и газы, и пары, и жидкости, и масла, и древесный уголь. Изменение состава про-

дуктов пиролиза зависит от температурных условий, типа вводимого в процесс сырья, способов ведения процесса. В некоторых случаях присутствие влаги необходимо, более того, сырье обязательно должно быть влажным. Если основным продуктом пиролиза является горючий газ, то процесс называют газификацией.

3. *Прочие термохимические процессы.* Возможны различные варианты предварительной подготовки сырья и проведения самих процессов. В промышленных масштабах они обычно ведутся при строгом контроле химического состава продуктов реакций. Особое значение имеют такие технологии, при которых целлюлоза и крахмалы превращаются в сахара для последующей ферментации.

#### *Биохимические*

4. *Спиртовая ферментация.* Этиловый спирт — летучее жидкое топливо, которое можно использовать вместо бензина. Он вырабатывается микроорганизмами в процессе ферментации. Обычно для ферментации в качестве сырья используют сахара.

5. *Анаэробная переработка.* В отсутствие кислорода некоторые микроорганизмы способны получать энергию, непосредственно перерабатывая углеродсодержащие составляющие при средних уровнях восстановления (см. § 10.4) производя при этом  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (метан). Этот процесс также является ферментационным, но его принято называть сбраживанием по аналогии с процессами, идущими в пищеварительном тракте жвачных животных. Получаемая смесь  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и попутных газов называется биогазом.

6. *Биофотолиз.* Фотолиз — это разложение воды на водород и кислород под действием света. Если водород сгорает или взрывается в качестве топлива при смешении с воздухом, то происходит рекомбинация  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$ . Некоторые биологические организмы продуцируют или могут при определенных условиях продуцировать водород путем биофотолиза. Подобный результат можно получить химическим путем без участия живых организмов в лабораторных условиях. Промышленного внедрения соответствующие процессы еще не получили (см. § 10.7).

#### *Агрохимические*

7. *Экстракция топлив.* В некоторых случаях жидкие или твердые разновидности топлива могут быть получены прямо от живых или только что срезанных растений. Сок живых растений собирают, надрезая кожуру стеблей или стволов, из свежесрезанных растений его выдавливают под прессом. Хорошо известный подобный процесс — получение каучука. Родственное каучуконосам растение Геррея (также из рода Эуфорбия) производит углеводороды с более низкой, чем у каучуконосов, молекулярной массой, которые могут использоваться в качестве заменителей бензина.

### 11.3. Производство биомассы для энергетических целей

Ниже вопросы теории фотосинтеза (гл. 10) увязываются с непосредственным получением биомассы. Особое внимание обращается на повышение эффективности фотосинтеза и рентабельности производства (§ 10.2 и 10.6).

**Энергетические фермы.** Этот термин используется в очень широком смысле, обозначая производство топлива (энергии) в качестве основного или дополнительного продукта сельскохозяйственного производства (поля), лесоводства (леса), аквакультуры (пресные и морские воды), а кроме того, те виды промышленной и бытовой деятельности, в результате которых образуются органические отходы. В табл. 11.1 приведены лишь несколько из почти бесконечного ряда подходящих примеров. Основной целью переработки сырья могло бы быть исключительно производство энергии, но более выгодно найти наилучшее соотношение между получением из различных видов биомассы и энергии, и биотоплива.

Наиболее характерный пример энергетических ферм представляют собой предприятия по выращиванию и комплексной переработке сахарного тростника (рис. 11.3). Производство зависит от сжигания отходов переработки тростника, необходимого для

Таблица 11.1. Источники биомассы и примеры ее переработки

Источник биомассы или топлива	Производимое биотопливо	Технология преобразования	Примерный КПД преобразования	Потребность в энергии для преобразования (н — необходимо, о — оптимально)	Приближенный энергетический выход биотоплива, мДж/кг
Лесоразработки	(Тепло)	Сжигание	70	Сушка (о)	16—20
Отходы переработки древесины а)	(Тепло)	»	70	Сушка (о)	16—20
б) {	Газ	Пиролиз	85	Сушка (о)	40 <sup>*1</sup>
	Нефть				40
Зерновые	Уголь	Сжигание	70	Сушка (о)	20
	Солома				14—16 <sup>*3</sup>
Сахарный тростник, сок	Этанол	Сбраживание	80	Тепло (н)	3—6
				Электроэнергия (о)	
То же, отходы	Жмых	Сжигание	65	Сушка (о)	5—8
Навоз (тропики)	Метан	Анаэробное разложение	50	—	4—8 <sup>*3</sup>
То же (умеренный пояс)	Метан	То же	50	Тепло (н)	2—4 <sup>*2</sup>
Городские стоки	Метан	» »	50	Тепло	2—4 <sup>*3</sup>
	Мусор (Тепло)	Сжигание	50	—	5—16 <sup>*3</sup>

\*1 Суммарная величина, имеются затраты биогаза на обогрев установки.

\*2 Без учета азота.

\*3 Сухой материал.

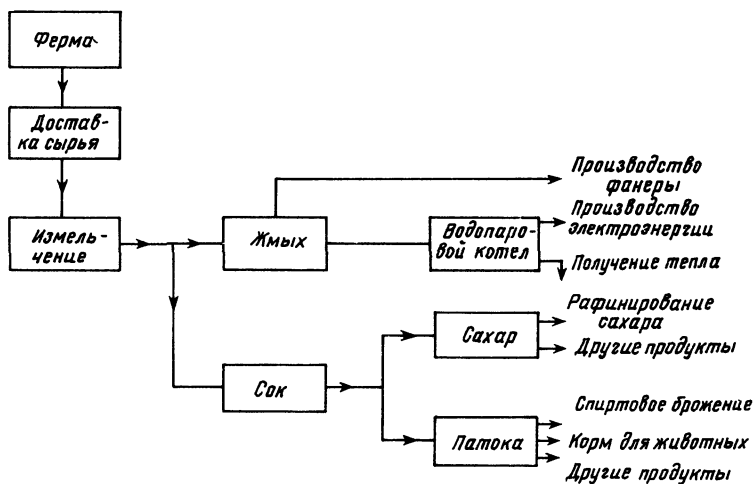


Рис. 11.3. Агропромышленная переработка сахарного тростника

снабжения энергией всей технологической цепи. При надлежащей механизации можно было бы получить дополнительную энергию для производства на продажу побочных продуктов (патоки, химикатов, корма для животных, этилового спирта, строительных материалов, электроэнергии). Следует отметить, что этиловый спирт и электроэнергию можно использовать для выращивания культур и выполнения транспортных операций.

Развитие энергетики за счет использования сельскохозяйственных культур имеет как достоинства, так и недостатки:

#### Достоинства

- Огромные потенциальные запасы
- Разнообразие культур
- Разнообразие применения (включая транспорт и производство электроэнергии)
- Связь с существующими агрокультурой и лесоводством
- Поощрение интегрированного сельскохозяйственного производства
- Эффективное использование побочных продуктов, отходов, стоков
- Улучшение состояния среды за счет утилизации отходов
- Использование комплексной эффективной переработки меньше загрязняет

#### Опасности и трудности

- Может привести к оскудению и эрозии почв
- Возможность конкуренции с производством пищи
- Использование генной инженерии может вызвать появление неконтролируемых организмов
- Крупномасштабная агроиндустрия может оказаться слишком сложной для эффективного управления
- Перевозка биомассы к перерабатывающим фабрикам создаст перегрузку для транспорта
- Ошибки проектирования и отсутствие замкнутого цикла переработки могут привести к загрязнению среды

воду и воздух (например, снижает содержание серы)  
 Ведет к развитию сельского хозяйства  
 Расширяет возможность экономии по отношению к продуктам, территории, занятости специалистов  
 Огромный потенциал в тропических странах, особенно развивающихся  
 Создание агропромышленности, которая будет способствовать решению широкого круга задач, включая развитие культуры и образования

—  
 —  
 —  
 —

Одна из наиболее существенных опасностей та, что производство энергии станет конкурировать с производством пищи. Например, зерновые фермы США дают около 10% мирового производства хлеба, а экспорт более чем 1/3 этого количества позволяет частично покрыть дефицит целого ряда стран. Крупномасштабное увеличение объема производства биотоплива (например, этилового спирта) по этой причине может оказать существенное отрицательное влияние на мировой рынок пищевых продуктов. Вторая серьезная опасность — возможность обеднения и эрозии почв в результате интенсификации выращивания «энергетических» культур. Очевидная стратегия спасения от этих явлений — выращивание культур, пригодных и для обеспечения человека (зерно), и для энергетических нужд при одновременном сокращении части урожая, скармливаемого животным.

**Географическое распределение.** Ясно, что наибольшим потенциалом для развития концепции энергетических ферм обладают тропические страны, особенно такие, где имеются соответствующие условия по качеству почв и количеству выпадающих осадков. В табл. 11.2 приведены оценки потенциала производства биомассы для ряда стран. Идеи развития этого направления для развивающихся стран кажутся очевидными.

Таблица 11.2. **Общая оценка годового потенциала источников биотоплива для различных стран, 10<sup>15</sup> Дж/год (32 МВт)**

Источник	Судан	Бразилия	Индия	Швеция	США
Навоз	93	640	890	18	110
Сахарный тростник	660	1000	430	—	420
Древесное топливо	290	3200	420	160	510
Городские отходы	5	94	320	23	170
Коммунальные стоки	2	11	66	1	5
Прочие	—	—	—	—	630
Общий потенциал (до двух значащих цифр)	1000	4800	2100	200	1800
Современное потребление энергии	180	2700	5800	1500	72 000
Отношение потенциала к потреблению, %	5,5	1,8	0,4	0,13	0,03

**Получение урожая.** Предсказать урожайность без детального знания метеорологических условий, агротехнических приемов, используемых удобрений, ирригационных сооружений и т. п. невозможно. Да и сравнивать между собой различные культуры по урожайности значительно труднее, нежели делать это по продолжительности выращивания и методам сбора урожая.

Таблица 11.3. Максимальная урожайность биомассы \*1

Культура (предполагается 1 урожай в год)	C*2, R*3	Урожайность, т/(га·год)		Плотность энергии, МДж/ (кг·с·м)	Эквивалентная мощность урожая, ГДж/(га·год)
		Сырая масса	Сухая масса		
<i>Естественные</i>					
Лука	—	7	3	—	—
Леса (умеренная зона)	C <sub>3</sub>	14	7	18	130
Леса (тропическая зона)	C <sub>3</sub>	22	11	18	200
<i>Кормовые</i>					
Сорго (3 урожая)	R, C <sub>4</sub>	200	50	17	850
Суданская трава (6 уро- жаев)	R, C <sub>4</sub>	160	40	15	600
Люцерна	C <sub>3</sub>	40	25	—	—
Рожь (умеренная зона)	C <sub>3</sub>	30	20	—	—
<i>Пищевые</i>					
Маниок (60% клубней)	—	50	25	—	—
Манис (зерновой, 60% зер- на)	C <sub>4</sub>	30	25	—	—
Пшеница (35% зерна)	C <sub>3</sub>	30	20	—	—
Сахарная свекла	C <sub>3</sub>	45	—	—	—
Сахарный тростник	R, C <sub>4</sub>	100	50	—	—
Рис (60% зерна)	C <sub>3</sub>	—	20	—	—
<i>Плантационные</i>					
Пальма масляная	R, C <sub>3</sub>	50	40	—	—
<i>Энергетические</i>					
Эвкалипт	R, C <sub>3</sub>	55	20	19	380
Сикамора	R, C <sub>3</sub>	20	10	19	190
Популус	R, C <sub>3</sub>	18	29	19	380
Водный гиацинт	C <sub>3</sub>	300	36	19	680
Макроводоросли (лами- нариевые)	C <sub>3</sub>	250	54	21	1100
Микроводоросли (диато- мовые)	C <sub>3</sub>	230	45	23	1000
<i>Выделяющие эксудаты</i>					
С хорошим выходом	—	1	1	40	40

\*1 Приведена полная масса растений, а не только зерно. Данные суммированы авторами по многим источникам. Погрешность не превышает  $\pm 25\%$ . Большинство растений на практике менее урожайны.

\*2 C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> — типы фотосинтеза (см. § 10.6)

\*3 R — урожай снимается выше корня.

Таблица 11.4. Энергетический анализ получения этанола из различных культур\*<sup>1</sup>

Номер строки	Составляющие	Сахарный тростник	Маинок	Древесина (гидролиз ферментами)	Древесина (кислотный гидролиз)	Солома
1	Производство	7,3	19,2	12,7	20,0	4,4
2	Химикаты	0,6	0,9	4,7	6,4	4,7
3	Подача воды	0,3	0,4	0,8	0,3	0,8
4	Электроэнергия	7,0	10,5	176	7,8	167
5	Жидкое топливо	8,0	29	42	62	42
6	Техника и сооружения	0,5	1,2	3,3	0,6	3,3
7	Общие затраты энергии (1) — (6)	24	61	239	98	222
8	Энергетический выход 30 МДж/кг—(7)	+8	—31	—209	—68	—192
9	Общие затраты энергии с учетом только (1) + (2) + (6)	8,4	21	21	27	12
10	Энергетический выход 30 МДж/кг—(9)	+21	+9	+9	+3	+18

\*<sup>1</sup> Данные относятся к крупномасштабному производству всех компонент и приведены в мегаджоулях на 1 кг обезвоженного этанола. Теплота сгорания получаемого продукта принята равной 30 МДж/кг.

Некоторые виды сельскохозяйственных культур высаживают ежегодно (например, злаковые) и могут убирать несколько раз за сезон (травы), посадку других ведут раз в несколько лет, а убирают ежегодно, например сахарный тростник: существуют и культуры, имеющие более длительный период роста (например, для получения некоторых видов маниока требуется 10 месяцев). Из древесных культур одни растут многие годы, а вырубаются полностью, другие растут рощами от общего сохраняемого при рубке корня и могут вырубаться каждые несколько лет (например, некоторые разновидности эвкалипта). В табл. 11.3 сведены данные, позволяющие оценивать максимальный биотопливный потенциал сельскохозяйственных культур в зависимости от теплоты сгорания и урожайности. Приведенные данные по водным культурам, например, позволяют надеяться на создание в перспективе избытка пищи на планете. Правда, здесь следует оговориться: к подобным обобщениям всегда необходимо относиться с осторожностью и уточнять их в каждом конкретном случае.

**Энергетический анализ.** Для выращивания и переработки урожая необходима энергия в форме солнечного излучения и в форме, пригодной для получения топлива для работы сельхозмашин, создания самих этих машин, получения удобрения и т. п. Вторая форма в целом — не что иное, как энергия брутто — обобщение всех форм энергии, отличной от солнечной и затрачиваемой на то, чтобы обеспечить весь цикл сельскохозяйственного производ-



ства. Лучше всего пояснить технику энергетического анализа на конкретном примере (табл. 11.4) получения этилового спирта из различных видов растительного сырья.

Здесь выделены и просуммированы характерные затраты энергии в расчете на 1 кг спирта, причем обобщенный показатель — энергия-брутто — дан в строке 7, а энергия-нетто — в строке 8. Характерно, что в большинстве примеров выход энергии (энергия-нетто), получаемый в результате сжигания конечного продукта (30 МДж), оказывается меньше энергии-брутто, затраченной на его производство. Из-за этого может сложиться мнение, что внедрение подобных технологических процессов вообще бесполезно.

Однако надо иметь в виду то обстоятельство, что максимальные затраты энергии при производстве связаны с процессами нагрева и машинной переработки сырья (строки 3—5). Частично или даже все эти затраты могут быть скомпенсированы за счет дополнительной энергии, которую можно получить путем утилизации отходов производства (жмых сахарного тростника, кора и другие отходы древесины, часть соломы урожая злаковых). В этом случае снабжение производства энергией станет не дороже использования солнечного излучения. Из строки 10 видна возможность получения избыточной энергии в случае такой компенсации затрат ее по строкам 3—5.

На практике энергетический анализ и связанный с ним анализ экономических факторов получения и переработки биомассы агропромышленным методом оказываются много сложнее этого упрощенного приближения. Однако существенным остается то, что использование для получения тепла и электроэнергии дешевых отходов биомассы может иметь решающее значение при оценке эффективности того или иного процесса.

Энергетический анализ — полезный инструмент при определении затрат энергии энергопотребляющих и энергопроизводящих систем, поскольку он позволяет выделять технические и технологические аспекты процессов. Но проблема не только в этом. Например, из табл. 11.4 видно, что производство этилового спирта из сахарного тростника наиболее оправдано. Однако окончательный выбор культуры должен быть основан на оценке целого ряда конкретных экономических факторов, среди которых первостепенное значение имеют и необходимость в создании независимого (от внешнего рынка) снабжения топливом, и сохранение источника альтернативных продуктов (продуктов питания, например).

#### **11.4. Сжигание биотоплива для получения тепла**

С помощью тепла сжигаемой биомассы готовят пищу, обогревают жилище, осуществляют целый ряд технологических

процессов при переработке урожая. Его используют для получения электроэнергии, необходимой для работы различной техники.

В большинстве развивающихся стран сжигание биомассы обеспечивает покрытие наибольшей доли потребности в топливе. Это является следствием как экстенсивного применения отапливаемых древесиной печей для приготовления пищи, так и крупномасштабного потребления биомассы для получения энергии, необходимо, чтобы приводить в действие мельницы при переработке сахарного тростника, сушилки чая, копры, технику для переработки пальмового масла и изготовления бумаги. Совершенно иначе обстоит дело в промышленно развитых странах: здесь доминирует использование ископаемого топлива и в некоторых случаях — атомной энергии.

Ниже, в табл. 11.5, приведены данные по теплоте сгорания ряда обезвоженных пригодных для нужд энергетики культур, биологических отходов, производных топлив и органических продуктов, полезные при оценке возможностей промышленного использования топлив из биомассы.

**Приготовление пищи и обогрев жилищ.** Почти половина населения планеты использует древесину и другие виды биотоплива для приготовления пищи и других домашних нужд. Средний уровень потребления топлива составляет примерно 0,5—1 кг сухой биомассы на человека в сутки (10—20 МДж/сут, что соответствует примерно 150 Вт). Если умножить это значение на  $2 \cdot 10^9$  человек, получим 300 ГВт. Непрерывное потребление 150 Вт только для приготовления пищи может показаться неоправданно большим. Это связано с использованием малоэффективных методов, в большинстве случаев основанных на применении открытого огня. Соответствующие «устройства» имеют КПД всего около 5%. Остальное теряется вследствие неполного сгорания, за счет уноса части тепла дуновениями ветра, потерями на излучение и т. д., возникающими от несоответствия размеров очага и котла. Значительное количество энергии теряется, кроме того, в результате испарения из неприкрытого котла и из-за использования сырого топлива. Дым (недогоревший углерод и смолы) от огня — следствие неполного сгорания. Продукты полностью сгоревшей древесины (побочные продукты сгорают во вторичных реакциях) содержат только  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Следует отметить, что дым представляет опасность для здоровья, а скорость сгорания никак не регулируется.

Эффективность приготовления пищи можно поднять за счет: 1) использования альтернативных видов пищи и методов ее приготовления, например паровых скороварок; 2) уменьшения тепловых потерь путем использования более совершенных нагревателей и хорошо подобранных кастрюль с крышками; 3) интенсификации догорания несгоревших топочных газов; 4) применением простых и надежных методов управления нагревателями.

Таблица 11.5. Теплотворные способности различных топлив

Топливо	Суммарная теплотворная способность		Примечание
	МДж/кг	МДж/л (15° С)	
<i>Специально собираемое</i>			
Древесина:			
зеленая	8	6	Зависит больше от влажности, чем от сорта дерева
сезонная	13	10	
специально высушенная	16	12	
Растительность (высушенная)	15	—	Например, сено
<i>Отходы урожая</i>			
Рисовая шелуха	} 12— 15	—	Для сухого материала. На практике отходы могут быть насыщены влагой
Жмых сахарного тростника			
Коровий навоз			
Торф			
<i>Вторичные биотоплива</i>			
Этанол	30	25	$C_2H_5OH$ : $789 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Метанол	23	18	
Биогаз	28	$20 \cdot 10^{-3}$	$50\% \text{ CH}_4 + 50\% \text{ CO}_2$
Генераторный газ	5—10	$(4-8) \cdot 10^{-3}$	
Древесный уголь:			Различается по составу
твердый кусковой	32	11	
пылевидный	32	20	
Кокосовое масло	39	36	—
«Кокохол»	39	33	Этиловый эфир кокосового масла
<i>Искапаемые топлива</i>			
Метан	55	$38 \cdot 10^{-3}$	Природный газ
Бензин	47	34	Моторное топливо
Керосин	46	37	—
Дизельное топливо	46	38	Фракция от перегонки
Сырая нефть	44	35	—
Уголь	27	—	Черный коксующийся

С учетом подобных усовершенствований наилучшие кухонные плиты на древесном топливе с естественной циркуляцией воздуха дают возможность до 20% энергии сгорания использовать по прямому назначению. Использование принудительной подачи воздуха с помощью электровентилятора позволяет повысить эффективность плит до 50%. Существует достаточное количество научно обоснованных конструкций кухонных плит, однако рынок сбыта для них еще не везде доступен.

Параллельно разрабатываются методы замены дровяных плит альтернативными устройствами, работающими на биогазе (метане, см. § 11.8) и топливе из отходов сельскохозяйственных культур, солнечными кухнями (§ 6.8), мелкомасштабными гидро-

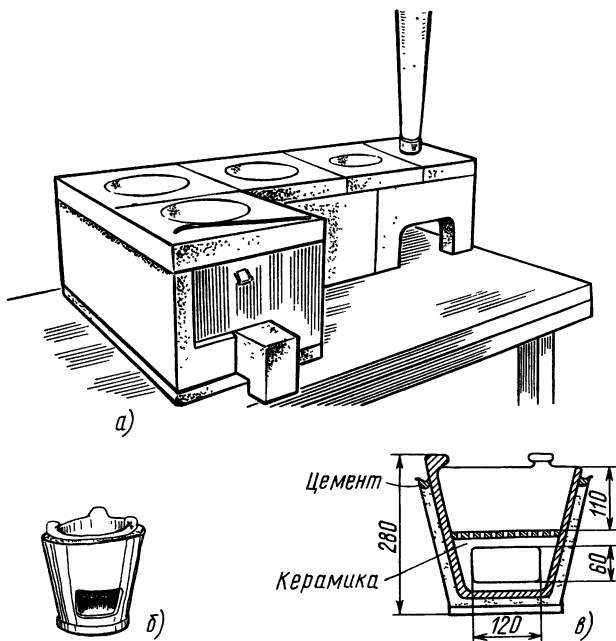


Рис. 11.4. Кухонные плиты повышенной эффективности (на древесном угле). Многоконфорочная плита, разработанная в министерстве энергетики Фиджи на основе индийского прототипа, выполнена в основном из бетонных модулей (а). Показана одноконфорочная печь Jhai bucket (б). Эта же печь в разрезе (в)

энергетическими установками (§ 8.5). Потребность в соответствующих устройствах в условиях уничтожения лесов и роста пустынь крайне высока.

На рис. 11.4 показаны два типа дровяных плит, разработанных для максимального использования древесного топлива при приготовлении пищи. Оба варианта достаточно дешевы и доступны для населения развивающихся стран.

В плите на рис. 11.4, а сгорание топлива полностью происходит в топке слева. Железная дверца (на рисунке заштрихована) открывается только для загрузки топлива. Воздух проникает внутрь через регулируемое отверстие под дверцей (на рис. оно полностью открыто). Это позволяет в зависимости от способа приготовления пищи регулировать горение. Горячие газы из топки поступают через достаточно узкие каналы под котлами, утепленными в отверстия конфорок. На этой стадии за счет воздуха, проникающего через дополнительные отверстия, происходит догорание топочных газов, после чего они удаляются через трубу в правой части плиты. Конструкция предотвращает загрязнение пищи и улучшает воздухообмен.

Плита на рис. 11.4, б проще и дешевле. Правда, она хуже управляема и менее универсальна. Тем не менее ее малая масса позволяет больше энергии передавать котлу, а не собственным стенкам. Воздух в этой конструкции подается к топливу снизу через колосник. Огонь непосредственно передает тепло котлу с высокой эффективностью. Такая плита особенно хорошо приспособлена для сжигания древесного угля, горящего чисто, практически без дыма.

Большинство замечаний, сделанных по поводу приготовления пищи, относится и к обогреву жилищ. Необходимо иметь управляемую скорость горения при хорошем дожигании первичных продуктов сгорания. В некоторых устройствах воздух вводится в печь прямо с улицы. Это уменьшает в обогреваемом помещении циркуляцию воздуха и потери тепла.

**Сушка технических культур** (копра, какао, кофе, чай, фрукты) для обеспечения их сохранности обычно сопровождается сжиганием древесины или отходов от переработки самих культур либо использованием излишков тепла от производства электроэнергии. Чтобы высушить материал, его можно непосредственно поместить в поток газообразных продуктов сгорания, однако при этом существует опасность воспламенения и ухудшения пищевых качеств. Более приемлем способ, при котором сушку ведут воздухом, нагретым в теплообменниках. Теория сушки обсуждалась в § 6.3.

**Сжигание отходов** — рациональный способ использования биотоплива, находящегося вблизи от места потребления энергии. Сжигание в эффективных печах позволяет получать потоки чистых горячих выхлопных газов ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} +$  избыточный воздух) при температуре около  $1000^\circ\text{C}$ , которые могут быть приведены к требуемой температуре за счет подмешивания холодного воздуха. Почти всегда выигрыш, получаемый от такой утилизации отходов биомассы, связан с тем, что их общее количество превышает необходимую потребность на сушку собственно конечных продуктов, обеспечивая получение избытка энергии для других целей, например промышленного получения пара.

**Производство тепла и электроэнергии.** Пар для обеспечения производства обычно получают, сжигая различные отходы биомассы в топках паровых котлов. При этом возможно использование метода сжигания в псевдоожигненном слое. Физически наиболее выгодно использовать для производства электроэнергии высокотемпературное тепло. Это приводит к тому, что получение электроэнергии сопровождается непрерывным сбросом низкотемпературного тепла. Отметим, кроме того, что паровые котлы в общем-то дороги. Суммарная эффективность получения электроэнергии достаточно низка, так как в нее преобразуется только часть тепла. В некоторых случаях за счет получения электроэнергии и подачи ее в местные энергосети удается опти-

мизировать производство тепла для нужд производства.

**Ресурсы древесины.** Мы снова обращаем внимание на то, что древесину можно считать возобновляемым источником энергии только в том случае, если скорость ее прироста превышает скорость уничтожения. Возобновление может происходить в природном лесу или на искусственных плантациях (здесь рост обычно идет быстрее). Мировые источники древесины расходуются не только для сжигания, но и для выпуска строительных материалов, для производства бумаги и на другие промышленные нужды. Вдобавок большое количество леса сжигается в процессе санитарных рубок.

Во многих странах (например, Судане, Кении, Непале) расходы древесины на топливо превышают ее прирост: запасы топлива истощаются. Более того, прирост населения стран, использующих древесное топливо, составляет 2—3% в год. Вследствие этого растут потребности в топливе для приготовления пищи. Чтобы устранить эту проблему, необходимо одновременно с интенсификацией восстановления лесов переходить на более эффективные методы приготовления пищи.

### 11.5. Пиролиз (сухая перегонка)

Под этим термином подразумеваются любые процессы, при которых органическое сырье подвергают нагреву или частичному сжиганию для получения производных топлив или химических соединений. Изначальным сырьем могут служить древесина, отходы биомассы, городской мусор и конечно уголь. Продуктами пиролиза являются газы, жидкий конденсат в виде смол и масел, твердые остатки в виде древесного угля и золы. Традиционная технология получения древесного угля — пиролиз без сбора паров и газов. Газификация — это пиролиз, приспособленный для максимального получения производного газообразного топлива. Варианты схем ведения пиролиза приведены на рис. 11.5. Наиболее предпочтительными считаются вертикальные устройства, загружаемые сверху. Получаемое газообразное топливо более удобно в эксплуатации, более экологично и транспортабельно, нежели исходная биомасса. Химические продукты пиролиза пользуются спросом и как ингредиенты процессов последующей переработки, и непосредственно в качестве товарной продукции. Устройства для частичного сжигания биомассы, проектируемые в расчете на получение максимального выхода именно газов, а не других продуктов сгорания, принято называть *газогенераторами*. Протекающие в них процессы относятся главным образом к пиролизическим.

КПД пиролиза определяется как отношение теплоты сгорания производного топлива к теплоте сгорания используемой в процессе биомассы. Достижимый КПД весьма высок: 80—90%.

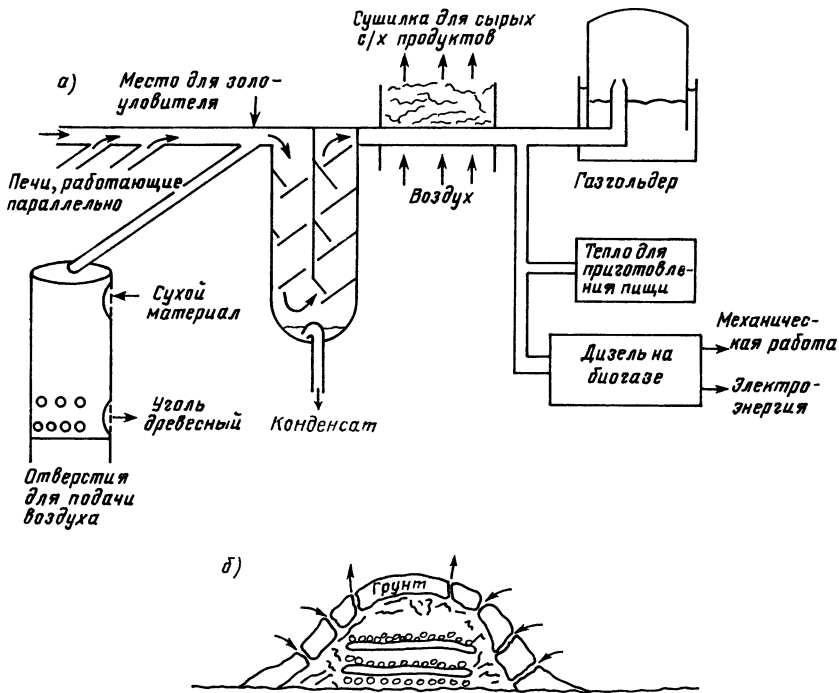
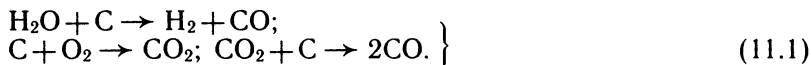


Рис. 11.5. Способы осуществления пиролиза: небольшая установка для пиролиза (а); традиционная печь для получения древесного угля (б)

Например, газогенератор на древесине может до 80% исходной энергии перерабатывать в горючие газы (преимущественно  $H_2$  и  $CO$ ), пригодные для обычных бензиновых двигателей. Используя этот процесс при производстве электроэнергии, можно достигать более высокой эффективности, чем при использовании паровых котлов. Подобные устройства потенциально пригодны для мелкомасштабной электроэнергетики (менее 150 кВт).

Химические процессы при пиролизе биомассы во многом схожи с теми, что идут при перегонке угля для получения синтетических газов, смол, масел и кокса. Например, до перехода на природный газ (главным образом  $CH_4$ ) в Европе в больших количествах использовался подававшийся потребителям по трубам светильный газ ( $H_2 + CO$ ), получающийся при реакции разложения воды в присутствии ограниченного количества воздуха:



Чтобы процесс пиролиза шел успешно, должны соблюдаться определенные условия. Подаваемый материал предвари-

тельно сортируют для снижения негорючих примесей, подсушивают (следует в то же время избегать подачи пересушенного материала), измельчают. Критическим параметром, влияющим на температуру и на соотношение видов получаемых продуктов, является соотношение воздух — горючее. Проще всего управлять блоком, работающим при температуре ниже 600° С. При более высоких температурах (от 600 до 1000° С) блоком управлять труднее, но количество водорода в вырабатываемом газе увеличивается. При температуре ниже 600° С можно выделить четыре стадии перегонки.

1. 100—120° С — подаваемый в газогенератор материал, опускаясь вниз; освобождается от влаги.

2. 275° С — отходящие газы состоят в основном из N<sub>2</sub>, СО и СО<sub>2</sub>; извлекаются уксусная кислота и метанол.

3. 280—350° С — начинаются экзотермические реакции, в процессе которых выделяется сложная смесь летучих химических веществ (кетоны, альдегиды, фенолы, эфиры).

4. Свыше 350° С — выделяются все типы летучих соединений; одновременно с образованием СО происходит увеличение образования Н<sub>2</sub>, часть углерода сохраняется в форме древесного угля, смешанного с зольными остатками.

Конденсированные жидкости, называемые *смолами* и *пироглигненными кислотами*, могут быть выделены и использованы для получения различных химических продуктов (например, метанола, жидкого топлива). В табл. 11.6 дана соответствующая детализация.

Таблица 11.6. Выход пиролиза сухой древесины

Компонент	Выход на 1000 кг сухой древесины, л	Компонент	Выход на 1000 кг сухой древесины, л
Древесный уголь	300 кг	Ацетон	3
Газ (теплота сгорания 10 465 кДж/м <sup>3</sup> )	140 м <sup>3</sup> (нормальные условия)	Древесное масло и легкая смола	76
Метанол	14	Креозот	12
Уксусная кислота	53	Вар (древесная смола)	30 кг
Эфиры	8		

Разновидности топлива, получаемого в результате пиролиза, обладают меньшей по сравнению с исходной биомассой суммарной энергией сгорания, но отличаются большей универсальностью применения. Некоторые продукты характеризуются значительно более высокой плотностью энергии (например, СН<sub>4</sub> имеет 55 МДж/кг), чем исходные. Термин «универсальность» подразумевает лучшую управляемость горением, большее удобство в обращении и транспортировке, более широкий диапазон возможных устройств-потребителей, меньшее загрязнение среды при сгорании.



**Твердый остаток (максимальная массовая доля 25—35%).** Современные установки для получения древесного угля, работающие при температуре 600° С, преобразуют в требуемый продукт от 25 до 35% сухой биомассы. Традиционные печи обладают выходом по древесному углю, приблизительно равным 10%. Древесный уголь на 75—85% состоит из углерода, если не ставится специальное требование увеличения его содержания (как это требуется для специального химически чистого древесного угля), обладает теплотой сгорания около 30 МДж/кг. Следовательно, если получить древесный уголь из древесины, то от 15 до 50% первоначальной химической энергии сгорания сохранится. Древесный уголь необходим в качестве топлива с контролируемой чистотой. Химически чистый древесный уголь используется как в лабораторной практике, так и в промышленных процессах. Он превосходит обычный угольный кокс при выплавке высококачественных сталей.

**Жидкости (конденсированные испарения, максимальная массовая доля примерно равна 30%).** Делятся на вязкие фенольные смолы и текучие жидкости, пиролигенные кислоты, в основном уксусную кислоту, метанол (максимум 2%) и ацетон. Жидкости могут быть отсепарированы либо могут использоваться вместе в качестве необработанного топлива с теплотой сгорания около 22 МДж/кг. Максимальный выход составляет примерно 400 л горючих жидкостей на 1 т сухой биомассы.

**Газы (максимальная массовая доля, получаемая в газогенераторах, составляет примерно 80%).** Смесь выделяющихся при пиролизе газов с азотом известна как древесный газ, синтетический газ, генераторный газ или водяной газ. Теплота сгорания на воздухе составляет 5—10 МДж/кг (от 4 до 8 МДж/м<sup>3</sup> при нормальных условиях). Эти газы могут быть использованы непосредственно в дизелях или в карбюраторных двигателях с искровым зажиганием, при этом основная трудность — избежать попадания в цилиндры золы и конденсирующихся продуктов пиролиза. Газы в основном состоят из N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и СО с малыми добавками СН<sub>4</sub> и СО<sub>2</sub>. Их можно накапливать в газгольдерах при давлении, близком к атмосферному. По указанным выше причинам они не пригодны для сжатия. Более чистый и однородный газ скорее может быть получен при газификации увлажненного древесного угля, нежели при пиролизе древесины непосредственно. Это связано с тем, что большая часть смол при переработке древесины на древесный уголь уже удалена.

## 11.6. Другие термохимические процессы

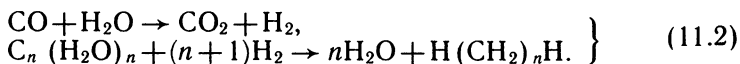
Выше были описаны процессы, при которых биомасса сжигалась или подвергалась пиролизу непосредственно после предварительной сортировки и измельчения. Однако она может быть

еще и обработана химически, для того чтобы получить исходный материал для спиртовой ферментации (§ 10.7), вторичное или улучшенное топливо.

Вот всего несколько наиболее важных примеров из большого числа возможных.

**Гидрогенизация.** Измельченную, разложившуюся или переваренную биомассу, например навоз, нагревают в атмосфере водорода до температуры около 600° С при давлении около 5 МПа (50 атм). Получаемые при этом горючие газы, преимущественно метан и этан, при сжигании дают около 6 МДж на 1 кг сухого сырья.

**Гидрогенизация с применением СО и пара.** Ведется аналогично предыдущему процессу, но нагревание производится в атмосфере СО и водяного пара при температуре 400° С и давлении 5 МПа. Из продуктов реакции извлекается синтетическая нефть, которую можно использовать как топливо. Соответствующие реакции идут в присутствии катализатора:



Последняя реакция описывает превращение углеводов в нефтеподобные углеводороды. Эффективность преобразования энергии в этом процессе составляет примерно 65%.

**Гидролиз под воздействием кислот и ферментов.** Целлюлоза, составляющая основную массу сухого остатка растений (от 30 до 50%), трудно поддается гидролизу и, следовательно, сбраживанию с помощью микроорганизмов (см. § 11.7). Превращение целлюлозы в сахара, которые могут сбраживаться, возможно путем нагревания в серной кислоте или под воздействием фермента целлюлозы некоторых микроорганизмов. Полученные продукты можно использовать в качестве пищи для крупного рогатого скота.

**Преобразование масла кокосовых орехов в эфиры.** Это один из примеров большого числа химических процессов, применяемых для получения биотоплив. Белая мякоть кокосовых орехов (копра) примерно на 50% состоит из масла, отжимаемого на валках. Годовое производство этого масла только на Филиппинах составляет 10<sup>6</sup> т/год. Кокосовое масло может быть непосредственно использовано в качестве дизельного топлива в двигателях, оснащенных специальной системой подачи, однако при этом образуется ядовитый дым, кроме того, при температуре ниже +23° С масло затвердевает. Добавив в масло 20% (по объему) метилового или этилового спирта, можно получить летучие эфиры и глицерол. Эфиры являются прекрасным дизельным топливом, лучше нефти, а глицерол — ценным вторичным продуктом. Этиловый спирт для этого процесса может быть получен

сбраживанием обычного сахара, а метиловый — газификацией отходов древесины. Получаемые эфиры имеют теплоту сгорания около 38 МДж/кг, что выше, чем у перерабатываемого масла, и приближается к соответствующему показателю бензина (46 МДж/кг). Другие растительные масла также могут быть переработаны аналогичным образом.

**Метиловый спирт в качестве топлива.** Метиловый спирт (метанол) — ядовитая жидкость, получаемая в процессе каталитической реакции между  $H_2$  и  $CO$  при температуре  $330^\circ C$  и давлении 15 МПа:



Эти газы — компоненты синтетического газа (см. § 11.5), они могут получаться при газификации биомассы. Метанол можно использовать в качестве заменителя бензина с теплотой сгорания 23 МДж/кг.

### 11.7. Спиртовая ферментация (брожение)

**Методы получения спирта.** Этиловый спирт (этанол)  $C_2H_5OH$  в естественных условиях образуется из сахаров соответствующими микроорганизмами в кислой среде, pH — от 4 до 5. Подобный процесс спиртовой ферментации во всем мире используют для получения питьевого спирта. Наиболее часто используемые микроорганизмы — дрожжи вида *Saccharomyces cerevisiae* — погибают при концентрации спирта выше 10%, поэтому для повышения концентрации используют перегонку или фракционирование (рис. 11.6). После перегонки (дистилляции) получается кипящая при постоянной температуре смесь: 95% этанола и 5% воды. Обезвоженный этанол в промышленных условиях

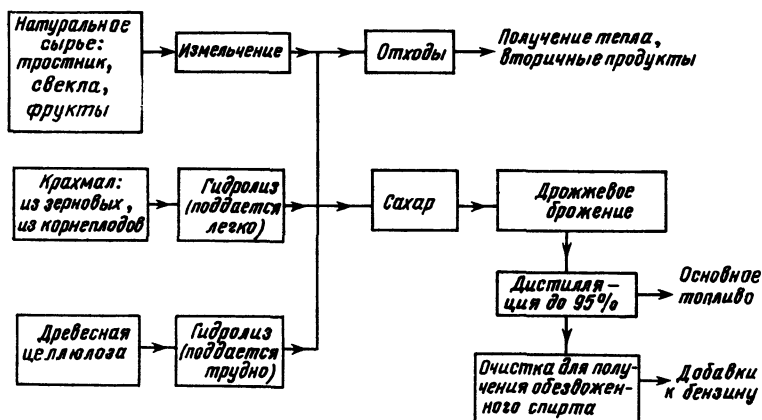


Рис. 11.6. Производство этанола

производится путем совместной перегонки с растворителем типа бензола. При брожении теряется лишь 0,5% энергетического потенциала сахаров, остальные затраты энергии связаны с перегонкой. Необходимую тепловую энергию можно получить, сжигая остающиеся отходы биомассы.

Ниже перечислены процессы производства этанола из различных культур в порядке возрастания трудностей переработки.

1. *Непосредственно из сахарного тростника.* Обычно промышленную сахарозу получают из сока сахарного тростника, а остающуюся патоку используют для получения спирта (рис. 11.3). Сама патока содержит около 55% сахаров. Если сама патока не пользуется спросом на рынке, то перерабатывать ее на спирт весьма прибыльно, особенно используя в качестве топлива отжатый тростник.

Основная реакция превращения сахарозы в этанол имеет вид



На практике выход ограничивается конкурирующими реакциями и потреблением сахарозы на увеличение массы дрожжей. Промышленный выход составляет около 80% выхода, определяемого (11.4). Реакции ферментации для других сахаров (например, глюкозы) очень похожи.

2. *Из сахарной свеклы* вначале получают сахар для сбраживания, но свекла не дает достаточного количества отходов для получения тепла. Из-за этого этанол дорожает.

3. *Из растительного крахмала*, например, из злаковых или маниока; крахмал можно также подвергнуть гидролизу на сахар. Это основной энергоаккумулирующий углевод растений. Состоит из двух компонентов с большой молекулярной массой, амилозы и амилопектина. Эти крупные молекулы четко линейны и состоят из глюкозных остатков, соединенных углеродными связями, которые могут быть разрушены ферментами солода, содержащегося в некоторых культурах, например в ячмене, или ферментами подходящих плесеней (грибков). Подобные методы используются в производстве виски, кукурузной водки, при получении спирта из корневищ маниока. Разрушить углеродные связи в крахмале можно и при обработке их сильными кислотами ( $pH \approx 1,5$ ) при давлении 0,2 МПа, но выход сахаров при этом снижается, а сам процесс по сравнению со сбраживанием удорожается. Важный вторичный продукт сбраживания — отходы, используемые в качестве корма для крупного рогатого скота и удобрений.

4. *Из целлюлозы*, которая содержит до 40% всей сухой биомассы и потенциально является обширным возобновляемым источником энергии. Имеет полимерную структуру связей молекул глюкозы. Это полисахарид — один из самых распространенных природных полимеров, формирует прочный каркас древесных растений. Соответствующие связи молекул глюкозы в целлюлозе

значительно труднее поддаются гидролизу, чем у крахмала. В растениях целлюлоза тесно связана с лигнином (наличие этого сложного полимера и приводит к одревеснению, повышая прочность.— *Прим. науч. ред.*), препятствующим ее гидролизу до сахаров. Подобно крахмалу возможен гидролиз целлюлозы в кислой среде, однако этот процесс дорог и требует подвода энергии. Гидролиз удешевляется и становится менее энергоемким при использовании грибов. Однако и в этом случае есть существенный недостаток — процесс идет слишком медленно. В основе промышленного процесса лежит использование измельченной древесной массы или старых газет. Механическое разрушение древесины — наиболее трудоемкая и дорогая стадия процесса, требующая много электроэнергии для питания приводов дробилок и валков.

**Использование этанола в качестве топлива.** Жидкие топлива чрезвычайно важны из-за удобства использования и хорошего управления сгоранием в двигателях. Можно вводить в несколько переделанные бензиновые двигатели прямо 95%-ный этанол, а можно подавать в обычный двигатель смесь из 100%-ного этанола (обезвоженный) с бензином в соотношении 1:10. Отметим, что вода не смешивается с бензином и часто обнаруживается в баках в виде отстоя, не причиняя особых неприятностей. Этого, однако, нельзя допустить в баках для смешения обезвоженного спирта с бензином.

Обезвоженный этанол — жидкость в интервале температур от  $-117$  до  $+78^{\circ}\text{C}$  с температурой воспламенения  $423^{\circ}\text{C}$ . Применение его в двигателе внутреннего сгорания требует специального карбюратора. Поэтому и смешивают бензин с обезвоженным этанолом (20% по объему) и используют эту смесь (газохол) в обычных бензиновых двигателях. Газохол в настоящее время — обычное топливо в Бразилии (этанол там получают из сахарного тростника и маниока), используют его и в США (этанол из кукурузы). Важная особенность этанола — способность выдерживать ударные нагрузки без взрыва, из-за этого он гораздо предпочтительнее добавок из тетраэтилсвинца, вызывающего серьезные загрязнения атмосферы. Превосходные свойства этанола как горючего обеспечивают двигателям 20%-ное увеличение мощности по сравнению с чистым бензином. Массовая плотность и теплотворная способность этанола ниже, чем бензина, соответственно теплота сгорания ( $24 \text{ МДж/м}^3$ ) на 40% ниже чем бензина ( $39 \text{ МДж/м}^3$ ), см. табл. 11.5. Однако лучшее горение этанола компенсирует это уменьшение теплотворной способности. Опыт подтверждает, что двигатели потребляют примерно одинаковое количество газохола и бензина.

Стоимость этанола сильно зависит от местных условий и цен, устанавливаемых для альтернативных видов топлива. Чрезвычайно важна политика правительств в этой области. Обычно при

благоприятных обстоятельствах цена этанола в качестве топлива может быть сравнима с ценой бензина (в ценах 1984 г.).

Таблица 11.7. Выход этанола из различных культур Бразилии \*

Культура	Количество этанола, получаемого из 1 т культуры, л	Количество этанола, получаемого на 1 га в год, л
Сахарный тростник	70	3500
Маниок	180	2160
Сладкое сорго	86	3010
Сладкий картофель	125	1875
Зерновые (кукуруза)	370	2220
Плодовые	160	3200

\* В некоторых районах возможно получение двух урожаев. За счет технологических усовершенствований выход из маниока может быть доведен до 3600 л/(га·год)

**Производство этанола из технических культур.** В табл. 11.7 сведены некоторые данные по производству этанола в зависимости от урожайности технических культур. Промышленное производство зависит и от многих других факторов, включая энергетические (см. § 11.3, табл. 11.4) и экономические. Необходимо еще раз обратить внимание на то обстоятельство, что использование различных видов отходов биомассы для выработки электроэнергии и обеспечения производства теплом — основа рентабельности получения этанола.

### 11.8. Получение биогаза путем анаэробного сбраживания

**Введение.** В естественных условиях разрушение любых видов биомассы, и в том числе навоза животных, происходит в почвенном гумусе путем разложения на элементарные соединения под действием разлагающих организмов, грибов, бактерий. Для этого процесса предпочтительны сырость, тепло и отсутствие света. На конечной стадии процесса полное разложение происходит под действием множества бактерий, классифицируемых либо как *аэробные*, либо как *анаэробные*. Аэробные бактерии развиваются преимущественно в присутствии кислорода, с их участием углерод биомассы окисляется до  $\text{CO}_2$ . В замкнутых объемах с недостаточным поступлением кислорода из внешней среды развиваются анаэробные бактерии, также существующие за счет разложения углеводов. В конечном итоге за счет их деятельности углерод делится между полностью окисленным  $\text{CO}_2$  и полностью восстановленным  $\text{CH}_4$  [см. (10.6)]. Питательные вещества, такие как растворимые соединения азота, сохраняются в качестве удобрений почвенного гумуса. Совершаемые микроорганизмами реакции разложения биомассы также относятся к процессам ферментации, однако для процессов, идущих в анаэробных условиях, чаще предпочитают термин «брожение» («сбраживание»).

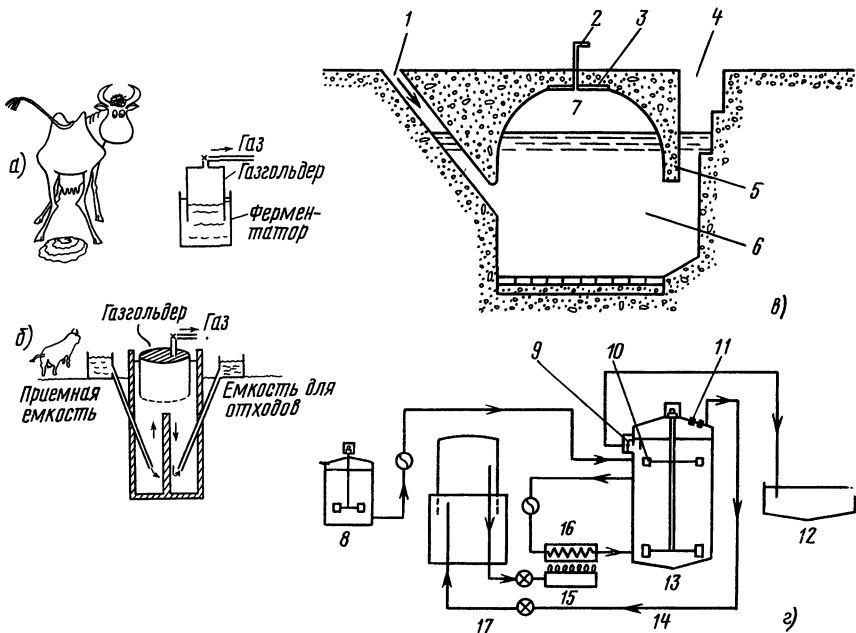


Рис. 11.7. Разновидности биогазогенераторов:

1 — ввод материала; 2 — газопровод; 3 — съемная крышка; 4 — вывод переработанного материала; 5 — разделительная стенка; 6 — ферментатор; 7 — газ; 8 — приемник; 9 — клапан; 10 — мешалка; 11 — стекло; 12 — емкость для продуктов переработки; 13 — газогенератор; 14 — подача газа; 15 — горелка; 16 — теплообменник; 17 — водяной газгольдер

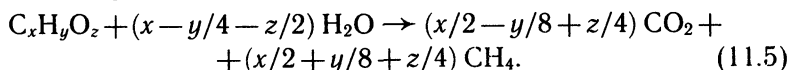
Биогаз — смесь  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , образующаяся в специальных устройствах — биогазогенераторах (рис. 11.7), устроенных и управляемых таким образом, чтобы обеспечить максимальное выделение метана (в литературе для этих устройств еще можно встретить название «метантэнк». — Прим. науч. ред.). Энергия, получаемая при сжигании биогаза, может достигать от 60 до 90% исходной, которой обладает сухой исходный материал. Однако газ получают из жидкой массы, содержащей 95% воды, так что на практике выход достаточно трудно определить. Другое и, по-видимому, очень важное достоинство процесса то, что в его отходах содержится значительно меньше болезнетворных организмов, чем в исходном материале. Правда, отметим, что не все паразиты и патогенные микроорганизмы погибают в процессе анаэробного сбраживания.

Получение биогаза становится экономически оправданным и предпочтительным, когда соответствующий биогазогенератор работает на переработке существующего потока отходов. Примерами подобных потоков могут служить стоки канализационных

систем, свиноферм, скотобоев и т. п. Экономичность в этом случае связана с тем, что нет нужды в предварительном сборе отходов, в организации и управлении процессом их подачи. Известно, сколько и когда поступит отходов, и остается лишь переработать их в биогаз и удобрения.

Получение биогаза возможно в установках самых разных масштабов. Оно особенно эффективно на агропромышленных комплексах, где целесообразно добиваться реализации полного экологического цикла. В таких комплексах навоз подвергают анаэробному сбраживанию с последующей аэробной обработкой в открытых бассейнах. Биогаз используют для освещения, приведения в действие механизмов, транспорта, электрогенераторов, для обогрева. В бассейнах можно выращивать водоросли, идущие на корм скоту. После аэробной ферментации полностью обработанные отходы, до того как быть использованными в качестве удобрений, могут подаваться в рыбные садки и пруды для разведения водоплавающей птицы. Успех реализации подобных схем прямо зависит от качества системной проработки всего проекта, степени стандартизации конструкций, регулярности обслуживания.

**Основные процессы и энергетика.** Основное уравнение, описывающее анаэробное сбраживание, имеет вид



Для целлюлозы это уравнение принимает вид



Некоторые органические соединения растений (например, лигнин) и все неорганические составляющие не поддаются сбраживанию. Они представляют собой инертную в этом процессе массу, образуют шлак, способный засорить систему. Но 95% массы, заполняющей биогазогенератор, составляет, как уже говорилось, вода.

Эти реакции слегка экзотермичны, в процессе их протекания выделяется примерно 1,5 МДж тепла на 1 кг сухой массы сбраживаемого материала, т. е. примерно 25 кДж/моль  $C_6H_{10}O_5$ . Этого, конечно, недостаточно для необходимого повышения температуры сбраживаемой массы.

Если подлежащий сбраживанию материал высушить и сжечь, то теплота его сгорания составит примерно 16 МДж/кг. Только около 10% потенциальной теплоты сгорания теряется в процессе сбраживания. Таким образом, КПД конверсии составляет 90%. Кроме того, материал с повышенной влажностью, будучи введен в процесс сбраживания, дает высококачественное с хорошо управляемым горением газообразное топливо, в то время как одно лишь удаление 95% влаги требует до 40 МДж тепла на



каждый килограмм сухого остатка. На практике сбраживание редко ведут до конца, так как это сильно увеличивает длительность процесса. Обычно сбраживают примерно 60% исходного продукта. Выход газа составляет примерно от 0,2 до 0,4 м<sup>3</sup> на 1 кг сбраживаемого сухого материала при нормальных условиях и при расходе 5 кг сухой биомассы на 1 м<sup>3</sup> воды.

Известно, что существуют три характерных уровня температур, предпочтительных для определенных видов бактерий. Сбраживание при более высоких температурах идет быстрее, чем при низких, и характеризуется примерно удвоением выхода газа на каждые 5° С. Низший уровень температуры — психрофильческий, около 20° С, средний — мезофильческий, около 30° С, высший — термофильческий, около 55° С. В тропиках сбраживание идет без подогрева при температуре почвы в пределах 20—30° С, сбраживание соответствует психрофильческому с временным интервалом 14 дней. В странах с более холодным климатом среду для сбраживания следует подогревать, возможно, используя часть получающегося биогаза, до температуры примерно 35° С. Некоторые бактерии «работают» при 55° С. Их используют, если ставят целью поскорее разложить материал, а не получить дополнительное количество биогаза.

Биохимические процессы при сбраживании идут в три стадии, причем каждая обеспечивается собственной группой анаэробных бактерий.

1. Нерастворимые разлагаемые биологически материалы (например, целлюлоза, полисахариды, жиры) расщепляются на углеводы и жирные кислоты. В работающем биогазогенераторе это происходит при температуре 25° С за сутки.

2. Кислотопродуцирующие бактерии образуют преимущественно уксусную и пропионовую кислоты. Эта стадия при такой же температуре также идет сутки.

3. Бактерии, образующие метан, медленно, в течение примерно 14 суток, при температуре 25° С полностью сбраживают исходные продукты, вырабатывая 70% CH<sub>4</sub> и 30% CO<sub>2</sub> с малыми примесями H<sub>2</sub> и возможно H<sub>2</sub>S. H<sub>2</sub> может иметь существенную роль, и на самом деле некоторые бактерии (например, Клостридиум) продуцируют водород.

Метанообразующие бактерии чувствительны к величине pH: условия в среде должны быть среднекислыми (pH от 6,6 до 7,0) и, конечно, не ниже pH = 6,2. Требуется определенное содержание азота и фосфора: около 10 и 2% массы сухого сбраживаемого материала соответственно. Золотое правило обеспечения успешного сбраживания — поддерживать постоянные условия по температуре и подаче исходных материалов. В стабильных условиях могут быть выведены подходящие популяции бактерий, пригодных именно для этих условий.

**Размеры биогазогенераторов.** Возможный энергетический

выход установки на биогаз определяется соотношением

$$E = \eta H_b V_b. \quad (11.7)$$

Здесь  $\eta$  — КПД горелочного устройства, котла и т. д. (составляет примерно 60%). Следует отметить, что некоторое количество сгорающего метана идет на подогрев  $\text{CO}_2$ , входящего в биогаз, и за счет этого не может быть израсходовано на другие цели, в результате снижается КПД.  $H_b$  — теплота сгорания на единицу объема биогаза (удельная объемная теплота сгорания биогаза), составляет примерно 20 МДж/м<sup>3</sup> при парциальном давлении около 10<sup>3</sup> Па,  $V_b$  — объем получаемого биогаза.

Соотношение (11.7) для чистого метана, входящего в биогаз, имеет следующий вид:

$$E = \eta H_m f_m V_b, \quad (11.8)$$

где  $H_m$  — удельная теплота сгорания метана (56 МДж/кг, при нормальных условиях 28 МДж/м<sup>3</sup>), а  $f_m$  — доля метана в биогазе (около 0,7).

Объем биогаза определяется из выражения

$$V_b = c m_0, \quad (11.9)$$

где  $c$  — выход биогаза из сухой биомассы (от 0,2 до 0,4 м<sup>3</sup>/кг);  $m_0$  — масса сухого сбраживаемого материала (например, 2 кг/сут на одну корову).

Объем жидкой массы, заполняющей биогазогенератор, равен

$$V_i = m_0 / \rho_m, \quad (11.10)$$

где  $\rho_m$  — плотность сухого материала, распределенного в массе (около 50 кг/м<sup>3</sup>).

Объем самого биогазогенератора определяется выражением

$$V_d = \dot{V}_i t_r, \quad (11.11)$$

где  $\dot{V}_i$  — скорость подачи сбраживаемой массы в генератор;  $t_r$  — время пребывания очередной порции в генераторе (от 8 до 20 сут).

*Пример 11.1.* Определите объем биогаза, получаемого с помощью биогазогенератора, утилизирующего навоз четырех коров, и обеспечиваемую им мощность. Время цикла сбраживания 14 суток, температура 30° С, подача сухого сбраживаемого материала от одного животного идет со скоростью 2 кг/сут, выход биогаза составляет 0,24 м<sup>3</sup>/кг, эффективность горелочного устройства 0,6, содержание метана в получаемом биогазе 0,8.

*Решение.*

$$m_0 = 4 \cdot 2 \text{ кг/сут} = 8 \text{ кг/сут}. \quad (11.12)$$

Согласно (11.10) объем жидкой массы составляет

$$V_i = 8 \text{ кг/сут} / 50 \text{ кг/м}^3 = 0,16 \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (11.13)$$

Из (11.11) объем биогазогенератора равен

$$V_d = 20 \text{ сут} \cdot 0,16 \text{ м}^3/\text{сут} = 3,2 \text{ м}^3. \quad (11.14)$$

С учетом (11.9)

$$V_b = 0,24 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 8 \text{ кг/сут} = 1,92 \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (11.15)$$

Согласно (11.8)

$$E = 0,6 \cdot 28 \text{ МДж/м}^3 \cdot 0,8 \cdot 1,9 \text{ м}^3/\text{сут} = 26 \text{ МДж/сут} = 7,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут} = \\ = 300 \text{ Вт (непрерывно, тепловая)}.$$

**Реальные биогазогенераторы.** На рис. 11.7 показаны схемы четырех основных типов биогазогенераторов.

1. *Домашний блок для тропиков.* Наиболее простое устройство, состоящее из двух металлических емкостей, верхняя из которых служит газгольдером, в нижнюю периодически загружается сбраживаемый навоз с добавкой культуры анаэробных бактерий из действующего генератора. Роль нижней емкости может играть 200-литровая бочка из-под горючего. Биогаз из газгольдера по трубопроводу подается в дом и используется по необходимости. Системы, подобные этой, ненадежны, используют их недолго, пока есть энтузиазм.

2. *Индийская система на гобаре.* Термин «гобар» означает высушенные на солнце коровьи лепешки, использующиеся в качестве топлива для приготовления пищи в тропических странах, а раньше и в Европе. Примерно с 1939 г. в Индии начались работы по внедрению в деревенский быт биогазогенераторов, и сейчас там подобных установок около 100 000. На рис. 11.7, б показана схема типового устройства. Навоз помещают в накопитель, где он отделяется от несбраживаемой соломы и других включений. Далее поток сбраживаемой массы медленно проходит через заглубленную в грунт емкость из кирпича, цикл брожения в которой составляет от 14 до 30 сут, в приемный бак для отработанной массы, используемой в качестве удобрения. Давление газа около 10 см водного столба создается с помощью тяжелого металлического газгольдера, являющегося самой дорогой частью установки. Газгольдер периодически (примерно раз в 6 мес) поднимают, чтобы очистить емкость от скапливающихся в верхней части шлаков. Ежедневная проверка состояния трубопроводов и регулярная профилактика установки обязательны. Недостаточно качественное обслуживание — основная причина возможного выхода биогазогенераторов из строя.

3. *Китайский биогазогенератор.* На рис. 11.7, в приведена схема системы, рекомендованной для массового использования в КНР как для отдельных хозяйств, так и для деревенских общин. Главная особенность проекта — стационарный сводчатый корпус из бетона, который значительно дешевле системы с тяжелым плавучим металлическим газгольдером. По мере выделения газа его объем увеличивается, за счет соответствующего роста давления поток сбраживаемой массы прерывается. Этим достигается регулирование работы системы.

4. *Установка для промышленной переработки отходов живот-*

новодства. На рис. 11.7, з показана автоматизированная установка, в которой процесс сбраживания идет при подогреве по крайней мере до 35° С.

### 11.9. Агрехимические способы получения топлива

Здесь речь пойдет о получении топлива в процессе жизнедеятельности растений, урожай которых можно использовать для производства масел и растворителей с минимальной переработкой. Случаи, когда растения полностью уничтожаются (см. § 11.4), не рассматриваются.

Можно разделить продукцию живых растений на следующие категории.

1. Семена — подсолнечник с массовым содержанием масла, равным 50%.

2. Орехи — пальмовое масло, копра кокосов, массовое содержание масла в них составляет до 50%.

3. Плоды — оливки.

4. Листья — эвкалипт, массовое содержание масел составляет 25%.

5. Стволы, корни (см. § 11.4).

6. Сок растений — сок каучука.

7. Переработка отходов — масла и растворители до 15% сухой массы, например скипидар, канифоль, маслянистые смолы из сосны, масло из листьев эуфорбии.

Лауреат Нобелевской премии Мелвин Кальвин считает агрохимические методы получения различных топлив предпочтительными (о цикле Кальвина см. § 10.6). Возможность реализации ферм по производству агрохимических топлив обсуждается в связи с тем, что зачастую получаемые таким образом продукты по своим химическим свойствам гораздо ценнее, чем просто топливо. В то же время речь идет о создании ферм именно для производства моторного топлива.

Изучение ситуации, связанной с производством топлив, дает обнадеживающие результаты [так, например, урожайность масла эуфорбии 10 т/(га·год); растущее в Бразилии дерево компайфера дает в год до 45 л масла, собираемого из надрезов коры], однако производительность растений на бросовых землях невысока.

Ниже приведены недостатки и достоинства агрохимических методов.

Низкая урожайность — 2—10 т (от средней до максимальной) с одного гектара в год в отличие от зерновых, дающих примерно 40 т/га.

Вытеснение производства пищевых культур, если не используются бросовые земли.

Трудоемкость (с точки зрения производителя).

Хорошее химическое сырье для получения высококачественных моторных топлив (ценных химических продуктов).

Экологичность методов производства (растения не уничтожаются, не требуется тяжелых сельскохозяйственных машин, возможно облагораживание бросовых земель).

Интегрируются с различными вариантами сельскохозяйственного производства (с зерновыми и скотоводческими комплексами).

Высокая трудоемкость (с точки зрения рабочих).

### Задачи

11.1. Фермер, имеющий 50 свиней, предполагает использовать их навоз для получения биогаза в качестве топлива своего автомобиля.

а) Обсудите возможность этого. Оцените энергию, которой обладает получаемый таким образом газ, и затраты энергии на его сжатие до требуемого объема, сравните их с энергией, необходимой для приведения автомобиля в действие.

б) Прокомментируйте, для каких других нужд может фермер использовать биогазогенератор.

Примите к сведению, что 100 кг свиных испражнений содержат примерно 0,5 кг разлагаемых составляющих в сутки и что 1 кг этих составляющих позволяет получить 0,4 м<sup>3</sup> биогаза при нормальных условиях.

11.2. Последние исследования показывают, что основным источником энергии на Фиджи является древесина, используемая для приготовления пищи на открытом огне. Типичное потребление древесного топлива составляет 1 кг на человека в день.

а) Оцените энергию, необходимую для того, чтобы вскипятить 2-литровый чайник, наполненный водой. В предположении о том, что такова потребность одного человека в день, сравните эту энергию с тем, что содержит древесина, и таким образом дайте оценку КПД использования открытого огня.

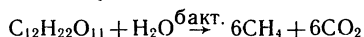
б) Какое количество строевого леса срубает деревня из 200 жителей в год? Предполагая систематическое воспроизводство древесины, оцените, какую площадь эта деревня должна отвести на топливные нужды, чтобы избежать обезлесивания.

Примечание: см табл. 11.3.

в) Обсудите справедливость сделанных допущений и уточните оценки.

11.3. а) Бак объемом 3 м<sup>3</sup> используется в качестве биогазогенератора. Каждый день через него проходит 0,2 м<sup>3</sup> массы, содержащей 4 кг сбраживаемого материала (это примерно соответствует количеству навоза от 20 свиней).

Предполагая, что основная реакция в биогазогенераторе



и что она идет в течение 7 сут, определите количество получаемого биогаза ежесуточно и теплоту его сгорания. Чему равно эквивалентное количество керосина?

б) Скорость реакции в биогазогенераторе можно удвоить, повышая температуру с 20° С (в окружающей среде) до 35° С. Что это даст? Как много

тепла ежесуточно потребуется для того, чтобы это осуществить? Какую часть тепла могла бы дать сама химическая реакция сбраживания?

11.4. а) Напишите химическое уравнение преобразования сахарозы в этанол и используйте его для оценки теоретического количества этанола, получаемого из 1 т сахарозы. Реален ли такой выход?

б) Фиджи — небольшое государство в южной части Тихого океана. Главный продукт его экспорта — сахар. Фиджи производит ежегодно 300 000 т сахара и ввозит такое же количество жидкого топлива. Если весь этот сахар преобразовать в этанол, то какую часть ввозимого топлива он заменит?

### Решения

11.1. а) Выработка газа обеспечивает получение 200 МДж/сут. Автомобиль требует 4 л бензина в сутки, т. е. 160 МДж/сут. Работа на сжатие составляет примерно 30 МДж (равна  $pV$ ).

б) См. § 11.8.

11.2. а)  $mc\Delta T \approx 0,6$  МДж (реальные тепловые потери от чайника подразумеваются достаточно высокими). КПД  $\approx 3\%$ .

б) 70 т; 7 га.

11.3. а) 3 м<sup>3</sup> газа; 63 МДж; 1,7 л керосина.

б) Меньше емкость — меньше стоимость; требуется 6 МДж/сут; вырабатываемое в реакции тепло 0,3 МДж/моль сахарозы, что составляет 3,6 МДж/сут.

11.4. а) 680 л при 100%-ной переработке.

б) Около 90% при соответствующей технологии.

## Глава 12

# ЭНЕРГИЯ ВОЛН

### 12.1. Введение

Огромные количества энергии можно получить от морских волн. Мощность, переносимая волнами на глубокой воде, пропорциональна квадрату их амплитуды и периоду. Поэтому наибольший интерес представляют длиннопериодные ( $T \sim 10$  с) волны большой амплитуды ( $a \sim 2$  м), позволяющие снимать с единицы длины гребня в среднем от 50 до 70 кВт/м.

Возможность преобразования энергии волн в электроэнергию доказана уже давно. Существует множество технических решений, позволяющих реализовать эту возможность. В последние годы интерес к волновой энергетике резко усилился, особенно в Японии, Великобритании, странах Скандинавии, в результате чего эксперименты переросли в стадию реализации проектов. Современная тенденция разработки таких установок, как и вообще установок на возобновляемых видах энергии, ориентируется на единичные модули умеренной мощности (около 1 МВт)

размером порядка 50 м вдоль фронта волны. Подобные устройства уже сейчас могут принести определенные экономические выгоды в случае замены дизельных генераторов, снабжающих энергией удаленные поселки, особенно на островах.

Развитие волновой энергетики сопряжено со значительными трудностями. Их подробный анализ дан ниже, но в основном они сводятся к следующему.

1. Волны нерегулярны по амплитуде, фазе и направлению движения. Проектировать же устройства для эффективного извлечения энергии в широком диапазоне варьирующихся величин не просто.

2. Всегда есть вероятность возникновения экстремальных штормов и ураганов, во время которых образуются волны очень большой интенсивности. Конструкции волноэнергетических устройств должны, разумеется, им противостоять. Примерно раз в 50 лет возникают волны, амплитуда которых в 10 раз превышает среднюю. Следовательно, во время штормов конструкции должны выдерживать нагрузки, примерно в 100 раз большие, чем при нормальной работе.

3. Подобные пиковые величины мощности присущи главным образом именно волнам на глубокой воде, проходящим со стороны открытого моря. Трудности, связанные с созданием энергетических устройств для таких волновых режимов, их обслуживанием, удержанием в заданном положении, передачей энергии на берег, вызывают опасения.

4. Обычно период волн  $T \approx 5 \div 10$  с (частота порядка 0,1 Гц). Достаточно трудно приспособить это нерегулярное медленное движение к генерированию электроэнергии промышленной частоты, которая в 500 раз выше.

5. Выбрать подходящий тип устройства для преобразования энергии из всего их многообразия — сложная, часто просто непосильная задача.

6. Привычка мыслить категориями крупномасштабной энергетики промышленно развитых районов ведет к искушению создавать лишь крупные волновые электростанции в местах с высокими волновыми потенциалами. При этом существует тенденция игнорировать зоны умеренных потенциалов, где зачастую использование волновой энергии оказывается экономически более оправданным.

Преимущества волновой энергии состоят в том, что она достаточно сильно сконцентрирована, доступна для преобразования и на любой момент времени может прогнозироваться в зависимости от погодных условий. Создаваясь под действием ветра, волны хорошо сохраняют свой энергетический потенциал, распространяясь на значительные расстояния. Например, крупные волны, достигающие побережья Европы, зарождаются во время штормов в центре Атлантики и даже в Карибском море.

Ниже даны основные представления, необходимые для понимания работы волновых энергетических устройств. Прежде всего читателя вводят в теорию монохроматических волн на глубокой воде и знакомят с расчетом потоков энергии, переносимых ими. Далее описываются реальные волны. И, наконец, рассказывается о попытках конструирования волновых устройств, достаточно эффективно реагирующих на изменение природных условий. Жертвуя математической строгостью, авторы пытались добиться физической ясности, рассчитывая на то, что необходимые теоретические выкладки читатель всегда найдет в литературе.

## 12.2. Волновое движение

Наибольшее число волновых энергетических устройств разрабатывается для извлечения энергии из волн на глубокой воде. Это наиболее общий тип волн, существующий при условии, что средняя глубина моря  $D$  превышает величину половины длины волны  $\lambda/2$ . Например, при характерной длине волны  $\lambda \sim 100$  м и амплитуде  $a$  м волна ведет себя как на глубокой воде при глубине моря, превышающей 30 м. На рис. 12.1, *a* показано, как движутся частицы жидкости в волне на глубокой воде. Амплитуда кругового движения с глубиной уменьшается экспоненциально и становится пренебрежимо малой при  $D > \lambda/2$ . В волне на мелководье (рис. 12.1, *б*) частицы движутся по эллиптическим орбитам, движение охватывает придонный слой, приводя к диссипации энергии волны.

Поверхностные волны на глубокой воде имеют характерные особенности.

1) Волны являются неразрушающимися синусоидальными с нерегулярной длиной, фазой и направлением прихода.

2) Движение каждой частицы жидкости в волне является круговым. В то время как изменяющиеся очертания волн свидетельствуют о распространении волнового движения, сами по себе частицы не связаны с этим движением и не перемещаются в его направлении.

3) Поверхностный слой жидкости остается на поверхности.

4) Амплитуда движения частиц жидкости экспоненциально уменьшается с глубиной. На глубине  $\lambda/2\pi$  от среднего положения

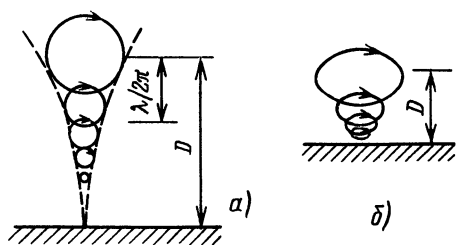


Рис. 12.1. Движение частиц жидкости по круговым орбитам в волне на глубокой воде (*a*) и по эллиптическим орбитам в волне на мелкой воде (*б*)



уровня поверхности амплитуда кругового движения частиц уменьшается в  $e$  раз ( $e=2,72$  — основание натуральных логарифмов). На глубине  $\lambda/2$  перемещение частиц жидкости становится пренебрежимо малым, составляя менее 5% поверхностного.

5) Существенно, что амплитуда волны  $a$  не зависит от ее длины  $\lambda$ , скорости распространения  $c$ , периода  $T$ , а зависит лишь от характера предшествовавшего взаимодействия ветра с морской поверхностью. В то же время редко создаются условия, при которых амплитуда достигает значения  $\lambda/10$ .

6) Разрушение волны в виде белого буруна происходит, когда наклон ее поверхности составит примерно 1:7. Энергетический потенциал волны при этом рассеивается.

Теоретически анализ волнового движения в жидкости достаточно труден, однако он детально выполнен в ряде специальных изданий. Здесь из теории использованы лишь те результаты, которые необходимы для понимания работы наиболее простых волноэнергетических устройств.

Для волн на глубокой воде силы трения, поверхностного натяжения и инерции малы по сравнению с двумя доминирующими силами — гравитационной и вращательной, поэтому водная поверхность всегда принимает такую форму, чтобы касательная к ней в любой точке была перпендикулярна направлению действия результирующей этих двух сил (рис. 12.2).

Очень важно понимать, что в волнах на глубокой воде нет поступательного движения жидкости<sup>1</sup>. Движение взвешенных в воде частиц на рис. 12.1 подтверждает это. На этом же рисунке сравнивается движение частиц в волнах на глубокой и мелкой воде.

В подповерхностном слое жидкости ее частицы совершают круговое движение с радиусом орбиты  $a$ , равным амплитуде волны (рис. 12.3). Высота волны  $H$  от вершины гребня до основания равна ее удвоенной амплитуде ( $H=2a$ ). Угловая скорость движения частиц  $\omega$  измеряется в радианах в секунду. Изменение

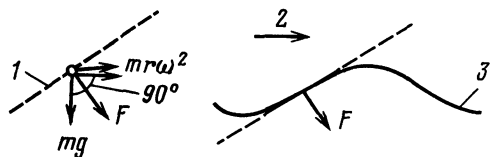


Рис. 12.2. Поверхность волны перпендикулярна результирующей гравитационной и центробежной сил  $F$ , действующих на элемент жидкости:

1 — касательная к поверхности воды, 2 — направление движения волны; 3 — поверхность волны

<sup>1</sup> Говоря об отсутствии в волне поступательного движения жидкости, авторы имеют в виду общий горизонтальный перенос массы. В действительности же в волне всегда имеется горизонтальная составляющая скорости, положительная на гребне, но отрицательная во впадине.— *Прим. пер.*

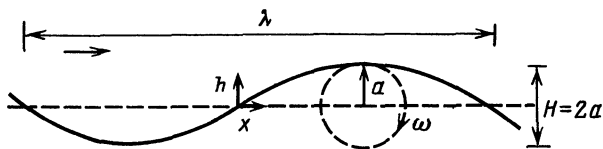


Рис. 12.3 Характеристики волны

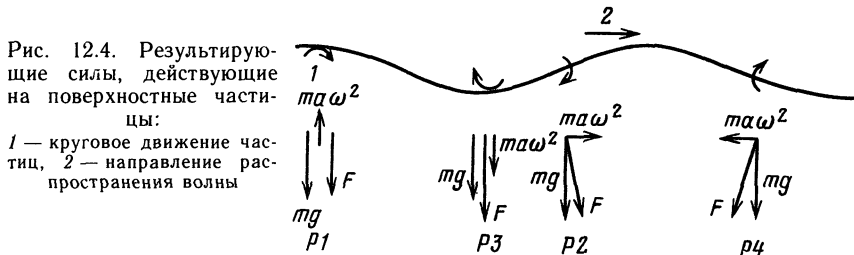


Рис. 12.4. Результирующие силы, действующие на поверхностные частицы:

1 — круговое движение частиц, 2 — направление распространения волны

формы волновой поверхности таково, что наблюдается поступательное движение, хотя сама вода, как уже отмечалось, не перемещается в направлении распространения волны (слева направо). Это кажущееся перемещение есть результат наблюдения фаз смещения последовательно расположенных частиц жидкости; как только одна частица в гребне опускается, другая занимает ее место, обеспечивая сохранение формы гребня и распространение волнового движения вперед.

Результирующая сила  $F$ , действующая на поверхностную частицу массой  $m$ , показана на рис. 12.4. Под действием суммы подобных сил водная поверхность принимает такую форму, при которой касательная в любой точке ее перпендикулярна  $F$ . При подъеме на гребень (положение  $P1$ ) частица подвергается действию центробежной силы  $m\alpha\omega^2$ . В следующий момент частица падает вниз, и ее место занимает соседняя, вращающаяся с задержкой по фазе. В положении  $P2$  частица оказывается на среднем уровне жидкости, и поверхность ориентируется перпендикулярно результирующей силе  $F$ . Во впадине, положение  $P3$ , направленная вниз сила имеет максимум (центробежная и гравитационная силы складываются). К положению  $P4$  частица

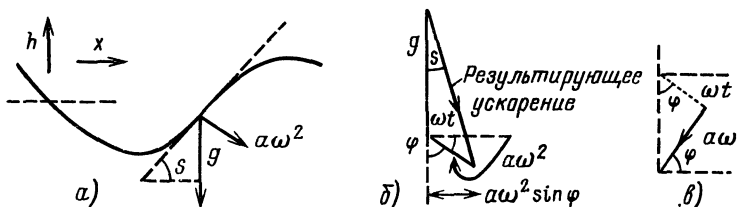


Рис. 12.5. Ускорение (б) и скорость частиц (в) в поверхностном слое жидкости (а)

практически полностью завершает цикл движения.

Изменение ускорения поверхностной частицы показано на рис. 12.5, б. В начальный момент времени частица находится в среднем положении, а затем ее фазовый угол изменяется по закону

$$\varphi = \pi/2 - \omega t, \quad (12.1)$$

$$\operatorname{tg} s = \frac{a\omega^2 \sin \varphi}{g + a\omega^2 \cos \varphi} \approx \frac{a\omega^2 \sin \varphi}{g}, \quad (12.2)$$

так что практически для неразрушенной волны  $g \gg a\omega^2$  (например,  $a=2$  м,  $T=8$  с,  $a\omega=1,2$  м/с<sup>2</sup> и  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup>). Пусть  $h$  — текущее значение подъема над средним уровнем. Наклон касательной к поверхности волны определяется выражением

$$\frac{dh}{dx} = \operatorname{tg} s. \quad (12.3)$$

Из соотношений (12.1) — (12.3) следует, что

$$\frac{dh}{dx} = \frac{a\omega^2}{g} \sin \varphi = \frac{a\omega^2}{g} \cos \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \frac{a\omega^2}{g} \cos \omega t. \quad (12.4)$$

По диаграмме рис. 12.5, в вертикальная скорость частицы

$$\frac{dh}{dt} = a\omega \sin \varphi = a\omega \cos \omega t. \quad (12.5)$$

Решая (12.4) и (12.5), получаем

$$h = a \sin \left( \frac{\omega^2 x}{g} - \omega t \right). \quad (12.6)$$

Сравнивая последнее выражение с основным уравнением распространения волны длиной  $\lambda$  и скоростью  $c$ , получаем

$$h = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) = a \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} x - \omega t \right) = a \sin (kx - \omega t), \quad (12.7)$$

где  $k=2\pi/\lambda$  — волновое число. Очевидно, что движение поверхности описывается так же, как и перемещение ее в пространстве при условии, что

$$\lambda = 2\pi g / \omega^2. \quad (12.8)$$

Это соотношение устанавливает зависимость между частотой и длиной для поверхностной волны на глубокой воде.

Период движения волны  $T=2\pi/\omega=2\pi/(2\pi g/\lambda)^{1/2}$ . Следовательно,

$$T = (2\pi\lambda/g)^{1/2}. \quad (12.9)$$

Скорость частицы жидкости в гребне волны

$$v = a\omega = a(2\pi g/\lambda)^{1/2}. \quad (12.10)$$

Из (12.7) и (12.8) найдем скорость перемещения поверхности волны в направлении  $x$ :

$$c = \omega\lambda/2\pi = g/\omega = g(\lambda/2\pi g)^{1/2} = g\lambda/2\pi. \quad (12.11)$$

Скорость  $c$  называют фазовой скоростью распространения волн, создаваемых на поверхности жидкости. Следует отметить, что эта величина не зависит от амплитуды волн и неявным образом связана со скоростью движения частиц жидкости в волне.

*Пример 12.1.* Каковы период и фазовая скорость волны на глубокой воде при  $\lambda=100$  м?

*Решение.* Из (12.8)

$$\omega^2 = 2\pi g/\lambda = (2\pi) 10 \text{ м}^2/\text{с}/100 \text{ м} = 0,8 \text{ с}^{-1}.$$

Следовательно,  $T = 2\pi/\omega = 8$  с.

Из выражения (12.11)

$$c = [10 \text{ м}/\text{с}^2 \cdot 100 \text{ м}/(2\pi)]^{1/2} = 13 \text{ м}/\text{с}.$$

Таким образом,  $\lambda=100$  м,  $T=8$  с,  $c=13$  м/с. (12.12)

### 12.3. Энергия и мощность волны

**Основные соотношения.** Элементарная теория волн на глубокой воде основана на допущениях о свойствах единичной регулярной волны. Частицы жидкости в такой волне движутся по круговым орбитам с переменной фазой в направлении распространения волн. Амплитуда этого движения в вертикальной плоскости равна половине расстояния от гребня до впадины волны и экспоненциально уменьшается с глубиной. Движение частиц остается круговым при глубине моря  $D > 0,5\lambda$ . На таких глубинах перемещения частиц вблизи дна пренебрежимо малы. Для этих условий (рис. 12.6) для частицы, находящейся на расстоянии  $z$  от среднего положения уровня поверхности, радиус круговой орбиты

$$r = ae^{kz}. \quad (12.13)$$

Для положения ниже среднего уровня поверхности  $z$  — отрицательная величина.

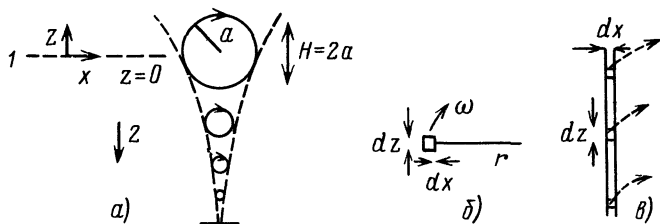


Рис. 12.6. Элементы движения жидкости (к объяснению экспоненциального уменьшения амплитуды волны с глубиной):

1 — средний уровень моря; 2 — глубина

Выделим элементарный слой единичной ширины в направлении вдоль фронта волны с координатами  $(x, z)$ . Элемент объема в этом слое

$$dV = dx dz, \quad (12.14)$$

а элемент массы при плотности  $\rho$

$$dm = \rho dV = \rho dx dz. \quad (12.15)$$

Пусть  $E_k$  — полная кинетическая энергия волнового движения этого слоя на единицу длины в направлении  $x$ . Соответственно полная кинетическая энергия на длине  $\delta x$  есть  $E_k \delta x$ . Каждый элемент этого слоя высотой  $\delta z$  и длиной  $\delta x$  находится в круговом движении с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , радиус круговой орбиты равен  $r$ , а линейная скорость  $v = r\omega$  (рис. 12.6, б). Вклад каждого элемента в полную кинетическую энергию составляет  $\delta E_k \delta x$ , причем

$$\delta E_k \delta x = \frac{1}{2} dm v^2 = \frac{1}{2} (\rho \delta z \delta x) r^2 \omega^2, \quad (12.16)$$

откуда

$$\delta E_k = \frac{1}{2} \rho r^2 \omega^2 \delta z. \quad (12.17)$$

Наиболее просто предположить, что в начальный момент времени такой элемент находится в каком-то среднем положении по отношению к слою, а все другие элементы этого слоя движутся вертикально в фазе с ним в направлении  $z$  (рис. 12.6, в).

Так как радиус круговой орбиты в волне  $r = ae^{kz}$  ( $z$  ниже поверхности отрицательно), то (12.17) преобразуется к виду

$$\delta E_k = \frac{1}{2} \rho (a^2 e^{2kz}) \omega^2 \delta z \quad (12.18)$$

и полная кинетическая энергия всего этого вертикального слоя равна

$$E_k \delta x = \int_{z=-\infty}^{z=0} \frac{\rho \omega^2 a^2}{2} e^{2kz} \delta z \delta x = \frac{1}{4} \rho \frac{\omega^2 a^2}{k} \delta x. \quad (12.19)$$

Так как  $k = 2\pi/\lambda$ , а из (12.8)  $\omega^2 = 2\pi g/\lambda$ , то

$$E_k = \frac{1}{4} \rho \frac{a^2 \omega^2}{k} = \frac{1}{4} \rho a^2 \frac{2\pi g}{\lambda} \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{1}{4} \rho a^2 g. \quad (12.20)$$

Таким образом, полная кинетическая энергия на единицу ширины волнового фронта и единицу длины вдоль направления распространения волны равна

$$E_k = \rho a^2 g / 4. \quad (12.21)$$

В задаче 12.1 показано, что таким же образом нормированная потенциальная энергия волны равна в точности такой же величине

$$E_p = \rho a^2 g / 4. \quad (12.22)$$

Это равенство кинетической и потенциальной составляющих энергии — свойство гармонического движения.

Приведенный способ нормирования есть не что иное, как нормирование на единицу площади поверхности волны, т. е. полная энергия на единицу площади поверхности волны равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_p = \rho a^2 g / 2. \quad (12.23)$$

Если учесть, что корень квадратный из среднего квадрата амплитуды равен  $(a^2/2)^{1/2}$ , то

$$E = \rho g (\text{корень квадратный из среднего квадрата амплитуды})^2. \quad (12.24)$$

Выражение для энергии на единицу ширины волнового фронта и на единицу длины волны вдоль направления его распространения запишем в виде

$$E_\lambda = E\lambda = \rho a^2 g \lambda / 2. \quad (12.25)$$

Из (12.20)  $\lambda = 2\pi g / \omega^2$ , так что

$$E_\lambda = \rho a^2 g^2 / \omega^2, \quad (12.26)$$

или, так как  $T = 2\pi / \omega$ ,

$$E_\lambda = \rho a^2 g^2 T^2 / 4\pi. \quad (12.27)$$

**Отбор мощности от волн.** Выше для непрерывного волнового движения на глубокой воде была определена его полная (кинетическая и потенциальная) энергия. Эта энергия связана с жидкостью, которая в среднем во времени остается в постоянном положении в пространстве. Однако приведенные расчеты ничего не рассказали о переносе энергии через вертикальное сечение.

В учебниках эту мощность принято рассчитывать исходя из первого закона динамики в предположении о результирующих давлениях и перемещениях. Прикладная математика требует точности и понимания, основанных на фундаментальной теории распространения волн в жидкости. Из детального анализа, который существенно упрощается для случая волн на глубокой воде, постараемся извлечь самое существенное.

Предположим, что единичный элемент или частица жидкости находится ниже среднего уровня поверхности (рис. 12.7). Для поверхностной волны с амплитудой  $a$  и волновым числом  $k$  радиус движения части в подповерхностном слое определяется уже известным выражением

$$r = a e^{kz}. \quad (12.28)$$

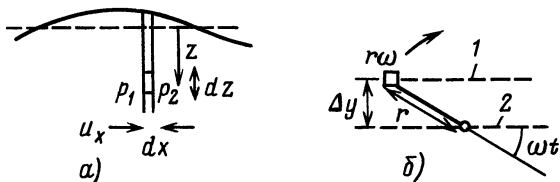


Рис. 12.7. Локальные колебания давления в волне: воздействие на элемент жидкости (а) и локальные перемещения элемента жидкости (б): 1 — текущее положение частицы; 2 — среднее положение

Вертикальное перемещение  $\Delta y$  (рис. 12.7, б) из среднего положения описывается выражением

$$\Delta y = r \sin \omega t = a e^{kz} \sin \omega t. \quad (12.29)$$

Горизонтальная составляющая скорости частицы определяется соотношением

$$u_x = r \omega \sin \omega t = a \omega e^{kz} \sin \omega t. \quad (12.30)$$

Из рис. 12.7, а следует, что мощность, переносимая волной в направлении  $x$  на единицу ширины волнового фронта, в любой момент равна

$$P' = \int_{z=-\infty}^{z=0} (p_1 - p_2) u_x dz, \quad (12.31)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — давления, действующие на элемент высотой  $dz$  единичной ширины в направлении вдоль волнового фронта. В свою очередь  $(p_1 - p_2)$  — разность давлений, испытываемая элементом жидкости в горизонтальном направлении. Единственная составляющая энергии, не обращающаяся в нуль при прохождении элементом положения среднего уровня поверхности, связана с изменением потенциальной энергии в результате вращения частиц по круговым орбитам:

$$p_1 - p_2 = \rho g \Delta y. \quad (12.32)$$

Подставляя вместо  $\Delta y$  его выражение из (12.29), получаем

$$p_1 - p_2 = \rho g a e^{kz} \sin \omega t. \quad (12.33)$$

С использованием (12.30) и (12.33) выражение (12.31) приобретает вид

$$P' = \rho g a^2 \omega \int_{z=-\infty}^{z=0} e^{2kz} \sin^2 \omega t dz. \quad (12.34)$$

Осреднение по времени за несколько периодов дает для  $\sin^2 \omega t$  значение  $1/2$ , так что

$$P' = \frac{1}{2} \rho g a^2 \omega \int_{z=-\infty}^{z=0} e^{2kz} dz = \frac{1}{2} \rho g a^2 \omega \frac{1}{2k}. \quad (12.35)$$

Согласно (12.7) фазовая скорость волны

$$c = \omega/k = \lambda/T. \quad (12.36)$$

С учетом (12.36) выражение для мощности, переносимой в направлении распространения волны на единицу ширины волнового фронта, приобретает вид

$$P' = \rho g a^2 c / 4 = \rho g a^2 \lambda / 4T. \quad (12.37)$$

С учетом (12.23) и (12.37) мощность  $P$  равна полной энергии (кинетическая + потенциальная)  $E$  в волне на единицу площади поверхности, умноженной на величину  $u = c/2$  — групповую скорость волн на глубокой воде, с которой волны переносят энергию. С учетом выражения для групповой скорости

$$P' = E u = E c / 2, \quad (12.38)$$

где  $E = \rho g a^2 / 2$ .

Из (12.8)

$$k = \omega^2 / g \quad (12.39)$$

и, следовательно, фазовая скорость

$$c = \omega/k = g/\omega = g/(2\pi/T). \quad (12.40)$$

Различие между групповой и волновой (фазовой) скоростями является общим для любых волновых процессов, для которых фазовая скорость зависит от длины волны (дисперсия).

Подставляя в (12.37) фазовую скорость в виде (12.40), получаем известное соотношение

$$P' = \rho g^2 a^2 T / 8\pi. \quad (12.41)$$

Следовательно, мощность, переносимая волнами, увеличивается прямо пропорционально квадрату амплитуды и периоду. Именно поэтому для специалистов по океанской энергетике особенно привлекательны длиннопериодные волны океанской зыби, обладающие значительной амплитудой. Читателям предоставляется получить выражение для полной мощности  $P'$  через длину волны, используя (12.9).

*Пример 12.2.* Какова мощность волны на глубокой воде при длине ее 100 м и амплитуде 1,5 м?

*Решение.* Из (12.12) для примера 12.1  $c = 13$  м/с. Используя (12.38), находим групповую скорость:  $u = c/2 = 6,5$  м/с. Волны с амплитудой 1,5 м ( $H = 3$  м) достаточно реальны для Атлантики. На основании (12.37)  $P = \rho g a^2 c / 4 = 73$  кВт/м.

Этот пример показывает, что волны океанской зыби способны переносить чрезвычайно высокие потоки мощности.



## 12.4. Описание реальных волн

На практике волны оказываются совсем не такими идеализированно синусоидальными, как это подразумевалось выше. Лишь случайно естественные или искусственно созданные в результате дифракции или движения в каналах волны становятся близкими к идеальным. Обычно же в море наблюдаются нерегулярные волны с переменными частотой, направлением и амплитудой. Под воздействием преобладающего ветра движение волн может приобретать преимущественное направление (например, юго-западное или северо-восточное для волн, набегających на побережье Британских островов), а период стать достаточно большим — наблюдаются волны океанской зыби. Более нестабильные ветры вызывают нерегулярное движение вод с характерным более коротким периодом — штормовые волны. При глубине моря порядка 30 м и менее возможны фокусирующие и направляющие эффекты, в отдельных местах они могут привести к появлению более регулярных или более мощных волн. Волновые энергетические устройства должны противостоять широкому спектру природных условий, должны быть предназначены для извлечения максимума мощности в среднем за достаточно длительный период и независимо от района размещения. При проектировании подобных устройств необходимо в первую очередь понимать возможность значительного усиления волн по сравнению с типичными для данного района по крайней мере раз в 50 лет.

Высота волн в заданной точке наблюдения обычно регистрируется с помощью аналоговых волнографов. Для получения сведений о направлении прихода волн требуются специальные измерения. Представление о записи волнографа дает рис. 12.8. Кривая фиксирует вертикальное перемещение уровня во времени. Современные волнографы используют цифровые методы регистрации с последующей обработкой на ЭВМ больших массивов данных. Если величина  $H$  от измерения к измерению существенно изменяется, то приходится использовать различные методы вычисления статистически обоснованных значений, наилучшим образом отражающих суть явления.

Основными переменными величинами, которые измеряются обычно в течение достаточно длительного времени, являются:

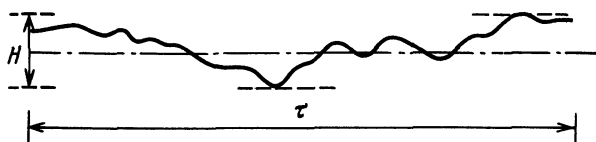


Рис. 12.8. Пример записи волнографа (пример условный, гребни специально выделены). Штрихпунктирная прямая соответствует среднему уровню моря

$N_c$  — число гребней за выбранный промежуток времени, на рис. 12.8 их число равно 10;  $H_{1/3}$  — высота волн 1/3-обеспеченности, это средняя высота 1/3-наибольших волн за рассматриваемый промежуток времени,  $H_{1/3}$  — среднее от  $N_c/3$  наибольших величин;  $H_s$  — характерная высота волн:

$$H_s = 4\bar{a} = 4 \left[ \left( \sum_{i=1}^n h^2 \right) / n \right]^{1/2}, \quad (12.42)$$

где  $\bar{a}$  — корень квадратный из среднего квадрата перемещения волной поверхности от положения среднего уровня поверхности, рассчитанный по  $n$  измерениям, выполненным за одинаковые интервалы времени, позволяет избежать погрешностей измерения за счет записи волнового процесса на частоте, в 2 раза меньшей, чем максимальная. Измеренная или наиболее вероятная максимальная высота волн  $H_{\max}$  1 раз в 50 лет может принять значение, равное  $50 H_s$ . Именно это значение закладывается в расчеты при проектировании морских сооружений. Средний период колебаний по минимумам  $T_z$  определяется как продолжительность промежутка времени между минимумами, пересекающими линию среднего положения уровня поверхности на волнограмме. На рис. 12.8  $T_z = \tau/3$ . Средний период колебаний по гребням  $T_c$  определяется продолжительностью временного периода  $\tau$  волнограммы, деленной на число гребней. На рис. 12.8  $T_c = \tau/10$ ; на практике  $N$  очень велико, так что погрешность в определении  $T_c$  мала. Параметр уширения спектра  $\epsilon$ , характеризующий число составляющих колебаний в волне, можно найти из соотношения:

$$\epsilon^2 = 1 - (T_c/T_z)^2. \quad (12.43)$$

В случае монохроматической волны  $T_c = T_z$ , так что  $\epsilon = 0$ . В рассматриваемом примере  $\epsilon = [1 - (0,3)^2]^{1/2} = 0,9$ , что указывает на смещение нескольких частот. Полные данные о вкладе отдельных составляющих волнового движения дает Фурье-анализ энергетического спектра волнения (см., например, рис. 12.9).

Согласно (12.41) мощность на единицу ширины волнового фронта в чисто синусоидальной волне на глубокой воде

$$P' = \rho g^2 a^2 T / 8\pi = \rho g^2 H^2 T / 32\pi, \quad (12.44)$$

где  $H = 2a$ . Так как среднеквадратическое смещение для чисто синусоидальной волны  $\bar{a} = a \times 2^{1/2}$ , то (12.44) можно преобразовать к виду

$$P' = \rho g^2 \bar{a}^2 T / 4\pi. \quad (12.45)$$

На практике морские волны конечно же не являются синусоидальными и монохроматическими. Поэтому мощность на единицу ширины волнового фронта необходимо находить через

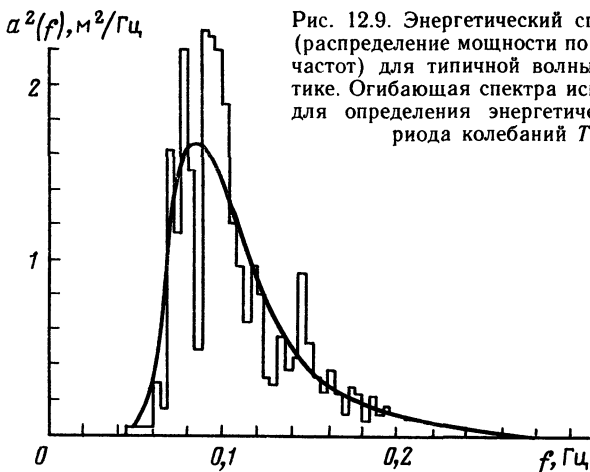


Рис. 12.9. Энергетический спектр  $a^2(f)$  (распределение мощности по интервалу частот) для типичной волны в Атлантике. Огибающая спектра используется для определения энергетического периода колебаний  $T_e$

характерную высоту волн  $H_s$ , определяемую из (12.42);

$$P' = \rho g^2 H_s^2 T_c / 64\pi. \quad (12.46)$$

Здесь фигурирует так называемый энергетический период  $T_e$ , определяемый как период наиболее представительной моды колебаний в энергетическом спектре волны (см. рис. 12.9). Для многих морей

$$T_e = 1,12 T_z. \quad (12.47)$$

До последних исследований в волновой энергетике  $P'$  примерно можно определить по данным волнографа следующим образом:

$$P' = \rho g H_{1/3}^2 T_z / 64\pi \approx [490 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})] H_{1/3}^2 T_z, \quad (12.48)$$

однако использование новейшего оборудования и анализ данных на ЭВМ позволяют получать надежные значения  $a$  и, следовательно  $H_s$ , а также  $T_z$  или  $T_e$ , с помощью которых вычисляют  $P'$ :

$$P' = [490 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})] H_s^2 T_e = [550 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})] H_s^2 T_z. \quad (12.49)$$

Так как результирующее волнение чаще всего нельзя представить суммой волн, действующих в одном направлении, то мощность, извлекаемая преобразователями направленного действия, будет значительно ниже той, которую переносят волны.

Данные о волнении регистрируются и детально обрабатываются морскими метеостанциями. Вероятно, наиболее важным документом о их деятельности являются диаграммы распределения числа наблюдений волн для заданного района моря за год, составленные в координатах характерная высота — период по впадинам (рис. 12.10). Зная, что период связан с длиной волны (12.9), можно нанести на такую диаграмму и линии равных отношений высоты волн к их длине (градиенты волн).

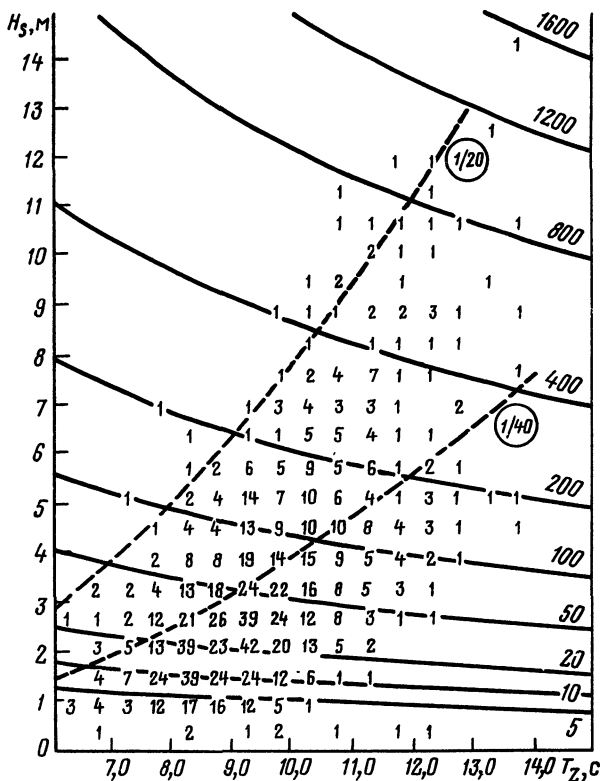


Рис. 12.10. Диаграмма распределения числа наблюдений характерных волн ( $H_s$ ) в зависимости от периода по впадинам ( $T_z$ ). Цифры на диаграмме обозначают среднее число реализаций по 1000 измерений, выполненных в течение года. Наиболее часто встречающиеся значения —  $H_s \approx 3$  м,  $T_z \sim 9$  с, однако максимум мощности приходится на более длительные периоды. Штриховые кривые — волны с одинаковым наклоном поверхности; сплошные — линии постоянной мощности, кВт/м; 1/20 и 1/40 — максимальные градиенты волн

Здесь же обозначаются контуры равных величин за год.

По этим данным можно рассчитать максимальные, средние, минимальные и другие величины мощностей и энергий, связанных с волновыми процессами. Соответствующие цифры можно занести на карты, например, для средних значений за год, как это сделано для планеты в целом и для северо-западной части морей, омывающих Европу (рис. 12.11 и 12.12).

## 12.5. Устройства для преобразования энергии волн

В результате волнового движения жидкости в волне одновременно с изменением положения уровня и наклона поверхности происходит изменение кинетической и потенциальной энергии,

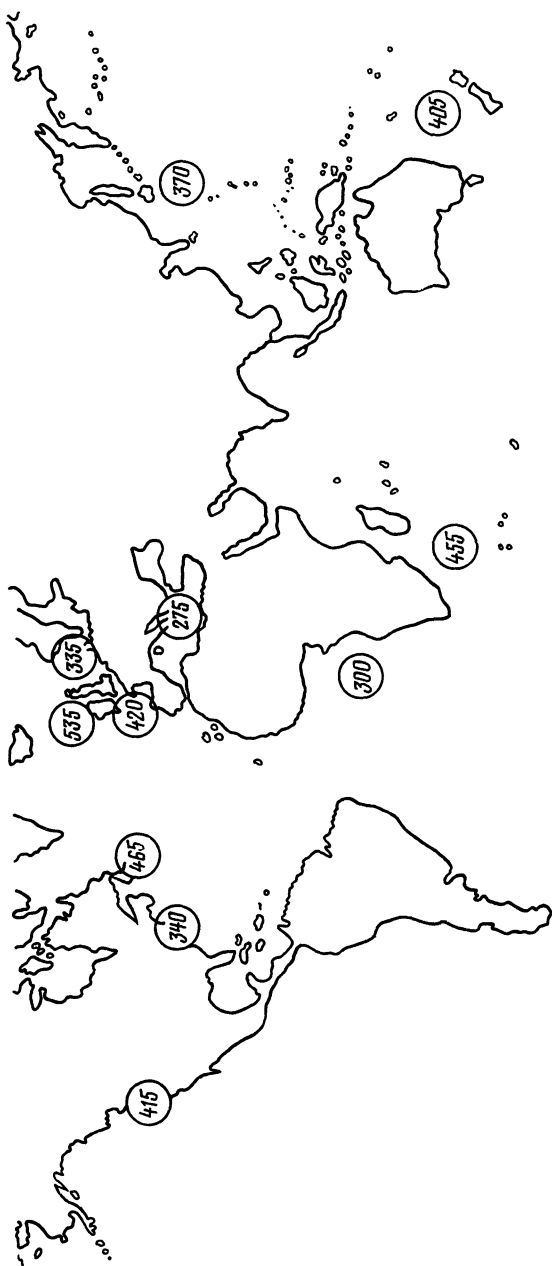


Рис. 12.11. Среднегодовые значения волновой энергии, МВт·ч/м, в различных районах Мирового океана

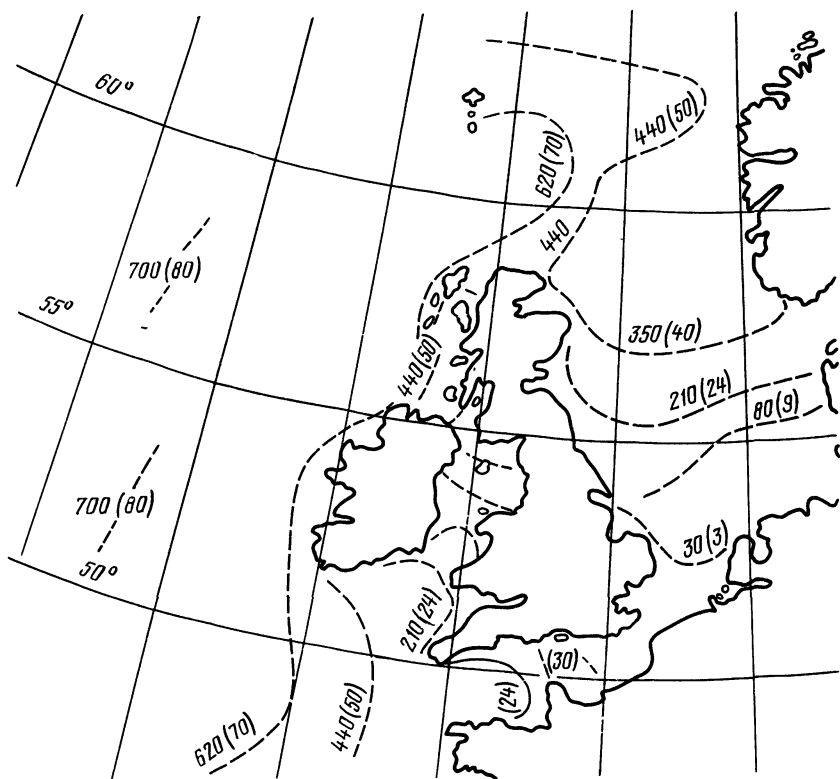


Рис. 12.12. Линии одинаковых средних значений волновой энергии на единицу длины гребня для северо-западных районов Европы. В скобках указаны значения мощности, кВт/м. Локальные эффекты не приведены

изменение давления под волной. На основе использования одного характерного признака волнового движения или их комбинации уже создано большое число различных устройств, поглощающих и преобразующих волновую энергию. Сюда же входят и устройства, улавливающие воду с гребней волн и возвращающие ее на средний уровень или к подножию волн после преобразования потенциальной энергии. Кроме того, можно использовать самые разнообразные сооружения для увеличения интенсивности волнового движения в местах размещения преобразователей за счет дифракционных и канальных эффектов.

Дать в этой книге полный обзор всех созданных когда-либо устройств для извлечения энергии из волн просто не представляется возможным, поэтому здесь приведено описание лишь некоторых наиболее важных.

**Устройства, отслеживающие профиль волны.** Стефан Солтер из Эдинбургского университета разработал устройство, которое

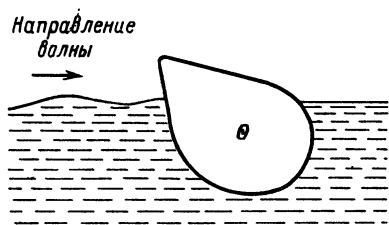


Рис. 12.13. Утка Солтера

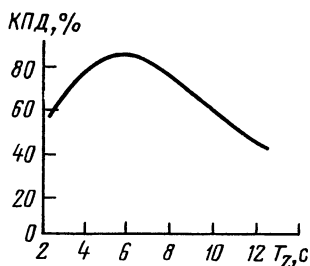


Рис. 12.14. Эффективность утки Солтера (диаметр 15 м, ось зафиксирована)

назвал «уткой». Форма ее обеспечивала максимальное извлечение мощности (рис. 12.13). Волны, поступающие слева, заставляют утку колебаться. Цилиндрическая форма противоположной поверхности обеспечивает отсутствие распространения волны направо при колебаниях утки вокруг оси  $O$ . Мощность может быть снята с оси колебательной системы с таким расчетом, чтобы обеспечить минимум отражения энергии. Отражая и пропуская лишь незначительную часть энергии волн (примерно 5%), это устройство обладает весьма высокой эффективностью преобразования в широком диапазоне частот возбуждающих колебаний (рис. 12.14).

Дальнейшие разработки Солтера направлены на то, чтобы обеспечить утке способность противостоять ударам максимальных волн и создать заякоренную гирлянду преобразователей в виде достаточно гибкой линии. Предполагается, что характерный размер реальной утки будет равен примерно  $0,1\lambda$ , что для 100-метровых атлантических волн соответствует 10 м. Нить из уток протяженностью несколько километров предполагается установить в районе с наиболее интенсивным волнением западнее Гебридских островов, мощность всей станции будет примерно 100 МВт. Проектируются и индивидуальные утки, устанавливаемые в заякоренных плотках и предназначенные для работы на меньших глубинах (примерно 20 м).

Любые волновые преобразователи имеют какие-то недостатки, но для уток наиболее серьезными оказываются следующие:

1) необходимость передачи медленного колебательного движения на привод генератора (Солтер работает над применением в качестве генераторов встроенных гироскопов, которые должны выдавать в сеть мощность, пропорциональную медленному вращению корпусов уток на волнении);

2) необходимость снятия мощности с плавающего на значительной глубине устройства большой протяженности.

Другой характерный тип устройства данного класса — ланкастерский «моллюск», использующий тот же «геометрический» принцип Солтера. Здесь клювообразный поплавок соединен с

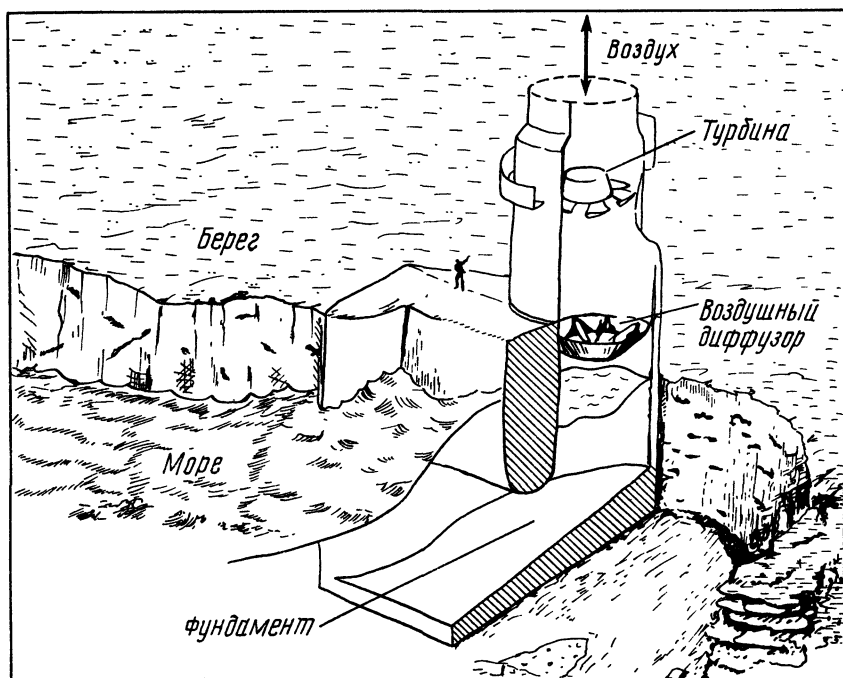


Рис. 12.15. Широкополосная волновая энергетическая установка на принципе колеблющегося водного столба (построена вблизи Тофтестоллена, Норвегия)

несколькими податливыми воздушными оболочками, заполненными воздухом, сжимаемым под действием волн. Сжатый воздух перегоняется из одной оболочки в другую по мере того, как волна поворачивает «клюв». Осциллирующий воздушный поток приводит в действие турбину Уэлса, отличающуюся тем, что направление ее вращения не зависит от направления потока воздуха. Турбина связана с электрогенератором.

**Колеблющийся водяной столб.** При набегании волны на частично погруженную полость, открытую под водой, столб жидкости в полости колеблется, вызывая изменения давления в газе над жидкостью. Полость может быть связана с атмосферой через турбину. Поток может регулироваться так, чтобы проходить через турбину в одном направлении, или может быть использована турбина Уэлса. Уже известны по крайней мере два примера коммерческого использования устройств на этом принципе — сигнальные буи, внедренные в Японии Масудой и в Великобритании сотрудниками Королевского университета Белфаста. Более крупное и впервые включенное в энергосеть устройство построено в Тофтестоллене (Норвегия) фирмой Kvaerner Brug A/S (рис. 12.15). Основной принцип действия колеблюще-



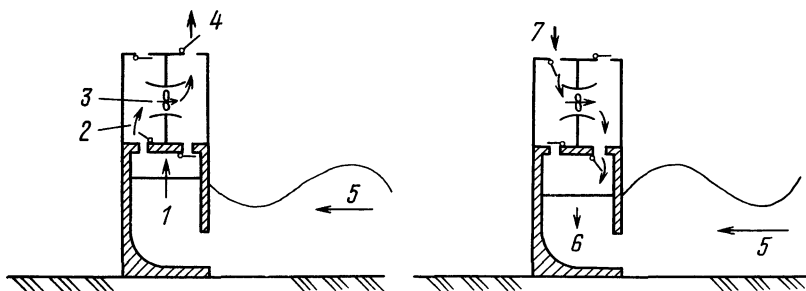


Рис. 12.16. Схема установки, в которой используется принцип колеблющегося водного столба (разработана Национальной инженерной лабораторией NEL, Великобритания, размещается непосредственно на грунте, турбина приводится в действие потоком одного направления):

1 — волновой подъем уровня, 2 — воздушный поток, 3 — турбина; 4 — выпуск воздуха; 5 — направление волны; 6 — опускание уровня; 7 — впуск воздуха

гося столба показан на рис. 12.16. В Тофтестоллене он используется в 500-киловаттной установке, построенной на краю отвесной скалы. Кроме того, национальная электрическая лаборатория (NEL) Великобритании предлагает конструкцию, устанавливаемую непосредственно на морском дне.

Главное преимущество устройств на принципе водяного колеблющегося столба состоит в том, что скорость воздуха перед турбиной может быть значительно увеличена за счет уменьшения проходного сечения канала. Это позволяет сочетать медленное волновое движение с высокочастотным вращением турбины. Кроме того, здесь создается возможность удалить генерирующее устройство из зоны непосредственного воздействия соленой морской воды.

**Подводные устройства.** Преимущества подводных устройств состоят в том, что эти устройства позволяют избежать штормового воздействия на преобразователи. Однако при их использовании увеличиваются трудности, связанные с извлечением энергии и обслуживанием. Для примера можно предложить так называемый «бристольский цилиндр», представляющий собой наполненный воздухом плавучий корпус, закрепленный под водой на опорах, установленных на грунте. Цилиндр находится под воздействием подповерхностного движения вод и изменения гидростатического давления. Вмонтированные на опоры гидравлические насосы преобразуют энергию движения цилиндра. Перекачиваемая ими жидкость может подаваться на генераторную станцию, единую для нескольких цилиндров, по трубопроводам.

**Системы, улавливающие волны.** Схемы подобных устройств используют явление, часто наблюдаемое в природных лагунах. Волна разбивается на откосе дамбы (вариант естественного рифа), и вода забрасывается на высоту, превышающую средний

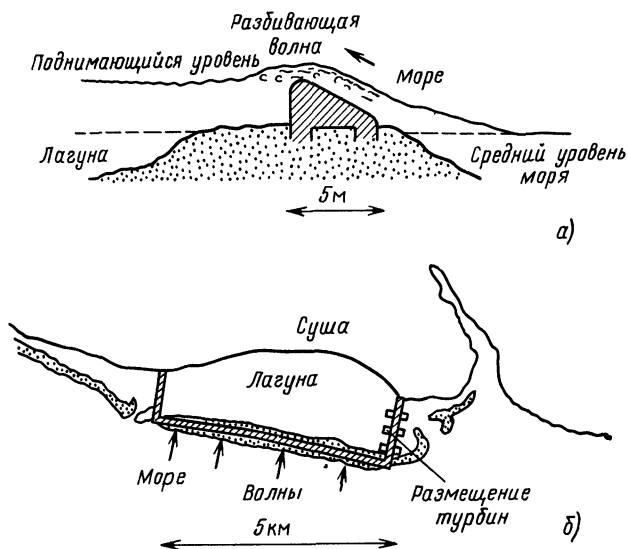


Рис. 12.17. Волноулавливающая энергетическая установка в естественной лагуна. Схема заполнения бассейна (а), размещения сооружений (б)

уровень моря, заполняя бассейн. Вода может быть возвращена обратно в море через низконапорную турбину. На рис. 12.17 приведена схема, детально прорабатываемая для условий острова Маврикий и предназначенная для обеспечения генерирования 20 МВт электрической мощности. При удельной величине мощности волн 22 кВт/м эффективность такого устройства будет не ниже 30% (имеется в виду преобразование кинетической энергии волн в потенциальную энергию жидкости в бассейне). Необходимая длина морской дамбы равна примерно 5 км. Первая в мире коммерческая станция на этом принципе построена в Норвегии в районе с естественной фокусировкой волн.

**Задача 12.1.** Предполагая, что элемент жидкости поднимается с глубины ниже среднего уровня поверхности моря на высоту этого уровня, покажите, что потенциальная энергия на единицу длины в направлении движения волны и на единицу ширины вдоль волнового фронта  $E_p = \rho g a^2 / 4$ .

**Решение.** Уравнение движения волновой поверхности имеет вид  $h = a \sin kx$ . При единичной ширине вдоль волнового фронта элемент жидкости имеет массу  $\rho dx dz$ . В волне он поднимается на высоту  $2z$ . При этом его потенциальная энергия увеличивается на

$$\begin{aligned}
 E_{p,\lambda} &= \int_{x=0}^{x=\lambda/2} \int_{z=0}^{z=h} (\rho dx dz) g (2z) = \rho g \int_{x=0}^{x=\lambda/2} h^2 dx = \\
 &= \rho g a^2 \int_{x=0}^{x=\lambda/2} \frac{1}{2} (1 - \cos 2kx) dx = \rho g a^2 \lambda / 4.
 \end{aligned}$$

В свою очередь потенциальная энергия на единицу длины,  $E_p = \rho g a^2 / 4$ . Эта величина в точности равна кинетической энергии (12.21).

## Глава 13

# ЭНЕРГИЯ ПРИЛИВОВ

### 13.1. Введение

Приливные колебания уровня в огромных океанах планеты вполне предсказуемы. Основные периоды этих колебаний — суточные продолжительностью около 24 ч и полусуточные — около 12 ч 25 мин. Разность уровней между последовательными самым высоким и самым низким уровнями воды — высота прилива  $R$ . Диапазон изменения этой величины составляет 0,5—10 м. Первая цифра наиболее характерна, вторая достигается и даже превосходится лишь в некоторых особенных местах вблизи побережья континентов. Во время приливов и отливов перемещение водных масс образует приливные течения, скорость которых в прибрежных проливах и между островами может достигать примерно 5 м/с.

Поднятую на максимальную высоту во время прилива воду можно отделить от моря дамбой или плотиной в бассейне площадью  $A$ . Если затем во время отлива пропустить эту массу воды через турбины, то можно получить среднюю мощность  $\bar{P} = \rho A R^2 g / 2$ . Для примера при значениях  $A = 10 \text{ км}^2$ ,  $R = 4 \text{ м}$ ,  $\tau = 12 \text{ ч } 25 \text{ мин}$  осредненная величина мощности  $\bar{P} = 17 \text{ МВт}$ . Очевидно, что места с большими высотами приливов обладают и большими потенциалами приливной энергии. Однако не только этот фактор важен для развития приливной энергетики: надо, например, принимать во внимание и капитальные затраты, и будущую прибыль от создания соответствующих приливных электростанций (ПЭС). Высокие капиталовложения, затраченные на строительство ПЭС, по-видимому, могут быть оправданы, если будет получена электроэнергия, а так же построены дороги вдоль дамб, кроме того, если сама ПЭС будет построена в эстуарии реки и бассейн ее будет использован для накопления энергии, улучшения условий судоходства и т. д. Следовательно, развитие приливной энергетики сильно связано с конкретной спецификой районов будущего строительства.

Энергия приливных течений может быть преобразована подобно тому, как это делается с энергией ветра. Мощность, снимаемая с  $1 \text{ м}^2$  площади поперечного сечения приливного потока при максимальной скорости  $u_0$ , равна примерно  $\bar{q} \approx 0,1 \rho u_0^3$ . Для  $u_0 = 3 \text{ м/с}$   $\bar{q} \approx 14 \text{ кВт/м}^2$ .

Преобразование энергии приливов использовалось для приведения в действие сравнительно маломощных устройств еще в средневековой Англии и в Китае. Из современных ПЭС наиболее хорошо известны крупномасштабная электростанция Ранс мощностью 240 МВт, расположенная в эстуарии реки Ла Ранс, впадающей в залив Сен Мало (Бретань, Франция), и небольшая, но принципиально важная опытная станция мощностью 400 кВт в Кислой губе на побережье Баренцева моря (СССР). Из мест, которые давно привлекают внимание гидростроителей, следует назвать эстуарий реки Северн в Великобритании и залив Фанди на восточном побережье Северной Америки на границе между США и Канадой.

Высота, ход и периодичность приливов в большинстве прибрежных районов хорошо описаны и проанализированы благодаря потребностям навигации и океанографии. Поведение приливов может быть предсказано достаточно точно, с погрешностью менее 4%. Таким образом, приливная энергия оказывается весьма надежной формой возобновляемой энергии.

При ее преобразовании возникают и определенные неудобства:

1) несовпадение основных периодов возникновения приливов (12 ч 25 мин и 24 ч 50 мин), связанных с движением Луны, с привычным для человека периодом солнечных суток (24 ч), в связи с чем оптимум приливной генерации находится не в фазе с потребностями в энергии;

2) изменение высоты прилива и мощности приливного течения с периодом в две недели, что приводит к колебаниям выработки энергии;

3) необходимость создания потоков воды с большим расходом при сравнительно малом перепаде высот, что заставляет использовать большое число турбин, работающих параллельно;

4) очень высокие капитальные затраты на сооружение большинства предполагаемых ПЭС;

5) потенциальные экологические нарушения и изменение режимов эстуариев и морских районов.

Для оптимизации выработки электроэнергии турбины ПЭС должны использоваться в нескольких режимах, выбор которых зависит от необходимой в данный момент мощности, потребностей и возможностей других производителей электроэнергии. Существует много вариантов режимов, но используются главным образом следующие.

1. Если ПЭС построена для обеспечения местных потребностей в энергии, то необходимы страхующие энергоустановки, подключаемые в период угасания приливов.

2. Если ПЭС включена в крупную энергосеть и является сравнительно небольшим источником в масштабах сети, то заранее определенные вариации приливной энергии могут быть

приспособлены к потребностям энергосети.

3. Если требования в приливной энергии не связаны жестко с солнечным периодом, то приливную энергию можно использовать в естественном режиме. Например, если вырабатываемая ПЭС электроэнергия идет на нужды транспорта — зарядку аккумуляторов или производство водорода, то она оказывается развязанной от других источников электроэнергии.

Окончательный критерий коммерческого успеха ПЭС — затраты на 1 кВт·ч вырабатываемой ею электроэнергии. Они могут быть снижены: 1) если станция будет решать несколько комплексных задач; 2) если проценты на капитал, вложенный в финансирование строительства при высоких капитальных затратах, не высоки; 3) если вырабатываемая электроэнергия используется для снижения потребления дорогого дизельного топлива. При сочетании таких экономических показателей наилучшими оказываются крупномасштабные ПЭС (мощностью порядка 1000 МВт). Но и менее крупные станции, предназначенные для снабжения удаленных районов, также могут оказаться экономически выгодными.

Ниже приведено описание физических свойств приливов и принципов приливной энергетики. Читатели, интересующиеся только устройствами для преобразования энергии приливов, могут непосредственно обратиться к § 13.4 и 13.5.

### 13.2. Причины возникновения приливов

Анализом поведения приливов занимались многие известные математики и физики прошлого, включая Ньютона, Эри, Лапласа, Джоржа Дарвина (сына Чарльза Дарвина), Кельвина. Здесь для объяснения явления используется физическая теория Ньютона. Однако надо иметь в виду, что современный анализ и предсказание приливов, основанные на математических методах гармонического анализа, базируются на основополагающих работах лорда Кельвина, выполненных в Глазго. Полное физическое понимание всех деталей динамики приливов все еще не достигнуто в связи со сложной топологией океанских бассейнов.

Жидкость в океанах удерживается на поверхности вращающейся Земли силами гравитации. Гравитационное же взаимодействие Земли с Луной и Солнцем возмущает эти силы, образуя приливы. Приливная энергия, снятая с турбин ПЭС, через которые протекает вода в процессе приливов, отбирает, таким образом, часть кинетической энергии вращающейся Земли. Если задействовать во всем мире все сколько-нибудь значительные места с достаточно высокими приливами, то согласно расчетам это приведет к сокращению периода вращения Земли на одни сутки за 2000 лет: это не так уж страшно для окружающей среды.

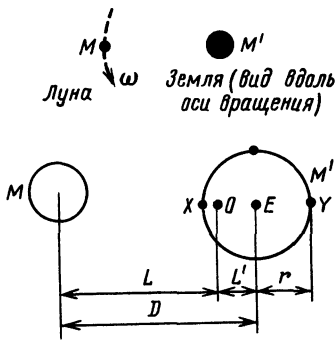
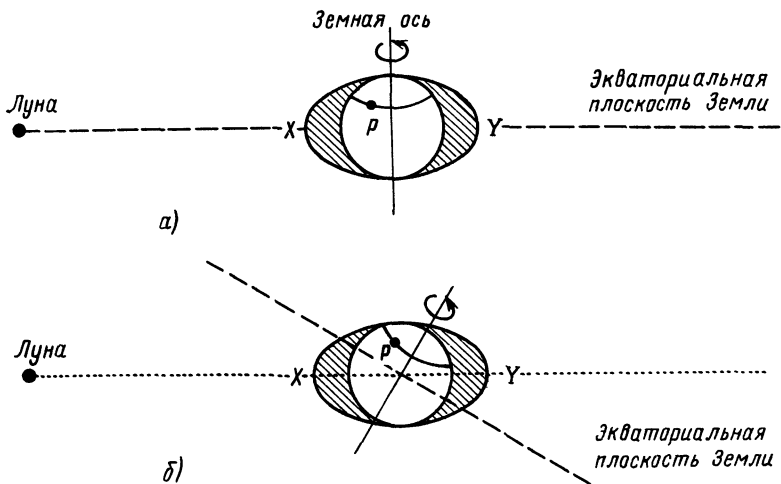


Рис. 13.1. Взаимное движение Земли и Луны. Вращение происходит вокруг точки  $O$  с частотой  $\omega$ ,  $L' = 4670$  км

Рис. 13.2. Физическое обоснование существования суточных и полусуточных приливов. Упрощенное объяснение равновесного прилива при нахождении Луны в плоскости экватора Земли. В точке  $P$  равные приливы наблюдаются 2 раза в сутки — полусуточные приливы, (а). Обычно Луна не лежит в экваториальной плоскости Земли. Поэтому приливы в точке  $P$  возникают 1 раз в сутки — суточные приливы, (б)



**Приливы, индуцируемые Луной.** Земля и Луна вращаются в космическом пространстве вокруг друг друга (рис. 13.1), но так как масса Земли примерно в 100 раз больше массы Луны, то движение Луны более очевидно. Центр этого вращения находится в точке  $O$ , для которой справедливо соотношение  $ML = M'L'$ . Таким образом,

$$L' = MD / (M' + M). \quad (13.1)$$

Так  $L' = 4670$  км, а средний радиус Земли равен 6371 км, то центр  $O$  лежит внутри земного шара.

Отстояние Луны от Земли поддерживается за счет равенства гравитационного взаимодействия и центробежной силы. Если обозначить гравитационную постоянную  $G$ , то

$$GMM' / D^2 = M'L'\omega^2 = ML\omega^2. \quad (13.2)$$

Если бы поместить всю массу Земли в ее центре  $E$ , то каждый элемент массы был бы по отношению к Луне в равновесном положении. Однако масса Земли распределена вокруг точки  $E$ , и на все ее элементы действуют различные силы. Так, элемент, находящийся в точке  $Y$  (рис. 13.1), испытывает уменьшение силы притяжения со стороны Луны и увеличение воздействия центробежной силы из-за увеличения радиуса вращения до величины  $r + L'$ . Элемент в ближайшей к Луне точке Земли испытывает увеличение силы притяжения по направлению к ней, центробежная же сила, действующая на него, уменьшается вследствие уменьшения радиуса вращения до  $r - L'$ . Твердые породы Земли, испытывая эти изменения сил при вращении Луны, подвергаются лишь сравнительно небольшим деформациям (растягивающие и сжимающие усилия компенсируются за счет возникновения внутренних напряжений). В жидкости подобные напряжения не возникают, и она приходит в движение относительно земной поверхности. Это и является причиной приливов.

Если Луна находится в экваториальной плоскости Земли, океанские воды стремятся стянуться в пики в точках  $X$  и  $Y$  — максимально приближенной и удаленной от Луны. Твердые породы Земли под этими пиками будут вращаться с периодом 24 ч (рис. 13.2,  $a$ ). Таким образом, без учета других эффектов любой водоем, находящийся в соответствующем положении на поверхности Земли, будет дважды испытывать подъемы и падения уровня воды при прохождении поверхности через положения пиков. Это — полусуточные приливы. Отметим, что суточное вращение Земли вокруг своей оси не оказывает первостепенного влияния на высоту прилива.

Можно оценить результирующую силу, вызывающую прилив, зная центробежную силу относительно точки  $O$  при вращении Луны с частотой  $\omega$  и силу лунного притяжения (рис. 13.1). Для массы воды  $m$ , удаленной от Луны в точке  $Y$ ,

$$F_Y = m(L' + r)\omega^2 - GMm/(D + r)^2. \quad (13.3)$$

Для ближайшей к Луне точке  $X$

$$F_X = m(r - L')\omega^2 + GMm/(D - r)^2. \quad (13.4)$$

По определению (см. рис. 13.1)

$$GMm/D^2 = mL'\omega^2. \quad (13.5)$$

Но так как  $r \ll D$ , то

$$1/(D \pm r)^2 = (1 \pm 2r/D)/D^2. \quad (13.6)$$

Подставляя (13.5) и (13.6) в (13.3) и (13.4), получаем

$$F_X = F_Y = mr\omega^2(1 + 2L'/D). \quad (13.7)$$

Таким образом, ежедневно наблюдать два приливных пика с

одинаковой амплитудой. Безусловно, это имеет место лишь в открытом океане при условии, когда Луна находится в экваториальной плоскости Земли.

Согласно этой равновесной модели при малой воде (в отлив) действующая на частицы жидкости сила равна  $m\tau\omega^2$  и, таким образом, приливообразующая сила в (13.7) есть не что иное, как  $m\tau\omega^2 2L'/D$ . Можно показать (см. задачу 13.1), что получаемый за счет этой силы максимальный равновесный подъем воды (равновесная высота прилива) равен 0,36 м.

Существуют три принципиальные причины, по которым действительное поведение приливов отличается от описываемого упрощенной моделью равновесного прилива.

1. Объяснение действия приливообразующих сил в этой модели физически корректно, однако допущение о том, что приливный пик может перемещаться в океане со скоростью 1600 км/ч, отслеживая вращение Земли, ошибочно. На самом деле приливная волна не может двигаться с такой большой скоростью, оставаясь на меридиане Луны (см. задачу 13.3). По мере прохождения Луны над океаном приливное движение распространяется всего со скоростью 500 км/ч и запаздывает по отношению к положению Луны. Время этого запаздывания есть «возраст прилива». В каждом океане образуется собственная система вызванных Луной приливов, фазы которых изменяются от одного океана к другому.

2. Луна обычно находится не в экваториальной плоскости Земли (рис. 13.2, б), в результате чего возникает суточная компонента прилива с меньшей частотой. Существуют и другие низкочастотные компоненты приливного движения. Например, расстояние между Землей и Луной колеблется от максимального  $4,06 \cdot 10^8$  м в апогее до  $3,63 \cdot 10^8$  м в перигее с периодом 27,55 солнечных суток (близким к месячному). Кроме того, плоскость движения Луны колеблется относительно плоскости эклиптики системы Земля — Солнце примерно на  $2^\circ$ .

3. Большие сложности возникают в связи с особенностями различных океанских бассейнов. Например, возможно образование резонансов, особенно вблизи континентальных шельфов, в результате которых высота прилива существенно увеличивается. В § 13.3 показано, что резонансы очень важны для создания приливных энергетических установок.

**Периодичность лунных приливов.** Для более точного расчета периода прилива необходимо уточнить само представление о том, что же мы подразумеваем под «сутками» (рис. 13.3). В точке А на Земле солнечные сутки есть интервал времени между двумя прохождениями Солнца через меридиан этой точки. В действительности этот интервал не остается постоянным, а изменяется в течение года из-за возмущений земной орбиты, и, таким образом, принятая в обиходе единица времени — средняя про-



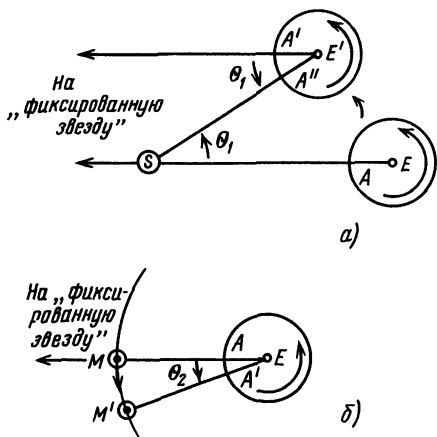


Рис. 13.3. Сравнение трех различных «суток», наблюдаемых с Земли: звездные и солнечные сутки (а); звездные и лунные сутки (б). Солнечные сутки длятся 24 ч, звездные — несколько дольше, лунные — несколько короче. Масштабы не соблюдены

должительность солнечных суток  $t_S$ , определяется как интервал, осредненный за весь год. Это и есть в точности 24 ч, т. е.  $t_S = 86\,400$  с.

Звездные сутки  $t^*$  — подобным образом рассчитанный средний интервал между последовательными прохождениями «фиксированной звезды», т. е. настолько удаленной, что ее видимое смещение по отношению к Земле пренебрежимо мало. Звездные сутки — величина, наиболее точно определяющая период вращения Земли как бы удаленным наблюдателем.

Из рис. 13.3,а видно, как различие между  $t_S$  и  $t^*$  связано с движением Земли вокруг Солнца (период  $T_S = 365,256 t_S$ ). Предположим, что в полдень какого-то известного дня центр Земли  $E$ , точка  $A$  на земной поверхности, Солнце  $S$  и некоторая фиксированная звезда находятся на одной линии. По истечении солнечных суток Солнце, точка  $A$  и центр Земли снова оказываются на одной линии. В то же время точка  $E$  смещается на угол  $\theta_1$  относительно Солнца в положение  $E'$ . Так как  $t_S$  есть продолжительность средних солнечных суток, то с целью сохранения периода мы можем представить Землю движущейся строго по круговой орбите. В этом случае соблюдается равенство

$$\theta_1/2\pi = t_S/T_S. \quad (13.8)$$

В то же время точка  $A$  поворачивается вокруг  $E$  на угол  $(2\pi + \theta_1)$  в положение  $A''$ . Время поворота на угол  $2\pi$  — не что иное, как  $t^*$  (определенное удаленным наблюдателем), так что

$$\theta_1/2\pi = (t_S - t^*)/t^*. \quad (13.9)$$

Приравнявая (13.8) и (13.9), получаем

$$t^* = t_S / [1 + (t_S/T_S)] = 86\,164 \text{ с} = 23 \text{ ч } 56 \text{ мин } 4 \text{ с}. \quad (13.10)$$

Подобным же образом продолжительность средних лунных суток определяется как средний интервал между двумя последовательными попаданиями на одну линию центра Земли  $E$ , точки  $A$  и центра Луны  $M$ . На рис. 13.3, б показаны моменты движения  $M$  по круговой орбите вокруг Земли. В течение времени  $t_M$  Луна

переместилась на угол  $\theta_2$  из точки  $M$  в точку  $M'$ , за то же время точка  $A$  на поверхности Земли повернулась на угол  $2\pi + \theta_2$  в точку  $A'$ . Таким образом, с точки зрения удаленного наблюдателя

$$\theta_2/2\pi = t_M/T^* = (t_M - t^*)/t^*, \quad (13.11)$$

где  $T^* = 27,32t_s$  (так называемый звездный лунный месяц, «действительный» лунный месяц) — период вращения Луны вокруг Земли с точки зрения удаленного наблюдателя. Эта величина несколько менее лунного месяца, фиксируемого наблюдателем, находящимся на поверхности Земли ( $T = 29,53$  сут), в связи с вращением Земли вокруг Солнца. Выражение (13.11) подразумевает, что

$$t_M = t^*/[1 - (t^*/T^*)] = 89\,428 \text{ с} = 24 \text{ ч } 50 \text{ мин } 28 \text{ с}. \quad (13.12)$$

**Приливы, вызываемые Солнцем. Смешанные приливы.** С помощью теории Ньютона объясняется и возникновение солнечных приливов, происходящих 2 раза в сутки с периодом, в точности равным половине солнечных суток. Правда, высота солнечного прилива примерно в 2,2 раза меньше лунного, являющегося доминирующим. Это следует из предположения о том, что отличие высот приливов пропорционально различию в гравитационных силах, создаваемых Луной и Солнцем в противоположных по диаметру  $d$  точках земной поверхности. Если  $M_M$  и  $M_S$  — массы Луны и Солнца, а расстояние от них до Земли — соответственно  $D_M$  и  $D_S$ , то для обеих систем гравитационные силы пропорциональны  $M/D^2$  и различие в силах

$$\frac{\partial F}{\partial D} d = -2Md/D^3. \quad (13.13)$$

Отношение высот лунного  $R_M$  и солнечного  $R_S$  приливов пропорционально приращением соответствующих гравитационных сил:

$$\frac{R_M}{R_S} = \frac{(M_M/D_M^3)}{(M_S/D_S^3)} = \left(\frac{D_S}{D_M}\right)^3 \frac{M_M}{M_S} = 2,2. \quad (13.14)$$

Солнечные приливы могут возникать в фазе и в противофазе с лунными. Если Солнце, Земля и Луна оказываются на одной линии — оба прилива в фазе: возникает прилив максимальной высоты. Это случается дважды в лунный месяц, во время полнолуния и новолуния, называются такие приливы *сизигийными*. Когда же направления Солнце — Земля и Земля — Луна перпендикулярны (находятся в квадратуре), высоты суммарных приливов минимальны (квадратурные приливы). Подобные угасания приливов повторяются также дважды за лунный месяц. Если возрастание высоты прилива — результат суммирования лунной и солнечной составляющих, то угасание — результат их вычитания. Отношение высот сизигийного и квадратурного приливов

можно представить в следующем виде:

$$R_c/R_{кв} = (1 + 1/2,2)/(1 - 1/2,2) = 3. \quad (13.15)$$

На практике различные динамические и локальные эффекты вызывают несоответствие реальных приливов этой упрощенной модели, отношение высот  $R_c/R_{кв}$  чаще всего приближается к двум. Сизигийные приливы во время перигея Луны имеют большую высоту, чем при ее апогее, а комбинация эффектов, включающих ветровой нагон, может стать причиной необычайно высоких приливов.

### 13.3. Усиление приливов

Обычный прилив в открытом океане имеет высоту менее 1 м и не пригоден для целей энергетики. Однако вблизи ряда эстуариев и некоторых других природных образований высоты приливов увеличиваются. Это может происходить за счет эффекта воронки (напоминает усиление звуковых волн в сужающемся канале старомодного стетоскопа) и за счет резонансного совпадения естественных частот движения водных масс и соответствующих бассейнов на побережье.

Приливное движение в море имеет форму движущейся волны, называемой *приливной волной*. В этой волне, длина которой довольно велика, если сравнивать с глубиной моря, весь столб воды от поверхности до дна движется с одинаковой скоростью (рис. 13.4). Движение непрерывно распространяющейся естественной приливной волны имеет скорость  $c$ , связанную с ускорением силы тяжести и глубиной моря  $h$  соотношением  $c = (gh)^{1/2}$ . Естественно, что вынужденное движение приливных волн, вызванных притяжением Луны и Солнца, не подчиняется требованиям условия свободного распространения волн и что в открытом океане не происходит резонансного усиления этого вынужденного движения. Резонансы могут возникать в некоторых эстуариях и заливах, однако это не единственная причина значительных изменений в приливном движении. Землетрясения в толще океанского дна или извержения подводных вулканов могут вызвать свободное распространяющуюся «приливную волну», называемую *цунами*, но такая волна лишь по форме движения похожа на приливную.

Вообразим слой воды глубиной  $h$ , шириной  $b$ , толщиной  $\Delta x$  и с подъемом уровня поверхности над средним положением  $z$ . Изменение положения уровня поверхности на толщине  $\Delta x$ , равное

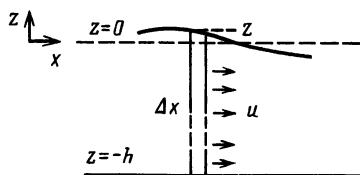


Рис. 13.4. Движение воды в приливной волне:  $u$  — скорость;  $h$  — глубина

$(\partial z / \partial x) \Delta x$ , по сравнению с  $z$  — малая величина. Боковая поверхность слоя имеет площадь  $A = hb$ .

Чтобы описать условие образования волны, достаточно знать ньютоновское уравнение движения жидкости для слоя и условие сохранения ее массы. Разность давлений на противоположных сторонах слоя, возникающая в результате небольшого изменения высоты подъема поверхности, равна

$$\Delta p = -\rho g \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) \Delta x. \quad (13.16)$$

Таким образом, уравнение движения слоя в форме второго закона динамики Ньютона при скорости  $u$  имеет вид

$$\left[ -\rho g \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) \Delta x \right] hb = \rho hb \Delta x \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (13.17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial z}{\partial x}. \quad (13.18)$$

Разность потоков жидкости, втекающей в слой и вытекающей из слоя, должна компенсироваться изменением во времени его объема, выполнение требования сохранения массы определяется уравнением неразрывности вида

$$- \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A + bz) u \right] \Delta x = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial [(A + bz) \Delta x]}{\partial t}. \quad (13.19)$$

Так как  $A = bh$  — константа и  $A \gg bz$ , то

$$-A \frac{\partial u}{\partial x} = b \frac{\partial z}{\partial t}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{h} \frac{\partial z}{\partial t}. \quad (13.20)$$

Из (13.18) и (13.20) следует, что

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = -g \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = -\frac{1}{h} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}. \quad (13.21)$$

Таким образом,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = gh \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad (13.22)$$

а это и есть уравнение движения волны со скоростью

$$c = (gh)^{1/2}. \quad (13.23)$$

Резонансное усиление приливов в эстуариях и заливах аналогично тому, как это происходит при резонансе звуковых волн в акустических резонаторах (рис. 13.5).

Резонанс для приливной волны, надвигающейся со стороны открытого моря, наступает, когда

$$L = j\lambda/4, \quad (13.24)$$

где  $j$  — нечетное целое.

Соответствующая резонансная частота  $f_r$  и период  $T_r$  связаны

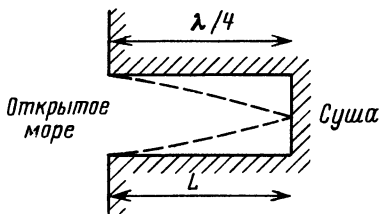


Рис. 13.5. Резонансное усиление приливной волны в эстуарии, вид в плане. Идеализированный залив глубиной  $h$  и длиной  $L = \lambda/4$  (четвертьволновый резонатор)

между собой следующим образом:

$$f_r = 1/T_r = c/\lambda. \quad (13.25)$$

Отсюда

$$T_r = \lambda/c = 4L/j(gh)^{1/2}. \quad (13.26)$$

Резонанс возникает, когда период собственных колебаний соответствующего бассейна оказывается равным (кратным) периоду вынужденных колебаний прилива в открытом море  $T_f$ , в этом случае

$$T_f = \frac{4L}{(gh)^{1/2}}; \quad \frac{L}{h^{1/2}} = \frac{j}{4}(g)^{1/2}T_f. \quad (13.27)$$

Полусуточный период прилива равен 12 ч 25 мин (45 000 с), таким образом, для случая  $j=1$  (основная гармоника) резонанс наступает, когда

$$L/h^{1/2} = (45\,000 \text{ с}) (9,8 \text{ м/с}^2)^{1/2}/4 = 36\,000 \text{ м}^{1/2}. \quad (13.28)$$

*Пример 13.1.* Эстуарий р. Северн между Уэлсом и Великобританией имеет протяженность около 200 км при глубине около 30 м, так что для него

$$L/h^{1/2} \approx 36\,400 \text{ м}^{1/2}. \quad (13.29)$$

В этом примере видно близкое совпадение собственной частоты эстуария с характерной частотой прилива, в результате чего в указанном эстуарии достигаются значительные амплитуды приливного движения, высота прилива здесь доходит до 10—14 м.

На практике эстуарии и заливы, конечно, не имеют таких однозначно определенных размеров, какие использованы в примере. Поэтому анализ резонансных условий сильно усложняется. Стало необходимым проводить моделирование природных условий в лабораторных волновых бассейнах с использованием соответствующей техники масштабирования и путем теоретического анализа. Это очень важно в связи с тем, что одним из основных вопросов при проектировании приливных энергоузлов является выяснение того, как дамба и плотина будут влиять на резонансные условия в бассейне. Некоторые расчеты, выполненные для эстуария р. Северн, показали возможность уменьшения и увеличения высоты приливов в зависимости от размещения ПЭС. Строительство ПЭС слишком дорого, чтобы позволить разработчикам ошибаться.

### 13.4. Мощность приливных течений

Как уже отмечалось, вблизи побережья и между островами приливы могут создавать достаточно сильные течения, пригодные для преобразования энергии. Полная мощность при этом может и не быть большой, но выработка электроэнергии по выдерживающим конкуренцию ценам для местного потребления оказывается вполне возможной. Устройства для преобразования энергии приливных течений будут практически сходны с аналогичными устройствами, приводимыми в действие течениями рек.

Соотношения, позволяющие оценить мощность приливных течений, подобны тем, которые используются в ветроэнергетике (см. гл. 9), при этом следует иметь в виду, что плотность воды в 1000 раз выше плотности воздуха, а скорости течения воды сравнительно низки.

Согласно (9.2) плотность мощности потока воды равна

$$q = \rho u^3 / 2. \quad (13.30)$$

В случае приливного или речного течения при скорости, например, 3 м/с  $q = 1025 \text{ кг/м}^3 \cdot 27 \text{ м}^3/\text{с}^3 / 2 = 13,8 \text{ кВт/м}^2$ . Только часть полной энергии потока может быть преобразована в полезную. Как и для ветра, это значение  $\eta$  не может превышать 60%. На практике оказывается, что  $\eta$  можно довести максимум до 40%.

Скорости приливных течений изменяются во времени примерно как

$$u = u_0 \sin(2\pi t / \tau), \quad (13.31)$$

где  $\tau$  — период естественного прилива, 12 ч 25 мин для полусуточного, а  $u_0$  — максимальная скорость течения.

Таким образом, электрическая мощность, снимаемая с 1 м<sup>2</sup> площади поперечного сечения потока (с учетом 40%-ной эффективности преобразования энергии потока в электрическую), в среднем равняется

$$\bar{q} = \frac{0,4}{2} \rho u^3 \frac{\int_{t=0}^{t=\tau/4} \sin^3(2\pi t / \tau) dt}{\int_{t=0}^{t=\tau/4} dt} \quad (13.32)$$

$$\bar{q} = 0,2 \rho u^3 (\tau / 3\pi) (4 / \tau) \approx 0,1 \rho u^3. \quad (13.33)$$

Для устройства, которое может работать на прямом и обратном течениях при максимальной скорости 3 м/с,  $\bar{q} \sim 2,8 \text{ кВт/м}^2$ . При максимальной скорости около 5 м/с, встречающейся в проливах между островами,  $\bar{q} \sim 14 \text{ кВт/м}^2$ . Перекрыв площадь 1000 м<sup>2</sup>,

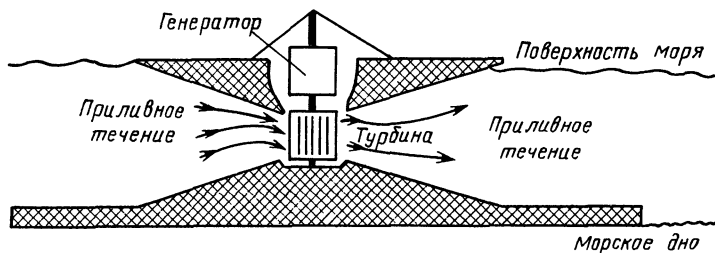


Рис. 13.6. Схема электростанции на приливном течении

можно получить. полную среднюю мощность электростанции около 14 МВт.

Периодическая природа генерации электроэнергии, конечно, создавала бы определенные затруднения для потребителей, но выше отмечалось, что мощность, развиваемая приливыми течениями, отстает по фазе примерно на  $\pi/2$  от мощности, создаваемой в заполняющемся бассейне, следовательно, преобразователи двух типов могут быть объединены.

Уже разработан целый ряд современных устройств для преобразования энергии приливных течений, один из которых показан на рис. 13.6. Капитальные затраты на создание подобных устройств в расчете на 1 кВт установленной мощности достаточно высоки. Если все же до их строительства дело дойдет, то скорее всего они появятся в отдаленных районах с необычайно высокими скоростями приливных течений, где любые альтернативные источники энергии еще более дороги.

### 13.5. Мощность приливного подъема воды

Основы теории приливной энергетики, и это ясно из самой природы приливов, совершенно просты. Предположим, что бассейн ПЭС наполняется при высокой воде и опустошается через турбины при малой воде (рис. 13.7). Пусть бассейн имеет постоянную площадь  $A$ , остающуюся покрытой водой при малой воде. Допустим, что поступившая в бассейн вода имеет массу  $\rho AR$ , сосредоточенную в центре тяжести на высоте  $R/2$  от уровня малой воды, и что вся вода вытекает из бассейна при малой воде. Потенциально максимальную энергию от прилива можно получить, если вся вода падает с высоты  $R/2$ . В этом случае

$$\text{энергия прилива} = (\rho AR)gR/2. \quad (13.34)$$

Если энергия преобразуется в течение продолжительности периода прилива, то средняя потенциальная мощность за приливный период оказывается равной

$$\bar{P} = \rho AR^2 g / 2\tau. \quad (13.35)$$

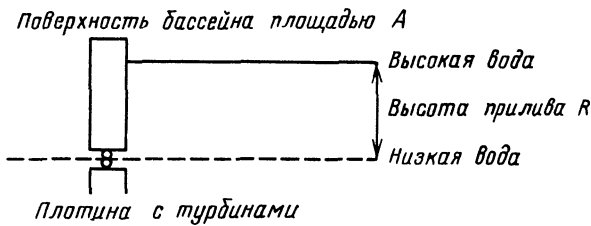
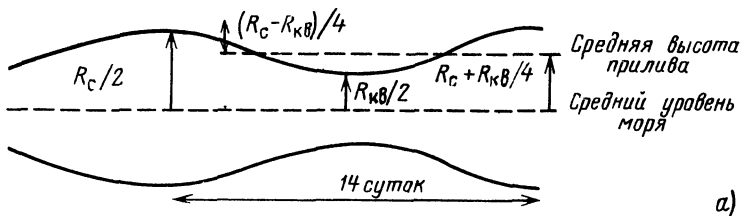


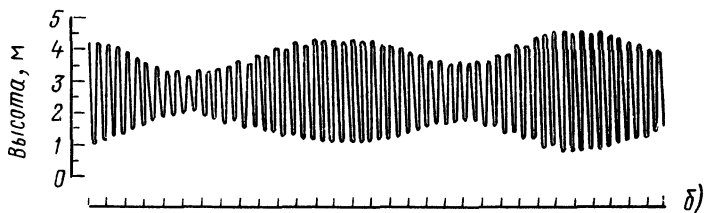
Рис. 13.7. Извлечение приливной энергии

Высота прилива в течение месяца изменяется от максимального значения  $R_c$  (сизигийный прилив) до минимального  $R_{кв}$  (квадратурный прилив). Форма огибающей этого изменения имеет синусоидальный характер (рис. 13.8) с периодом, равным половине продолжительности лунного месяца.

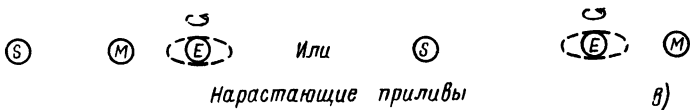


а)

Дни месяца  
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31



б)



в)

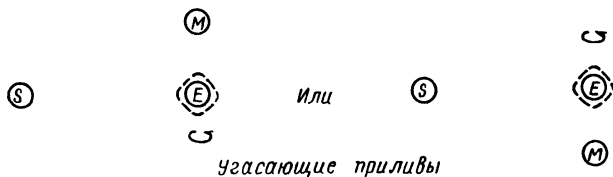


Рис. 13.8. Синусоидальное изменение высоты прилива (а) и изменение высоты прилива в течение месяца (регулярный полусуточный прилив) (б). Положения Солнца (S), Луны (M) и Земли (E), в результате которых приливы 2 раза в месяц нарастают и угасают (в)



В любой момент времени  $t$  после достижения приливом средней высоты в течение всего лунного месяца продолжительность  $T$  ( $T=29,53$  сут) высота прилива определяется соотношением

$$R/2 = \left( \frac{R_c + R_{кв}}{4} \right) + \left( \frac{R_c - R_{кв}}{4} \right) \sin(4\pi t/T). \quad (13.36)$$

Если

$$R_{кв} = \alpha R_c, \quad (13.37)$$

то высота прилива определяется следующим образом:

$$R = \frac{R_c}{2} [(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \sin(4\pi t/T)]. \quad (13.38)$$

При определении мощности учитывается средний квадрат высоты прилива:

$$\bar{R}^2 = \frac{R_c^2}{4} \frac{\int_{t=0}^{\tau} [(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \sin(4\pi t/T)^2] dt}{\int_{t=0}^{\tau} dt}. \quad (13.39)$$

Таким образом,

$$\bar{R}^2 = \frac{R_c^2}{8} (3 + 2\alpha + 3\alpha^2). \quad (13.40)$$

Средняя мощность, производимая в течение месяца, равняется

$$\bar{P}_{мес} = \frac{\rho A g}{2\tau} \frac{R_c^2}{8} (3 + 2\alpha + 3\alpha^2), \quad (13.41)$$

где  $R_{кв} = \alpha R_c$ ,  $\tau$  — период прилива.

Так как  $\alpha \approx 0,5$ , выражение (13.41) мало отличается от часто используемой в литературе аппроксимации

$$\bar{P} \approx \frac{\rho A g}{2\tau} (\bar{R})^2, \quad (13.42)$$

где  $\bar{R}$  — средняя высота по всем приливам:

$$\bar{P} \approx \frac{\rho A g}{2\tau} \frac{(R_{\max}^2 + R_{\min}^2)}{2}. \quad (13.43)$$

Здесь  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  — максимальное и минимальное значения  $R$ .

*Пример 13.2.* Если  $R_c = 5$  м,  $R_{кв} = 2,5$  м,  $\alpha = 0,5$ ,  $R = 3,7$  м,  $A = 10$  км<sup>2</sup>,  $\rho = 1,03 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $\tau = 44\,700$  с (12 ч 25 мин), то согласно (13.41) — (13.43)  $P_1 = 16,6$  МВт,  $P_2 = 15,4$  МВт,  $P_3 = 16,1$  МВт, т. е. оценки несколько различаются.

**Особенности применения.** На практике в системе, использующей сбрасывание запаса воды из заполняемого в прилив бассейна, несмотря на достаточно высокую эффективность пре-

образования получить максимальную потенциальную мощность нельзя. Этому препятствуют следующие обстоятельства.

1) Генерирование электроэнергии не может быть обеспечено вплоть до условий малой воды, таким образом, часть потенциальной энергии прилива не может быть преобразована.

2) Турбины ПЭС должны работать при низком напоре и при больших скоростях потоков — условия необычные для имеющейся обычной гидроэнергетической практики. Турбины оказываются менее эффективными при снижении напора. Наибольший опыт в производстве подобных турбин имеет Франция, где впервые были применены высокоскоростные капсульные агрегаты для равнинных ГЭС на ПЭС Ранс.

3) Необходимо более-менее равномерно снабжать потребителей электроэнергией, а в случае ПЭС это невозможно из-за изменения уровня воды в бассейнах.

Эффективность ПЭС можно увеличить, если все ее агрегаты при полной воде использовать в насосном режиме для поднятия уровня в бассейне. Пусть мы имеем систему, в которой высота прилива 5 м. Подъем уровня даже на 1 м по отношению к высшей точке прилива позволяет обеспечить генерацию при малой воде с перепадом уже 6 м. Даже если насосный режим и режим генерации имеют эффективность 50%, выигрыш от выработки электроэнергии будет порядка 200% (см. задачу 13.5).

На рис. 13.7 показано, что ПЭС принципиально может работать как при опустошении бассейна, так и при его наполнении. Оптимальная станция, использующая реверсируемые гидроагрегаты, которые, кроме того, можно еще использовать и в насосном режиме для повышения уровня в бассейне, может перерабатывать до 90% потенциальной энергии прилива.

### 13.6. Перспективные районы строительства приливных электростанций

Вся мощность океанских приливов на нашей планете оценивается в 3000 ГВт. Из них примерно 1000 ГВт рассеивается в мелководных прибрежных районах, где принципиально возможно возведение инженерных сооружений. На рис. 13.9 обозначены места, обладающие наибольшими приливыми потенциалами. Расшифровка приведена в табл. 13.1. Суммарный потенциал обозначенных мест возможного строительства ПЭС составляет около 120 ГВт, т. е. примерно 10% общего мирового гидравлического потенциала рек.

#### Задачи

13.1. а) Пусть  $F_2$  — сила, действующая со стороны Луны (рис. 13.1) на массу  $m$  морской воды вдоль радиуса Земли  $EZ$ . Так как  $D \gg r$ , покажите,

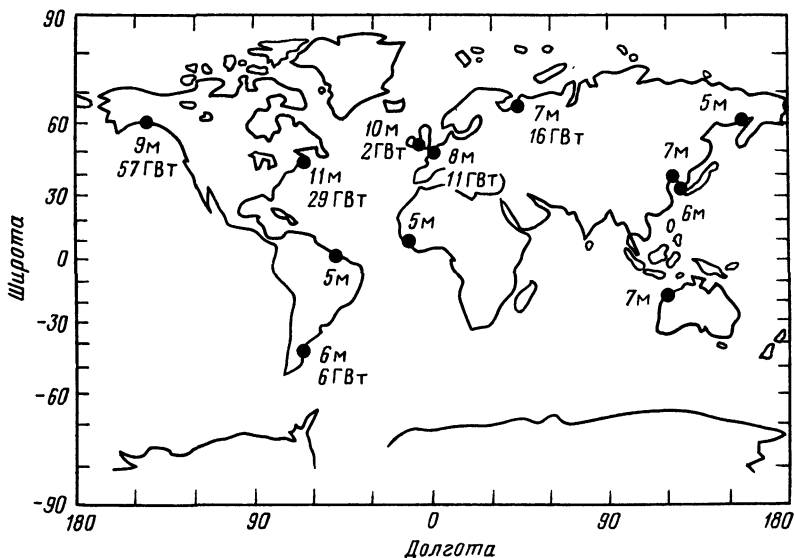


Рис. 13.9. Районы наиболее значительных приливов. Цифрами обозначены средние высоты приливов и энергетические потенциалы

что  $F_z = m r \omega^2$ .

б) Покажите также, что различие в силе лунного притяжения, воздействующего на одну и ту же массу воды при полной и малой воде, равно приливообразующей силе

$$F_t = F_x - F_z = 2MmGr/D^3.$$

в) Приливообразующая сила должна равняться разнице в гравитационном воздействии на массу  $m$  при малой и полной воде. Исходя из этого покажите, что высота океанского прилива ( $R = 0,36$  м) описывается выражением

$$R = Mr^4/M'D^3.$$

**13.2.** Продолжительность звездного лунного месяца  $T^*$  вычисляется по (13.11). Продолжительность лунного месяца  $T_M$  находится как средний период между двумя новолуниями при наблюдении с Земли.  $T^* < T_M$  вследствие движения Земли и Луны как системы относительно Солнца, что как бы «оттягивает» появление новой Луны. Как связаны  $T^*$  и  $T_M$ ?

**13.3.** а) Земные океаны имеют среднюю глубину 4400 м. Покажите, что скорость естественного распространения приливной волны составляет примерно 200 м/с (750 км/ч).

б) Сравните эту скорость со скоростью перемещения создаваемой Луной приливной силы вокруг экватора.

в) В чем причина различия между этими скоростями?

**13.4.** Глубина типичного земного океана 4400 м.

а) Какова скорость свободного движения приливной волны для этой глубины?

Таблица 13.1. Основные места концентрации приливной энергии в мире

Месторасположение	Средняя высота прилива, м	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Потенциал	
			Средняя мощность, ГВт	Годовая выработка, ТВт·ч
<i>Северная Америка</i>				
Пассамакводи	5,5	262	1,8	15,8
Кобсук	5,5	106	0,7	6,3
Анаполис	6,4	83	0,77	6,7
Майнас-Кобекунд	10,7	777	19,9	175
Шеподи	9,8	117	0,52	22,1
Камберленд	10,1	73	1,7	14,7
Птикодиак	10,7	31	0,8	7,0
Мемрамкук	10,7	23	0,6	5,2
<i>Южная Америка</i>				
Сан Хосе (Аргентина)	5,9	750	5,87	51,5
<i>Великобритания</i>				
Северн	9,8	70	1,68	14,7
<i>Франция</i>				
Арженон	8,4	28	0,45	3,9
Ранс	8,4	22	0,35	3,1
Монт Сен Мишель	8,4	610	9,7	85,1
Сомма	6,5	49	0,47	4,1
<i>Ирландия</i>				
Странгфорд Лох	3,6	125	0,35	3,1
<i>СССР</i>				
Мезенский залив	6,0	2330	15,2	50,0
Пенжинская губа (южный створ)	6,2	20 530	87,4	190,0
Тугурский залив	4,7	1800	10,3	27,6
<i>Австралия</i>				
Кимберлей	6,4	600	0,6	5,6

Примечание. Таблица приведена в сокращении. Данные по СССР уточнены по книге Бернштейна Л. Б. и др «Приливные электростанции» (см. список рекомендуемой литературы на русском языке в конце книги)

б) Сколько времени понадобится приливной волне при такой скорости, чтобы обогнуть земной шар?

в) Если приливная волна возникает под воздействием Луны, может ли ее движение непрерывно усиливаться вследствие вращения Земли?

13.5. Бассейн ПЭС быстро заполняется при полной воде с помощью насосных агрегатов, что дает увеличение уровня в нем на 1 м. Полагая эффективность работы агрегатов и в насосном, и в генераторном режиме равной 50%, покажите, что дополнительный прирост выработки энергии может быть в 2 раза больше энергии, затраченной на работу агрегатов в насосном режиме.

13.1. а) Центробежная сила при вращении вокруг точки  $O$  равна  $F_{OZ} = m(L'^2 + r^2)^{1/2} \omega^2$ . В проекции на  $EZ$  радиальная (вертикальная) составляющая сила равна  $F_{EZ} = F_{OZ} \cos(\angle ZOE) = m r \omega^2$ .

б) Из (13.6)  $F_t = F_x - F_{EZ} = m r \omega^2 L'/D$ . С учетом (13.5)  $F_t = (GMm/D^2) \times \times (2r/D) = 2MmGr/D^3$ .

в) Различие в силах притяжения Земли для расстояний от ее центра  $r$  и  $(r+R)$  равно  $2MGmR/r^3$ . Приравняв это к  $F_t$ , получим  $R = (M/M')(r^4/D^3)$ . Подставив данные, приведенные на рис. 13.1, получим  $R = 0,36$  м.

13.2. На рис. 13.3, а точку  $A$  можно использовать для того, чтобы представить движение Луны вокруг Земли. Если в (13.10) заменить  $t^*$  на  $T^*$ , а  $t_s$  на  $T_m$ , то получим

$$T_m = \frac{T^*}{1 - (T^*/T_s)} = \frac{27,32t_s}{1 - (27,32t_s)/(365,256t_s)} = 29,53 t_s.$$

13.3. а)  $u = (gh)^{1/2} = (9,8 \text{ м/с}^2)(4400 \text{ м})^{1/2} = 210 \text{ м/с} = 760 \text{ км/ч}$ .

б)  $v = 2\pi r/t_s = 2\pi(6,38 \times 10^6 \text{ м})/(86\,400 \text{ с}) = 464 \text{ м/с} = 1670 \text{ км/ч}$ .

в) Приливная волна не может не отставать от приливообразующей силы, и, следовательно, равновесный прилив никогда не может установиться.

13.4. а)  $v = (gh)^{1/2} = (10 \text{ м/с}^2)(4400)^{1/2} = 210 \text{ м/с}$ .

б)  $t = 2\pi r/v = 2\pi(6,4 \cdot 10^6 \text{ м})/(210 \text{ м/с}) = 53 \text{ ч}$ ;  $53 \text{ ч} \gg 24 \text{ ч}$ .

в) Для непрерывного усиления прилива, возникающего под действием Луны, необходимо, чтобы скорость свободно распространяющейся приливной волны была в 2 раза больше. Океаны не связаны между собой, каждый из них обладает собственными присущими ему приливными свойствами, в каждом из них поступающая приливная энергия рассеивается на собственном мелководье.

13.5. Положим, что заканчивается масса воды  $M$ . Потребляемая энергия, необходимая для подъема уровня в бассейне на 1,0 м, с учетом эффективности равна  $2Mgh/2 = Mg$ . Выработка энергии при малой воде составляет  $Mg \times \times (R+h/2) = 2,7 Mg$ . Таким образом, отношение выработки энергии к ее затратам равно  $(2,7-1)/1 = 1,7$ .

## Глава 14

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОКЕАНА

#### 14.1. Введение

Мировой океан — крупнейший естественный коллектор солнечного излучения. В нем между теплыми, поглощающими солнечное излучение поверхностными водами и более холодными придонными достигается разность температур в  $20^\circ \text{C}$ . Это обеспечивает непрерывно пополняемый запас тепловой энергии, которая принципиально может быть преобразована в другие

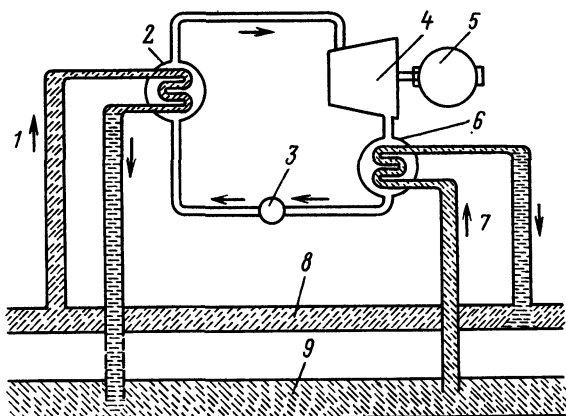


Рис. 14.1. Схема преобразования тепловой энергии океана. Тепловая машина использует перепад температур между поверхностными и глубинными водами океана:

1 — подача теплой воды; 2 — испаритель; 3 — насос подачи рабочего тела; 4 — турбина; 5 — генератор; 6 — конденсатор; 7 — подача холодной воды; 8 — поверхность океана; 9 — океанские глубины

виды. Сам термин преобразование тепловой энергии океана *OTEC* — ocean thermal energy conversion — означает преобразование некоторой части этой тепловой энергии в работу и далее в электроэнергию.

На рис. 14.1 приведена схема одной из установок, позволяющих осуществить процесс такого преобразования. По существу — это тепловая машина, приводимая в действие разностью температур между «холодной»  $T_c$ -водой, поднятой с соответствующей глубины, и «горячей» водой с температурой  $T_h = T_c + \Delta T$ , забранной с поверхности. Рабочая жидкость (рабочее тело), циркулируя по замкнутой схеме, отбирает тепло от горячей воды в теплообменнике испарителя, в паровой фазе приводит в действие турбину, связанную с генератором, а затем конденсируется в охлаждаемом холодной водой конденсаторе. На этом цикл завершается.

Ниже в деталях обсуждаются только системы, работающие по замкнутому циклу. Можно представить себе и другие системы, например использующие в качестве рабочего тела саму морскую воду и работающие по открытому циклу. Тем не менее изложенные здесь и в следующем параграфе физические и географические сведения применимы к любым системам *OTEC*.

Начнем с определения  $P_0$  — мощности, отдаваемой теплой водой в идеальной системе. Допустим, что поток теплой воды с объемным расходом  $Q$  поступает в систему при температуре  $T_h$  и покидает ее при температуре  $T_c$  (температура холодных глубинных вод). При определении  $P_0$  мы, очевидно, делаем пред-

положение об идеальном теплообменнике. В такой идеализированной системе при  $\Delta T = T_h - T_c$

$$P_0 = \rho c Q \Delta T. \quad (14.1)$$

На основе второго начала термодинамики максимальная механическая мощность, которую можно получить от преобразования теплового потока,

$$P_1 = \eta_K P_0, \quad (14.2)$$

где

$$\eta_K = \Delta T / T_h \quad (14.3)$$

есть КПД идеальной тепловой машины Карно, работающей при перепаде температур между  $T_h$  и  $T_c = T_h - \Delta T$ . Безусловно, выход в случае реальной системы будет существенно ниже, чем  $P_1$ . Реальные тепловые машины работают не по циклу Карно, скорее, их цикл ближе к идеальному циклу паровой турбины Ренкина. Тем не менее эти выражения позволяют проиллюстрировать возможности и ограничения ОТЕС. Согласно (14.1) — (14.3) идеальная механическая выходная мощность преобразователя тепловой энергии равна

$$P_1 = (Qc\rho/T_h)(\Delta T)^2. \quad (14.4)$$

*Пример 14.1. Требуемый расход воды.* Для  $\Delta T = 20^\circ \text{C}$ , чтобы получить от идеальной тепловой машины мощность 1 МВт, необходимо обеспечить [согласно (14.4)] расход, равный

$$Q_1 = \frac{10^6 \text{ Дж/с} \cdot 300 \text{ К}}{10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot (20 \text{ К})} = 0,18 \text{ м}^3/\text{с} = 650 \text{ т/ч}.$$

Таким образом, для получения значительных мощностей требуются существенные потоки воды даже для случая максимально возможного в океане перепада температур. Это в свою очередь требует применения громоздких и соответственно дорогостоящих технических средств.

Ввиду того что  $P_1$  зависит от квадрата  $\Delta T$ , опыт подсказывает экономическую привлекательность идеи ОТЕС лишь в районах, где  $\Delta T \geq 15^\circ \text{C}$ . Из рис. 14.2 видно, что такие районы лежат в тропиках. Об изменении температуры с глубиной для одного из таких районов позволяет судить рис. 14.3. Активно ведется изыскания по проблеме ОТЕС на острове Гавайи ( $20^\circ$  сев. широты,  $160^\circ$  зап. долготы), на острове Науру ( $0^\circ$  сев. широты,  $166^\circ$  вост. долготы), в течении Гольфстрим вблизи полуострова Флорида. В тропических районах  $T_h$  и  $T_c$  мало изменяются от сезона к сезону, что должно обеспечивать стабильную выработку энергии в течение всего года.

Безусловно, стабильность и независимость от капризов погоды — главные преимущества ОТЕС как возобновляемого

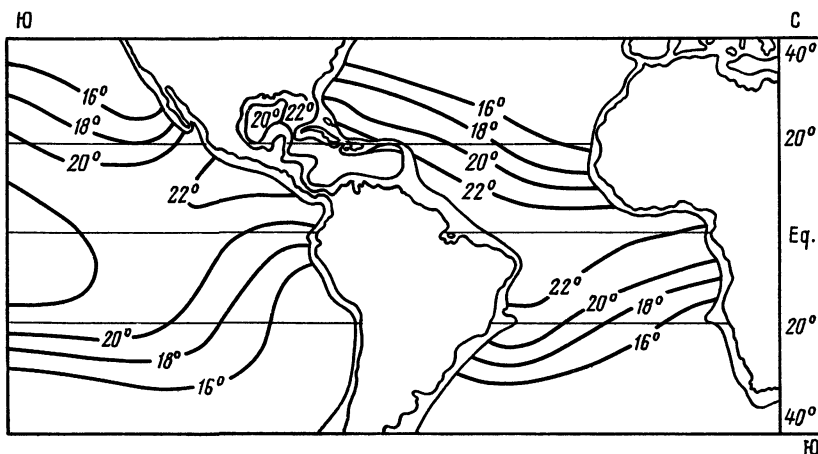
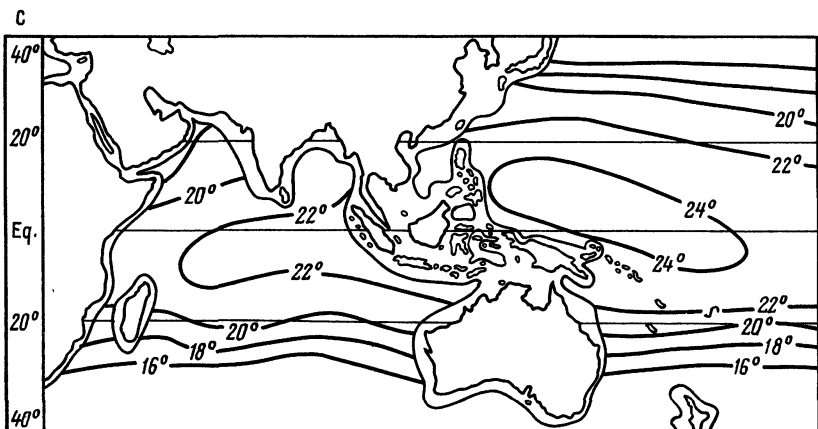


Рис. 14.2. Средние сезонные разности температур  $\Delta T$  между поверхностными и глубинными (1000 м) водами. Зоны с  $\Delta T \geq 20^\circ \text{C}$  наиболее подходят для ОТЕС. Все эти зоны расположены в тропиках

источника энергии. Ниже перечислены другие важные преимущества ОТЕС:

1) В подходящих для размещения преобразователей районах ограничения на значения преобразуемых ресурсов накладывают только размеры установок.

2) Создание экономически оправданных установок требует лишь некоторой доработки таких широко апробированных устройств, как теплообменники и турбины. Никаких совершенно новых или технически невозможных устройств не требуется.

Главные недостатки — стоимость и масштабы установок. Если бы удалось достичь фактической мощности  $P_1$ , то стоимость стала бы минимальной, но принципиальные ограничения накла-



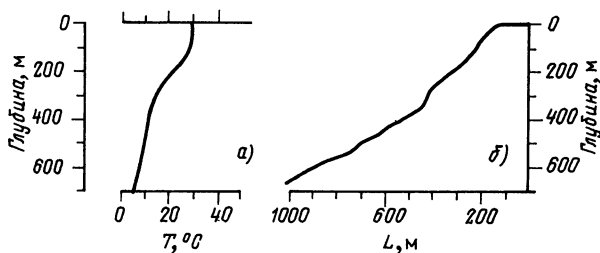


Рис. 14.3. Изменение температуры воды (а) и профиля дна (б) ( $L$  — расстояние от берега, м) по мере удаления от берега острова Науру (центральная часть Тихого океана,  $0^\circ$  сев. широты,  $166^\circ$  вост. долготы). Профиль дна и температурные условия позволяют разместить энергетическую установку на побережье

дывают необходимость учитывать вязкость жидкостей и несовершенство теплообменников (соответствующие оценки сделаны в двух следующих параграфах). Приведенные удельные затраты на создание одной не так давно запущенной экспериментальной океанской термальной электростанции (ОТЭС, не путать с латинской ОТЕС) составили 40 000 долл/кВт установленной мощности. Однако анализ, проведенный в § 14.2—14.4, показывает, что крупномасштабные серийные ОТЭС будут значительно более экономичными, что делает саму концепцию ОТЕС достойной внимания. Соответствующие работы активно ведутся в США, Франции и Японии.

Один из факторов увеличения стоимости систем ОТЭС — дороговизна их обслуживания в открытом море и передачи энергии на берег (§ 14.4). Однако существуют прибрежные районы, где дно резко падает и оборудование ОТЭС может быть размещено на суше. Одно из таких мест — остров Науру в южной части Тихого океана. На рис. 14.3 дано представление о топографии дна как раз вблизи этого острова.

## 14.2. Теплообменники

При расчете идеальной выходной мощности  $P_1$  было сделано допущение об идеальном характере теплообмена между океанской водой и рабочим телом в системах ОТЭС. На практике это далеко от истины даже для самых лучших теплообменников.

**Общий анализ.** Теплообменники передают тепло от одной жидкости к другой, не позволяя им смешиваться. В справочной литературе описано много различных типов подобных устройств, однако наиболее распространенным является кожухотрубный теплообменник (рис. 14.4). В таком теплообменнике поток воды движется по трубам, омываемым рабочим телом.

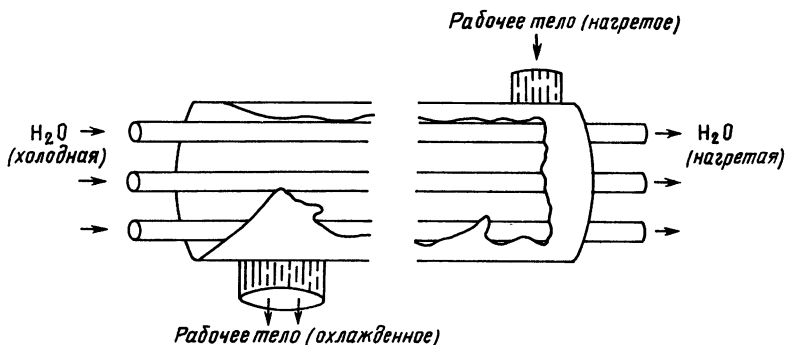


Рис. 14.4. Кожухотрубный теплообменник (в разрезе)

На рис. 14.5 показано, из чего складывается сопротивление теплопереносу. Основные неприятности возникают из-за низкой теплопроводности самой морской воды. Собственно передача тепла от воды к металлу идет так, как описано в § 3.4. На последнем теплоперенос осуществляется за счет теплопроводности, будь то сам металл или различные пленки (оксиды, биологические обрастания) на его поверхности. Для преодоления всех термических сопротивлений при теплопередаче необходим определенный перепад температур  $\delta T$ .

Пусть  $P_{wf}$  — тепловой поток от морской воды ( $w$ ) к рабочему телу жидкости ( $f$ ). Тогда

$$P_{wf} = \delta T / R_{wf}, \quad (14.5)$$

где  $R_{wf}$  — сопротивление теплопередаче от воды к рабочему телу. Если предположить, что аналогичное падение температуры  $\delta T$  будет наблюдаться и во втором теплообменнике при передаче тепла от рабочего тела к морской воде, то действительный перепад температур, приводящий в действие тепловую машину, будет равен не  $\Delta T$ , а

$$\Delta_2 T = \Delta T - 2\delta T. \quad (14.6)$$

Для идеальной тепловой машины Карно выходная мощность

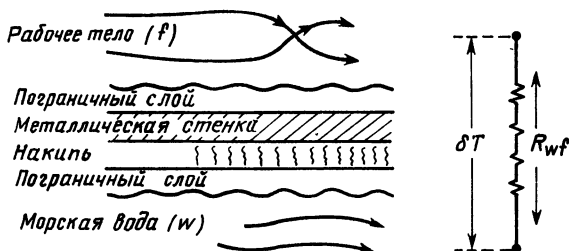


Рис. 14.5. Сопротивление теплопередаче через стенку теплообменника

была бы при этом равна

$$P_2 = \left( \frac{\Delta T - 2\delta T}{T_h} \right) \frac{\delta T}{R_{wf}}. \quad (14.7)$$

Согласно (14.7) если  $\delta T/R_{wf}$  мало, то мала и выходная мощность. Однако  $\delta T$  должно быть минимальным, чтобы достичь максимального КПД тепловой машины, т. е., строго говоря, требуется минимизировать сопротивление теплопередаче  $R_{wf}$  и сделать теплообменник как можно более эффективным. Поэтому трубы теплообменника должны быть сделаны из металла, хорошо проводящего тепло, их должно быть достаточно много, чтобы они могли обеспечить необходимую площадь рабочей поверхности. Другой способ улучшения теплопередачи — увеличение поверхности за счет оребрения труб, применения пористых покрытий, турбулизаторов внутри труб. При таком усложнении конструкций не удивительно, что теплообменники оказываются наиболее дорогостоящей частью ОТЭС. Стоимость увеличивается еще и потому, что материал труб должен противостоять коррозии и в морской воде, и в среде рабочего тела, и все соединения должны быть гарантированно герметичными.

Полное термическое сопротивление можно выразить через удельное термическое сопротивление  $r_{wf}$  и общую площадь стенок  $A_{wf}$  (см. § 3.2, где объяснены все эти термины):

$$R_{wf} = r_{wf}/A_{wf}. \quad (14.8)$$

Наибольший объем исследований, проводимых по проблеме ОТЭС, связан как раз с разработкой теплообменников. Их цель — снизить  $r_{wf}$  и за счет этого уменьшить площадь  $A_{wf}$ . Снижение расхода металла на изготовление крупных теплообменников несомненно приведет к существенному снижению общей стоимости. Наиболее совершенные технологии уже сейчас позволяют получать  $r = 3 \cdot 10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  [ $h = 1/r = 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ].

Необходимый расход воды через теплообменник определяется отбираемой от нее мощностью, теплопередачей и абсолютными значениями температур. Это видно из рис. 14.6, где показан баланс тепловых потоков через теплообменник работающей установки. В каждой точке теплообменника разность температур между рабочим телом и водой равна  $4^\circ \text{С}$ . Таким образом, наибольшая температура рабочего тела оказывается равной  $T_{hf} = T_{hw}^{in} - \delta T$ , а наименьшая  $T_{cf} = T_{cw}^{in} + \delta T$ . Поэтому мощность, отдаваемая горячей водой, равна

$$P_{wf} = \rho c Q (T_{hw}^{in} - T_{hw}^{out}) \quad (14.9)$$

при падении температуры

$$T_{hw}^{in} - T_{hw}^{out} = \Delta T - 2\delta T. \quad (14.10)$$

*Пример 14.2. Характеристики теплообменника.* Определить основные параметры кожухотрубного теплообменника ОТЭС с

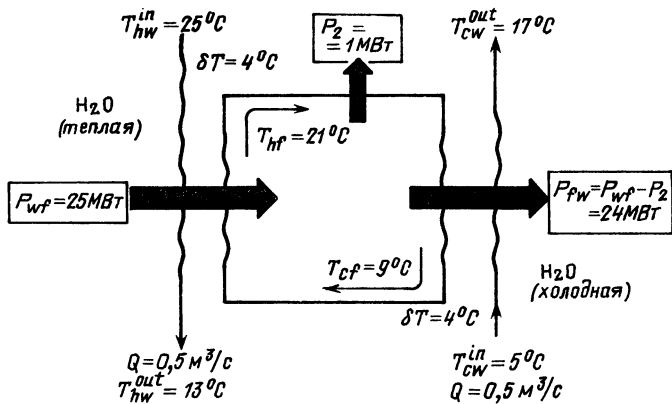


Рис. 14.6. Энергетические потоки в преобразователе ОТЭС (пример 14.2)

выходной мощностью 1 МВт в предположении о том, что реализуется цикл Карно при условии снижения температуры рабочего тела из-за несовершенства теплообменника. Исходные параметры см. на рис. 14.7 ( $r_{wf} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ,  $\Delta T = 20^\circ \text{С}$ ,  $\delta T = 4^\circ \text{С}$  и т. д.)

### Решения

1) *Площадь поверхности.* Из (14.8)  $A_{wf} = r_{wf}/R_{wf}$ .

Из (14.7)

$$1/R_{wf} = \frac{P_2 T_h}{(\Delta T - 2\delta T)\delta T}$$

таким образом

$$A_{wf} = \frac{(1 \cdot 10^6 \text{ Вт})(300 \text{ К})(3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт})}{(20 - 8) \text{ К}(4 \text{ К})} = 1,9 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

Это очень большая величина.

2) *Расход воды*

$$\eta'_k = \frac{21 - 9}{273 + 21} = 12/294,$$

$$P_{wf} = P_2/\eta'_k = 1 \text{ МВт} \cdot 12/294 = 25 \text{ МВт}.$$

Поэтому на основании (14.9) и (14.10) расход воды равен

$$Q = 25 \text{ МВт} / [10^3 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{кг}) \cdot 12 \text{ К}] = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3) *Термическое сопротивление пограничных слоев.* Предположим, что каждый погранслой (рис. 14.5) дает примерно половину  $r_{wf}$ . Точнее, допустим, что удельное термическое сопротивление погранслоя (воды) на внутренней стенке трубы равно  $r_v = 1,5 \times$

$\times 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Положим также, что  $d$  — диаметр отдельных трубок теплообменника. Конвективная теплопередача к внутренней поверхности гладкой трубы описывается следующим выражением:

$$\text{Nu} = 0,27 \text{ Re}^{0,8} \text{ Pr}^{0,33}.$$

По определению число Нуссельта есть не что иное, как  $\text{Nu} = d / (r_v k)$ , т. е. число Рейнольдса для каждой трубки оказывается равным

$$\text{Re} = [d / (0,27 r_v k \text{ Pr}^{0,33})]^{1,25} = [0,27 \cdot 0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) \cdot (7)^{0,33}]^{-1,25} \times \times (d/r_v)^{1,25} = a d^{1,25},$$

где  $a = 4,67 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1,25}$ .

4) *Диаметр трубок и их число.* В качестве первого приближения примем  $d = 0,02 \text{ м}$ , тогда  $\text{Re} = 3,5 \cdot 10^4$ . В этом случае скорость потока в каждой трубке

$$u = \text{Re } \nu / d = 3,5 \cdot 10^4 (1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}) / (0,02 \text{ м}) = 1,7 \text{ м}/\text{с}.$$

Следовательно, объемный расход через  $n$  трубок равен  $Q = n \pi d^2 / 4$ , а число трубок

$$n = 4(0,5 \text{ м}^3/\text{с}) / [(1,7 \text{ м}/\text{с}) 3,14 \cdot (0,01 \text{ м})^2] = 3600.$$

5) *Длина трубок.* Из выражения для необходимой площади теплопередачи  $A = n \pi d l = 1,9 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \pi 3600 \times 0,02 \text{ м} = 32 \text{ м}$ .

Этот пример показывает, что даже для сравнительно небольшой ОТЭС необходим внушительных размеров теплообменник соответствующей стоимости. Конечно, в этом примере дана заниженная оценка размеров: использованные соотношения не позволяют учесть несовершенство тепловой машины, приводящее к тому, что для создания требуемой выходной мощности необходимый объемный расход увеличивается. Кроме того, в примере предполагается, что трубки имеют чистые гладкие стенки.

**Биообрастания.** Внутренние поверхности трубок теплообменников уязвимы для оседания морских организмов, что увеличивает сопротивление теплопередаче и снижает работоспособность ОТЭС. Биообрастание — одна из главных проблем при проектировании таких станций: увеличение площади поверхности теплообменников создает условия для дополнительного расселения организмов-обрастателей. Среди методов, позволяющих бороться с обрастанием, — механическая очистка за счет непрерывного пропускания по трубкам теплообменников плотно притирающихся шариков и химическая очистка путем введения биоцидов в морскую воду.

Результатом всех этих осложнений является то, что для сохранения стоимости сооружения приходится использовать компоненты, размеры которых далеки от оптимальных (например, размеры теплообменников).

### 14.3. Требования к насосным агрегатам

Работа ОТЭС требует подачи огромных количеств поверхностных и глубинных вод, прокачки рабочего тела. Все это сопровождается совершением работы против сил сопротивления, и на все расходуется мощность ОТЭС, что приводит к дополнительному расходованию мощности исходного потока  $P_0$ . Эти затраты можно численно оценить, хотя аналитическое решение и затруднено. Эффект охлаждения воды в гидростатической «цепи» мал, но он содействует циркуляции.

*Пример 14.3. Трение в трубопроводе холодной воды.* Система ОТЭС в примере 14.2 (см. рис. 14.6) имеет  $P_2=1$  МВт,  $\Delta T=20^\circ$  С при длине трубопровода  $L=1000$  м и его диаметре  $D=1$  м. Определить мощность, затрачиваемую на подъем воды по трубе.

*Решение.* Средняя скорость потока в трубе  $u=Q/A=(0,5 \text{ м}^3/\text{с}) / [\pi (0,5 \text{ м})^2] = 0,63 \text{ м/с}$ . Следовательно, число Рейнольдса равно  $Re=uD/\nu=(0,63 \text{ м/с}) (1 \text{ м}) / (1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с})=6,3 \cdot 10^5$ . На практике различные морские организмы, поднимаясь по трубе с глубины, будут оседать на стенках и создавать эквивалентные неоднородности высотой  $\xi=20$  мм, т. е.  $\xi/D=0,02$ . Таким образом, из рис. 2.6 коэффициент сопротивления трубы оказывается равным  $\zeta=0,012$ .

В соответствии с (2.12) потеря напора в трубопроводе составляет  $H=2\zeta L u^2/Dg=1,0$  м. Для преодоления этого сопротивления требуется такая же мощность, как и для подъема массы  $\rho Q$  на высоту  $H$  в секунду:  $P=\rho QgH=4,7$  кВт.

Видно, что избежать серьезных потерь в трубопроводах можно, сделав их диаметр достаточно большим. Однако так как потери напора изменяются пропорционально  $D^{-4}$  или даже  $D^{-5}$ , они могут стать ощутимыми в переходах от трубопровода к теплообменнику и внутри самого теплообменника. Безусловно, все попытки увеличить теплопередачу за счет развития поверхности теплообменника и турбулизации потока в нем ведут к увеличению сопротивления движению потока внутри него.

В дополнение к сказанному скорость потока, на практике требуемая для получения заданной выходной мощности, оказывается выше принятой в примере 14.2 из-за того, что реальная тепловая машина менее эффективна, чем машина Карно. За счет этого потери мощности на преодоление гидравлического сопротивления увеличиваются. Обрастание труб теплообменника ухудшает ситуацию как за счет необходимости увеличивать расход  $Q$ , чтобы поддерживать требуемый уровень выходной мощности, так и за счет уменьшения проходного сечения. Как следствие в подобных системах более 50% подводимой мощности может быть израсходовано на преодоление трения в трубопроводах.

### 14.4. Другие практические соображения

Приведенные выше расчеты показывают, что каких-либо серьезных термодинамических ограничений, по которым успешная

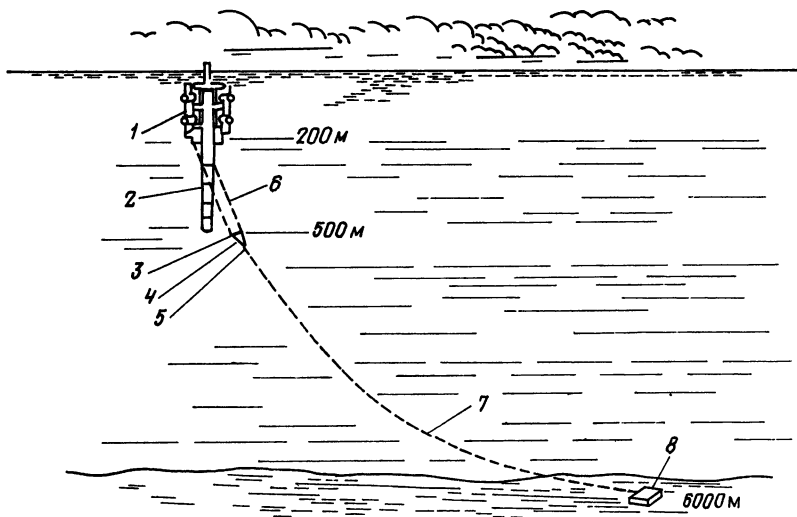


Рис. 14.7. Подводная платформа для ОТЭС электрической мощностью 400 МВт, предложенная специалистами фирмы Lockheed. Платформа может быть установлена на якорю при любой глубине моря:

1 — платформа; 2 — трубопровод холодной воды; 3 — распорка; 4 — бридель, 5 — шарнир, 6 — трапеция, 7 — якорный трос; 8 — якорь

работа ОТЭС была бы невозможной, не существует. Хотя, конечно, остается целый ряд практических, конструкционных и экологических затруднений, но все они могут быть так или иначе преодолены.

**Платформы.** Американские разработчики ставят перед собой целью создание крупных систем, рассчитанных на выходную электрическую мощность примерно 400 МВт, которые должны будут размещаться на массивных плавучих платформах в открытом море, подобных уже использующимся для бурения нефтяных скважин. Из-за того что подобные сооружения будут тяжеловесны и неманевренны, возникают серьезные трудности при подключении к ним трубопроводов холодной воды, связанные с напряжениями, создаваемыми поверхностными волнами и течениями.

Одно из решений этой проблемы — придать платформе нейтральную плавучесть и заякорить в подводном положении (рис. 14.7), что позволит избежать основных нагрузок на поверхности.

**Трубопроводы холодной воды.** Эти трубопроводы — объект воздействия не только сил, возникающих в месте присоединения их к платформам, но и целого ряда сил, распределенных вдоль трубопроводов. Они включают силы, связанные с действием волнения и течений, нестационарные силы, возникающие при срыве вихрей при обтекании трубопроводов потоками в толще

океана, силы, связанные с гармоническими колебаниями платформ, с дрейфом их в океане, и, наконец, собственный вес трубопроводов. В стадии обсуждения находится вопрос о том, какой материал, жесткий или податливый (например, полиэтилен), будет лучше противостоять этим силам. Кроме того, есть еще одно существенное обстоятельство — необходимость сборки и позиционирования трубопроводов. Ряд специалистов отдают предпочтение доставке готовых трубопроводов в сборе и на плаву медленного затопления с переводом в вертикальное положение в требуемом месте. Однако транспортировать даже отдельную нитку такого трубопровода, имеющего диаметр несколько метров и длину до 1 км, не просто.

**Соединение с берегом.** Высоковольтные, рассчитанные на передачу большой мощности подводные кабели — стандартные компоненты систем передачи электроэнергии. Они безусловно дороги (как и любые достаточно сложные морские конструкции), но тем не менее изготовление такого кабеля длиной около 50 км вполне осуществимо.

В качестве альтернативы для крупных ОТЭС, размещаемых в сотнях километрах от берега и потребителей, разрабатывается идея использования получаемой электроэнергии непосредственно на борту для производства химических веществ, как бы аккумулирующих энергию (например, водорода, § 16.3).

Размещаемые на суше системы могут быть созданы лишь в местах с большим уклоном дна (редко встречающихся). Их главное преимущество заключается в низкой стоимости. Упрощаются здесь подключение к трубопроводу холодной воды, обслуживание. Кроме того, трубопровод холодной воды не подвержен нагрузкам, так как он покоится на дне. Правда, он все же уязвим для воздействия штормов из-за того, что волновое движение может сказываться до глубин примерно 20 м.

**Турбины.** Если не касаться реальных размеров турбин, то они не представляют серьезных трудностей. Могут быть использованы существующие разработки. Как и для всех существующих тепловых машин, КПД турбин не будет выше 50% по отношению к идеальной машине Карно с таким же подводом тепла к рабочему телу.

**Выбор рабочего тела.** Имеется масса доступных для использования жидкостей, имеющих подходящую точку кипения, например аммиак, фреоны или даже вода. Конечно, если рассматривать воду, то ее точка кипения должна быть понижена до температуры поверхностных вод за счет частичного вакуумирования (снижения давления). На этом основано действие систем открытого цикла, в которых теплые поверхностные воды сами используются в качестве рабочего тела. Построенные по этому принципу ОТЭС могут производить не только электроэнергию, но и значительное количество пресной воды.



**Воздействие на окружающую среду.** Разнообразие форм жизни в море создает проблему биообращения. Это же подсказывает возможность разведения рыб на фермах при ОТЭС. Морская вода с глубин богата нитратами, которые можно было бы распределять вокруг станций. Это позволило бы интенсифицировать рост водорослей, которые в свою очередь привлекали бы от других морских обитателей из более высоких по уровню пищевых цепей. За счет этого можно создать основу для коммерческого разведения рыб. Однако общий биологический эффект от подъема огромных количеств холодной обогащенной биогенами воды в теплые приповерхностные слои еще не изучен. Он может быть и нежелательным. Предварительно его необходимо оценить на мелкомасштабных установках.

### Задачи

**14.1.** Рассчитайте размеры кожухотрубного теплообменника для получения выходной мощности  $P_2 = 10$  МВт, приняв  $r_v = 3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·К/Вт,  $\delta T = 4^\circ$  С, диаметр трубок  $D = 5$  см.

*Указание:* следуйте примеру 14.2.

**14.2.** Определите потери мощности на трение в теплообменнике, рассмотренном в примере 14.2.

**14.3.** Тепловая машина для выработки максимальной мощности. Как показано в термодинамике, ни одна тепловая машина не может иметь КПД выше, чем идеальная машина Карно. При работе на перепаде температур  $T_h$  и  $T_c$  ее КПД равен  $\eta_K = (T_h - T_c)/T_h$ . Однако отводимое тепло в машине Карно равно нулю. Почему?

Воспользуйтесь выражением (14.7) и покажите, что машина, которая создает максимальную полезную мощность при постоянном термическом сопротивлении трубок теплообменника, имеет  $\delta T = \Delta T/4$ , т. е. «теряет» половину начального температурного перепада. Каков КПД этой машины в качестве преобразователя энергии по сравнению с машиной Карно?

### Решение

**14.1.**  $A = 19 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>,  $Q = 5$  м<sup>3</sup>/с,  $Re = 1,1 \cdot 10^5$ ,  $u = 2,2$  м/с,  $h = 1200$ ,  $l = 100$  м.

**14.2.**  $\xi = 0,007$  (при чистых стенках),  $P_f = 35$  кВт.

**14.3.**  $\eta = \eta_K/4$ .

## Глава 15

# ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

## 15.1. Введение

В ядре нашей планеты максимальная температура достигает  $4000^\circ$  С. Выход тепла через твердые породы суши и океанского дна происходит главным образом за счет теплопроводности (гео-

термальное тепло) и реже — в виде конвективных потоков расплавленной магмы или горячей воды. Средний поток геотермального тепла через земную поверхность составляет примерно  $0,06 \text{ Вт/м}^2$  при температурном градиенте менее  $30^\circ \text{ С/км}$ . Этот непрерывный поток тепла обычно сравнивают с аналогичными величинами, связанными с другими возобновляемыми источниками и в среднем в сумме составляющими  $500 \text{ Вт/м}^2$ . Однако имеются районы с повышенными градиентами температуры, где потоки составляют примерно  $10\text{—}20 \text{ Вт/м}^2$ , что позволяет реализовать геотермальные станции (ГеоТЭС) тепловой мощностью  $100 \text{ МВт/км}^2$  и продолжительностью срока эксплуатации не менее 20 лет.

Качество геотермальной энергии обычно невысокое, и лучше его использовать непосредственно для отопления зданий и других сооружений или же для предварительного подогрева рабочих тел обычных высокотемпературных установок. Подобные отопительные системы уже эксплуатируются во многих частях света, значительное число проектов находится в стадии проработки. Если случается, что тепло из недр получают при температуре около  $150^\circ \text{ С}$ , то имеет смысл говорить о преобразовании его в электроэнергию. Несколько важных достаточно мощных ГеоТЭС уже запущены в Италии, Новой Зеландии, США.

Наиболее просто использовать тепло пород с помощью тепловых насосов. Хотя, строго говоря, это также «геотермальный» источник, но здесь он не рассматривается.

Часть источников геотермальной энергии можно отнести непосредственно к возобновляемым источникам энергии, так как их тепло так или иначе рассеивается в окружающей среде подобно теплу горячих ключей и гейзеров. В других же источниках потоки тепла приходится увеличивать, искусственно пробуривая скважины в природные накопители горячих вод, создавая разрывы и активизируя охлаждение горячих горных пород, и поэтому они не могут оставаться возобновляемыми в течение длительного времени. Подобные системы ограниченного применения рассматриваются здесь лишь потому, что их принято упоминать среди других «альтернативных» источников энергии. Правильнее считать, что извлечение и использование геотермальной энергии более близко по своей сути к сжиганию ископаемого топлива, нежели к преобразованию рассеянной в окружающей среде действительно возобновляемой энергии. В связи с этим геотермальной энергии здесь уделено сравнительно мало места.

## 15.2. Геофизика

Внутренняя структура планеты показана на рис. 15.1. Теплопередача от полужидкой мантии поддерживает температурную разность между внешней и внутренней поверхностями сравнитель-

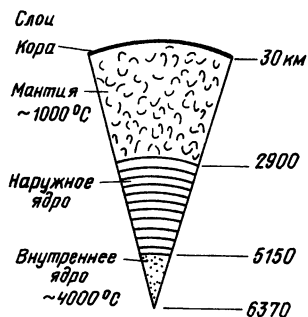


Рис. 15.1. Внутреннее строение Земли. Кора имеет существенные вариации по составу и толщине

но тонкой коры около  $1000^{\circ}\text{C}$  при среднем градиенте температур около  $30^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Твердые породы, слагающие кору, имеют среднюю плотность  $2700\text{ кг}/\text{м}^3$ , теплоемкость  $1000\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$  и теплопроводность  $2\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ . Поэтому средний геотермальный поток и составляет примерно  $0,06\text{ Вт}/\text{м}^2$ , а примерно  $10^{20}\text{ Дж}/\text{км}^2$  в виде тепла аккумулировано в коре. Если за 30 лет преобразовать только 0,1% этого тепла, то тепловая мощность, которую можно получить, составит  $100\text{ МВт}/\text{км}^2$ . Эти оценки дают представление о ресурсах тепловой энергии и показывают, что геотермальный источник обладает огромным потенциалом.

Земная кора получает тепло в результате: естественного охлаждения и трения ядра; радиоактивного распада элементов, подобных торью и урану; химических реакций. Постоянные времена этих процессов настолько велики по отношению к времени существования Земли, что невозможно даже оценить, увеличивается температура ее или уменьшается. Радиоактивные элементы концентрируются в коре путем фракционной рекристаллизации из расплавов, особенно много их в граните. В течение многих миллионов лет радиационный распад и химические реакции являются единственным существенным источником тепла (см. задачу 15.2), а геотермальная энергетика предполагает выведение тепла, запасенного в тепловых хранилищах в толще коры.

Если теплопроводность — единственный механизм теплопередачи, то при распространении тепла через однородные материалы от мантии к поверхности Земли градиент температуры будет постоянным. Он повышается в зонах с плохо проводящими тепло твердыми включениями и снижается в зонах повышенного теплообмена, например в насыщенных водой породах, где возникает конвективный перенос тепла. Аномально высокие температурные градиенты часто наблюдаются в местах расположения радиоактивных или экзотермических химических источников.

Земная кора состоит из огромных платформ (рис. 15.2). Зонам границ платформ соответствует усиление теплового взаимодействия коры с мантией, сопровождающееся сейсмической активностью, наличием вулканов, гейзеров, фумарол и горячих ключей. Потенциал геотермальной энергии этих районов очень велик, им соответствует увеличение температурных градиентов до  $100^{\circ}\text{C}/\text{км}$  и активизация высвобождения воды в виде пара или перегретой жидкости, часто находящихся под повышенным давлением.

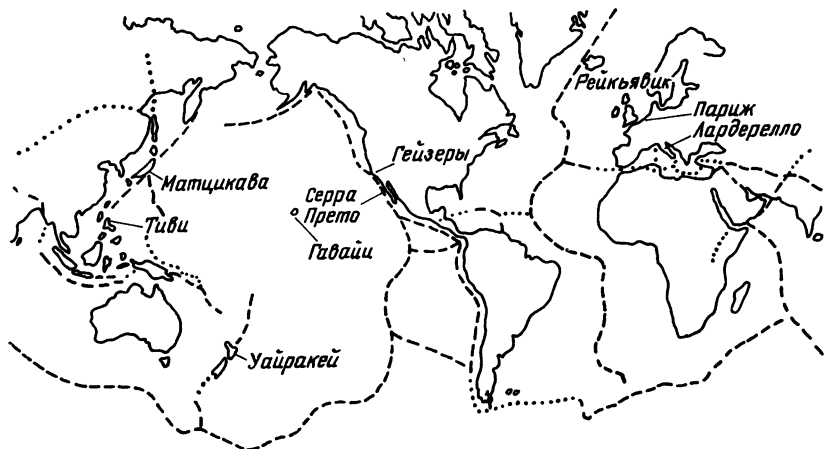


Рис. 15.2. Районы повышенной геотермальной активности. Обозначены наиболее хорошо известные месторождения и термальные поля. Штриховые линии — границы основных плит; пунктирные — зоны напряжений

Из-за аномалий в структуре коры районы с умеренным увеличением температурных градиентов (примерно до  $50^{\circ}\text{C}$ ) встречаются и на достаточном удалении от границ платформ. В таких районах тепло может высвобождаться естественным образом из-за проникновения воды в зону подогрева, сопровождающегося интенсивным конвективным теплообменом. В результате возникают горячие источники с повышенной концентрацией растворенных химических веществ, часто известные как целебные. Глубоко залегающие зоны подогрева с помощью бурения могут стать источниками тепла с температурой от  $50$  до  $200^{\circ}\text{C}$ . Если подобные аномалии связаны с материалами, имеющими низкую теплопроводность, например сухими скальными породами, то повышение температурных градиентов достигается за счет относительного увеличения запасенного в породах тепла.

Сведения о геотермальных структурах получают при геологической съемке, проходке шахт, нефтяных скважин. Наиболее важным параметром является температурный градиент, точность изменения которого зависит от сохранения в скважине в процессе бурения невозмущенного поля температур. При глубоком бурении скважины обычно достигают отметки  $6$  км, но технология бурения остается такой же до глубины  $15$  км. Технология обустройства таких скважин вполне отработана, так что применительно к строительству ГеоТЭС эта проблема может считаться решенной.

Принято выделять три класса геотермальных районов.

**Гипертермальный.** Температурный градиент — более  $80^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Эти районы расположены в тектонической зоне вблизи границ континентальных плит. Первый такой район был задействован

для производства электроэнергии в 1904 г. вблизи Лардерелло (Тоскана, Италия). Почти все из существующих ГеоТЭС размещены именно в таких районах.

*Полутермальный.* Температурный градиент — примерно от 40 до 80° С/км. Подобные районы связаны главным образом с аномалиями, лежащими в стороне от границ платформ. Извлечение тепла производится из естественных водоносных пластов или из раздробленных сухих пород. Хорошо известный пример такого района находится вблизи Парижа и используется для обогрева зданий.

*Нормальный.* Температурный градиент — менее 40° С/км. Такие районы наиболее распространены, именно здесь тепловые потоки в среднем составляют примерно 0,06 Вт/м<sup>2</sup>. Маловероятно, чтобы в таких районах даже в будущем стало экономически выгодно извлекать тепло из недр.

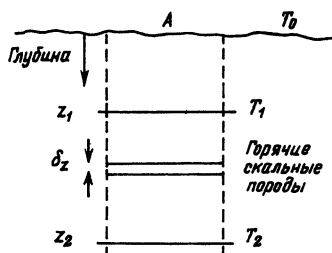
В каждом из перечисленных классов в принципе можно получать тепло за счет: *естественной гидротермальной циркуляции*, при которой вода проникает в глубоко залегающие породы, где превращается в сухой пар, пароводяную смесь или просто нагревается до достаточно высокой температуры. Соответствующие выходы наблюдаются в природных условиях. Если на глубине давление возрастает в результате парообразования, то могут возникнуть эффектные гейзеры, подобные тем, которые можно увидеть недалеко от Сакраменто в Калифорнии (США), в районе Уайракея (Новая Зеландия), на Камчатке. Следует понимать, однако, что эжектируется в этом случае именно горячая вода, а не пар; *искусственного перегрева*, связанного с охлаждением полурасплавленной магмы, застывающей в виде лавы. Первой ГеоТЭС, использующей этот принцип, была станция мощностью 3 МВт, построенная на Гавайях в 1982 г.; *охлаждения сухих скальных пород*. Обладающие достаточно низкой теплопроводностью сухие скальные породы (например, гранит) в течение миллионов лет накапливали тепло. Создание искусственных разрывов в породах позволяет прокачивать через них воду, отбирая тепло.

На практике ГеоТЭС в гипертермальных районах работают на естественной гидротермальной циркуляции; в полутермальных районах используется как естественная гидротермальная циркуляция, так и искусственный перегрев за счет извлечения тепла из сухих горных пород. Нормальные же районы обладают слишком малыми температурными градиентами, чтобы представлять коммерческий интерес.

### 15.3. Анализ свойств сухих горных пород и естественных водоносных пластов

**Сухие скальные породы.** Предположим, что определенная масса сухого скального материала расположена в толще коры срав-

Рис. 15.3. Структура системы из сухих горных пород (для расчета запаса тепла). Плотность  $\rho$ , удельная теплоемкость  $c$ , температурный градиент  $dT/dz=G$ ;  $A$  — площадь;  $T_0$  — поверхностная температура;  $T_1$  — минимальная полезная температура;  $T_2$  — температура на максимальной глубине



нительно недалеко от поверхности (рис. 15.3). Скальные породы имеют плотность  $\rho_N$ , удельную теплоемкость  $c_r$ , площадь поперечного сечения рассматриваемого массива  $A$ . Для однородного материала в отсутствие конвекции с глубиной температура будет увеличиваться линейно. Если  $z$  растет по направлению от поверхности Земли (где  $z=0$ ), то

$$T = T_0 + \frac{dT}{dz}z = T_0 + Gz. \quad (15.1)$$

Положим, что минимальная допустимая температура  $T_1$  соответствует глубине  $z_1$ , таким образом:

$$T_1 = T_0 + Gz_1; \quad z_1 = (T_1 - T_0)/G. \quad (15.2)$$

Полезное теплосодержание  $\delta E$  в элементе толщиной  $\delta z$  на глубине  $z$  при температуре  $T > T_1$  равно

$$\delta E = (\rho_r A \delta z) c_r (T - T_1) = (\rho_r A \delta z) c_r G (z - z_1). \quad (15.3)$$

Полное полезное теплосодержание скального грунта до глубины оказывается равным

$$E_0 = \int_{z=z_1}^{z_2} \rho_r A c_r G (z - z_1) dz = \rho_r A c_r G [z^2/2 - z z_1]_{z_1}^{z_2} = \\ = \rho_r A c_r G (z_2 - z_1)^2 / 2. \quad (15.4)$$

Пусть средняя допустимая температура, превышающая  $T_1$ , равна  $\theta$ , причем

$$\theta = (T_2 - T_1)/2 = G(z_2 - z_1)/2. \quad (15.5)$$

В этом случае  $E_0 = C_r \theta$ , где  $C_r$  — теплоемкость горных пород, залегающих в слое между  $z_1$  и  $z_2$ :

$$C_r = \rho_r A c_r (z_2 - z_1). \quad (15.6)$$

Согласно (15.4)

$$E_0 = \rho_r A c_r G (z_2 - z_1)^2 / 2. \quad (15.7)$$

Допустим, что тепло извлекается из пород равномерно, пропорционально температуре, превышающей  $T_1$ , с помощью потока воды, имеющего объемный расход  $V$ , плотность  $\rho_w$ , удельную

теплоемкость  $c_w$ . В этом непрерывном процессе вода нагревается до температуры  $\theta$ . Таким образом,

$$\rho_w c_w \theta \dot{V} = -C_r \frac{d\theta}{dt}, \quad (15.8)$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = - \frac{\dot{V} \rho_w c_w}{C_r} dt = - \frac{dt}{\tau} \quad (15.9)$$

и

$$\theta = \theta_0 e^{-t/\tau}. \quad (15.10)$$

Вспомнив, что полезное теплосодержание  $E = C_r \theta$ , получим

$$E = E_0 e^{-t/\tau}, \quad (15.11)$$

$$\frac{dE}{dt} = - \frac{E_0}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad (15.12)$$

где постоянная времени  $\tau$  определяется следующим образом:

$$\tau = C_r / (\dot{V} \rho_w c_w) = \rho_w A c_r (z_2 - z_1) / (\dot{V} \times \rho_w c_w). \quad (15.13)$$

#### Пример 15.1

1) Рассчитайте полезное теплосодержание на 1 км<sup>2</sup> сухой скальной породы (гранит) до глубины 7 км. Примите: температурный градиент равным 40° С/км, минимальную допустимую температуру превышающей поверхностную на 140 К,  $\rho_r = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_r = 820$  Дж/(кг·К).

2) Чему равна постоянная времени извлечения тепла при использовании в качестве теплоносителя воды, если  $V = 1$  м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>)?

3) Каковы скорости извлечения тепла — первоначальная и через 10 лет?

#### Решения

1) На глубине 7 км температура  $T_2$  превышает  $T_0$  на 280 К. Минимальная допустимая температура на 140 К превышает  $T_0$  на глубине 3,5 км. Исходя из (15.7), получаем

$$E_0/A = \rho_r c_r (z_2 - z_1) (T_2 - T_1) / 2 = (2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3) [0,82 \times \times 10^3 \text{ Дж/(кг·К)}] (3,5 \text{ км}) (70 \text{ К}) = 5,42 \cdot 10^{17} \text{ Дж/км}^2. \quad (15.14)$$

2) Подставив числовые значения в (15.13), получим

$$\tau = \rho_r c_r A (z_2 - z_1) / (\dot{V} \rho_w c_w) = 1,84 \cdot 10^9 \text{ с} = 58 \text{ лет}. \quad (15.15)$$

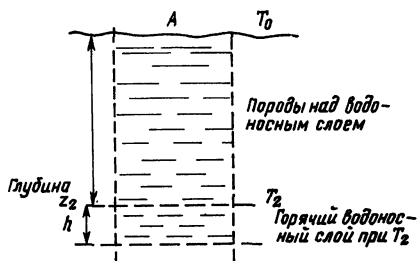
3) Используя соотношение (15.12), имеем

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = (5,42 \cdot 10^{17} \text{ Дж/км}^2) / (1,84 \cdot 10^9 \text{ с}) = 294 \text{ МВт/км}^2, \quad (15.16)$$

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=10 \text{ лет}} = 294 \exp(-10/58) = 247 \text{ МВт/км}^2. \quad (15.17)$$

**Естественные водоносные пласты.** В случае естественных водоносных пластов, залегающих на значительной глубине (рис.

Рис. 15.4. Профиль горячего водоносного слоя для расчета запаса тепла (обозначения см. на рис. 15.3)



15.4), источник тепла лежит внутри слоя воды. Часть пласта занята порами, заполненными водой ( $p'$ ), остальное пространство заполнено скальной породой с плотностью  $\rho_r$ . Предположим, что толщина водоносного слоя ( $h$ ) много меньше глубины его залегания ( $z_2$ ) и что соответственно температура всей массы жидкости равна  $T_2$ . Минимальная полезная температура равна  $T_1$ . Характеристики источника тепла определяются так, как это делалось для сухих скальных пород в § 15.3:

$$T_2 = T_0 + \frac{dT}{dz} z = T_0 + Gz, \quad (15.18)$$

$$E_0 / A = C_a (T_2 - T_1), \quad (15.19)$$

где

$$C_a = [p' \rho_w c_w + (1 - p') \rho_r c_r] h. \quad (15.20)$$

По аналогии с (15.8) определим отбор тепла при объемной скорости  $\dot{V}$  и величине  $\theta$ , превышающей  $T_1$ :

$$\dot{V} \rho_w c_w \theta = - C_a \frac{d\theta}{dt}. \quad (15.21)$$

Таким образом,

$$E = E_0 \exp(-t/\tau_a), \quad (15.22)$$

$$\frac{dE}{dt} = - (E_0 / \tau_a) \exp(-t/\tau_a), \quad (15.23)$$

$$\tau_a = C_a / (\dot{V} \rho_w c_w) = [p' \rho_w c_w + (1 - p') \rho_r c_r] h / (\dot{V} \rho_w c_w). \quad (15.24)$$

#### Пример 15.2

1) Определите начальную температуру и теплосодержание на 1 км<sup>2</sup> до температур свыше 40° С водоносного пласта толщиной 0,5 км при глубине залегания 3 км, пористости 5%, плотности породы 2700 кг/м<sup>3</sup>, удельной теплоемкости 840 Дж/(кг·К), температурном градиенте 30° С/км. Расчет выполните при средней температуре поверхности 10° С.

2) Какова постоянная времени извлечения тепла при закачивании воды и расходе 100 м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>)?

3) Какова тепловая мощность, извлекаемая первоначально и через 10 лет?



1) Первоначальная температура

$$T_2 = 10^\circ \text{C} + (30 \cdot 3^\circ \text{C}) = 100^\circ \text{C}. \quad (15.25)$$

Из (15.20) находим

$$C_a = (0,05 \cdot 1000 \cdot 42\,000 + 0,95 \cdot 2700 \cdot 840) (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) (0,5 \text{ км}) = \\ = 1,18 \cdot 10^{15} \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{км}^2). \quad (15.26)$$

С учетом (15.19)

$$E_0 = [1,18 \cdot 10^{15} \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{км}^2)] [(100 - 40)^\circ \text{C}] = 0,71 \cdot 10^{17} \text{ Дж}/\text{км}^2. \quad (15.27)$$

Качество энергии соответствует ее использование на ГеоТЭС или для обогрева жилищ.

2) По формуле (15.24)

$$\tau = 1,2 \cdot 10^{15} / (0,1 \cdot 1000 \cdot 4200) = 2,8 \cdot 10^9 \text{ с} = 90 \text{ лет}. \quad (15.28)$$

3) Согласно (15.23)

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = 0,71 \cdot 10^{17} / (2,8 \cdot 10^9) = 25 \text{ МВт}/\text{км}^2. \quad (15.29)$$

Проверка:

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=0} = \dot{V} \rho_w c_w (T_2 - T_1) = 0,1 \cdot 1000 \cdot 4200 \cdot 60 = 25 \text{ МВт}/\text{км}^2.$$

Согласно (15.23)

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{t=10 \text{ лет}} = 25 \text{ МВт}/\text{км}^2 \exp(-10/90) = 22 \text{ МВт}/\text{км}^2. \quad (15.30)$$

## 15.4. Использование геотермальных ресурсов

Геотермальную энергию получают от источников тепла с высокими температурами, она обладает некоторыми особенностями. Одна из них заключается в том, что температура теплоносителя существенно ниже температуры при сжигании топлива. Несмотря на то что суммарные запасы геотермальной энергии велики, ее термодинамическое качество низко. Эти источники имеют много общего с промышленными выбросами тепла и тепловой энергией океана (см. гл. 14). Ниже кратко рассмотрена стратегия использования геотермальной энергии.

**Сочетание возможностей и потребностей.** С геотермальными источниками всегда связывают попытки выработки электроэнергии как наиболее ценного продукта, в то время как наилучший способ утилизации тепловой энергии — использование комбинированного режима (и выработка электроэнергии и обогрев). Безусловно, электроэнергия может быть подана в энергосистему и через нее передана потребителям наряду с электроэнергией, вырабатываемой другими источниками. В то же время не лишне

упомянуть, что потребность в тепле при температуре до  $100^{\circ}\text{C}$  обычно даже выше, чем в электроэнергии. Таким образом, использование геотермальной энергии в виде тепла не менее важно. Выработка электроэнергии, по всей вероятности, будет представлять интерес, если теплоноситель имеет температуру более  $300^{\circ}\text{C}$ , и не будет, если последняя ниже  $150^{\circ}\text{C}$ .

Тепло не так легко передавать на расстояние более 30 км, поэтому необходимо его использовать вблизи места добычи. В зонах холодного климата обогрев жилищ и промышленных зданий создает ощутимую потребность в тепле, если плотность населения составляет более 300 человек на  $1\text{ км}^2$  (более 100 усадеб на  $1\text{ км}^2$ ). Таким образом, тепловая станция мощностью 100 МВт может обслуживать жилой район площадью примерно  $20 \times 20\text{ км}$  при расходе тепла около 2 кВт на усадьбу. Подобная геотермальная система давно используется в Исландии и в меньшей степени — в Новой Зеландии. Другие крупные потребители тепла — теплицы (до  $60\text{ МВт/км}^2$  в одной установке для Северной Европы), фермы для разведения рыб, установки для сушки пищевых продуктов и для реализации других технологий.

Масштаб использования геотермальной энергии определяют некоторые факторы. Доминантой стоимости оказываются капитальные затраты на сооружение скважин, стоимость которых экспоненциально увеличивается с ростом их глубины. Так как температура увеличивается с глубиной, а выработка энергии увеличивается с ростом температуры, в большинстве случаев ограничиваются оптимальной глубиной скважины примерно 5 км. Как следствие масштаб энергетических установок обычно выбирают больше 100 МВт (электрических или тепловых — для высоких температур, только тепловых — для низких температур).

Общее количество тепла, извлекаемого из геотермальной скважины, можно увеличить за счет повторной закачки отработанной и частично охлажденной воды. Это удобный способ избавиться от сбросовых вод, которые могут быть сильно минерализованными (содержать до  $25\text{ кг/м}^3$  солей) и являются опасными загрязнителями среды. Однако это приводит к росту стоимости станций.

**Техника извлечения тепла.** Наиболее успешно реализованные проекты имеют скважины, пробуренные непосредственно в естественные подземные коллекторы геотермальных районов (рис. 15.5). Этот метод используется в Гейзерах (Калифорния) и в Уайракее (Новая Зеландия), где в скважинах существует значительное давление. Подобные методы используются для извлечения энергии из водоносных слоев в высокотермальных районах, где природного напора достаточно, чтобы обойтись без насосных систем.

Последние разработки направлены на извлечение тепла из сухих горных пород, так как они могут обеспечить большую

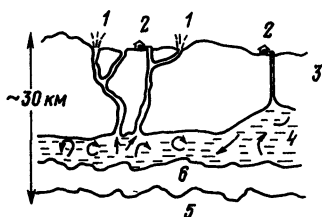


Рис. 15.5. Схема размещения гидротермальных станций в гипертермальном районе (геотермальное поле Гейзеры, Калифорния):

1 — естественный гейзер; 2 — энергетическая станция, 3 — глубокая скважина (5 км); 4 — пароводяной источник ( $\sim 280^\circ\text{C}$ ); 5 — мантия; 6 — горячие скальные породы

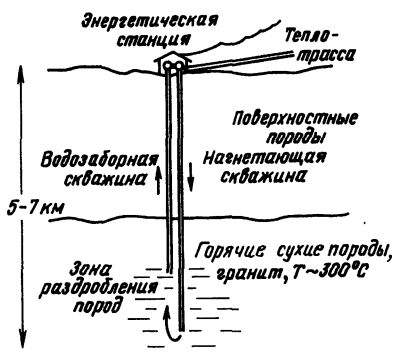


Рис. 15.6. Схема извлечения тепла из сухих горных пород

производительность, чем водные источники. Лидирующая группа специалистов (Лос-Аламосская научная лаборатория, США) разработала методы дробления скал гидроразрывом с помощью холодной воды, нагнетаемой под давлением в скважину (рис. 15.6). После предварительного дробления пород вода нагнетается через питающую скважину, фильтруется через скальные породы на глубине около 5 км при температуре  $250^\circ\text{C}$ , теплая вода возвращается на поверхность через приемную скважину. Две такие скважины могут обеспечить энергией установку мощностью порядка гигаватта.

**Системы генерации электроэнергии.** Выбор теплообменников и турбин для обычных геотермальных источников — комплексная задача, требующая специального опыта. Несколько вариантов возможных схем ГеоТЭС приведено на рис. 15.7.

Если для получения электроэнергии используются источники с низкой температурой, то для приведения в действие турбин приходится вместо воды применять другие рабочие жидкости (например, фреон, толуол). Новые виды техники нуждаются в повышении эффективности. Особые трудности могут возникнуть с теплообменниками из-за высокой концентрации в воде из скважин различных химических веществ. В гл. 14 подобные проблемы с теплообменниками обсуждались применительно к ОТЭС.

В табл. 15.1 перечислены основные действующие ГеоТЭС с указанием на значительное увеличение мощности, планируемое в будущем. Капитальные затраты на строительство ГеоТЭС в настоящее время варьируется от 1500 до 2500 долл. на киловатт установленной электрической мощности, что оказывается сравнимым с таковыми для АЭС и ТЭС.

Рис. 15.7. Примеры организации цикла для производства электроэнергии. Цикл с одним рабочим телом, например с водой или фреоном (а); цикл с двумя рабочими телами — водой и фреоном (б); прямой паровой цикл (в) и двухконтурный цикл (г); I — геотермальный источник; II — турбинный цикл; III — охлаждающая вода

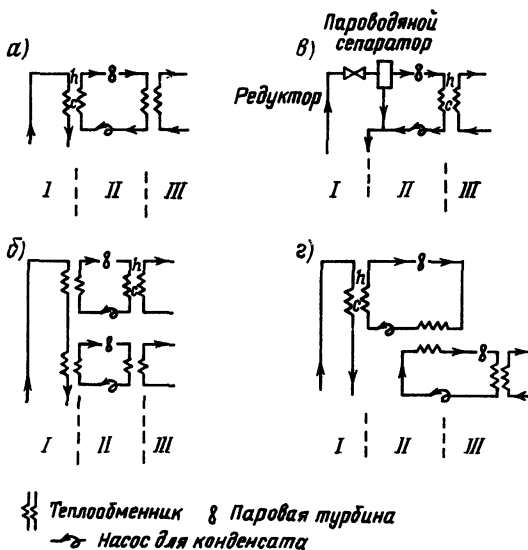


Таблица 15.1. Возможности производства электроэнергии с помощью геотермальных источников \*

Страна	Основные термальные поля	Электрическая мощность, МВт	
		действующих станций на конец 1980 г.	возможное наращивание
США	Гейзеры	700	10 000
Италия	Лардерелло	420	—
Новая Зеландия	Уайракей	250	100
Мексика	Серро Прието	150	5000
Япония	Мацукава	250	10 000
Филиппины	—	250	1000
СССР	Паужетское	6	—
Сальвадор	—	100	—
Исландия	Неймефьял	40	500

\* Приведены лишь страны с большим опытом использования геотермальной энергии, однако по крайней мере еще 50 стран планируют в той или иной степени перейти на использование подобных источников.

### Задачи

15.1. а) Куб из горячих горных пород со стороной  $h$  верхней гранью находится на глубине  $d$  от поверхности Земли. Плотность скального грунта  $\rho$ , и удельная теплоемкость  $c_r$ . Породы над кубом имеют теплопроводность  $k$ . Если скальный грунт является изотермической массой с температурой  $T$ , превышающей температуру поверхности, а другие источники тепла отсутствуют, покажите, что постоянная времени охлаждения куба определяется выражением  $\tau = \rho hcd/k$ .

б) Определите  $\tau$  для куба из гранита [сторона 10 км, плотность  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,

удельная теплоемкость  $0,82 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К)] залегающего в 10 км от поверхности под слоем однородных пород с теплопроводностью  $0,40$  Дж/(м·с·К).

в) Сравните потери энергии гранитом за счет естественной теплопроводности с потерями при коммерческом извлечении тепла из той же массы при мощности  $100$  МВт.

15.2. а) Определите тепловую мощность, создаваемую радиоактивным распадом  $^{238}\text{U}$  в  $5 \text{ м}^3$  гранита [ $^{238}\text{U}$  составляет  $99\%$  урана в граните при средней концентрации  $4 \cdot 10^{-3}\%$ ; тепло, создаваемое чистым  $^{238}\text{U}$ , составляет  $3000$  Дж/(кг·год)].

б) Радиоактивность  $^{238}\text{U}$  создает около  $40\%$  тепловой мощности от общей, создаваемой радиоактивными источниками в граните. Является ли тепло, создаваемое за счет радиоактивного распада, существенным источником энергии для получения геотермальной энергии?

### Решения

15.1. а) Тепловой поток через слой поверхностных пород при разности температур  $T$  равен  $P = kAT/d$ . Тепло, теряемое массой гранита, равно  $P = \rho Vc_r dT/dt$ . Следовательно,  $dT/dt = [kA/(\rho Vc_r)]T/d$ , откуда  $T = T_0 e^{-t/\tau}$ , где  $\tau = V\rho c_r d / (kA) = \rho hc_r d / k$ .

б)  $\tau = 5 \cdot 10^{11}$  с =  $10\,000$  лет.

15.2. а)  $M_{\text{гр}} = (5 \cdot 10^9 \text{ м}^3) (2700 \text{ кг/м}^3) = 13,5 \cdot 10^{12}$  кг,

$$M_{^{238}\text{U}} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 13,5 \cdot 10^{12} \text{ кг} = 54 \cdot 10^7 \text{ кг};$$

$$P = (54 \cdot 10^7 \text{ кг}) (3000 \text{ Дж/кг}) / (3,1 \cdot 10^7 \text{ с}) = 50 \text{ кВт}.$$

б) Общая тепловая мощность, вырабатываемая в результате радиоактивного распада, равна  $50/0,4 = 120$  кВт, что пренебрежимо по сравнению с извлекаемой из сухой скальной породы тепловой мощностью около  $100$  МВт.

## Глава 16

### АККУМУЛИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ НА РАССТОЯНИЕ

#### 16.1. Значение процессов аккумуляции и передачи энергии

Как уже обсуждалось в гл. 1, устройства для преобразования возобновляемой энергии по сравнению с установками на обычном и ядерном топливе различаются по требованиям к аккумуляции и передаче на расстоянии. Такие особенности возобновляемых источников, как низкая интенсивность и рассеянность, делают для них предпочтительным децентрализованное потребление. Более того, энергию от этих источников часто не нужно будет передавать на большие расстояния, так как источники уже распределены в пространстве. Тем не менее некоторые виды ис-

точников можно с успехом использовать в централизованных системах (например, крупные гидроузлы), из-за чего приходится рассматривать даже механизмы крупномасштабного перераспределения энергии (§ 16.8).

Так как полезность устройств для преобразования возобновляемой энергии основана на переработке независимых от нас естественных ее потоков, существует проблема приведения в соответствие выработки энергии и потребности в ней в рамках временного спроса, т. е. в выравнивании скорости потребления энергии. Последняя изменяется во времени в масштабах месяцев (например, для обогрева жилищ в зонах умеренного климата), дней (например, для искусственного освещения) и даже секунд (в моменты включения крупных нагрузок). В противоположность энергетике на традиционном топливе получаемая из окружающей среды мощность возобновляемых источников нам не подконтрольна. Как уже обсуждалось более детально в гл. 1, у нас есть выбор: либо подгонять нагрузку к интенсивности, доступной для преобразования возобновляемой энергии, либо накапливать энергию для последующего использования. У нас на выбор самые различные способы аккумуляирования: химическое, тепловое, электрическое, в форме потенциальной или кинетической энергии. Ниже с требуемой детализацией рассмотрены все эти различные формы аккумуляирования, с тем чтобы дать возможность пользователю выбрать наиболее подходящую для конкретного применения.

Чтобы помочь этому выбору, в табл. 16.1 и на рис. 16.1 суммированы данные об эффективности различных способов аккумуляирования. Эффективность может оцениваться в различных единицах измерения — в мегаджоулях на доллар, мегаджоулях на кубический метр и мегаджоулях на килограмм. Первая оценка —

Рис. 16.1. Связь между удельными характеристиками методов аккумуляирования энергии. По оси абсцисс — энергия на единицу стоимости, по оси ординат — энергия на единицу объема (по ценам 1980 г.). Отмечается превосходство нефти (см. табл. 16.1):

1 — поднятая жидкость, 2 — сжатый воздух; 3 — горячая вода, 4 — расплавы солей, 5 — химические процессы, 6 — нефть; 7 — гидриды, 8 — перспективные аккумуляторы; 9 — существующие аккумуляторы; 10 — маховик; 11 — сверхпроводник

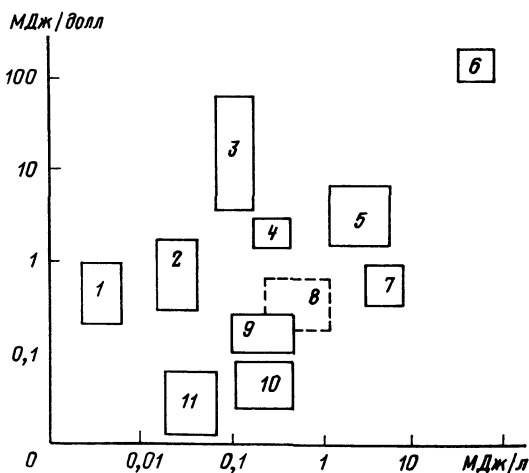


Таблица 16.1. Аккумулирующие системы и их характеристики \*1

Система	Плотность энергии		Рабочая температура, °С	Коммерческая характеристика		Преобразование	
	МДж/кг	МДж/л		Срок ввода, лет	Покупательная способность, МДж/долл	Тип	КПД
<i>Стандартное топливо</i>							
Дизельное топливо	45	39	Окружающей среды То же »	Используются » »	200*2 1000*2 200—*2	Химическая энергия — работа То же »	30 30 60
Уголь	29	45					
Древесина	15	7					
<i>Прочие химические соединения</i>							
Водород (газ)	140	1*4	(-253)—30	10	0,1—10*2	Электрическая энергия — химическая Тепло — химическая энергия Химическая энергия — химическая	60
Аммиак (N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> )	2,9	0,3*4	0—700	5	1*2	Тепло — химическая энергия Химическая энергия — химическая	70
FeTiH <sub>1,7</sub> (H <sub>2</sub> )	1,8	20	100	10	1*2	Химическая энергия — химическая	90
<i>Запасяющая тепло</i>							
Вода	0,2	0,2	20—100	Используются »	3—100*3 0,2*3	Тепло—тепло То же	50—100*5 50—90*5
Чугун	0,05	0,4	20—400				
<i>Тепловая (фазовый переход)</i>							
Пар Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	2,2 0,25	0,02*6 0,29	100—300 32	» »	10 2*3	Тепло—тепло То же	70*4 80
<i>Электрическая</i>							
Конденсаторы	—	10 <sup>-6</sup>	—	Маловре- роятно	—	—	—

Продолжение табл. 16.1

Система	Плотность энергии		Рабочая температура, °С	Коммерческая характеристика		Преобразование	
	МДж/кг	МДж/л		Срок ввода, лет	Покупательная способность, МДж/долл	Тип	КПД
Электромагниты Аккумуляторы: свинцово-кислотные натрий-серные Li/TiS <sub>2</sub>	—	10 <sup>-3</sup>	—	—	—	—	—
	0,10	0,29	Окружающей среды	Используется 10 лет	0,1 <sup>*3</sup>	Электрическая энергия — электрическая То же	75
	0,65 0,48	350	350 100	10 10	0,1 <sup>*3</sup> 0,1 <sup>*3</sup>	»	75 75
Топливные элементы	—	—	150	10	10 <sup>*2</sup>	Химическая энергия — электрическая	38
Механические							
Гидравлические	0,001	0,001	Окружающей среды	Используется	1 <sup>*3</sup>	Электрическая — электрическая То же	80
Маховик (стальной диск)	0,05	0,4	То же	»	0,08	Электрическая	80
Маховик (композит)	0,05	0,15	»	»	0,05	То же	80
Сжатый воздух	0,02—2	2 <sup>*6</sup>	20—1000	»	0,3	»	50

\*<sup>1</sup> Данные приблизительные. Особенно это касается коммерческих характеристик.

\*<sup>2</sup> Энергия, расходуемая за определенный срок на единицу стоимости.

\*<sup>3</sup> Энергоемкость на единицу стоимости; например, если аккумулятор имеет 10 циклов разряда на 50% его энергии, расходуемая за определенный срок, на единицу стоимости равна (0,1 МДж/долл).

\*<sup>4</sup> При давлении 15 МПа.

\*<sup>5</sup> Зависит от времени и тепловых потерь.

\*<sup>6</sup> При давлении 2 МПа.



обычно решающая, но ее труднее всего получить. Вторая приобретает значение, когда борьба идет за пространство (например, необходимо разместить устройство в здании определенного размера). Третья предпочтительна в том случае, когда решающим оказывается масса (например, в авиации). Здесь будет показано, каким образом проводятся соответствующие оценки эффективности.

Аккумуляция энергии — не новая концепция в энергетике. Ископаемые топлива в этом смысле являются эффективным аккумулятором с высокой плотностью энергии. Однако по мере того, как источники топлива становятся все менее доступными и все более дорогими, появляется необходимость в развитии других методов аккумуляции, и в качестве одного из них — производства возобновляемого топлива.

## 16.2. Биологическое аккумуляция

Произрастание растений за счет фотосинтеза и накопление солнечной энергии в виде кислорода детально обсуждались в гл. 10. Эта энергия выделяется при сгорании биологических и ископаемых горючих материалов. Можно поэтому считать, что энергия накапливается в самих горючих материалах, хотя, строго говоря, это не корректно. Некоторые химические способы получения биотоплив описаны в гл. 11 (см. также рис. 11.2).

Некоторые из биотоплив — жидкости и газы — можно использовать в двигателях внутреннего сгорания, и поэтому они необходимы для транспорта в качестве заменителей обычных моторных топлив, получаемых из нефти. Представляет интерес и получение с помощью этих топлив электроэнергии в небольших дизельных установках. Эти и другие аспекты биологических методов аккумуляции энергии были обсуждены в гл. 11.

## 16.3. Химическое аккумуляция

**Введение.** Энергия может удерживаться в связях многих химических элементов и выделяться в процессе экзотермических реакций, из которых наиболее известно горение. Иногда необходимо применить для запуска такой реакции предварительное нагревание или катализаторы (например, ферменты). Биологические компоненты представляют особый случай. Здесь речь идет лишь о неорганических соединениях, являющихся наиболее распространенными аккумуляторами, энергия которых выделяется при их сгорании в воздухе.

**Водород.** Может быть получен путем электролиза воды с помощью любого источника тока. В виде газа он может быть накоплен, передан на расстояние и сожжен для получения тепловой энергии. Единственным продуктом сгорания водорода является

ся вода: не образуется никаких загрязняющих веществ. Энтальпия образования водорода  $H = -242$  кДж/моль, т. е. при образовании 1 моля  $H_2O$  (18 г) выделяется 242 Дж тепловой энергии.

В течение многих лет водород, правда, в смеси с  $CO$  («светильный газ»), получаемый из угля, использовался для получения тепловой энергии.

Наиболее отработанный способ получения чистого  $H_2$  — электролиз, однако эффективность этого процесса составляет примерно 60%. Часть потерь связана с возникновением пузырьков газов вблизи электродов, препятствующих перемещению ионов в электролите и увеличивающих общее сопротивление электрической цепи. Исследования в области изучения механизмов удаления пузырьков и создания пористых материалов с развитой поверхностью уже позволили достигнуть эффективности примерно 80%. Новые электроды допускают более высокие плотности тока, что позволяет уменьшить размеры ячеек и снизить стоимость вырабатываемого газа. За счет применения катализаторов ожидается дальнейшее повышение эффективности электролиза.

Разлагать воду можно и за счет высокотемпературного нагрева. Изменение свободной энергии Гиббса, связанное с обращением электрохимической реакции при абсолютной температуре  $T$ ,

$$\Delta G = -nF\xi = \Delta H - T\Delta S, \quad (16.1)$$

где  $\xi$  — электрический потенциал;  $\Delta S$  — изменение энтропии;  $F = 96\,500$  Кл/моль — постоянная Фарадея;  $n$  — количество молей вещества, вступивших в реакцию.

Реакция разложения



имеет положительные  $\Delta G$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ . В этом случае (16.1) показывает, что с увеличением  $T$  электрический потенциал  $\xi$ , необходимый для разложения воды, уменьшается. В задаче 16.1 показано, что лишь при  $T = 2700$  К  $\xi = 0$ , следовательно, разложение воды прямым нагревом нерентабельно.

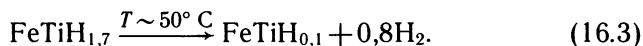
Многообещающей является замена части необходимой для разложения воды электроэнергии теплом от дешевого источника, в качестве которого можно использовать солнечное излучение: получение тепла при  $T \approx 1000$  К с помощью солнечных концентраторов может существенно снизить стоимость получения водорода.

Электролитом при получении водорода может быть сама морская вода. Однако при этом возникают некоторые технические трудности, связанные с выделением хлора на «кислородном» электроде. Приближенные химические расчеты показывают, что можно получать чистый кислород, если поддерживать напряжение на электролизной ячейке ниже 1,8 В. Это, к сожалению, ограничивает плотность тока, что приводит к необходимости

увеличивать площадь поверхности электродов.

В лабораториях исследуется еще несколько способов получения водорода без применения ископаемого топлива — вплоть до использования особых водорослей, которые «фотосинтезируют» его (см. § 10.7), но ни один из них еще не дал приемлемой эффективности.

Хранить водород в больших количествах не просто. Наиболее обещающий способ — использование подземных каверн, подобных тем, из которых добывается природный газ. Но хранение газа — даже под высоким давлением — требует значительных объемов. Водород может быть сжижен, но так как точка его кипения 20 К, такой способ хранения представляется трудным для обслуживания. Химическое аккумулирование в виде металлгидридов, из которых водород может быть извлечен при нагревании, более удобно в эксплуатации и позволяет хранить большие запасы водорода, например:



Эта реакция обратима, так что портативный гидридный аккумулятор может подзаряжаться централизованно на заправочных станциях. Тепло, выделяющееся при зарядке, может использоваться в тепловых сетях местного значения, а сами гидридные аккумуляторы — в качестве «топливных баков» транспортных средств. Главные трудности при этом — масса и стоимость используемых в таких аккумуляторах металлов (см. табл. 16.1). Необходимо заметить, что водород можно передавать через разветвленную сеть трубопроводов, используемых сейчас для подачи природного газа во многих странах мира. Кроме того, существует возможность с большой эффективностью использовать его для непосредственного получения электроэнергии с помощью топливных элементов (§ 16.6).

**Аммиак.** В отличие от воды аммиак может быть разложен на составляющие элементы при доступных температурах:

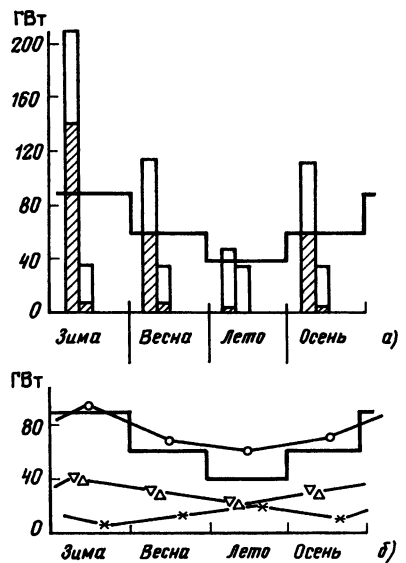


В сочетании с принципом теплового двигателя эта реакция может стать основой наиболее эффективного способа непрерывного получения электроэнергии за счет использования солнечного тепла. Соответствующая система, предложенная Карденом, описана в § 6.9.

#### 16.4. Аккумулирование тепла

Использование низкотемпературного тепла составляет существенную часть мирового потребления энергии. В качестве примера на рис. 16.2 показано общее потребление энергии Великобританией с учетом расхода ее на обогрев. Видно, что зимой более половины

Рис. 16.2. Сезонные изменения потребности в энергии на различные цели в Великобритании, приведенные к энергетическому эквиваленту, ГВт. Два столбца для каждого сезона соответствуют наиболее холодным дням (столбец слева) и ночным часам (столбец справа). Заштрихованная область соответствует энергии, расходуемой на отопление и обеспечение горячей водой (быт, общественные здания, производство). Жирной линией показана потребность в энергии при наличии системы для 7-суточного аккумуляирования тепла, сглаживающей погодные и технологические колебания потребностей. Заштрихованные области соответствуют необходимым затратам тепла, поэтому даже 12-часовое аккумуляирование существенно снизит отмеченные колебания день — ночь (а). Устойчивые значения мощности, ГВт, которые можно было бы получать в Великобритании, используя солнечное тепло (\*), энергию ветра ( $\nabla$ ) и волн ( $\Delta$ ), с учетом 7-суточного аккумуляирования тепла (б). Отметим, что суммарная мощность, которую могут давать эти три источника возобновляемой энергии, превосходит выравненную с помощью аккумуляирования потребность в мощности (жирная кривая), см. также задачу 16.4.



национального потребления энергии приходится на обогрев жилищ (для поддержания температуры около  $18 \pm 3^\circ \text{C}$ ).

Совершенно не обязательно использовать для обогрева высокотемпературные источники энергии, которые гораздо лучше сберечь для других целей. Для обогрева жилищ больше подходят пассивные приемники солнечного тепла в сочетании с тепловыми аккумуляторами, поддерживающими комфортные условия по ночам и в пасмурные дни.

Более того, именно в тех случаях, когда энергия используется при низких температурах, характерных для среды, ее особенно ценно накапливать в форме тепла. Тепловое аккумуляирование плодотворно и при использовании «отходов» тепла, возникающих в процессе работы различных установок (см. § 1.4).

В высоких широтах интенсивность солнечного облучения летом значительно выше, чем зимой (см. рис. 4.7 и 4.10), в связи с чем и потребность в тепле зимой значительно выше. Поэтому, чтобы иметь эффективный способ с максимальной выгодой использовать солнечное тепло для обогрева, необходимо научиться хранить его по крайней мере в течение трех месяцев.

Давайте в связи с этим оценим время  $t_i$ , необходимое для того, чтобы тепловой аккумулятор израсходовал 50% запасенного тепла в процессе эксплуатации при постоянной температуре  $T_s$ , будучи помещенным в среду с температурой  $T_a$ . Тепловой баланс аккумуля

мулятора определяется соотношением

$$mc \frac{\partial T_s}{\partial T} = - \frac{T_s - T_a}{R}, \quad (16.5)$$

где  $c$  — теплоемкость, а  $R$  — термическое сопротивление между аккумулятором и окружающей средой. Решение уравнения (16.5) имеет вид

$$(T_s - T_a)/(T_s(0) - T_a) = \exp(-t/mcR), \quad (16.6)$$

откуда следует, что

$$t_i = 1,3mcR. \quad (16.7)$$

Если аккумулятор выполнен в виде сферы радиусом  $a$ , то термическое сопротивление его равно  $R = r/4\pi a^2$ , где  $r$  — удельное термическое сопротивление, а  $m = 4\pi a^3 \rho/3$ . Следовательно,

$$t_i = 0,43\rho c r a. \quad (16.8)$$

*Пример 16.1.* Размер и изоляция домашнего теплового аккумулятора. Небольшой хорошо изолированный солнечный дом требует среднего внутреннего расхода тепла около 1 кВт. Вместе с дополнительным теплом от освещения и т. п. это обеспечивает поддержание внутренней температуры 20° С. Принято решение построить аккумулятор горячей воды в виде прямоугольной емкости, верхней частью которой будет служить пол дома площадью  $A = 200 \text{ м}^2$ . Аккумулятор теряет тепло в процессе охлаждения от 60 до 40° С в течение 100 дней.

*Решение.* 1) Требуемое количество тепла = (1 кВт)(100 дней)(24 ч/день)  $\times$   $\times$  [3,6 МДж/(кВт·ч)] = 8640 МДж.

Количество воды = (8640 МДж)/[(1000 кг/м<sup>3</sup>)(4200 Дж/(кг·К))]  $\times$   $\times$  (20 К)] = 103 м<sup>3</sup>.

Глубина емкости = 103 м<sup>3</sup>/200 м<sup>2</sup> = 0,5 м.

2) Допустим, что потеря тепла происходит только через верхнюю часть емкости. Согласно (16.7) термическое сопротивление

$$R = \frac{(100 \text{ дней}) (86400 \text{ с/день})}{(1,3)(103 \text{ м}^3) (1000 \text{ кг/м}^3) [4200 \text{ Дж/(кг·К)}]} = 0,0154 \text{ К/Вт.}$$

Из (3.6) находим удельное термическое сопротивление:

$$r = RA = (0,0154)(200 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}) = 3,1 \text{ м}^2 \text{ К/Вт.}$$

3) Изоляционный материал (например, пенополистирол) имеет теплопроводность  $\lambda \sim 0,04 \text{ Вт/(м·К)}$ . Требуемая толщина покрытия на верхней крышке емкости

$$d = (3,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}) [0,04 \text{ Вт/(м·К)}] = 12 \text{ см.}$$

Для того чтобы избежать нежелательных потерь тепла через боковые и нижнюю стенки, их достаточно покрыть слоем того же пенополистирола толщиной 50 см.

4) Плотность энергии, запасенной в аккумуляторе, = (8640 МДж)/(103 м<sup>3</sup>) = = 84 МДж/м<sup>3</sup>.

При снижении окружающей температуры на 20° С плотность запасаемой энергии должна быть соответственно увеличена в 2 раза.

*Примечание:* при активном способе извлечения тепла с помощью теплообмен-

ного аппарата появляется возможность управлять потреблением тепла, снижать первоначальную температуру в аккумуляторе или уменьшать его объем.

Как следует из примера 16.1, запастись на три месяца теплом для обогрева жилого дома — вполне решаемая задача. Правда, при этом важно не только сделать хороший проект, но и грамотно его реализовать. В частности, необходимо качественно выполнить теплоизоляцию и предохранить дом от сырости, снабдить его управляемой системой вентиляции (возможно, с рециркуляцией тепла), использовать все «отходы» тепла от освещения, приготовления пищи, жизнедеятельности самих обитателей. Существуют примеры подобных высокотехнологичных домов, обладающих кроме всего прочего прекрасной архитектурой и создающих идеальные условия для жизни. Отметим, что в качестве аккумулирующей тепло среды предпочтительнее использовать вместо воды скальные породы.

Как следует из примера 16.1, в течение короткого периода продолжительностью до четырех дней сами здания можно использовать в качестве аккумуляторов тепла. При проектировании зданий для стран с жарким климатом важное применение по аналогии с созданием запасов тепла может найти аккумулирование холода.

Известно, что использование аккумулирования тепла в широком масштабе высокоширотными морскими странами позволило бы решить проблемы снабжения теплом за счет развития ветро- и волноэнергетики. Оба эти источника наиболее производительны зимой, а их мощность, хотя и флуктуирует час от часу, редко существенно падает более чем на несколько дней.

Значительно большей теплоемкостью в ограниченном интервале температур по сравнению с системами, использующими поглощение тепла, обладают материалы, при изменении температуры изменяющие фазовое состояние. Например, глауберову соль ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) можно использовать для аккумулирования тепла уже при комнатной температуре. При  $32^\circ\text{C}$  она разлагается на насыщенный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  с выпадением части  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в осадок. Эта реакция обратима и дает  $250 \text{ кДж/кг} \sim 650 \text{ МДж/м}^3$  тепловой энергии. Так как большая часть стоимости аккумуляторов для обогрева зданий связана со стоимостью конструкций, такие аккумуляторы могут оказаться дешевле, чем водяные емкости с более низкой удельной плотностью запасания энергии. К сожалению, еще не разрешены некоторые практические трудности при создании подобных аккумуляторов.

## 16.5. Аккумулирование электроэнергии: свинцово-кислотные батареи

Электричество — наиболее совершенная форма энергии, и поэтому в направлении поисков дешевых и эффективных методов

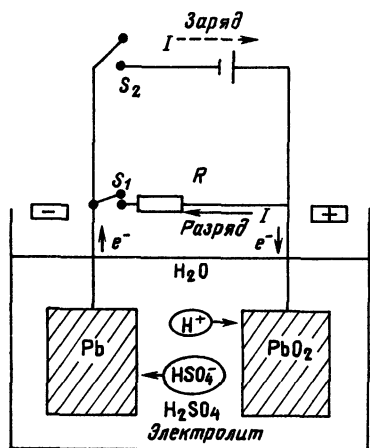


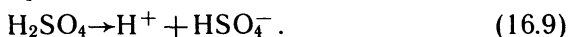
Рис. 16.3. Схема устройства ячейки свинцово-кислотного аккумулятора. Переносчики заряда движутся в направлении, показанном в процессе реакции разряда через сопротивление  $R$ . Реакции и направление движения носителей изменяются на обратные при зарядке (переключатель  $S_1$  открыт,  $S_2$  замкнут)

его аккумулирования делаются огромные усилия. Устройство, допускающее как поглощение, так и выдачу электроэнергии, называют *электрической аккумуляторной батареей* или *электрическим аккумулятором*. Под это определение не подпадают

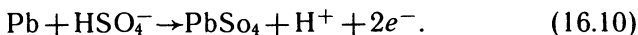
устройства с различными промежуточными носителями энергии, и, в частности, комбинация электролизера и топливного элемента. Электрические аккумуляторы являются существенной частью почти всех фотоэлектрических и небольших ветроэнергетических установок; ведутся работы по созданию эффективных аккумуляторов для транспортных средств.

Хотя многие электрохимические реакции обратимы, только некоторые из них на практике подходят для создания аккумуляторов, которые допускали бы сотни циклов при зарядно-разрядных токах от 1 до 100 А. Наиболее известен и широко используется свинцово-кислотный аккумулятор, изобретенный Планте в 1860 г.

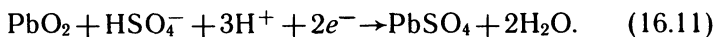
Такой аккумулятор набирается из отдельных элементов, схематично показанных на рис. 16.3. Как и в любом электрохимическом элементе, здесь имеются две пластинки-электроды, помещенные в проводящей раствор-электролит. В случае свинцово-кислотного аккумулятора электроды формируются в виде сеток, ячейки которых заполнены пастами из свинца и диоксида свинца. В качестве электролита используется серная кислота, диссоциирующая следующим образом:



В процессе разряда на отрицательном электроде идет реакция



Свинец окисляется до  $\text{Pb}^{2+}$ , сохраняющийся в виде сульфата  $\text{PbSO}_4$ . Сульфат замещает свинцовую пасту в ячейках электрода. Освобожденные в этой реакции электроны перемещаются по внешней цепи к положительному электроду, где они вступают в реакцию:



Образовавшийся  $PbSO_4$  аналогичным образом замещает  $PbO_2$  на положительном электроде. Электрический ток в электролите поддерживается ионами  $H^+$  и  $HSO_4^-$  серной кислоты, которая, таким образом, принимает участие в реакциях на электродах.

Зная ход реакций и соответствующие электродные потенциалы (они приведены в химических справочниках), можно найти теоретическую плотность энергии, запасаемую любым типом аккумулятора.

*Пример 16.2.* Теоретическая плотность энергии свинцово-кислотного аккумулятора. Реакции (16.9) и (16.10) показывают, что перенос 2 молей электронов требует:

1 моль Pb .....	207 г
1 моль $PbO_2$ .....	239 г
2 моля $H_2SO_4$ .....	196 г

Всего активного материала 642 г. Но 2 моля электронов несут заряд, равный (2 моля)  $(-1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}) (6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}) = -1,93 \cdot 10^5 \text{ Кл}$ . Стандартный электродный потенциал для  $Pb/PbSO_4$  равен 0,30 В, а для  $PbSO_4/Pb^{4+}$  потенциал равен  $-1,62$  В. Таким образом, теоретическое значение ЭДС элемента ( $Pb/PbSO_4/H_2SO_4/PbSO_4/PbO_2$ ) составляет  $0,3 - (-1,62) = 1,92$  В, при этом (в соответствии с международным соглашением о знаках) электрод, на котором нанесен  $PbO_2$ , считается положительным.

Реальная ЭДС ячейки зависит от концентрации реагентов и может быть определена стандартными электрохимическими методами. Практически напряжение на ячейке, работающей при низких плотностях тока, изменяется лишь на несколько процентов от теоретического (рис. 16.4). Обычно напряжение отдельного элемента свинцово-кислотного аккумулятора равно 2 В. Поэтому работа, затраченная на перемещение 2 молей электронов, составляет

$$(1,93 \cdot 10^5 \text{ Кл}) (2,0 \text{ В}) = 0,386 \cdot 10^6 \text{ Дж},$$

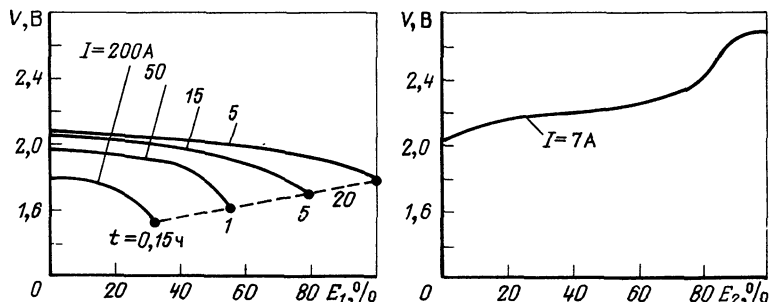


Рис. 16.4. Рабочие характеристики типового свинцово-кислотного аккумулятора (номинальная емкость около 100 А·ч). Разряд. Кривые соответствуют определенным разрядным токам (подразумеваются постоянными) в течение «полного» разряда (а). Заряд. Кривые заряда при постоянном низком значении тока (б):  $E_1$  — процент использования запасенной энергии;  $E_2$  — запасаемая энергия;  $V$  — ЭДС ячейки



а энергия, запасенная в 1 кг активных компонентов, теоретически равна

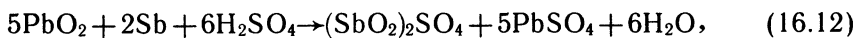
$$W_m^0 = (0,386 \cdot 10^6 \text{ Дж}) / (0,642 \text{ кг}) = 0,60 \text{ МДж/кг.}$$

К сожалению, плотность энергии  $W_m$ , запасаемой в любом реальном аккумуляторе, много ниже теоретической величины  $W_m^0$ , так как необходимо учитывать массу всей конструкции. Большинство коммерческих аккумуляторов имеет  $W_m \sim 0,15 W_m^0$ , хотя от более качественных (и более дорогих!) образцов можно вполне обоснованно ожидать доведения  $W_m$  до  $0,25 W_m^0$ .

В специфическом случае свинцово-кислотного аккумулятора основные причины столь большого отклонения от теоретического значения плотности энергии состоят в том, что: 1) реальный аккумулятор обязательно содержит неактивные материалы, например корпус, сепараторы (предотвращают короткое замыкание между электродами), воду, в которой растворена кислота (концентрация кислоты не должна быть слишком большой, чтобы аккумулятор не разряжался сам на себя), и из-за этого плотность энергии оказывается ниже теоретической, рассчитываемой с учетом только массы активных компонентов; 2) нельзя допустить, чтобы реакция в аккумуляторе шла до полного завершения. Если весь свинец вступит в реакцию (16.10), то не станет электрода, на котором должна пойти обратная реакция, т. е. аккумулятор не сможет работать в цикле. Аналогично нельзя позволить концентрации  $H_2SO_4$  упасть до слишком низкого значения: электролит перестанет быть проводником с необходимой проводимостью. На практике нельзя допускать разряда аккумулятора более чем на 50% от запасенной энергии, в противном случае он будет разрушаться. Такие разряды называются «глубокими разрядами».

Описанные ниже ограничения, присущие реальным аккумуляторам, знакомы всем владельцам автомобилей: они стараются до этого дела не доводить. Твердый Pb имеет почти в 2 раза большую плотность, чем  $PbSO_4$ , участвующий в реакциях при разряде (16.10). Из-за этого кристаллам  $PbSO_4$  трудно занять пространство, первоначально заполненное пастой Pb на отрицательном электроде. На практике некоторое количество  $PbSO_4$  оседает на дно аккумулятора при каждом разряде. Это приводит к невосполнимым потерям активного вещества. Эти потери увеличиваются при глубоком разряде. Таким образом, аккумулятор можно достаточно быстро довести до такого состояния, что он не сможет заряжаться.

Другой важный фактор, ограничивающий время жизни даже правильно эксплуатируемого аккумулятора, — саморазряд на положительном электроде. Это особенно актуально для аккумуляторов транспортных средств, для которых сетки электродов делаются не из чистого свинца, а из сплава последнего с сурьмой — более прочного и лучше воспринимающего механические нагрузки при движении. К сожалению, наличие сурьмы ведет к реакции



которая достаточно медленно, но необратимо уничтожает активный материал аккумулятора.

В аккумуляторах для стационарного использования (например, для фотоэлектрических осветительных систем) можно применять электроды без сурьмы, что в отсутствие чрезмерного разряда увеличивает жизнь аккумуляторов до 7 лет.

Работоспособность аккумулятора зависит и от значения токов, при которых он разряжается и заряжается, глубины его регулярного разряда. На рис. 16.4 приведена разрядная характеристика типичного свинцово-кислотного аккумулятора для автомобиля. Его номинальная емкость  $Q_{20} = 100 \text{ А}\cdot\text{ч}$ , электроэнергия может быть извлечена в процессе разряда при постоянном токе за 20 ч. При разряде до 60% от  $Q_{20}$  напряжение на элементах аккумулятора падает незначительно: от 2,07 до 1,97 В. Если этот аккумулятор разряжать за 1 ч, то напряжение на нем падает быстрее, а полный заряд, который может быть из него извлечен, снижается до 0,5  $Q_{20}$ . Это связано с тем, что скорость реакции на электродах ограничена скоростью диффузии реагентов, в процессе которой они вступают в контакт. Быстрое образование продуктов реакции (особенно  $\text{PbSO}_4$ ) может блокировать этот контакт. Более того, внутреннее сопротивление слоя  $\text{PbSO}_4$  снижает напряжение, которое может развить элемент.

На рис. 16.4, б показан пример зарядной характеристики того же аккумулятора. Чтобы зарядка началась, требуется к элементу подвести ЭДС не менее 2,1 В. По мере заряда напряжение на элементе медленно повышается, а затем делает резкий скачок вверх примерно до 2,6 В. Это происходит вблизи полного заряда при работе с постоянным зарядным током. Подъем напряжения связан с началом электролиза в элементе. При чрезмерной зарядке в элементе может образоваться значительное количество  $\text{H}_2$ , способного привести к механическому разрушению его, одновременно концентрация кислоты может подняться до значения, при котором ионы в электролите теряют подвижность, делая аккумулятор неработоспособным. Эти негативные явления можно устранить, проводя зарядку при постоянном напряжении.

## 16.6. Топливные элементы

Топливный элемент преобразует химическую энергию топлива непосредственно в электрическую, минуя промежуточную стадию сжигания. Так как преобразование тепло-работа здесь отсутствует, эффективность топливных элементов не подпадает под ограничения второго закона термодинамики, как это происходит в обычных системах топливо — тепло — работа — электроэнергия. Теоретически КПД преобразования химической энергии в электрическую может достигать 100%. Хотя топливные элементы, как уже отмеча-

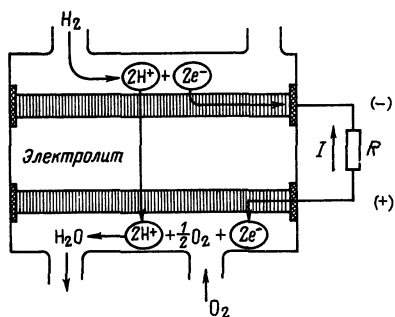


Рис. 16.5. Схема топливного элемента. В результате соединения водорода и кислорода получаются вода и электро-энергия. Пористые электроды пропускают ионы водорода

лось выше (§ 16.5), строго говоря, не относятся к аккумулирующим устройствам, но здесь имеет смысл их рассматривать из-за их схожести с электрическими аккумуляторами и возможности с их помощью исполь-

зовать водород (§ 16.3). Именно поэтому мы описываем только топливные элементы, работающие на водороде, хотя существуют и другие типы подобных устройств.

Аналогично аккумулятору топливный элемент имеет два электрода, разделенных электролитом, переносящим ионы, а не электроны. Водород (или другой преобразуемый компонент) подводится к отрицательному электроду, а кислород (или воздух) — к положительному (рис. 16.5). В результате катализа на пористом аноде молекулы водорода разлагаются на водородные ионы и электроны. Ионы  $H^+$  мигрируют через электролит (обычно кислота) к катоду, где соединяются с электронами, поступающими через внешнюю цепь, и с кислородом, образуя воду.

Эффективность реального топливного элемента значительно ниже теоретических 100% во многом по тем же причинам, что и у электрического аккумулятора. Однако эта величина — вероятное значение для преобразования химической энергии в электрическую (40%) — не зависит от того, работает топливный элемент на полную мощность или нет (в отличие от дизельных двигателей, газовых турбин и т. д.).

Крупномасштабные топливные элементы не дают существенной экономии. Это связано с тем, что соединенные в батареи отдельные топливные элементы имеют примерно такой же КПД. В связи с этим считается предпочтительным создание сравнительно небольших станций местного значения мощностью до 100 кВт. Интересно, что отдельное здание можно было бы с помощью топливных элементов обеспечивать и электроэнергией, и теплом (оно выделяется при работе топливных элементов) при том же расходе топлива, которое в обычных условиях тратится только на обогрев. Основной причиной, по которой топливные элементы не находят пока широкого применения, является их высокая стоимость (более 2000 долл/кВт).

## 16.7. Механическое аккумулирование

**Вода.** Гидроэнергетические системы приводятся в действие природными потоками, мощность которых  $P = \rho g Q_0 H$ , где  $Q_0$  — рас-

ход воды в заданном сечении, а  $H$  — высота падения потока (§ 8.2). Так как  $Q_0$  потока зависит от выпадения осадков, что не всегда соответствует по ритму потребности в энергии, все крупные гидроэнергетические системы имеют водохранилища, обеспечивающие аккумуляцию энергии (см. рис. 1.5, *в* и 8.7). Вода накапливается при высоте подъема  $H$  и срабатывается через турбины при управляемом расходе. Потенциальная энергия, запасаемая с помощью дамбы высотой 100 м, обладает плотностью  $W_v = 1,0 \text{ Мдж/м}^3$ . Хотя эта величина сравнительно невелика, полная энергия, накапливаемая в водохранилищах, может быть огромной.

Работающие в двух режимах гидроаккумулирующие станции (ГАЭС) используют два резервуара — верхний и нижний. Когда в энергосети имеется избыток мощности, вода закачивается в верхний бассейн. При увеличении потребности в энергии воду пропускают через турбины в нижний бассейн, обеспечивая генерирование электроэнергии. На практике в ГАЭС используют агрегаты, работающие в двух режимах: и как насосы, и как турбины. Уже построено несколько достаточно крупных станций этого типа для выравнивания колебаний потребностей энергетики. Это обеспечивает работу традиционных АЭС и ТЭС с постоянной нагрузкой в наиболее эффективном режиме.

В связи с тем что около 15% подводимой энергии в ГАЭС идет на обеспечение быстрого переключения агрегатов с одного режима на другой, а еще около 15% тратится на трение и перераспределение потоков, наилучшие экономические показатели такие станции давали бы при автоматическом управлении нагрузкой (см. § 1.4).

**Маховики.** Кинетическая энергия вращающегося тела

$$E = J\omega^2/2, \quad (16.13)$$

где  $J$  — момент инерции тела относительно его оси вращения, а  $\omega$  — угловая скорость, рад/с. В простейшем случае, когда масса сконцентрирована на ободе радиусом  $r = a$ ,  $I = ma^2$ . Для однородного диска той же массы момент инерции в 2 раза меньше ( $ma^2/2$ ), так как масса распределена ближе к оси. Из (16.13) следует, что плотность энергии, запасаемой однородным диском,

$$W_m = E/m = a^2\omega^2/2. \quad (16.14)$$

Для того чтобы использовать маховик в качестве аккумулятора энергии (а не просто выравнивающего ход устройства), ему необходимо сообщить по возможности большую скорость. Однако угловая скорость ограничивается напряжениями, разрывающими маховик при вращении под действием центробежных сил. Для однородного диска из материала с плотностью  $\rho$  максимальное разрывающее напряжение

$$\sigma^{\max} = \rho\omega^2 a^2. \quad (16.15)$$

Для маховика обычной формы момент инерции чаще всего описывается выражением  $I = Kma^2/2$ , где  $K$  — константа, примерно равная 1. Таким образом,

$$W_m = Ka^2\omega^2/2 \quad (16.16)$$

и

$$W_m^{\max} = K\sigma^{\max}/(2\rho). \quad (16.17)$$

Широко используемая для этого сталь не позволяет получить высокую плотность энергии.

*Пример 16.3.* Максимальная плотность энергии вращающегося стального диска. Для наиболее прочной стали из (16.17) при  $K=1$  имеем

$$W_m^{\max} = (1000 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2) / (2 \cdot 7800 \text{ кг/м}^3) = 0,06 \text{ МДж/м}^3.$$

Значительно более высокую плотность энергии можно получить при использовании легких стеклокомпозитных материалов. Таков, например, композит на основе стекловолокна и эпоксидной смолы в качестве связующего, имеющий значительно более высокую  $\sigma^{\max}$  при меньшей плотности  $\rho$ . Чтобы наилучшим образом использовать подобные материалы, маховикам придают необычную форму с волокнами, вытянутыми в направлении действия максимальных напряжений. Подобные устройства позволяют получить плотность энергии до 0,5 МДж/кг (лучше, чем у свинцово-кислотного аккумулятора) или даже выше (задача 16.3).

Для использования с целью выравнивания потребления энергии в крупных энергосетях маховики могут быть установлены где угодно, так как занимают сравнительно мало места. Блок с маховиком массой 100 т имел бы аккумулирующую способность примерно 10 Мв·ч. При еще больших потребностях достаточно создать каскад из нескольких подобных «мини»-блоков.

Маховики, кроме того, представляют интересную альтернативу традиционным аккумуляторным батареям для питаемых электроэнергией транспортных средств (см. задачу 16.2), особенно в связи с тем, что их подзарядка требует значительно меньше времени.

**Сжатый воздух.** Воздух может быть быстро сжат и медленно расширен. За счет этого легко выравнивать большие флуктуации давления в гидравлических системах. В § 8.7 приведен пример работающего на этом принципе гидравлического клапанного насоса.

Допустимая плотность энергии с использованием сжатого воздуха умеренно высока. Предположим для примера, что воздух в объеме  $V_1 = 1 \text{ м}^3$  медленно сжимается при давлении  $2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  до объема  $0,4 \text{ м}^3$  при постоянной температуре. Для  $n$  молей идеального газа

$$pV = nR_0T, \quad (16.18)$$

откуда следует, что совершенная работа (запасенная энергия)

$$E = \int_{V_1}^{V_2} p dV = nR_0T \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = p_1 V_1 \ln(V_1/V_2) = 0,19 \text{ МДж} \quad (16.19)$$

для указанного выше объема.

В сжатом состоянии  $W_V = E/V_2 = 0,48 \text{ МДж/м}^3$ . Для системы, работающей в менее идеальных условиях,  $W_V$  будет несколько ниже. Главной трудностью при таком способе аккумулирования энергии оказывается снижение потерь в процессе сжатия от нагревания.

## 16.8. Передача энергии

**Введение.** В табл. 16.2 представлены основные используемые в энергетике методы передачи энергии потребителям.

Методы разделены на категории в зависимости от того, лежат ли в их основе непрерывные способы подачи (например, трубопроводы) или периодические (например, с помощью судов), а также от того, пригодны ли они для использования на длинных, средних или коротких расстояниях. Здесь же приведены характерные желательные значения величин энергетических потоков для отдельных типичных случаев (например, при передаче по отдельной нитке трубопровода). Хотя эти потоки по масштабам варьируются в широких пределах, их удельные значения на практике оказываются замечательным образом подобными и составляют примерно 10 МДж (100 Вт) на одного пользователя в день. В последующих параграфах и задачах 16.6 — 16.8 величинам, приведенным в табл. 16.2, дается обоснование.

Для устройств, преобразующих возобновляемую энергию, источники которой обычно распределены в пространстве и имеют низкую интенсивность, более актуальна передача энергии на короткие расстояния, нежели на длинные; перемещение биомассы на небольшие расстояния и подача тепла внутри здания — наиболее характерны. Энергию от устройств, приводимых в действие механическими перемещениями — потоками воды, ветром, волнами — лучше передавать в виде электроэнергии, которую непосредственно могут использовать потребители. Если получение водорода станет обычным способом аккумулирования энергии, то его передача по трубопроводам и дополнительное преобразование в месте поступления, по всей вероятности, будут крупномасштабными.

**Газопроводы.** В трубопроводах, используемых для подачи газообразного топлива, мы обычно имеем дело с турбулентными дозвуковыми потоками. К таким трубопроводам применима теория, изложенная в § 2.7. Правда, на ее интерпретацию влияет сжимаемость газа.

Т а б л и ц а 16.2. Основные средства передачи энергии на расстояние и соответствующие им потоки энергии

Метод	Большие расстояния (более 1000 км)	Поток		Средние расстояния (1—1000 км)	Поток		Малые расстояния (10 м.—1 км)	Поток	
		на единичный образец, МВт	на пользователя в сутки, МДж		на единичный образец, МВт	на пользователя в сутки, МДж		на единичный образец, МВт	на пользователя в сутки, МДж
Непрерывный	Нефтепровод Газопровод (высокое давление)	15 000	60	Нефтепровод Газопровод (высокое давление)	10 000	60	—	—	—
		500	20		500	20			
Разовый	Нефтеналивной танкер  Уголь судами	1200	—	Электроэнергия (линия высоковольтных передач)  Нефть (или замеситель, например этанол) транспортными средствами Цистерны Суда Уголь поездами Биомасса на грузовиках	100	20	Электроэнергия (линия низковольтных передач)  Биомасса виках Дерево «на руках»	—	—
		—	—		200	28			
									0.03

В соответствии с формулой (12.12) градиент давления вдоль отрезка трубы диаметром  $D$  равен

$$dp/dx = -2\xi\rho u^2/D, \quad (16.20)$$

где  $\xi$  — коэффициент сопротивления;  $\rho$  и  $u$  — плотность и средняя скорость потока соответственно.

В установившемся потоке газа  $\rho$  и  $u$  по длине протяженного трубопровода изменяются, но массовый расход

$$\dot{m} = \rho u A \quad (16.21)$$

остается постоянным. Здесь  $A = \pi D^2/4$  — площадь поперечного сечения.

Кроме того, плотность  $\rho$  изменяется при изменении давления  $p$ :

$$p = (RT/M)\rho = K\rho \quad (16.22)$$

при более или менее постоянном  $K$  для данного газа. Здесь  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $M$  — грамм-молекулярная масса/1000 (чтобы привести к килограмму на моль). Если число Рейнольдса велико,  $\xi$  не будет существенно изменяться вдоль трубопровода и можно проинтегрировать (16.20) на каком-то участке от  $x_1$  до  $x_2$ , получив

$$p_1^2 - p_2^2 = 64\xi RT \dot{m}^2 (x_2 - x_1) / \pi^2 MD^5. \quad (16.23)$$

Таким образом, давление достаточно быстро падает вдоль трубопровода, и для обеспечения подачи газа необходимо довольно часто устанавливать компрессорные станции. В качестве численного примера укажем, что для подачи через трубопровод диаметром 30 см метана при среднем давлении в 40 раз выше атмосферного необходимо поддерживать энергию потока, вкладывая около 500 МВт, что весьма существенно (пример 16.7).

Согласно (16.23) трубопроводы большего диаметра обладают меньшими потерями. На возможность применения трубопроводов сильное влияние оказывает обеспечение наиболее экономичного соотношения между размерами трубопроводов (капитальные затраты) и необходимым количеством компрессорных станций (затраты на обслуживание). Стоимость сооружений сильно колеблется, но на практике расходы не превышают 0,2 долл./ (Гдж · 10<sup>3</sup> км).

Сжимаемость газа дает возможность получить дополнительную выгоду. Трубопровод сам по себе может быть использован в качестве временного хранилища за счет закачивания в него газа с большим расходом, чем это требуется на выходе. При этом сжатый газ накапливается. Для трубопровода, описанного выше, энергия, запасенная в 100-километровом отрезке, оказывается равной

$$0,79 (32 \text{ кг/м}^3) (50 \text{ МДж/кг}) (10^5 \text{ м}) (0,3 \text{ м})^2 = 11,3 \cdot 10^6 \text{ МДж/100 км.}$$



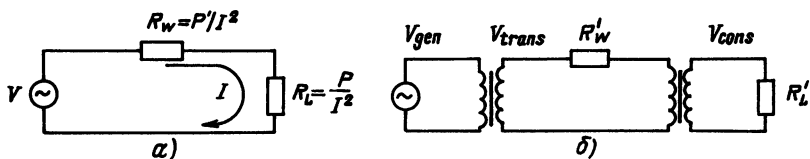


Рис. 16.6. Передача электроэнергии. Подключение генератора непосредственно к нагрузке с сопротивлением  $R_w$  через проводную линию с конечным сопротивлением  $R_L$  (а). Более приемлемый способ с повышением напряжения генератора для передачи с последующим понижением у потребителя (б)

Такой способ аккумулирования оказывается весьма существенным.

**Передача электроэнергии.** Предположим, что в двух различных системах одинаковые полезные мощности передаются одинаковым сопротивлениям  $R$  при различных напряжениях  $U_1$  и  $U_2$  по проводам с одинаковым сопротивлением на единицу длины (рис. 16.6). Токи в системах соответственно равны  $I_1 = P/U_1$  и  $I_2 = P/U_2$ , а соотношение потерь в системах

$$P'/P_2 = I_1^2 R / I_2^2 R = (P/U_1)^2 (U_2/P)^2 = U_2^2 / U_1^2. \quad (16.24)$$

Значительно меньшие мощности рассеиваются в системах, работающих при повышенных напряжениях. Низковольтные системы сравниваются с высоковольтными по значениям потерь только при использовании более дорогих кабелей большего сечения. Например, если электроэнергия передается при обычном бытовом напряжении (220 В), то стоимость кабеля оказывается ограничивающим фактором уже при расстоянии более 200 м. Если передавать энергию при еще более низких напряжениях (порядка 12 В), трудности становятся непреодолимыми.

Указанные факторы лежат в основе проектирования любых электрических силовых сетей. Обычные вращающиеся электрогенераторы лучше всего работают при напряжении около 10 кВ. Та легкость, с которой переменное напряжение может быть преобразовано в постоянное, повышено или понижено, объясняет, почему системы переменного напряжения стали сейчас предпочтительными для всех, даже самых малых, сетей. Как показано на рис. 16.6, б, получаемое от генератора напряжение повышается трансформатором, с тем чтобы быть пониженным до требуемого значения у потребителя. Значение напряжения ограничивается диэлектрическим пробоем воздуха вокруг проводов и качеством их изоляции от металлических опор линий высоковольтных передач, находящихся под потенциалом Земли. Усовершенствование изоляторов позволило повысить напряжение для передачи на дальние расстояния от 6000 В в 1900 г. до более чем 200 000 В в наши дни.

Разрабатываемые сейчас преобразователи на еще большие напряжения по всей вероятности не дадут существенного улучшения экономических показателей линий электропередачи. Это же справедливо для высоковольтных систем постоянного тока, обладающих определенными преимуществами при передаче на большие расстояния, но требующих более дорогих преобразователей.

Привлекает внимание применение сверхпроводящих линий, отличающихся нулевым сопротивлением, но они могут работать лишь при очень низких температурах (меньше —  $260^{\circ}\text{C}$ ). Обслуживание подобных низковольтных систем на больших расстояниях затруднено, и подобные линии пока рассматриваются лишь как перспективные<sup>1</sup>.

Крупные электростанции обычно объединяются в достаточно большие энергосистемы, так что если одна из станций останавливается на профилактику, ремонт или по экономическим соображениям, ее нагрузку берут на себя другие. Так как все достаточно крупные энергосистемы могут быстро компенсировать колебания в потреблении энергии (примерно 20%), то они могут с такой же легкостью компенсировать и подобные колебания в ее выработке. Поэтому мощности электростанций, работающих на преобразовании непостоянных источников возобновляемой энергии, могут непосредственно подаваться в такие системы. За счет этого же становится возможным включать в энергосистемы станции с непредсказуемыми колебаниями выработки электроэнергии, например ВЭС. Легче всего осуществлять управление энергосистемой, если в ней есть достаточно крупная ГАЭС (или ГАЭС — *прим. пер.*).

**Транспорт биомассы.** Биомассу можно доставлять контейнерами подходящего размера вручную, по дорогам, по рельсам, по водным путям. Однако из-за низкой плотности большинства видов биомассы редко бывает экономически целесообразно перевозить ее на большие расстояния (более 1000 км). Впрочем, даже на средних расстояниях (1—1000 км) неоправданно дорого перевозить биомассу только ради получения энергии. Экономически и экологически оправданным оказывается энергетическое использование потока биомассы только в том случае, когда ее предварительно используют для других целей, например при извлечении сахара из сахарного тростника. В этом случае поток использованной биомассы идет на топливо для той же фабрики. Тогда транспортировка топлива может классифицироваться как «чистая» (см. § 11.1). В свою очередь биотопливо может передаваться и на средние, и даже на длинные дистанции после преоб-

---

<sup>1</sup> Эта проблема уже имеет принципиальное решение в связи с последними открытиями в области высокотемпературной сверхпроводимости.— *Прим. пер.*

разования сырой биомассы (например, посредством пиролиза, см. § 11.5).

В качестве альтернативы биомасса может использоваться непосредственно вблизи ее источника. Так обычно происходит при сжигании древесины, остающейся наиболее важным источником энергии в большинстве развивающихся стран.

**Тепло.** Движение тепла внутри зданий через специально встроенные калориферы или по трубам парового отопления — основной пример передачи энергии на очень короткие расстояния. Это особенно актуально для холодного климатического пояса, где на обогрев идут основные затраты энергии (см., например, рис. 16.2). Передача тепла с помощью пара используется также во многих производственных процессах.

Передача тепла ограничивается малыми расстояниями из-за тепловых потерь через стенки трубопроводов.

*Пример 16.4. Потери тепла трубопроводом парового отопления.* Трубопровод диаметром 5 см используется для подачи тепла на расстояние 100 м. Он изолирован с помощью слоя стекловаты толщиной  $x=1$  см. Оцените потери тепла вдоль трассы, приняв  $T_a=10^\circ\text{C}$ .

*Решение.* В качестве первого приближения примем, что пар имеет температуру  $T_v=100^\circ\text{C}$  вдоль всего трубопровода (пар высокого давления в действительности имеет более высокую температуру, см. справочники по инженерной термодинамике). Теплопроводность стекловаты  $\lambda=0,04$  Вт/(м·К) — подобно другим изоляторам, использующим воздушные микропоры. Основной вид потерь тепла — теплопроводность через изолятор, таким образом, согласно (3.9)

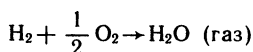
$$P_{\text{loss}} = -\lambda \Delta T / \Delta x = \\ = (0,04 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}) (100 \text{ м}) (0,06) (100 - 10^\circ\text{C}) / (0,01 \text{ м}) = 6,8 \text{ кВт}.$$

Этот расчет выполнен без учета скорости потока в трубопроводе. Очевидно, что при передаче больших потоков тепла (более 10 МВт) относительные потери соответственно уменьшаются. Во многих городах функционируют действующие на этом принципе районные теплосети.

Другой способ транспортировки больших количеств тепловой энергии на короткие расстояния — использование тепловых труб. В таких трубах, частично заполненных жидким, а частично — парообразным теплоносителем, круговорот которого происходит за счет капиллярных явлений в пористом фитиле, эффективная теплопроводность оказывается выше, чем у меди.

### Задачи

**16.1.** Изменение энтальпии, свободной энергии и энтропии при образовании воды в процессе реакции



составляет соответственно

$$\Delta H = -242 \text{ кДж/моль}, \Delta G = -228 \text{ кДж/моль}, \Delta S = -64 \text{ Дж/(К}\cdot\text{моль)}.$$

Вычислите температуру, выше которой  $\text{H}_2\text{O}$  термодинамически нестабильна.

*Рекомендация:* воспользуйтесь (16.1).

**16.2.** Пассажирский автобус, испытывавшийся в Швейцарии, приводился в движение с помощью энергии, запасенной в маховике. Маховик разогнался на стоянках электромотором, подключаемым к электросети. Маховик представлял собой сплошной стальной цилиндр массой 1000 кг, диаметром 180 см и мог вращаться с частотой 3000 об/мин.

а) Какова кинетическая энергия маховика при максимальной скорости?

б) Каково среднее время между стоянками для зарядки, если средняя мощность, потребляемая автобусом, составляет 20 кВт?

**16.3.** Маховик из трех одинаковых стержней, вращающихся вокруг общего центра, выполнен из композита на основе стекловолокна плотностью  $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$  и с пределом прочности  $\sigma = 3500 \text{ МН/м}^2$ . Волокна направлены вдоль стержней и связаны между собой с помощью минимального количества компаунда (10%) с пренебрежимой прочностью и подобной стекловолокну плотностью. Определите максимальную достижимую с помощью такого маховика плотность энергии. Какова соответствующая угловая скорость при  $a = 1,0 \text{ м}^2$ .

**16.4.** Проверьте, что данные, приведенные на рис. 16.2, соответствуют действительности.

а) Население Великобритании составляет примерно 50 млн. человек. Какова общая потребность в энергии в расчете на одного человека по сравнению со средним мировым 2 т условного топлива?

б) Каким образом «нетепловые» потребности изменяются от сезона к сезону? Какому типу промышленной деятельности это соответствует?

в) Пик потребления, отмечаемый зимой, соответствует дневной температуре  $-3^\circ \text{C}$ . Сколько тепла приходится на одно хозяйство? Вероятно ли это? (График, соответствующий потреблению тепла (см. рис. 16.2) включает и нехозяйственное использование).

г) Примените данные гл. 4 (особенно рис. 4.16) для оценки количества солнечного тепла, падающего на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальной и вертикальной (южная сторона) поверхностей в зависимости от сезона, приняв, что Великобритания расположена на  $50^\circ$  сев. широты. Какова типичная эффективность солнечного нагревателя? Какая площадь коллектора необходима, чтобы обеспечить мощность, требуемую на обогрев согласно рис. 16.2? Будет ли эффективным использование пассивных солнечных устройств в сочетании с теплоизоляцией, управляемой вентиляцией?

д) Какова примерно электрическая мощность, получаемая с  $1 \text{ м}^2$  площади, ометаемой ветроколесом при средней скорости ветра  $8 \text{ м/с}$  [см. (9.73)]? Суша и спокойные прибрежные воды Великобритании можно (достаточно грубо) аппроксимировать двумя прямоугольниками  $1000 \cdot 200 \text{ км}$ , обращенными большими сторонами к преимущественным ветрам. Предположим, что используются ВЭУ с ветроколесом диаметром 100 м при средней скорости  $8 \text{ м/с}$  на оси колеса. Сколько ВЭУ потребуется, чтобы на территории всей страны вырабатывать среднюю мощность 30 ГВт? Каково было бы среднее расстояние между ними, если

бы половина установок размещалась на суше, а половина — на поверхности воды?

е) Воспользуйтесь картой распределения мощности волн (см. рис. 12.12), чтобы определить, какова должна быть суммарная протяженность линии преобразователей волновой энергии вдоль западного и северного побережья Великобритании для получения мощности 30 ГВт.

16.5. Наибольшая величина магнитной индукции, которую можно сравнительно просто получить с помощью обычного электромагнита,  $B_0 \sim 1$  Тл. Плотность энергии магнитного поля равна  $W_V = B^2/2\mu_0$ . Определите  $W_V$  при  $B = B_0$ .

16.6. Рассчитайте энергетические потоки в следующих случаях:

а) В 1984 г. около 30 млн. баррелей нефти в день вывозилось судами из района Персидского залива (1 баррель = 180 л).

б) По трубопроводу, проложенному от Ирака до Средиземного моря, ежегодно перекачивается 10 млн. т сырой нефти.

в) Семья из четырех человек в домашнем хозяйстве использует на приготовление пищи 13 кг сжиженного газа.

г) Автомобиль той же семьи пробегает в год 8000 км, расходуя 7 л/км.

д) Сельский житель в Папуа (Новая Гвинея) тратит 2 ч, чтобы принести на своей спине вязанку дров массой 20 кг.

е) 3 т древесного топлива доставляют в город колесным транспортом при скорости 30 км/ч.

16.7. Газообразный метан ( $\text{CH}_4$ ) подается по стальному трубопроводу диаметром 30 см. Вдоль трубопровода на расстоянии 100 км друг от друга расположены компрессорные станции. На каждой из них давление газа повышается с 3 до 6 МПа. Определите массовый (а) и энергетический (б) потоки. Какой объем газа ежедневно перекачивает каждая компрессорная станция (в)? Рекомендация: предварительно определите  $\zeta$ , положив число Рейнольдса достаточно высоким. Затем найдите  $m$  и изменение плотности. Если необходимо, то сделайте второе приближение. Вязкость метана при заданных давлениях равна  $10^{-5}$  Н·с/м<sup>2</sup>.

16.8. Высоковольтная (220 кВ) линия электропередачи протяженностью 200 км связывает город с ГЭС мощностью 200 МВт. Провода линии рассчитаны на рассеяние 1% передаваемой мощности. Определите необходимое поперечное сечение проводов и объясните, почему потери 1% мощности экономически предпочтительнее потерям в 10 или в 0,1%.

### Решения

16.1. 3800 К (считаем, что  $\Delta H$  и т. д. независимы от  $T$ ).

16.2. а) 20 МДж; б) 16 мин.

16.3. 0,5 МДж/кг;  $1,8 \cdot 10^3$  рад/с = 17 000 об/мин.

16.4. а) 2 т условного топлива в год умножить на  $50 \cdot 10^6 = 150$  ГВт.

б) В среднем на 60 ГВт; перерабатывающая промышленность и т. д.

в) 14 кВт на хозяйство; нет, реальная потребность около 1 кВт.

г) По графиком рис. 4.16 25 м<sup>2</sup> на дом летом, 360 м<sup>2</sup> зимой. Возможно, однако маловероятно без дополнения тепловым аккумулятором.

д)  $90 \text{ Вт/м}^2$ . При диаметре ветроколес  $100 \text{ м}$  необходимо примерно  $30\,000 \text{ ВЭУ}$ . Площадь каждой равна  $2 \cdot (2 \cdot 10^{11} \text{ м}^2) / 30\,000$ . Среднее расстояние — около  $3 \text{ км}$ .

е)  $400 \text{ км}$  при  $70 \text{ кВт/м}$ . Соответствует.

*Примечание:* этот «пакет» ответов показывает, что применение возобновляемой энергии сулит значительный выигрыш даже для страны, обладающей собственными источниками нефти и газа.

**16.5.**  $0,4 \text{ МДж/м}^2$ .

**16.6.** См. табл. 16.2.

**16.7.** а)  $11 \text{ кг/с}$ ; б)  $540 \text{ МВт}$ ; в)  $1,3 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{день}$ .

**16.8.** В случае медного провода полное поперечное сечение равно  $1500 \text{ мм}^2$  (4 проводника диаметром  $22 \text{ мм}$  каждый).

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Алферов Ж. И., Бородин А. В.** Земные профессии Солнца. М.: Сов. Россия, 1981.
- Андерсон Б.** Солнечная энергия (Основы строительного проектирования): Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1982.
- Ахметов Р. Б.** Перспективы использования нетрадиционных источников энергии. М.: Информэнерго, 1985.
- Брикворт Б.** Солнечная энергия для человека: Пер. с англ. М.: Мир, 1976.
- Вершинский Н. В.** Энергия океана. М.: Наука, 1986.
- Ветроэнергетика:** Новейшие разработки/Под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- Выморочков Б. М.** Геотермальные электростанции. М.-Л.: Энергия, 1966.
- Геотермальное теплоснабжение/А. Г. Гаджиев, Ю. И. Султанов, П. Н. Ригер и др.** М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Гриликес В. А.** Солнечные космические электростанции. Л.: Наука, 1986.
- Гуля Н. В.** Накопители энергии. М.: Наука, 1980.
- Даффи Дж., Бекман У. А.** Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: Пер. с англ. М.: Мир, 1977.
- Егоров Н. И.** Физическая океанография. Л.: Гидрометеоздат, 1966.
- Зоколей С. В.** Солнечная энергия и строительство: Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1979.
- Использование энергии приливных и ветровых волн.** Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984.
- Коробков В. А.** Преобразование энергии океана. Л.: Судостроение, 1986.
- Лидоренко Н. С., Стребков Д. С.** Нетрадиционная энергетика. М.: Знание, 1986.
- Мак-Вейг Д.** Применение солнечной энергии: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981.
- Мак-Кормик М.** Преобразование энергии волн: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Марочек В. И., Соловьев С. П.** Пасынки энергетике. М.: Знание, 1961.
- Методы преобразования энергии океана.** Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983.
- Непорожний П. С., Обрезков В. И.** Введение в гидроэнергетику: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1982.
- Основы общей биологии:** Пер. с нем. М.: Мир, 1982.
- Преобразование тепловой энергии океана.** Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984.
- Преобразование солнечной энергии.** Аспекты физики твердого тела: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- Применение солнечной энергии:** Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981.
- Приливные электростанции/Л. Б. Бернштейн, В. Н. Силаков, Б. Л. Эрлихман и др.** М.: Энергоатомиздат, 1986.

**Сассон А.** Биотехнология: свершения и надежды: Пер. с англ. М.: Мир, 1967.

**Системы** извлечения тепла земной коры и методы их расчета/А. И. Щербаков, А. С. Цырульников, Э. И. Мерзляков, И. А. Рыженко. Киев: Наукова думка, 1986.

**Сичкарев В. И.** Основы исследования и разработки волновых энергетических станций. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987.

**Шефтер Я. И.** Использование энергии ветра. М.: Энергоатомиздат, 1983.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию .....	3
Предисловие авторов .....	7
<b>Глава 1. Основы использования возобновляемых источников энергии .....</b>	<b>10</b>
1.1. Введение .....	10
1.2. Основные понятия и определения .....	12
1.3. Научные принципы использования возобновляемых источников энергии .....	17
1.4. Технические проблемы использования возобновляемых источников энергии .....	21
1.5. Социально-экономические последствия развития энергетики на возобновляемых источниках энергии .....	27
<b>Глава 2. Основы механики жидкости .....</b>	<b>30</b>
2.1. Введение .....	30
2.2. Закон сохранения энергии, уравнение Бернулли .....	31
2.3. Закон сохранения количества движения .....	33
2.4. Вязкость .....	34
2.5. Турбулентность .....	35
2.6. Трение при течении в трубах .....	36
<b>Глава 3. Теплоперенос .....</b>	<b>42</b>
3.1. Введение .....	42
3.2. Метод тепловой цепи и терминология .....	43
3.3. Теплопроводность .....	45
3.4. Конвективный теплообмен .....	47
3.5. Радиационный теплоперенос .....	56
3.6. Свойства прозрачных веществ .....	67
3.7. Теплоперенос посредством теплоносителя .....	68
3.8. Смешанный теплоперенос и его тепловая цепь .....	70
<b>Глава 4. Солнечное излучение .....</b>	<b>73</b>
4.1. Введение .....	73
4.2. Космическое солнечное излучение .....	74
4.3. Составляющие излучения .....	75

4.4. Геометрия Земли и Солнца .....	76
4.5. Расположение приемника относительно Солнца .....	80
4.6. Влияние земной атмосферы .....	83
4.7. Измерения солнечной энергии .....	88
4.8. Оценки солнечной энергии .....	89
<b>Глава 5. Нагревание воды солнечным излучением .....</b>	<b>94</b>
5.1. Введение .....	94
5.2. Расчет теплового баланса, общие замечания .....	96
5.3. Открытые нагреватели .....	97
5.4. Закрытые нагреватели .....	100
5.5. Системы с изолированным накопителем .....	104
5.6. Селективные поверхности .....	108
5.7. Вакуумированные приемники .....	110
<b>Глава 6. Другие применения солнечной энергии .....</b>	<b>116</b>
6.1. Введение .....	116
6.2. Подогреватели воздуха .....	117
6.3. Зерносушилки .....	118
6.4. Солнечные отопительные системы .....	121
6.5. Охлаждение воздуха .....	124
6.6. Опреснение воды .....	126
6.7. Солнечные пруды .....	129
6.8. Концентраторы солнечной энергии .....	130
6.9. Солнечные системы для получения электроэнергии .....	134
<b>Глава 7. Фотоэлектрическая генерация .....</b>	<b>140</b>
7.1. Введение .....	140
7.2. Кремниевый $p - n$ переход .....	141
7.3. Поглощение фотонов .....	149
7.4. Потребляемая солнечная энергия .....	152
7.5. Фотоэлектрические свойства цепи и нагрузки .....	154
7.6. Ограничения эффективности солнечных элементов .....	157
7.7. Конструкции солнечных элементов .....	163
7.8. Типы и конструкции фотоэлементов .....	166
7.9. Фотоэмиссионные и термоэмиссионные системы .....	173
<b>Глава 8. Гидроэнергетика .....</b>	<b>176</b>
8.1. Введение .....	176
8.2. Основные принципы использования энергии воды .....	177
8.3. Оценка гидроресурсов для небольших станций .....	178
8.4. Активные гидротурбины .....	181
8.5. Реактивные гидротурбины .....	185
8.6. Гидроэлектростанции .....	188
8.7. Гидравлический таран .....	191
	<b>389</b>

<b>Глава 9. Ветроэнергетика</b> .....	195
9.1. Введение .....	195
9.2. Классификация ветроустановок .....	199
9.3. Основы теории ветроэнергетических установок .....	203
9.4. Режимы работы ветроколеса .....	211
9.5. Метод линий тока .....	216
9.6. Характеристики ветра .....	217
9.7. Использование ветроколесом энергии ветра .....	227
9.8. Производство электроэнергии с помощью ветроэнергетических установок .....	230
9.9. Производство механической работы .....	237
9.10. Перспективы использования ВЭУ .....	239
<b>Глава 10. Фотосинтез</b> .....	243
10.1. Введение .....	243
10.2. Трофический уровень фотосинтеза .....	245
10.3. Фотосинтез на уровне растений .....	248
10.4. Термодинамический анализ .....	253
10.5. Фотофизика .....	256
10.6. Фотосинтез на молекулярном уровне .....	259
10.7. Искусственный фотосинтез .....	264
<b>Глава 11. Биотопливо</b> .....	266
11.1. Введение .....	266
11.2. Классификация биотоплива .....	268
11.3. Производство биомассы для энергетических целей .....	271
11.4. Сжигание биотоплива для получения тепла .....	276
11.5. Пиролиз (сухая перегонка) .....	281
11.6. Другие термохимические процессы .....	284
11.7. Спиртовая ферментация (брожение) .....	286
11.8. Получение биогаза путем анаэробного сбраживания .....	289
11.9. Агрохимические способы получения топлива .....	295
<b>Глава 12. Энергия волн</b> .....	297
12.1. Введение .....	297
12.2. Волновое движение .....	299
12.3. Энергия и мощность волны .....	303
12.4. Описание реальных волн .....	308
12.5. Устройства для преобразования энергии волн .....	311
<b>Глава 13. Энергия приливов</b> .....	318
13.1. Введение .....	318
13.2. Причины возникновения приливов .....	320
13.3. Усиление приливов .....	326
13.4. Мощность приливных течений .....	329
13.5. Мощность приливного подъема воды .....	330
13.6. Перспективные районы строительства приливных электростанций .....	333

<b>Глава 14. Преобразование тепловой энергии океана .....</b>	<b>336</b>
14.1. Введение .....	336
14.2. Теплообменники .....	340
14.3. Требования к насосным агрегатам .....	345
14.4. Другие практические соображения .....	345
<b>Глава 15. Геотермальная энергия .....</b>	<b>348</b>
15.1. Введение .....	348
15.2. Геофизика .....	349
15.3. Анализ свойств сухих горных пород и естественных водоносных пластов .....	352
15.4. Использование геотермальных ресурсов .....	356
<b>Глава 16. Аккумуляция и передача энергии на расстояние .....</b>	<b>360</b>
16.1. Значение процессов аккумуляции и передачи энергии .....	360
16.2. Биологическое аккумуляция .....	364
16.3. Химическое аккумуляция .....	364
16.4. Аккумуляция тепла .....	366
16.5. Аккумуляция электроэнергии: свинцово-кислотные батареи ...	369
16.6. Топливные элементы .....	373
16.7. Механическое аккумуляция .....	374
16.8. Передача энергии .....	377
<b>Список рекомендуемой литературы .....</b>	<b>386</b>

Производственное издание

*Твайделл Джон, Уэйр Антони*  
**Возобновляемые источники энергии**

Заведующий редакцией *А. Б. Желдыбин*

Редактор *Л. В. Белова*

Художник переплета *А. Т. Кирьянов*

Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*

Технический редактор *О. Д. Кузнецова*

Корректор *Е. С. Арефьева*

ИБ № 2770

Сдано в набор 17.07.89. Подписано в печать 12.12.89. Формат 60 × 88<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,01. Усл. кр.-отг. 24,01. Уч.-изд. л. 26,05.  
Тираж 3450 экз. Заказ 2704. Цена 2 р.

---

Энергоатомиздат. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

---

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО. «Первая Образцовая типография» Государственного комитета СССР по печати. 113054, Москва, Валовая, 28