
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИР

B. J. BRINKWORTH

SOLAR ENERGY FOR MAN

Compton Press
London 1972

Б. ДЖ. БРИНКВОРТ

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА

Перевод с английского
канд. техн. наук В. Н. Оглоблева

Под редакцией и с предисловием
д-ра техн. наук Б. В. Тарнижевского

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА 1976

6П2.7
Б87

Бринкворт Б.

Б87 Солнечная энергия для человека. Пер. с англ. В. Н. Оглоблева. Под ред. и с предисл. Б В Тарнижевского. М., «Мир», 1976.

291 с. с илл. (В мире науки и техники.)

Рост населения планеты и бурный технический прогресс требуют новых источников энергии. Солнечная энергия с ее неиссякаемым потенциалом открывает перед человечеством огромные перспективы.

Природа солнечного излучения, его взаимодействие с земной атмосферой, проблема преобразования солнечной энергии в другие виды энергии, возможности использования солнечной энергии человеком — таков круг вопросов, рассматриваемых в книге английского ученого, преподавателя Кардиффского университета Б. Дж. Бринкворта.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся проблемами современной энергетики и перспективами ее развития.

Б $\frac{30317-196}{041(01)-76}$ 196—76 6П2.7

Редакция научно-популярной и научно-фантастической литературы

© Перевод на русский язык, «Мир», 1976

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Проблема использования солнечной энергии, которая долгое время являлась предметом изучения лишь отдельных исследователей, сегодня привлекает к себе пристальное внимание ученых и государственных деятелей, журналистов и футурологов. Исследования в области использования солнечной энергии упоминаются в межгосударственных и многосторонних соглашениях по научно-техническому сотрудничеству.

Такая перемена произошла не случайно. В 1973 г., когда во многих западных странах разразился так называемый энергетический кризис, человечество впервые реально почувствовало, что запасы ископаемого топлива, и прежде всего жидкого топлива (нефти), не беспредельны. Конечно, непосредственные причины нынешнего энергетического кризиса носят главным образом политический и экономический характер. Тем не менее в области энергетических ресурсов и производства энергии угроза истощения запасов топлива объективно существует, что заставляет заблаговременно изыскивать новые, достаточно мощные источники энергии.

Кроме того, в последние годы весьма остро встал вопрос о защите окружающей среды, поскольку развитие промышленности ведет к необратимым нарушениям существующего в природе равновесия. Современная топливная энергетика играет не последнюю роль в загрязнении воздушного и водного бассейнов вредными выбросами, а также в «тепловом загрязнении» окружающей среды. Таким образом, новый энергоисточник, призванный заменить ископаемое топливо и обеспечить энергетические потребности будущего,

должен быть не только достаточно мощным, но и достаточно «чистым».

На современном уровне развития науки и техники весьма перспективными представляются два энергоисточника — управляемый термоядерный синтез и солнечная энергия. Известно, что во многих странах предпринимаются значительные усилия для успешного решения задачи управления термоядерной реакцией. В этих исследованиях ведущая роль принадлежит нашей стране. Хотя сегодня эта проблема еще не решена, однако результаты уже проведенных исследований позволяют надеяться на успех в течение ближайших 20—25 лет. Некоторые исследователи полагают, что к концу нынешнего — началу будущего века управляемый термоядерный синтез будет применяться в промышленных масштабах для производства электроэнергии.

Разделяя этот оптимизм, нельзя не напомнить об одном недостатке атомной и термоядерной (равно как и топливной) энергетики, на который указал академик Н. Н. Семенов [1]. Дело в том, что все виды энергии (электрическая, механическая), производимые на земле, в конечном итоге трансформируются в тепловую энергию, а производство энергии в количестве, составляющем 5% от поступающей на землю солнечной радиации (что в 700 раз превышает современное мировое производство энергии), может, по мнению Н. Н. Семенова, привести к необратимым изменениям теплового баланса и климата нашей планеты. В этом и состоит угроза «теплового загрязнения» при производстве энергии на основе химических (ископаемое топливо) или ядерных реакций.

Оценивая в самых общих чертах перспективы будущего существования человечества с учетом прогнозируемого значительного роста населения нашей планеты, мы должны отметить три основные проблемы, стоящие перед человечеством: обеспечение населения пищей, энергией и сохранение природных условий, пригодных для жизни. Решение этих трех задач в значительной степени может быть связано с использованием солнечной энергии.

Действительно, как источник энергии для реакции фотосинтеза — основного природного процесса полу-

чения органических веществ и в конечном итоге продуктов питания — солнечная радиация незаменима.

Что касается обеспечения человечества энергией, то солнечное излучение по своим энергетическим ресурсам вполне способно удовлетворить энергетические потребности будущего.

Наконец, солнечная энергия является исключительно «чистым» видом энергии. Ее использование не связано с загрязнением окружающей среды и нарушением теплового баланса нашей планеты.

Из сказанного не следует, конечно, что солнечная энергия — единственная панацея для человечества, тем не менее эта проблема стоит того, чтобы уделить ей серьезное внимание и объективно оценить ее перспективы.

Вопросам энергетики будущего и возможностям использования солнечной энергии в последнее время посвящено значительное число работ. Из отечественных публикаций, рассчитанных на широкого читателя, наиболее интересными и обоснованными являются статьи академиков В. А. Кириллина и Н. Н. Семенова [2, 1]. Большое внимание этой проблеме уделяет и зарубежная печать, хотя в ней нередко появляются сообщения, которые носят спекулятивный, несерьезный характер и могут дезориентировать неподготовленного читателя.

В этой связи хочется отметить, что книга Б. Бринкворта привлекает прежде всего серьезностью и объективностью постановки и изложения вопросов, связанных с использованием солнечной энергии. Она вышла в свет в 1972 г., и разразившийся вскоре в капиталистических странах энергетический кризис не нашел в ней отражения. Тем не менее автор объективно оценивает перспективы истощения ресурсов ископаемого топлива и необходимость изыскания новых источников для энергетики будущего.

Книга Б. Бринкворта обращена к самым широким читательским кругам и преследует цель познакомить их с различными аспектами использования солнечной энергии. Автор не описывает тех или иных проектов и разработок, связанных с созданием конкретных солнечных установок, а стремится изложить научные

основы, на которых базируется современная техника использования солнечной энергии.

Несмотря на ряд преимуществ солнечной радиации как энергоисточника («чистота», повсеместная распространенность, «бесплатность» и т. п.), использование солнечной энергии не получило еще заметного распространения. Это обусловлено особенностями солнечной радиации и техническими трудностями, связанными с ее преобразованием. Так, солнечная радиация весьма рассеянна, имеет малую плотность (удельную мощность), изменчива во времени. Эффективность преобразования солнечной лучистой энергии в механическую и электрическую ограничивается и принципиальными положениями физики и термодинамики. В книге Б. Бринкворта эти трудности и ограничения рассматриваются весьма подробно, что позволяет реально оценить технические возможности преобразования и использования солнечной энергии. Может даже показаться, что изложению элементарных основ термодинамики, молекулярной физики, квантовой теории и т. п. уделено слишком много места, тогда как собственно задачи использования солнечной энергии представлены весьма сжато. Между тем, следует иметь в виду, что техника использования солнечной энергии (гелиотехника) не является какой-то специфической изолированной областью, а базируется на общих фундаментальных законах природы и широко использует достижения многих сфер современной науки и техники. В этой связи такое изложение, позволяющее с научных позиций оценить возможности и трудности использования солнечной энергии с учетом популярного характера книги и широты читательской аудитории, представляется весьма целесообразным и необходимым.

Однако не со всеми оценками и высказываниями автора можно согласиться. Советский читатель, несомненно, отметит слабость в авторских суждениях о причинах разделения стран на «бедные» и «богатые», о различии в уровне жизни «развитых» и «развивающихся» стран, о сырьевом и энергетическом кризисе и т. п.

Поскольку книга Бринкворта вышла в 1972 г., целесообразно коротко остановиться на некоторых

современных тенденциях и достижениях в области использования солнечной энергии как за рубежом, так и в нашей стране.

Как уже отмечалось, во многих странах энергетический кризис послужил толчком к изысканию новых источников энергии. Исследования в области солнечной энергии занимают в этом ряду не последнее место. В таких странах, как США, Япония, ФРГ, они проводятся на уровне национальных программ, рассчитанных на длительный период.

Так, в США в ближайшие 5 лет на эти исследования предполагается выделить 1 млрд. долл. По мнению американских специалистов, достижения в области науки и техники, а также повышение цен на органическое топливо обеспечивают необходимые условия для того, чтобы к 1980 г. наряду с традиционными коммерческими энергоресурсами нашла применение и солнечная энергия. При этом ближайшей задачей является использование солнечной энергии для отопления и охлаждения зданий, на что в США расходуется до 25% всей потребляемой энергии. Уже теперь в США насчитывается более 30 зданий, в том числе 4 школы, где в порядке эксперимента установлены солнечные отопительные системы. Широкое применение солнечной энергии для таких целей не требует решения фундаментальных технических проблем. Снижение капиталовложений при создании систем солнечного отопления, кондиционирования и горячего водоснабжения зависит в большей степени от масштабов их промышленного изготовления и применения, чем от поисков и разработки каких-либо принципиально новых технических решений. По оценке американских специалистов, эти системы окажутся полностью конкурентоспособными при затратах порядка 10 долл. на 1 Гкал энергии. К 1985 г. они смогут заменить 10—20 млн. т условного топлива.

Что касается перспектив преобразования солнечной энергии в электрическую, то, по мнению американских специалистов, они являются более отдаленными и связаны с развитием фотоэлектрической технологии и необходимостью значительного (на два порядка) снижения стоимости фотопреобразователей. Предполагается, что к середине 80-х годов в результате резкого

увеличения ассигнований на эти исследования данная задача может быть успешно решена. Разрабатывается даже проект космической фотоэлектростанции на синхронной орбите, которая будет передавать на Землю энергию в виде электромагнитного излучения в сантиметровом диапазоне с последующим обратным преобразованием ее в электроэнергию. Не вдаваясь подробно в анализ и оценку этого и других проектов, можно отметить, что перспектива создания к концу 80-х годов достаточно мощных солнечных фотоэлектростанций представляется вполне реальной.

Большой интерес проявляется к использованию солнечной энергии также и в Японии. Это понятно, поскольку Япония почти полностью лишена собственных ресурсов ископаемого топлива и целиком зависит от его импорта. В Японии разработана широкая программа исследований в области использования новых источников энергии, получившая название «Солнечный свет», которая ставит задачей обеспечение «энергетической независимости» страны. По данной программе на эти исследования до 2000 г. планируется израсходовать 3,5 млрд. долл., причем значительная часть ассигнований выделена на разработки в области фотоэлектрической технологии. В частности, к 1980 г. предполагается создать фотоэлектрическую станцию мощностью 1 МВт, а к 2000 г. — 100 МВт.

Даже в ФРГ, несмотря на относительно неблагоприятные для использования солнечной энергии климатические условия, этой проблеме уделяется серьезное внимание. Так, до 1979 г. планируется выделить 110 млн. марок на исследования главным образом по созданию систем солнечного отопления и охлаждения домов. Можно было бы продолжить перечень стран, ведущих серьезные разработки в этой области, однако из сказанного видно, что проблема использования солнечной энергии приобретает сегодня новое звучание. Следует лишь добавить, что эта проблема является теперь предметом активного международного научно-технического сотрудничества. В 1973 г. в Париже под эгидой ЮНЕСКО был созван Первый международный конгресс по использованию солнечной энергии, в котором приняли участие представители 58 стран, обсудившие более 350 докладов по различным аспектам ис-

пользования солнечной энергии (преобразование ее в электрическую, механическую, тепловую, применение в биологии, медицине, градостроительстве и т. п.).

Советскому читателю, естественно, интересно, знать, каковы достижения в этой области у нас. В нашей стране рассматриваемая проблема имеет свою историю. На нее обратил внимание еще М. В. Ломоносов, круг научных интересов которого, как известно, был необычайно широк. Не останавливаясь на отдельных исследованиях дореволюционного периода, отметим, что в СССР одним из первых серьезное внимание проблеме использования солнечной энергии уделил в 30-е годы профессор Б. П. Вейнберг. Совместно с В. Б. Вейнбергом и другими исследователями им в тот период были разработаны и опробованы солнечные аппараты для нагрева и кипячения воды, ее опреснения, получения пара и т. д.

В послевоенный период развитие техники использования солнечной энергии (гелиотехники) в нашей стране связано с именем академика АН Туркменской ССР В. А. Баума и его школы. Особенно много В. А. Баум сделал для подготовки квалифицированных специалистов в этой области.

В 1958 г. на третьем советском искусственном спутнике Земли впервые были установлены солнечные батареи, что положило начало применению фотоэлементов для непосредственного преобразования лучистой энергии в электрическую. Выдающаяся роль в развитии фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии принадлежит в нашей стране члену-корреспонденту АН СССР Н. С. Лидоренко и профессору А. П. Ландсману.

К настоящему времени исследования по использованию солнечной энергии проводятся в ряде научных учреждений Москвы, Ташкента, Ашхабада, Еревана. Советская наука в этой области занимает передовые позиции. С 1965 г. издается всесоюзный журнал «Гелиотехника», на страницах которого публикуются научные статьи и сообщения о новых исследованиях и разработках. Эти исследования охватывают вопросы разработок солнечных систем опреснения воды, отопления, кондиционирования и горячего водоснабжения, преоб-

разования солнечной энергии в электрическую с помощью фотоэлектрических, термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователей, высокотемпературных технологических процессов, осуществляемых с помощью солнечной энергии и т. п.

Имеются определенные достижения в области практического использования солнечной энергии. В Туркменской и Узбекской ССР сооружены солнечные установки для опреснения минерализованных грунтовых вод с целью их применения для водоснабжения пастбищ. В Туркмении сооружен экспериментальный трехэтажный дом с солнечным кондиционером и проектируются жилые здания, оборудованные такими солнечными кондиционерами. Экспериментальный дом с системой солнечного отопления построен в Узбекской ССР.

Солнечные водонагреватели начали применяться в СССР еще с 30-х годов. В настоящее время в Бухарской области Узбекской ССР строится специальный завод по производству солнечных водонагревателей. Разрабатываются проекты солнечных сушильных установок, теплиц, холодильников и т. п. Серьезно изучаются вопросы аккумулирования энергии, что имеет важное значение при изменчивом характере поступления солнечной радиации [3].

В ряде научных учреждений ведутся исследования в области высокотемпературной технологии с использованием концентрации солнечной энергии параболическими зеркалами.

Определенные успехи достигнуты в разработке фотоэлектрических методов преобразования солнечной энергии в плане как научных исследований, так и практического применения полученных результатов [4, 5]. Так, все современные долговременные космические объекты оборудованы солнечными батареями, которые являются основой систем бортового энергопитания. Фотоэлектрические преобразователи начинают также применяться и в наземных устройствах. В последние годы разработан и успешно испытан ряд конструкций фотоэлектрических источников питания для энергоснабжения автономных объектов. Созданы фотоэлектрические установки для привода водоподъемных электронасосов на отдаленных и пустынных

пастбищах и затворов автоматизированных ирригационных систем, энергопитания морских и речных навигационных систем световой сигнализации, радиоприемников и т. п. Так, фотоэлектрическими источниками питания оборудованы маяки и буи на Рыбинском водохранилище, на Ладожском озере и озере Байкал. Солнечная фотоэлектрическая водоподъемная установка в сочетании с солнечным опреснителем работает в Каракумах. Область применения фотоэлектрических преобразователей для народнохозяйственных целей, несомненно, будет расширяться.

Наша страна богата природными ресурсами. Мы располагаем значительными запасами ископаемого топлива — угля, нефти, газа. В обозримом будущем нам не угрожает энергетический кризис, который уже сегодня для многих стран стал суровой реальностью. Однако это не означает, что использование солнечной энергии не имеет для нас серьезного народнохозяйственного значения. Несмотря на то что большая часть территории СССР лежит в довольно высоких широтах, некоторые весьма большие районы нашей страны по своим климатическим характеристикам благоприятны для использования солнечной энергии. К этим районам относятся Средняя Азия, Казахстан, Закавказье, Северный Кавказ, Нижнее Поволжье, юг Украины. Широкое использование солнечной энергии в нашей стране может иметь большое народнохозяйственное значение, способствовать существеной экономии топлива и сохранению окружающей среды. Однако непременным условием такого использования является бо́льшая экономичность применяемых для этой цели технических средств по сравнению с устройствами, потребляющими «традиционные» энергетические ресурсы.

Председатель Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике академик В. А. Кириллин говорил: «Задача использования солнечной энергии ... для получения больших количеств электроэнергии является, конечно, актуальной. Основные усилия для ее решения должны быть направлены, с нашей точки зрения, на выработку принципиальных решений, обеспечивающих приемлемые технико-экономические показатели.

Что касается использования солнечной энергии ..., в малых масштабах, например для опреснения солоноватой воды на пастбищах, нагревания воды, сушки фруктов и т. п., ... то здесь имеются приемлемые решения, и работа должна быть не только продолжена, но и расширена» [2].

Таким образом, для развития научных и практических изысканий в области использования солнечной энергии в нашей стране открываются широкие перспективы [6].

Предлагая вниманию читателей настоящую книгу, в которой популярно изложены научные основы использования солнечной энергии, мы надеемся, что эта увлекательная и многообещающая проблема найдет себе новых приверженцев.

Б. Тарнижевский

Рекомендуемая литература

1 **Семенов Н. Н.,** Об энергетике будущего, «Наука и жизнь», 1972, № 10, 11.

2 **Кириллин В. А.,** Энергетика — проблемы и перспективы, «Коммунист», 1975, № 1, стр. 43.

3 **Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф., Трушевский С. Н.,** Аккумулирование плавлением, «Наука и жизнь», 1974, № 3.

4. **Лидоренко Н. С.,** Современное состояние исследований по прямому преобразованию солнечной энергии в электрическую, «Гелиотехника», 1969, № 6.

5. **Васильев А. М., Ландсман А. П.,** Полупроводниковые фотопреобразователи, изд-во «Советское радио», М, 1971.

6. **Лидоренко Н. С. и др.,** Возобновляющиеся источники энергии — резерв интенсификации народного хозяйства, «Коммунист», 1976, № 2, стр. 62.

I. Энергия в жизни человека

Растет лес долго, а сгорает быстро.
Луций Анней Сенека (5 г. до н. э. — 65 г. н. э.)

Наши внуки будут жить в мире, уже лишенном нефти. Использовать уголь в качестве топлива в будущем окажется нерациональным, так как с его помощью люди смогут получать различные химические вещества. В жизни народов возможны неблагоприятные изменения, и плохо, если они произойдут неожиданно. Не исключено, что беспечная эксплуатация природных видов топлива приведет к их полному уничтожению раньше, чем большинство наций достигнет того уровня развития, при котором от них можно будет отказаться.

До сих пор исчезновение традиционных видов топлива и возникновение каких-либо связанных с этим проблем представлялось чем-то невероятным. И сейчас большинство людей не подозревают о неизбежности подобных проблем. Даже если последние станут очевидными, многие люди по-прежнему будут надеяться, что специалисты найдут способы их разрешения. Их надежды, по-видимому, обоснованы. Именно ученые и инженеры должны предвидеть будущие потребности человечества и заранее делать все для их своевременного удовлетворения. Но, к сожалению, у нас слишком мало времени, чтобы предотвратить увеличение дефицита одного весьма существенного продукта — энергии. Наряду с борьбой за жилье и пищу людям придется вести борьбу за овладение источниками энергии:

Миллиард людей теснились на Земле. Колеса времени начали вращаться. Через сто пятьдесят лет их стало два миллиарда. Остановите эти колеса. Через

сто пятьдесят недель их снова только миллиард: миллиард мужчин и женщин умерли от голода. Так Олдос Хаксли представлял начало двадцатого столетия. Если даже нам удастся предотвратить подобную катастрофу, нищету и конфликты между людьми может вызвать простая нехватка энергии.

Как же избежать ее? Появление источников атомной энергии несомненно несколько скрашивает перспективу. Будем надеяться, что они помогут отсрочить энергетический кризис на некоторое время. И если за этот период человек сможет овладеть реакцией термоядерного синтеза, то кризиса удастся избежать. В настоящее время подобный путь представляется единственно возможным. Но отношение к нему в разных странах различно. Такой путь приведет к усилению существующей ныне тенденции к централизации крупномасштабной выработки энергии с последующей передачей ее потребителям в виде электричества. Одако финансирование разработок и строительства сложных и дорогостоящих линий электропередач способны взять на себя только высокоразвитые государства. Отсталые нации окажутся не в состоянии конкурировать с ними, и это приведет к их дальнейшему отставанию. Уже сейчас наметилось деление стран мира по уровню развития, и разрыв между ними все более увеличивается. В развивающихся странах энергетическая проблема имеет свою специфику: здесь нужны относительно небольшие количества энергии на разбросанных и разобщенных территориях. Более того, эти страны нуждаются в энергии именно теперь.

Проблемы, связанные с источниками энергии, появились сравнительно недавно, и с момента их возникновения прошел короткий в масштабах исторического развития срок, причем люди пока еще располагают значительными запасами таких природных видов топлива, как уголь и нефть. Однако и сейчас проводятся серьезные исследования возможностей использования энергии солнечного излучения и морских приливов, ветра и рек. Эта книга посвящена главным образом вопросам использования энергии солнечного излучения. Как мы увидим дальше, солнечная радиация слишком рассеянна и непостоянна по интенсивности, чтобы на нее можно было полагаться при круп-

номасштабном производстве энергии, хотя в принципе она могла бы полностью удовлетворить все энергетические потребности человечества. Для удовлетворения небольших запросов несомненный интерес представляют различные доступные уже сейчас методы преобразования энергии, которые и рассмотрены в книге. Мы будем неоднократно указывать на целесообразность применения этих методов в развивающихся странах, где они смогут быстро принести плоды.

В первой главе мы кратко остановимся на различных проблемах, связанных с подобного рода исследованиями, и рассмотрим некоторые обстоятельства, ограничивающие возможности преобразования и использования солнечной энергии.

Народонаселение

Неоднократно предсказывалось, что в двадцатом столетии человечество ожидает беспрецедентное увеличение численности населения — демографический взрыв. На рис. 1 показано, как изменялась численность населения земного шара в предшествующие века, и дан ее прогноз на конец столетия. Предполагается, что вплоть до XV в. на протяжении более тысячи лет общая численность населения оставалась примерно постоянной и составляла около трехсот миллионов человек. Начавшийся в XV в. рост населения чрезвычайно ускорился в нашем столетии и принял характер неконтролируемого взрыва. В период с 1400 по 1900 г. годовой прирост численности населения постепенно увеличивался от 0 до 0,75%. В настоящее время эта величина достигает 2%, а ежегодное увеличение общей численности населения равно населению Англии и составляет примерно восемь тысяч человек в час, или два человека в секунду. Если такие темпы роста сохранятся, население земного шара к концу этого столетия вновь удвоится. Следовательно, уже через 30 лет людей станет вдвое больше, чем сейчас. И поэтому только для поддержания существующего ныне жизненного уровня такого числа людей необходимо будет вдвое увеличить добычу сырья, производство пищи и предметов широкого потребления. За 30 лет придется построить еще столько же

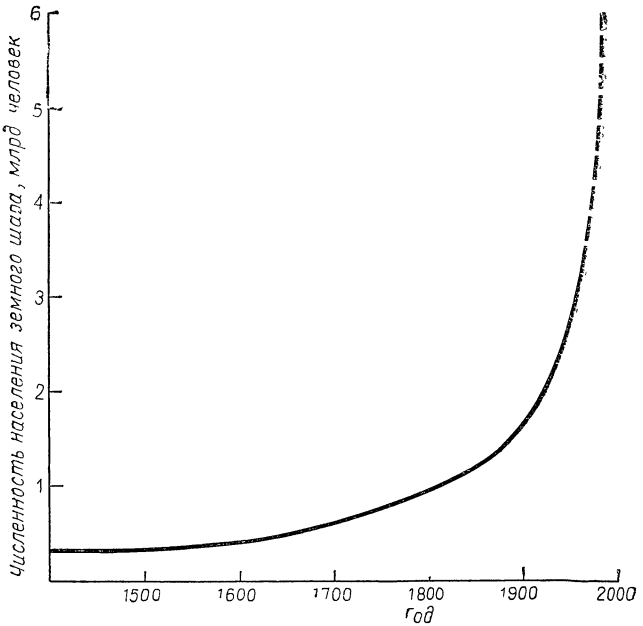


Рис. 1. Рост численности населения земного шара, 1400—2000 гг.

домов, заводов, школ и больниц, сколько их существует сейчас.

В настоящее время такой темп роста населения считается вполне реальным. Насколько опасны последствия этого? Подсчитано, что если темп роста не сдерживать, то ежегодное увеличение населения составит 40—60 человек на каждую тысячу. (Демографы предпочитают характеризовать темп роста именно в такой форме, а не говорить о 4—6% ежегодного прироста населения.) Чтобы численность населения земного шара оставалась неизменной, рождаемость должна равняться смертности. Если среднюю смертность оценить величиной $^{40}/_{1000}$, то средняя продолжительность жизни должна быть равна $^{1000}/_{40}$, или 25 годам. Поскольку на протяжении веков численность населения увеличивалась медленно, то очевидно, что тогда средняя продолжительность жизни приближалась к ука-

занным значениям. Однако продолжительность жизни некоторых людей была значительно выше средней, это позволило предположить, что человек может прожить около 100 лет. Благодаря развитию медицины и гигиены, в частности в Западной Европе, смертность постепенно снижалась. В настоящее время во всех высокоразвитых странах смертность не превышает $^{12}/_{1000}$, что соответствует средней продолжительности около 80 лет. Более того, в этих странах рождаемость снизилась до значения $^{16}/_{1000}$. Значит, численность населения в них, хотя и сравнительно медленно, но увеличивается.

В менее развитых странах за последние 30 лет в результате успехов медицины и гигиены средний показатель смертности также заметно снизился, продолжительность жизни здесь увеличилась с 25 до 50 лет. (Странам Европы для этого потребовались века.) Это произошло в основном за счет уменьшения смертности в младенческом возрасте. Вследствие значительного улучшения санитарного обслуживания и профилактики инфекционных заболеваний возраста 12—20 лет сейчас достигает более 90% детей, тогда как прежде этот показатель не превышал 50%. Такое потрясающее изменение совершилось в пределах жизни

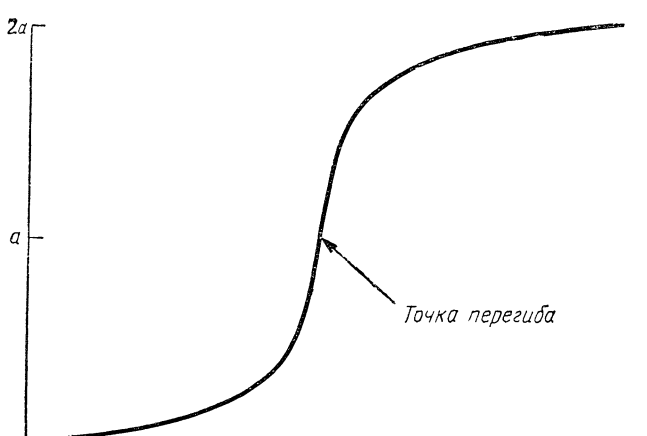


Рис. 2. Кривая изменения численности некоторых видов животных.

всего лишь одного поколения, однако обычаи и нравы не изменяются столь быстро. Демографический взрыв в этих странах можно задержать, если в них снизится рождаемость. Среднемировой показатель рождаемости по-прежнему составляет около $^{35}/_{1000}$, тогда как показатель смертности уменьшился до $^{17}/_{1000}$. Совершенно очевидно, что население земного шара будет увеличиваться до тех пор, пока рождаемость и смертность не сравняются.

Пока еще трудно предвидеть, как отразится на развитии общества такой быстрый рост численности населения. Падение рождаемости в Западной Европе происходило медленно и непрерывно, а в послевоенной Японии рождаемость упала сразу очень резко. В связи с уменьшением смертности в детском возрасте для продолжения рода совершенно не обязательно иметь много детей. Кроме того, различные социальные изменения могут привести к тому, что содержание большой семьи окажется несовместимым с приемлемым образом жизни. Установлено, что слишком высокая плотность расселения тех или иных видов животных приводит к естественному ограничению их численности. Изменение последней носит S-образный характер (рис. 2). При высоком уровне сознания и доступности многочисленных искусственных способов регулирования рождаемости людям нет необходимости следовать подобной закономерности развития, и, по-видимому, в последующие десятилетия темпы роста населения земного шара несколько снизятся.

Как видно из рисунка, кривая имеет асимметричный характер, и предельная величина, к которой стремится численность популяции, вдвое превышает ее значение в точке перегиба. Предположим, что в настоящее время изменение численности населения соответствует такой кривой и упомянутые выше возможности ее регулирования скажутся в точке перегиба через одно-два десятилетия. Тогда на основе рис. 1 мы приходим к заключению, что численность населения стабилизируется где-то на уровне 10 млрд. Это в три раза превышает нынешнюю численность населения и, по наиболее оптимистичному прогнозу, возможно, является пределом.

Условия жизни людей

Как мы видели, в развивающихся странах рождаемость превышает смертность. В результате численность населения в них быстро увеличивается, что значительно осложняет условия жизни этих народов. По сравнению с их трудностями проблемы жизни в развитом обществе, хотя они и требуют от людей больших затрат нервной энергии, времени и материальных ценностей, кажутся до смешного ничтожными.

Невозможно переоценить бедственность положения народов развивающихся стран. Нельзя не согласиться с тем, что основные жизненные потребности человека составляют пища, вода, одежда, жилье; однако и сегодня многие люди обеспечены далеко не всем из этого перечня. Качество и количество пищи, потребляемой примерно половиной населения земного шара, значительно ниже, чем это необходимо для поддержания здоровья и трудоспособности людей, а $^1/_6$ населения земного шара, или 500 млн. человек, страдает сильным истощением. Еще больше людей, употребляющих недоброкачественную пищу. В мире широко распространены болезни, вызываемые постоянным недоеданием. Различными болезнями, ослабляющими умственные и физические способности, страдают сотни миллионов детей. Эти болезни невозможно преодолеть, поскольку прожиточный минимум человека нередко составляет несколько соевых бобов в день.

Обеспечить запасы воды, незагрязненность пищевых продуктов и эффективные способы удаления отходов в этих странах по-видимому удастся лишь второму — третьему поколениям. Слабое развитие гигиены способствует широкому распространению переносчиков инфекций и паразитов. Десятки миллионов людей все еще страдают от малярии, примерно 500 млн. больны трахомой — вирусным заболеванием глаз.

Считается, что жизненные условия более $^1/_3$ человечества опасны для здоровья. Многие не имеют дома, работы и лишены перспектив ее получения. Каждый пятый ребенок на земном шаре не может посещать школу и около 800 млн. взрослых безграмотны.

С развитием международных связей всему миру стало известно, сколь велики различия в условиях жизни слаборазвитых и развитых стран. Население Африки и Азии составляет $^2/_3$ населения Земли, однако общий национальный доход этих стран не превышает $^1/_6$ общемирового дохода. Доход североамериканских стран достигает 40% общемирового дохода, тогда как в них проживает только 7% населения Земли. На каждого жителя Америки и Западной Европы приходится энергии в 20—50 раз больше, чем на его собрата в Африке или Южной Америке. Своим превосходством развитые нации в значительной мере обязаны тому огромному вниманию, которое уделяется в них развитию науки и ее применениям. Хотя в последнее время успехи науки и техники в какой-то мере благоприятно сказываются и на развивающихся странах, тем не менее с каждым новым достижением науки отставание последних все более усиливается. Некоторые из них пытаются улучшить общее состояние национальной экономики, уменьшая ее зависимость от импорта некоторых товаров и создавая отечественные образцы. Но и в таких случаях экономика развивающихся стран, несмотря на временное укрепление, имеет тенденцию к ослаблению вследствие уменьшения традиционного экспорта хлопка и каучука.

Однако не следует думать, что для сокращения разрыва между развитыми и развивающимися странами ничего не предпринимается. В настоящее время в рамках международной помощи туда направляются специалисты различных профилей: инженеры и техники, агрономы и врачи. Значительную помощь этим странам оказывает ООН. Все достижения цивилизации, избавившие народы развитых стран от голода, болезней и лишений, должны быть использованы для развития отсталых наций. Рост общественного сознания в развитых странах позволяет надеяться, что объем такой помощи в будущем возрастет.

Совсем не обязательно, чтобы экономическое развитие всюду следовало образцам, успешно проверенным в Европе, США и СССР. Проблемы пищи и воды, жилищного строительства и одежды, здоровья и образования и вообще запросы и желания людей в каждой

стране безусловно имеют свою национальную специфику.

В настоящей книге мы не можем подробно обсуждать все эти вопросы; мы остановимся на одном наиболее важном из них — вопросе обеспечения людей энергией. Проблема энергии и ее роли в судьбах и развитии людей впервые была поставлена в Европе еще во времена Промышленной революции, начавшейся в Англии около 150 лет назад. Механизация и совершенствование технологии производства отныне стали рассматриваться как ключ к общему повышению уровня жизни. Если согласиться с таким подходом, то решение многих из упомянутых проблем будет зависеть от обеспечения людей энергией.

Потребность людей в энергии

В прошлом потребление энергии росло пропорционально увеличению численности населения. Вплоть до XVI в. тепло повсеместно получали путем сжигания дров, сельскохозяйственных отходов. Использование энергии воды и ветра также уходит корнями в далекое прошлое. Тогда источники энергии можно было использовать, не считаясь с ресурсами Земли, так как запасы их легко восполнялись. Уголь в качестве топлива применяли в Англии уже в XII в., но его добыча не превышала 10^7 т в год вплоть до конца XVIII в., когда началась Промышленная революция. Теперь для развития промышленности требовалась энергия в количествах, которые не могли обеспечить только восполняемые (природные) источники. За паровым насосом Сэвери (1698) появилась машина Ньюкомена (1712), затем — машина с коленчатым валом, созданная Ваттом [1] (1781), и паровоз Тревитика (1802). Изобретение электрического генератора Пикси (1832), электрического двигателя — Граммом (1873) и открытие Фарадеем законов электромагнетизма наметили пути к широкому использованию энергии. К 1900 г. количество угля, добываемого только в Англии,

[1] Первая поршневая паровая машина была сконструирована и построена в 1763—1766 гг. русским изобретателем И. И. Ползуновым. — *Прим. ред.*

достигло $2 \cdot 10^8$ т в год. В 1857 г. началась добыча нефти в Румынии, а в 1859 г. — в США. Как при использовании угля в качестве топлива необходимо было постоянно восполнять его запасы, так и применение продуктов перегонки нефти в качестве горючего в двигателях внутреннего сгорания требовало непрерывного расширения ее добычи. В конце XIX — начале XX вв. двигатели внутреннего сгорания начали широко применяться на транспорте. К этому времени относятся изобретения бензинового двигателя Отто (1875), автомобильного двигателя Бензом (1890) и самолета братьями Райт[1] (1903).

Чтобы представить себе масштабы потребления энергии в обозримом будущем, необходимо оценить, как увеличиваются энергетические потребности человека в нашем развивающемся мире. Мы начнем со статистических данных мировой добычи угля и нефти. Как известно, при сжигании топлива входящие в его состав вещества соединяются с кислородом воздуха, а выделяющаяся в результате этого процесса энергия используется для отопления жилых домов, общественных зданий и заводов, а также для приведения в действие машин, в которых она преобразуется в работу. К. п. д. этих машин в разное время был различным, он отражал уровень технического развития общества. В последние десятилетия эффективность тепловых машин резко возросла, но, как мы покажем в гл. 5, существуют принципиальные факторы, ограничивающие дальнейшее ее увеличение. Здесь мы не будем на них останавливаться, так как наша цель — получить лишь ориентировочное представление об энергетических потребностях человечества. Если предположить, что среднее значение к. п. д. использования угля и нефти не превышает 20%, то, следовательно, на удовлетворение потребности в этом виде энергии расходуется лишь $^1/_5$ всей энергии, выделяемой при сжигании данных видов топлива. Следует также учитывать, что определенное количество энергии люди получают за счет сжигания леса, торфа и других растительных

[1] Первый самолет (летательный аппарат с паровым двигателем) был построен в 1882 г. в России А. Ф. Можайским. — *Прим ред.*

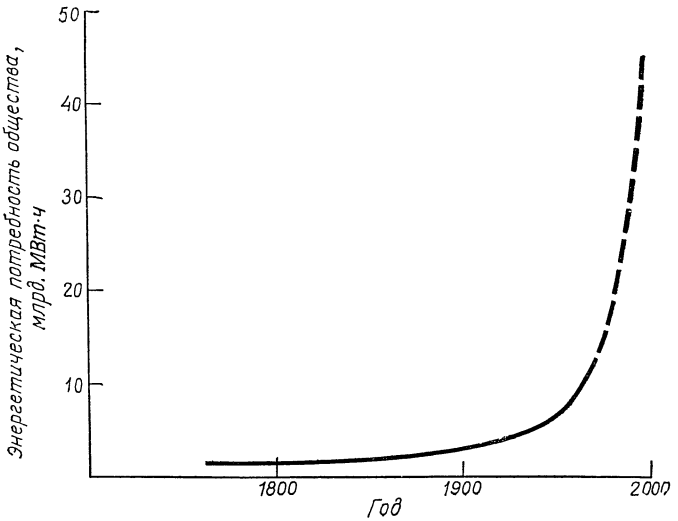


Рис. 3. Оценка мировой энергетической потребности, 1800—2000 гг.

материалов. Во многих странах мира эти источники энергии все еще являются основными, и их вклад в общий топливный баланс составляет около 15%. В прошлом такие источники имели еще большее значение и вплоть до 1900 г. покрывали примерно 50% общей потребности в энергии. Вклад других источников энергии — гидроэлектростанций и атомных станций, по-видимому, пока не превышает 2%, несмотря на их высокий к. п. д. Кроме того, для перевозки грузов и сельскохозяйственных работ используются сотни миллионов животных, однако количество совершаемой ими работы в общем объеме потребляемой человечеством энергии ничтожно — не превышает нескольких кВт·ч в день в среднем на одного животного.

На рис. 3 представлена кривая энергетической потребности общества. За единицу энергии здесь принят киловатт-час (кВт·ч), широко применяемый в практике. Необходимо подчеркнуть, что эта кривая дает лишь ориентировочную оценку фактической работы, которую совершают машины, преобразующие химическую и тепловую энергию в работу. При этом

не следует путать энергетическую потребность с потребляемой энергией, поскольку потребляемая от источников энергия из-за низкой эффективности ее преобразования значительно превышает указанную на графике энергетическую потребность.

Как мы видим, по сравнению с кривой численности населения (см. рис. 1) кривая энергетической потребности отличается большей крутизной. Это вполне понятно. С повышением жизненного уровня растут и запросы людей, что приводит к увеличению энергетической потребности на душу населения. Характерной чертой экономики развитых стран является переход от того уровня общественного развития, при котором население занималось сельским хозяйством и влачило жалкое существование, к более высокому уровню, когда население сосредоточено преимущественно в городах и занято в сфере производства предметов потребления и различных видов энергии. Общество, достигшее такой стадии, обладает огромными преимуществами, хотя, к сожалению, не все его члены пользуются его благами. Об уровне развития наций иногда судят по относительной численности городского населения. В настоящее время в Англии сельским хозяйством занимается около 6% населения, тогда как в странах Юго-Восточной Азии аналогичная цифра достигает 90%.

Другим показателем уровня развития общества является потребление энергии на душу населения. Физические возможности человека весьма невелики. Ежедневно только для поддержания своего здоровья человек должен потреблять с пищей около 2500 ккал, что в пересчете на принятые нами единицы энергии составляет около 1000 кВт·ч в год. Следовательно, если примерно 5% своей энергии человек будет тратить на выполнение полезной работы, то последняя не превысит 50 кВт·ч в год. Однако для населения в целом средняя величина такой работы не превосходит и половины указанного значения. Свои физические возможности человек расширяет, используя животных и особенно машины. Благодаря этому среднее значение энергии, приходящейся на одного жителя земного шара, в настоящее время достигает 3000 кВт·ч в год. Однако эта величина в зависимости от уровня разви-

тия нации колеблется в широких пределах. По нашим подсчетам, для Соединенных Штатов и некоторых стран Западной Европы она достигает 18 000 кВт · ч в год, тогда как для Индии она не превышает нескольких сотен кВт·ч в год.

Поднимая свой жизненный уровень, развивающиеся страны должны стремиться к тому, чтобы устранить существующее неравенство. Когда это произойдет и насколько к тому времени богатые нации уйдут вперед в своем развитии, пока можно только предполагать. Не делая слишком завышенных оценок, предположим, что некоторое устойчивое положение будет достигнуто, когда средняя энергетическая потребность на душу населения земного шара поднимется до современного уровня высокоразвитых наций. Такое предположение не лишено оснований, поскольку богатые нации несколько продвинутся в своем развитии, тогда как, по-видимому, не все развивающиеся страны пойдут по пути промышленного развития своей экономики. Однако необходимо учесть и множество дополнительных факторов. Отсталым странам необходимо в короткий срок осуществить капитальное строительство в самых широких масштабах. Даже при современных методах разработки полезных ископаемых это может привести к быстрому истощению всех ресурсов земного шара. При существующих темпах добычи запасы определенных металлов также должны иссякнуть уже через несколько десятилетий. При повышенной потребности в сырье начнут осваиваться даже такие месторождения, которые в настоящее время из-за низкого качества их руды не разрабатывают. Поэтому в будущем затраты энергии на получение того же количества руды заметно возрастут. Таким образом, даже с учетом того, что некоторые металлы после переплавки можно использовать повторно или заменять их пластмассами, затраты энергии на обеспечение капитальных строительств материалами вряд ли существенно снизятся.

Запасы воды также истощаются. И сейчас на земном шаре есть места, где стремятся использовать каждую каплю воды. Со временем для удовлетворения потребности в пресной воде будут опреснять в огромных количествах морскую воду, что потребует новых

затрат энергии. При наиболее доступном способе получения пресной воды эти затраты можно оценить величиной 100 кВт·ч на 1 т воды. И едва ли их можно снизить более чем на 2 кВт·ч на тонну. Кроме того, в будущем для увеличения производства растительных продуктов питания потребуется использовать удобрений примерно в сто раз больше, чем в настоящее время. При приготовлении аммиака NH_3 (который является основой большинства минеральных удобрений) азот получают путем восстановления его из воздуха, а водород — с помощью электролиза воды, причем на получение 1 кг азота необходимо затратить около 7 кВт·ч энергии. В масштабах же земного шара объем производства подобных удобрений достигает $20 \cdot 10^6$ т в год.

Эти и многие другие факторы позволяют, по крайней мере умозрительно, оценить общую энергетическую потребность населения земного шара. Трудно представить, чтобы в конечном итоге эта потребность в расчете на душу населения оказалась ниже 20 000 кВт·ч в год. Если совместить эту оценку с полученной выше оценкой общей численности населения на некотором установившемся уровне, то получится, что энергетическая потребность общества в будущем составит около $2 \cdot 10^{14}$ кВт·ч в год, что в 16 раз превышает существующий уровень. Заметим, что к подобному результату приводит совместное действие двух факторов: увеличение численности населения (примерно в 3 раза) и повышение его запросов (не менее чем в 5 раз). Рассмотренные графики, построенные на основе ориентировочных оценок, дают лишь самое общее представление о возможных тенденциях развития. Но нельзя недооценивать всю сложность ситуации, в которой может оказаться человечество, например, через столетие.

Источники энергии

Вопросы энергообеспечения земного шара нельзя рассматривать в отрыве от проблем обеспечения человека пищей, водой, промышленным сырьем и уничтожения отходов. Все эти проблемы уже сейчас принимают критические размеры. Однако всестороннее

исследование их не входит в задачу нашей книги. Достаточно лишь отметить, что существующие запасы ископаемых видов топлива не могут полностью удовлетворить растущие энергетические потребности общества.

Изучение имеющихся запасов угля (они оцениваются в $25 \cdot 10^{12}$ т) показывает, что при современных методах добычи их хватит не более чем на столетие. Этих запасов было бы достаточно для получения примерно $6 \cdot 10^{18}$ кВт·ч энергии, если считать, что среднее значение к. п. д. преобразования энергии в целом не ниже 30%. Если бы современный уровень потребности в энергии сохранился до конца двадцатого столетия, то этих запасов хватило бы примерно на 150 лет, однако с учетом роста энергетических потребностей, о котором мы говорили в предыдущем разделе, их с трудом можно растянуть на 25 лет. Правда, в дальнейшем человечество сможет рассчитывать не только на уголь, но приведенные цифры наглядно показывают, как быстро истощаются его запасы.

Еще труднее определить долю нефти и природного газа в энергетическом балансе мира. В силу геологических особенностей их запасы невозможно оценить с такой же точностью, как запасы угля, поэтому прогноз на будущее приходится делать с учетом возможных открытий новых месторождений. Разведанные сейчас запасы соответствуют энергии $6 \cdot 10^{14}$ кВт·ч, не исключено, что открытие новых месторождений позволит увеличить эту цифру, но, по-видимому, не более чем в 3 раза. Таким образом, запасы нефти и газа тоже не безграничны. Эти виды топлива более удобны, чем уголь, поэтому они усиленно вытесняли его в процессах производства энергии и тепла. Например, затраты нефти в каждом десятилетии превышают объем ее добычи за весь предшествующий период. Если нефтью покрывать хотя бы половину энергетических потребностей общества (см. рис. 3), то ее разведанных запасов не хватит даже до конца этого столетия.

Нетрудно представить себе всю сложность ситуации, связанную с зависимостью от ископаемых видов топлива, если бы не открытие и использование ядерных источников энергии. В Соединенных Штатах Америки и Англии строительство ядерных реакторов

началось еще со времени осуществления Ферми (1942) первой цепной ядерной реакции [1]. Топливом в таких реакторах обычно служил обогащенный уран, то есть природный уран, в котором путем предварительной обработки повышалось содержание радиоактивного изотопа ^{235}U (его содержание в природном уране составляет около 0,7%). Однако, как оказалось, удобнее использовать в качестве ядерного горючего изотопы ^{239}Pu и ^{233}U, которые получают из более распространенных изотопов ^{238}U и ^{232}Th соответственно. Процесс протекает в «реакторе-размножителе», где образование ядерного горючего происходит за счет энергии, получаемой при делении ^{235}U. Количество получаемого таким образом ядерного топлива хотя и невелико, но вполне достаточно для работы реактора. Весьма перспективным представляется создание реакторов на быстрых нейтронах, работающих на широко распространенных радиоактивных изотопах. В настоящее время уран добывают из таких руд, в которых его содержание превышает $^1/_{1000}$, однако при нехватке энергии экономически оправданной станет использование руд с еще меньшим содержанием урана. Из сказанного ясно, что оценить общие запасы ядерного горючего трудно, но можно утверждать, что они исчисляются в десятках или даже сотнях миллионов тонн. Если бы все имеющиеся запасы урана и тория подверглись распаду, то из каждой тонны такого горючего можно было бы получить по крайней мере 10^2 МВт·ч электроэнергии. Эта цифра особенно поражает, если учесть, что тепловые электростанции дают не более 2500 кВт·ч электроэнергии на тонну угля. Как известно, в широко распространенных породах гранита относительное содержание урана и тория в среднем составляет около $2 \cdot 10^{-5}$. Возможно, когда-нибудь и этого окажется достаточно, чтобы добывать и использовать гранит для получения электричества, поскольку каждая тонна гранитного сырья может обеспечить столько же электричества, сколько 8 т угля.

Нет необходимости строить дальнейшие предположения в этой области. Очевидно, что ядерная энергия

[1] Первая в мире атомная электростанция была введена в действие в СССР в 1954 г. — *Прим. ред.*

позволит надолго отсрочить наступление энергетического голода на земном шаре, а когда запасы угля, нефти и газа истощатся, она, по-видимому, будет в состоянии полностью удовлетворять потребности общества в энергии. Еще более далекую перспективу связывают с реализацией управляемой термоядерной реакции, в которой предполагается использовать тяжелые изотопы водорода, получаемые из морской воды. В принципе моря смогут обеспечить человечество всем необходимым: пищей, водой, топливом и минералами. Итак, долговременный прогноз выглядит вполне оптимистично, и есть все основания надеяться, что Земля сможет обеспечить своих обитателей всем необходимым.

Поступление энергии

До сих пор мы рассматривали лишь основные ресурсы Земли. Поскольку они не безграничны, то необходимо хотя бы знать, как лучше распорядиться ими. Мы видели, что ископаемых запасов топлива вряд ли хватит более чем на два столетия; а это лишь мгновение в истории развития планеты. Считается, что основные природные источники энергии (уголь, нефть, газ) образовались из остатков растений, которые обильно покрывали Землю в какой-то очень давний период ее истории. В настоящее время только тропические леса служат тем материалом, который, как и прежде, откладывается «в расчете» на далекую перспективу, но, по-видимому, этот вклад в общий топливный баланс планеты совершенно ничтожен.

Энергия, необходимая для образования ископаемых источников энергии, поступает от Солнца. Реакции, которые происходят в растениях под действием солнечного света, называют реакциями *фотосинтеза*. Их мы рассмотрим в гл. 9 при обсуждении вопросов производства органических соединений (то есть соединений на основе углерода). Исходным сырьем для реакции фотосинтеза являются вода и углекислый газ. Все виды жизни на нашей планете поддерживаются благодаря энергии, которая высвобождается при разложении и синтезе органических веществ. Эти универсальные процессы сопровождаются выделением

огромных количеств энергии. Установлено, что земные растения ежегодно потребляют не менее 10^{14} кВт·ч энергии; соответствующая оценка для растений, живущих в водоемах, отсутствует, так как пока еще не разработаны необходимые методы исследования, но, по-видимому, это величина того же порядка. Таким образом, общее количество солнечной энергии, потребляемой живыми организмами, во много раз превышает энергетическую потребность людей в настоящее время. Следует подчеркнуть, что эта величина не намного меньше того значения энергии, которое, согласно сделанным выше оценкам, определит энергетические потребности общества в будущем. В любом случае человек потребляет лишь незначительную долю общего количества солнечной энергии, идущей на фотосинтез. Задолго до конца XIX в. считалось, что энергетическая потребность людей при достаточно развитом лесоводстве может быть полностью удовлетворена за счет сжигания дров.

Солнечная энергия входит в нашу жизнь и другими путями. Благодаря ей обеспечивается циркуляция воздуха в атмосфере и воды в океанах, а также испарение воды, которая затем возвращается на землю в виде дождя. Выпадающая на возвышенности дождевая вода при своем движении вниз приводит в действие гидроэлектростанции. Швейцария и некоторые Скандинавские страны таким способом получают более половины всей энергии. Хотя полный вклад гидроэнергии в общемировой энергетический баланс весьма незначителен, некоторые развивающиеся страны, особенно в Африке и Южной Америке, возлагают на гидроэлектроэнергию большие надежды. Однако установлено, что даже при полном освоении гидроэнергоресурсов земного шара невозможно покрыть существующую в настоящее время энергетическую потребность. По-видимому, не следует многого ожидать и от ветряных энергетических установок. После обширных предварительных исследований в соответствующих районах Земли было построено несколько крупных ветряных энергетических установок мощностью свыше 1000 кВт·ч каждая. Они оказались весьма эффективными для получения небольших количеств энергии в отдаленных областях, поэтому их использование

должно значительно возрасти. Но, по-видимому, даже при самых широких масштабах применения подобных установок общие потенциальные возможности ветряных генераторов не превзойдут возможностей гидроэлектростанций.

Размещение энергетических систем в устьях рек позволяет использовать энергию рек и морских приливов. В различных участках земного шара было построено несколько очень крупных приливных станций, среди них особенно выделяется система Ранс на северо-западе Атлантического побережья Франции с годовой выработкой электроэнергии около $5 \cdot 10^8$ кВт·ч. Однако энергия приливов настолько мала, что ее хватило бы на удовлетворение современной энергетической потребности общества лишь в течение одной минуты. Кроме того, мощность приливов и отливов не везде достаточно велика, чтобы подобное преобразование было экономически оправдано.

Таковы основные способы использования энергетических потенциалов земного шара. Каждому из них свойственны свои преимущества и недостатки. Темой нашей книги является проблема использования солнечной энергии. Эту проблему можно рассматривать с различных сторон, но прежде всего следует оценить размеры реальной экономической выгоды от преобразования солнечной энергии и попытаться реализовать эти возможности. Интенсивность солнечного излучения (то есть энергия, приходящая на единицу освещаемой поверхности) составляет в верхней части атмосферы около 1,3 кВт/м^2. Примерно такое количество энергии получает поверхность стола средних размеров при его обогреве с помощью электроплитки средней мощности. Значительная часть солнечной энергии не доходит до поверхности земли (причины этого мы рассмотрим позже), но в то же время общая энергия облучения горизонтальной поверхности во многих частях земного шара достигает 2000 кВт·ч/м^2 в год, что соответствует среднему значению интенсивности 0,6 кВт/м^2 в течение 9 ч ежедневно. Таким образом, с поверхности площадью 80 км^2 можно было бы получать столько же энергии, сколько все человечество использует в настоящее время, а энергией, полученной с площади в 300 км^2, можно было бы удовлет-

ворить все потребности будущего. Чтобы увязать эту перспективу с реальностью, следует отметить, что пустыни только в одной Западной Австралии занимают площадь около 1500 км².

Эти цифры безусловно поражают воображение, но не следует забывать, что солнечная радиация слишком рассеянна. Например, даже в домашнем чайнике скорость передачи энергии через нагревающуюся поверхность составляет несколько сотен кВт/м². Именно низкая интенсивность солнечной энергии делает экономически невыгодным ее широкое применение. Однако, пока человек не научится получать в достаточных количествах ядерную энергию, он должен стремиться как можно шире использовать солнечную энергию. Сейчас это единственный весьма мощный источник, способный удовлетворить энергетические потребности человека.

Возможные модели экономического развития общества

Пока нет необходимости заниматься преобразованием солнечной энергии в больших масштабах, однако ее применение в некоторых районах земного шара для удовлетворения энергетических потребностей местного значения весьма заманчиво. Запасы солнечной энергии повсеместно неистощимы. Но сейчас не следует рассчитывать на получение солнечной энергии с больших поверхностей размерами в десятки квадратных километров. С помощью солнечной энергии, падающей на крышу больницы, можно, например, осуществить горячее водоснабжение последней. Или еще: выполняя функции коллектора солнечного излучения, крыша дома может обеспечить энергией ткацкий или токарный станок, крыша сарая —насос для орошения 10 га земли. Солнечная установка размером с небольшой пруд позволит напоить водой целую деревню, а установка величиной со школьную доску обеспечит электроэнергией школьные радио- и телевизионные приемники. Как видим, подобные местные источники энергии могут найти разнообразное применение.

Что это значит для экономического развития отсталых областей? По-видимому, такие огромные потенци-

альные возможности солнечных энергетических систем откроют новые перспективы в развитии отсталых сельских областей, задержат переселение людей из этих областей в города, а, как известно, такое переселение значительно осложняет развитие многих стран.

Уже первые шаги на пути технического прогресса отсталых наций позволят им подняться над уровнем, при котором каждая семья занята своим натуральным хозяйством. В Европе переход от такого хозяйства осуществлялся постепенно в ходе двух параллельно развивающихся процессов. Во-первых, в результате совершенствования способов ведения хозяйства значительно поднялась производительность труда сельскохозяйственного рабочего и соответственно значительно возросла доля урожая, приходящаяся на каждого. В наше время один человек, занятый в сельском хозяйстве, может прокормить десяток других. Во-вторых, высвобождавшиеся из сельской местности люди концентрировались в больших и малых городах, где их эффективно использовали в промышленном производстве. Рост промышленной продукции способствовал общему подъему жизненного уровня, при этом часть ее продавалась в другие страны, экономическое развитие которых не позволяло им производить подобную продукцию. Численность общества непрерывно увеличивалась, и на каком-то этапе его развития оказалось возможным привлечь значительную часть людей к общественно полезному, но не приносящему непосредственно материальных благ труду. Это, в свою очередь, создало условия для дальнейшего развития нации, в частности повышения ее культурного уровня — хорошего медицинского обслуживания, всеобщего образования, возможностей для отдыха и т. п. Такие условия являются неотъемлемыми для жизни во всех развитых странах, но их количественные показатели отражают материальный уровень развития общества.

Сельское население развитых стран значительно сократилось. Например, в Англии за последнее столетие количество сельскохозяйственных рабочих уменьшилось в 10 раз. Темпы роста городского населения, особенно в XIX в., оказались выше темпов развития промышленности, и это обусловило бедственное положение рабочих. Последствия такого явления дают

о себе знать до сих пор. Если подобное повторится, то уже в значительно больших масштабах, и исход этого может быть катастрофичным. Сейчас население окраин больших городов составляет около $^1/_3$ общей численности городского населения. Дома во многих пригородах представляют собой какие-то жалкие сооружения из фанерных, бумажных и металлических ящиков, которые разбросаны как попало — ни дорог, ни водоснабжения, ни канализации. В этих лачугах люди ютятся в страшной тесноте. В них, как правило, живут неграмотные, больные, безработные люди. Однако численность такой категории населения растет год от года. В подобных условиях ныне пребывает более $^1/_4$ населения земного шара. При существующей тенденции развития общества к 2000 г. такая категория людей составит $^1/_2$ населения Земли.

Однако несмотря на столь ужасные условия, этим людям живется все же лучше, чем большинству сельских жителей. К тому же в некоторых странах нет достаточно строгих правил владения землей, что постоянно побуждает людей к смене места жительства. А большой город действует подобно магниту, который притягивает широким выбором работы, доступностью развлечений, более тесным контактом с остальным миром, ощущением, что в нем все доступнее, чем где бы то ни было. В значительной мере это действительно так. Если в мире не произойдет каких-либо радикальных изменений, то надеяться на ослабление тяги к городу нет оснований. Уменьшение сельского населения могло бы быть оправданно, если бы возрастала производительность сельского хозяйства. Иначе едва ли возможно создать те излишки продуктов, которые необходимы при увеличении численности населения земного шара. Переезды в города обычно способствовали разрушению семьи, что также снижало стабильность сельской общины. Эти и множество других причин привели к необходимости запретить перемещение людей из сельских районов. Однако подобная мера может быть эффективной лишь в том случае, если в деревне будут созданы соответствующие условия для работы и жизни людей. Серьезным препятствием к развитию деревни является недостаток средств сообщения. Большинство мелких сельскохозяйственных

центров совершенно не связаны друг с другом. Обширные пространства с низкой плотностью населения экономически не выгодно оснащать шоссейными и железными дорогами и покрывать сетью нефтепроводов.

Существует множество других взаимосвязанных проблем развития удаленных и труднодоступных областей. Все их невозможно подробно рассмотреть в рамках нашей книги, однако следует сказать, что одним из ключей к решению этих проблем является создание местных запасов энергии. Централизованное снабжение мелких сельскохозяйственных районов электроэнергией от крупных станций экономически невыгодно из-за больших затрат, связанных с передачей энергии на далекие расстояния. В энергетике есть понятие «удваивающего расстояния», то есть расстояния от источника до потребителя энергии, при котором ее стоимость возрастает вдвое. При передаче электроэнергии такое расстояние составляет около 500 км. Во многих развивающихся странах весьма ограничены даже традиционные способы получения энергии путем сжигания природного топлива, так как его либо недостаточно, либо слишком дорога транспортировка. «Удваивающее расстояние» для угля также составляет несколько сотен километров.

Вот почему в подобной ситуации особый интерес вызывает ветряная и солнечная энергия. Получение этих видов энергии доступно почти везде. Как мы покажем далее, в большинстве случаев экономически выгоднее использовать солнечные установки небольших размеров. С их помощью можно обеспечить энергией потребности таких местных производств, как прядильное, лесопильное, бумажное, консервное, легкая промышленность, ремонт транспорта, осушение и орошение земли, опреснение и накопление воды и т. д. Если в ближайшее время таким путем удастся возродить деревни, то они постепенно могут стать большими развитыми экономически рентабельными районами. По-видимому, такое решение проблемы для развивающихся стран более разумно, чем пытаться обеспечить потребности в энергии больших городов и промышленных центров западного образца в условиях дефицита пространства и времени.

Как мы уже говорили, во многих районах земного шара ежегодно можно получать солнечную энергию в количестве до 2000 кВт·ч на каждый квадратный метр поверхности. В дальнейшем мы рассмотрим способы получения и использований этой энергии. Абсолютно ясно, что многие из способов вследствие определенных недостатков не могут претендовать на универсальность. При обсуждении таких недостатков мы попытаемся показать, какие способы наиболее выгодны. Возможно, с нашими аргументами и обоснованиями не все согласятся, и с этим нельзя не считаться. Но цель книги будет достигнута, если как можно больше людей узнают о подобных способах получения энергии и о том, какой вклад они могут внести в дальнейшее экономическое развитие человечества.

2. Солнце и Земля

Судьбы людей сопровождает замечательный мир света.
Генри Уодсуорт Лонгфелло (1807—1882)

Прежде чем приступить к изучению проблемы использования солнечной энергии и ее преимуществ, остановимся на трудностях, связанных с ее получением. Солнце непрерывно излучает энергию в пространство, но только незначительная часть ее попадает на Землю. Эта энергия питает все процессы в живой и неживой природе (вклад энергии природных ядерных реакций и гравитационных взаимодействий, вызывающих приливы, совершенно ничтожен). В этой главе мы расскажем о происхождении солнечного излучения, его природе, взаимодействии с Землей и ее атмосферой, а также установим, как интенсивность солнечного излучения изменяется в любой точке земной поверхности в зависимости от времени суток и сезона.

Эти сведения пригодятся нам позже при рассмотрении возможных методов использования солнечной энергии. Мы должны понять специфику каждого метода преобразования солнечной энергии и научиться путем простейшего анализа оценивать его эффективность. Для этого нам придется прибегнуть к помощи некоторых общих, но малоизвестных положений термодинамики, квантовой механики, электрохимии и т. д. Читателя это не должно настораживать, поскольку в каждой конкретной ситуации мы будем рассматривать только те положения, которые необходимы для лучшего понимания предмета и постараемся предельно упростить объяснение.

Следующая глава полностью посвящена рассмотрению некоторых основных принципов. Однако подобное размещение материала совсем не обязательно.

Ведь мы уже пользовались рядом положений, которые необходимо было бы исследовать более подробно. В этой главе к ним добавятся новые. Если читатель достаточно свободно воспринимает наше повествование, он может пропустить следующую главу без какого-либо ущерба для целостности впечатления от книги.

Происхождение солнечной энергии

Хотя в нашей жизни Солнце играет исключительно большую роль, оно является лишь незаметным членом так называемой *главной последовательности звезд.* Оно принадлежит к классу карликовых желтых звезд спектрального типа dG, более многочисленному, чем другие классы. В настоящее время предполагают, что эти звезды, как и другие, образовались из туманностей более раннего происхождения. Возможно, что началом образования отдельных изолированных небесных тел с повышенной плотностью вещества послужило хаотическое движение последнего в таких туманностях. Под действием тяготения вокруг этих тел начался процесс концентрации вещества, называемый *холодной аккрецией.* Подобные скопления вещества непрерывно уплотнялись под действием собственных сил тяготения, все время притягивая к себе новое вещество, постоянно увеличивая свои размеры и плотность. Уплотнение, по-видимому, прекращается, когда силам тяготения начинают противодействовать иные силы взаимодействия, возникающие при сближении частиц. Позже мы подробнее рассмотрим характер такого взаимодействия.

Действие гравитационных сил, под влиянием которых сближаются частицы вещества в туманности, подобно действию пружин. Эти гравитационные «пружины» имеют одну особенность: при достаточном удалении частиц их действие ослабевает. Сближение частиц приводит к ускорению их движения. Совершаемая при сжатии «пружин» работа (она связана с изменением энергии гравитационного поля) проявляется в увеличении энергии движения частиц. При этом каждая частица взаимодействует со множеством других. Частицы вещества при своем движении испы-

тывают возмущения, в результате температура туманности повышается. При некоторой температуре (когда частицы приблизятся друг к другу на достаточное расстояние) может произойти ядерная реакция. Последствия этого зависят от природы и количества участвующего в реакции материала. Для звезд типа Солнца характерна такая эволюция: они вступают в длительный период относительной устойчивости, в течение которого очень медленно сжимаются, поскольку силы сжатия почти уравновешены силами давления, обусловленного исходящим из звезды излучением.

Температура в центре Солнца достигает 10^7 °С; при такой температуре вещество уже не может сохранять обычную упорядоченную структуру из атомов и молекул. Оно становится *плазмой*, в которой ядра атомов движутся отдельно от электронов. При столкновении таких свободных ядер происходят термоядерные взрывы. Наблюдая поведение более холодного вещества на видимой поверхности Солнца, ученые пришли к выводу, что термоядерные реакции осуществляются в глубинах Солнца.

Температура видимой поверхности Солнца составляет около 5500 °С, то есть она достаточно велика, чтобы атомы находились в возбужденном состоянии, и вместе с тем достаточно низка, чтобы здесь время от времени возникали обычные атомы и молекулярные структуры. Как мы увидим дальше, эти атомы можно обнаружить на основе анализа солнечных спектров излучения и поглощения. Сейчас уже установлено, что на Солнце присутствует по крайней мере $^2/_3$ элементов из числа найденных на Земле. Наиболее распространен на Солнце самый легкий элемент — водород. Солнечное вещество примерно на 80% состоит из водорода и почти на 20% — из гелия, другого наиболее легкого после водорода элемента. Это хорошо согласуется с общепринятым положением, что основным источником энергии излучения Солнца является реакция синтеза ядер водорода, которая приводит к образованию гелия. Ядра водорода состоят из одной положительно заряженной частицы — протона. Обычно одноименно заряженные частицы отталкиваются, но при достаточно высокой температуре их движение становится столь быстрым, что они могут прибли-

зиться друг к другу на расстояние, при котором возможно их слияние под действием сил притяжения. При этом из каждых четырех ядер водорода образуются одно ядро гелия, два нейтрино и некоторое количество γ-излучения. Нейтрино — это чрезвычайно стабильные незаряженные частицы, обладающие огромной проникающей способностью. Они сразу же покидают пределы Солнца и не принимают участия в дальнейших «событиях», а вот γ-излучение, как увидим далее, претерпевает существенное изменение. В ходе такой реакции расходуется примерно $^3/_4$% вещества. В результате масса Солнца каждую секунду уменьшается на $4 \cdot 10^6$ т, тем не менее ученые полагают, что его состояние практически не изменится еще в течение миллиардов лет.

Солнечное излучение

В общем объеме солнечного излучения радиация, связанная непосредственно с ядерными реакциями, происходящими в солнечном ядре, составляет не более 3%. Исходное γ-излучение, пройдя $5 \cdot 10^5$ км через толщу солнечного вещества, претерпевает глубокие изменения. Все виды электромагнитного излучения имеют общую волновую природу и различаются между собой длиной волны. γ-Излучение самое коротковолновое из них, длина волны его порядка 10^{-8} мм. Для объяснения процессов взаимодействия излучения с веществом излучение обычно рассматривают состоящим из дискретных частиц — *фотонов*, каждая из которых характеризуется определенным количеством энергии — *квантом*. Более подробно мы остановимся на этом в гл. 4. Сейчас необходимо лишь отметить, что при подобном представлении энергия фотона обратно пропорциональна длине волны его излучения. Поэтому фотоны наиболее коротковолнового γ-излучения обладают наибольшей энергией. Двигаясь от центра Солнца, они сталкиваются с ядрами и электронами или рассеиваются в столкновениях с другими ближайшими фотонами. Поскольку часть энергии при таких взаимодействиях передается другим частицам, то энергия фотона уменьшается, и теперь им соответствует более длинноволновое излучение. Таким образом

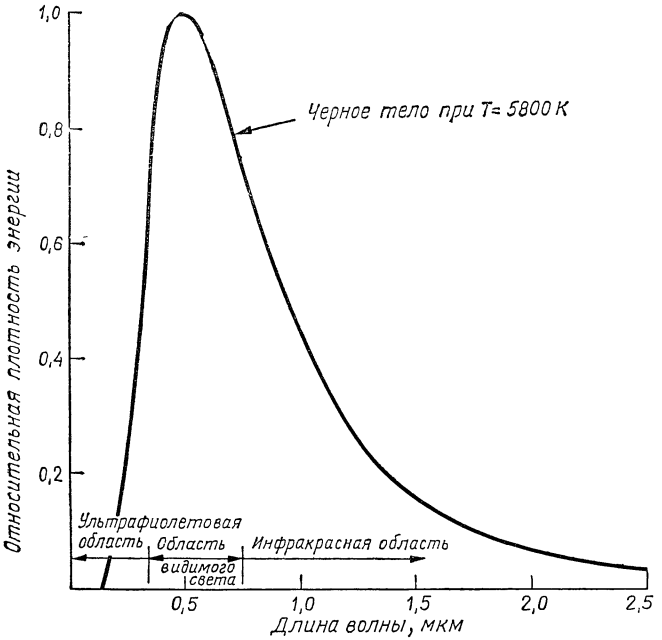


Рис. 4. Энергетический спектр излучения абсолютно черного тела при $T \approx 5800$ К (5500 °С).

γ-излучение переходит в более мягкое рентгеновское излучение, длина волны которого лежит в диапазоне 10^{-6} мм. По мере приближения к солнечной поверхности, где температура достаточно низка, чтобы там могло существовать вещество в атомарном состоянии, начинает действовать другой механизм: энергия фотонов здесь идет на возбуждение атомов, то есть она вызывает переход электронов на более удаленную от ядра орбиту. При возвращении атома в исходное состояние (электрона — на его прежнюю орбиту) возникает так называемое характеристическое излучение. На поверхности Солнца столкновения фотонов с веществом приводят к повышению кинетической энергии его атомов. Солнечное излучение, передаваемое во внешнее пространство, характеризуется широким спектром, причем максимум его интенсивности приходится на диапазон 10^{-4}—10^{-2} мм. Такое распределение по энергиям близко к энергетическому спектру

классического «черного тела» при температуре 5500 °С, представленному на рис. 4. К «черному телу» мы еще вернемся позднее, а сейчас необходимо лишь сделать некоторые замечания относительно формы, показанной на рисунке кривой. На этом графике по оси ординат отложена *плотность энергии*; последняя определяется как доля общей энергии, приходящаяся на какой-либо элементарный интервал длин волн, которые отложены по оси абсцисс. Длины волн здесь даны в микрометрах (мкм, 1 мкм равен 10^{-6} м, или 10^{-3} мм). Как мы видим, почти половина всей солнечной энергии сосредоточена в интервале длин волн 0,35—0,75 мкм, это *видимая область* спектра. Таким образом, в процессе эволюции человек приспособился зрительно воспринимать излучение именно в этой самой мощной области солнечного спектра. Остальная часть солнечной энергии сосредоточена в ультрафиолетовой области спектра с длинами волн менее 0,3 мкм (меньшая ее часть) и в инфракрасной области спектра (большая часть), последняя дает нам тепло.

Рассматривая Солнце через закопченное стекло, защитные очки или проектируя его изображение через малое отверстие на ровную поверхность, мы можем увидеть его бесформенную внешнюю оболочку. Мы можем также наблюдать темные области на его поверхности — *солнечные пятна*, а с помощью оптических приборов с большим увеличением удается разглядеть пятнистую поверхность Солнца, усеянную более светлыми (более нагретыми) областями — *факелами*, извергающими гигантские (размером в сотни тысяч километров) струи — *солнечные вспышки*. Удивительно, что такое возбуждение видимой поверхности Солнца сочетается с относительным постоянством его излучения. Оказывается, что общая интенсивность солнечного излучения и распределение его по длинам волн, ссобенно в ультрафиолетовой области спектра, почти не меняются. Чрезвычайно сильное влияние на состояние солнечной поверхности оказывает и другое явление — *солнечный ветер*. Это беспорядочное перемещение вещества, состоящего в основном из протонов, которые приобретают достаточную энергию, чтобы покинуть пределы Солнца и нестись далее через

Солнечную систему со скоростью в сотни километров в секунду. Взаимодействие такого потока частиц с магнитным полем Земли обусловливает появление полярных сияний и препятствует распространению радиоволн.

Взаимодействие солнечного излучения с атмосферой Земли

Солнечное излучение, распространяясь со скоростью $3 \cdot 10^5$ км/с, уже через 8 мин. достигает орбиты Земли, отстоящей от Солнца на $1{,}5 \cdot 10^8$ км. Его исходная интенсивность настолько велика, что даже на таком большом расстоянии она составляет около 1300 Вт/м^2. Хотя Земле достается лишь малая доля солнечной энергии, но и энергии, которая достигает верхних слоев атмосферы, достаточно, чтобы в десятки тысяч раз перекрыть существующую энергетическую потребность всего земного шара. Однако вследствие различных сложных взаимодействий (рис. 5) в атмосфере до земной поверхности доходит лишь часть этой энергии. В верхних слоях атмосферы, удаленных от поверхности Земли на 25 км и более, происходит поглощение

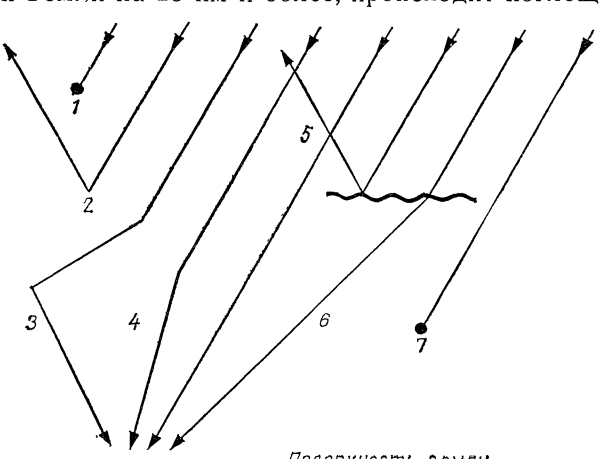


Рис. 5. Взаимодействие солнечного излучения с атмосферой:
1 — поглощение в озоне; *2* — рассеяние излучения различными компонентами атмосферы; *3* — многократное рассеяние; *4* — однократное рассеяние, *5* — отражение излучения облаками; *6* — рассеяние излучения в облаках; *7* — поглощение компонентами атмосферы.

и рассеяние ультрафиолетового излучения. Сначала обычный молекулярный кислород O_2 диссоциирует в атомарный кислород O. Для разрушения указанной молекулярной связи требуются фотоны с длиной волны менее 0,18 мкм, в результате этого процесса фотоны с такой энергией полностью поглощаются. Лишь часть атомов кислорода снова соединяется в молекулы, большинство же атомов вступают во взаимодействие с другими молекулами кислорода, образуя молекулы озона O_3. Последний также поглощает ультрафиолетовое излучение, хотя и в меньшей степени, чем O_2; под действием фотонов с длиной волны менее 0,32 мкм происходит разложение озона на O_2 и O. Итак, почти вся энергия ультрафиолетового излучения идет на поддержание устойчивого процесса разложения и объединения O, O_2 и O_3, в результате чего при прохождении через атмосферу ультрафиолетовое излучение преобразуется в излучение меньшей энергии. И это наше счастье, поскольку ультрафиолетовое излучение обжигает кожу, повреждает глаза и может быть даже смертельно опасным.

Фотоны с длинами волн, соответствующими видимой и инфракрасной областям спектра, взаимодействуют с молекулами газа и частицами пыли воздуха, не нарушая их связей. При этом фотоны рассеиваются более или менее равномерно во всех направлениях и некоторые из них вновь попадают в космическое пространство. Такому виду рассеяния подвержено в основном наиболее коротковолновое излучение. Отраженное от различных частей атмосферы рассеянное излучение доходит до нас, принося голубизну ясного неба, которую можно наблюдать на малых высотах. Капли воды также сильно рассеивают солнечное излучение. При повышенной их плотности, например в массивной туче, рассеяние может быть столь велико, что до 80% фотонов возвращается вновь в космическое пространство. Если учесть, что облачность в среднем покрывает около 50% неба, то такой механизм потерь солнечной энергии следует считать достаточно мощным.

Солнечное излучение при прохождении через атмосферу встречает еще одно значительное препятствие — это молекулы водяного пара, углекислого

газа и других соединений, которые поглощают излучение. Степень этого поглощения зависит от длины волны, наиболее интенсивно оно в середине инфракрасной области спектра. Все виды электромагнитного излучения распространяются с одинаковой скоростью c (скоростью света.—*Ред.*), равной $3 \cdot 10^5$ км/с. Если длину волны обозначить через λ, то частоту излучения можно определить отношением c/λ. Частоты, характерные для инфракрасной области спектра, соответствуют частотам колебаний молекул некоторых входящих в состав атмосферы соединений. Это обстоятельство также обусловливает потери энергии солнечного излучения, поглощенная энергия затем в процессе столкновений (сравнительно частых в довольно плотной атмосфере Земли) распределяется между другими молекулами. Пока мы будем считать поглощенное излучение полностью потерянным, хотя позже мы увидим, что благодаря ему образуется некое вторичное излучение, играющее важную роль. В результате взаимодействий с атмосферой интенсивность солнечного излучения у поверхности Земли по сравнению с ее значением в верхних слоях атмосферы уменьшается более чем вдвое. Существенно изменяется также спектральное распределение энергии. Все эти эффекты зависят от состава атмосферы и заметно изменяются от места к месту. Прохождению солнечного излучения препятствуют значительная загрязненность атмосферы больших городов, высокое содержание водяного пара у морского побережья, облачность и т. д. Но, по-видимому, основным фактором, определяющим интенсивность солнечного излучения в той или иной точке земного шара, является пройденный им путь. Потери на этом пути связаны с рассеянием и поглощением излучения и, как будет показано дальше, зависят от времени суток, сезона и географического местоположения.

Кажущееся положение Солнца

Основные особенности сложного движения Земли определяются ее ежегодным обращением вокруг Солнца и вращением относительно собственной оси. Земная орбита имеет эллиптическую форму, но ее

эксцентриситет настолько мал, что она почти не отличается от круговой. Величина радиуса земной орбиты, составляющего около $1{,}5 \cdot 10^8$ км, принята за астрономическую единицу (а. е.); максимальные отклонения от этого значения в течение года не превышают 1,5%. Такие отклонения настолько несущественны, что не сказываются на чередовании сезонов. Последние обусловлены наклоном земной оси к плоскости ее орбиты. Угол наклона составляет около 66,5° и практически не меняется [1] в пространстве. Такая ориентация оси вращения Земли при ее движении относительно Солнца обусловливает, как это видно из рис. 6, существенные колебания продолжительности светового дня в течение года. Например, в Северном полушарии наибольшая продолжительность светового дня отмечается 22 июня в период *летнего солнцестояния,* когда земная ось наклонена северным концом в сторону Солнца, и соответственно самый короткий день (или самая длинная ночь) отмечается 22 декабря в период *зимнего солнцестояния,* когда ось ориентирована в противоположную сторону. Существует два других характерных положения Земли относительно Солнца, а именно когда ось вращения Земли оказывается перпендикулярной линии, соединяющей центры Земли и Солнца. Эти так называемые *моменты равноденствия* отмечаются 21 марта и 23 сентября, когда день равен ночи.

Кажущееся движение Солнца, наблюдаемое из какой-либо точки Северного полушария с широтой φ, показано на рис. 7. Кажущееся положение Солнца в любой точке Земли определяется двумя углами: *высоты* h (между направлением на Солнце из точки наблюдения и горизонтальной плоскостью, проходящей через эту точку) и *азимута* A (между плоскостью меридиана и вертикальной плоскостью, проведенной через точку наблюдения и Солнце. Когда Земля обращена к Солнцу южной стороной, азимут равен нулю, а высота максимальна. Отсюда вытекает понятие *полдень,* которое принято за начало времени отсчета дня (или второй половины суток).

---

[1] На самом деле в результате свободной прецессии этот угол медленно изменяется (с периодом около $2{,}6 \cdot 10^4$ лет).

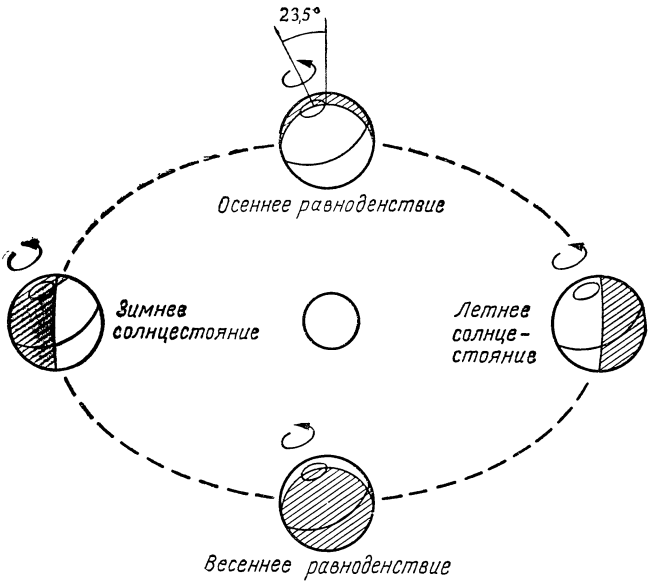


Рис. 6. Движение Земли относительно Солнца.

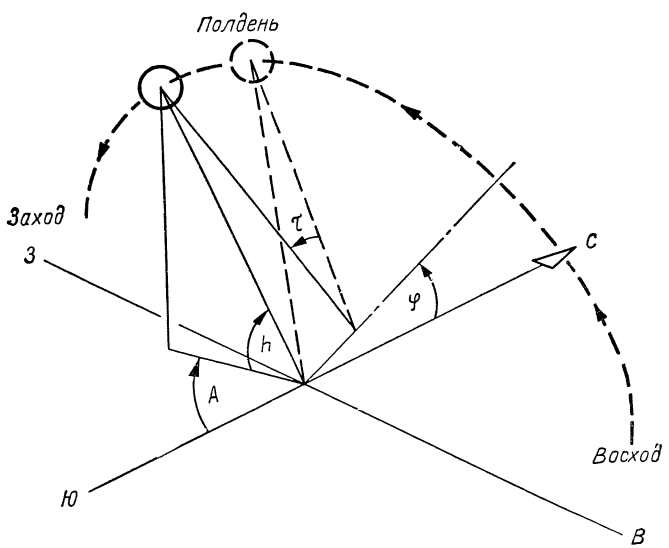


Рис. 7. Кажущееся движение Солнца на широте φ Северного полушария.

Благодаря вращению Земли вокруг своей оси Солнце периодически через 24 ч как бы повторяет свое движение, создавая впечатление движения вокруг Земли. Учитывая малые размеры Земли по сравнению с ее расстоянием до Солнца, мы можем, не допуская большой ошибки в расчетах, принять за ось его вращения вокруг Земли линию, которая, как показано на рисунке, проходит через нашу точку наблюдения с широтой φ. Очевидно, эта ось в данной точке наклонена по отношению к горизонтали С — Ю на угол φ. Если мы будем каждый час измерять смещение Солнца относительно его положения в полдень, то получим ряд значений угла τ, характеризующих его угловые перемещения вокруг этой оси в зависимости от времени t после полудня:

$$\tau = \frac{t}{24} \cdot 360^\circ = 15t \text{ град}$$

или

$$\tau = \frac{t}{24} \cdot 2\pi = 0{,}252t \text{ рад}, \qquad (2.1)$$

поскольку полное обращение Солнца на 360°, или 2π рад (радиан), осуществляется за 24 ч. Сезонное изменение кажущегося положения Солнца описывается углом *склонения* δ, который изменяется от $+23{,}5^\circ$ в летнее солнцестояние до $-23{,}5^\circ$ в зимнее солнцестояние (см. рис. 6). Совершенно очевидно, что на рис. 7 изображен случай летнего движения Солнца, когда его траектория при движении с востока на запад от восхода до заката пересекает северное направление горизонта. В точках равноденствия $\delta = 0$, а точки восхода и захода Солнца располагаются строго на линии В—З горизонта. Для других времен года величину солнечного склонения лучше брать из таблиц, хотя в большинстве случаев значение δ можно ориентировочно оценить из соотношения

$$\delta = 23{,}5 \sin\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \text{град}, \qquad (2.2)$$

где δ изменяет свой знак от $+$ к $-$ в соответствии со знаком функции sin; d — число дней, прошедших с момента весеннего равноденствия.

Теперь можно рассчитать кажущееся положение Солнца в любой точке на широте φ в любое время суток в соответствии с углом τ и в любое время года

в соответствии с углом склонения δ. Очевидно, в полдень высота Солнца максимальна, $90° - \varphi + \delta$, но в другое время суток кажущееся положение Солнца определить несколько труднее. Читатель, испытывающий склонность к тригонометрическим построениям, возможно, захочет сам произвести соответствующие расчеты, хотя всегда можно воспользоваться диаграммами и таблицами. Мы же приведем результат в простейшем виде:

$$\sin h = \cos\varphi \cos\delta \cos\tau + \sin\varphi \sin\delta \qquad (2.3)$$

и

$$\sin A = \frac{\cos\delta \sin\tau}{\cos h}. \qquad (2.4)$$

Существует и другой способ нахождения координат кажущегося движения Солнца — с помощью диаграмм, однако он малоинтересен. Рис. 8 позволит нам понять некоторые его существенные особенности. Диаграмма показывает зависимость угловых координат h и A от времени относительно местного полудня. На ней нанесены траектории движения Солнца, наблюдаемые в различное время года в некоторых точках земного шара: на экваторе ($\varphi = 0°$), в тропиках ($\varphi = \pm 23{,}5°$), в Северной Европе ($\varphi = 52°$ с. ш.) и на Северном полярном круге ($\varphi = 66{,}5°$ с. ш.). Пунктирными линиями показана та часть траекторий, где азимут достигает 90°, то есть Солнце находится с севера от линии В—З. Здесь следует сказать о явлении, которое называется *полярным днем* и наблюдается летом вблизи полярного круга. В период полярного дня Солнце все время находится над горизонтом.

При восходе и заходе Солнца $h = 0$. Из уравнения (2.3) видно, что это произойдет при углах τ в каждом из двух случаев, близких к полудню, для которых

$$\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\tau = -\sin\varphi \cdot \sin\delta,$$

то есть

$$\cos\tau = -\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta. \qquad (2.5)$$

Например, в Соединенном Королевстве ($\varphi = 52°$) имеем $\tau = 124°$ (8,3 часа при 15° в час) перед полуднем и после него в середине лета ($\delta = 23{,}5°$) и $\tau = 56°$ (3,7 часа) в середине зимы ($\delta = -23{,}5°$). Увеличение продолжительности светового дня летом

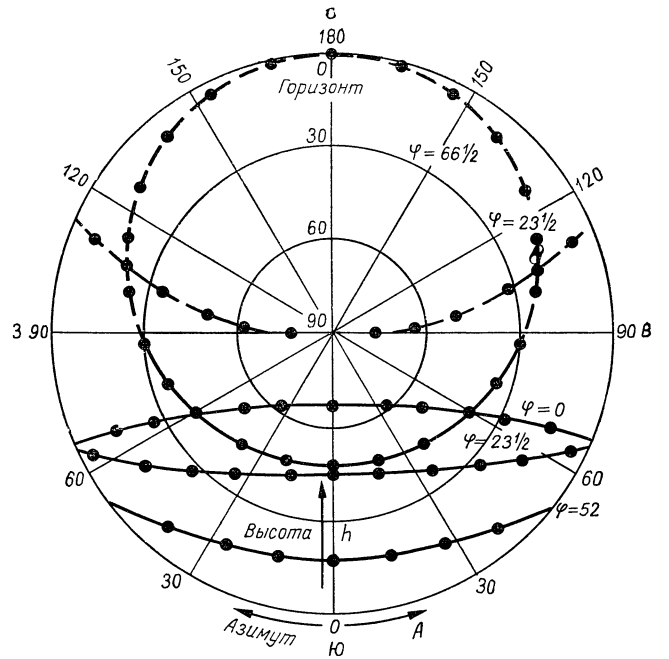


Рис. 8. Кажущаяся траектория Солнца для различных времен года и широт (Северное полушарие).

Точками отмечены ежечасные положения Солнца относительно положения в полдень ($\varphi = 52°$ — зимой; $\varphi = 66{,}5°$ — летом; $\varphi = 23{,}5°$ — зимой (внизу) и летом (вверху); $\varphi = 0$ — зимой и летом).

заметно даже в тропиках ($\varphi = 23{,}5°$), где, особенно в период летнего солнцестояния, Солнце находится над горизонтом около 13,5 ч. Как видно из рис. 8, Солнце там в это время года в полдень находится непосредственно над головой и в течение всего дня азимут остается близким к 90°. Позже мы покажем, сколь важное значение подобное обстоятельство может иметь для тропических стран.

Интенсивность солнечного излучения на поверхности Земли

Интенсивность солнечного излучения у земной поверхности в основном зависит от двух факторов: угла наклона лучей к плоскости поверхности в дан-

ной точке и длины пути лучей в атмосфере. Оба эти фактора зависят от высоты Солнца h.

Если через I обозначить интенсивность излучения, падающего на горизонтальную поверхность под углом i к ее *нормали*, как показано на рис. 9, то интенсивность облучения этой поверхности определяется произведением $I \cdot \cos i$. Наклон любой поверхности, например склона горы или крыши дома, можно задать через направление нормали к ней (то есть так же, как мы определили кажущееся положение Солнца) путем задания высоты ψ и азимута ξ. Эти углы показаны на рис. 10. Нам не следует глубоко вникать в подробности расчета интенсивности излучения, падающего на такие наклонные поверхности, однако следует хотя бы в общих чертах описать метод подобных расчетов. В результате соответствующих тригонометрических преобразований мы получаем уравнение, позволяющее определить угол i между направлением солнечных лучей и нормалью к освещаемой поверхности:

$$\cos i = \cos(h - \psi) + \cos h \cdot \cos\psi [\cos(A - \xi) - 1]. \quad (2.6)$$

Из уравнения видно, что для поверхности, нормаль к которой лежит в той же вертикальной плоскости, что и Солнце (то есть $\xi = A$), угол $i = h - \psi$. Поскольку толщина атмосферы Земли много меньше ее радиуса, при вертикальном падении лучей длина пройденного ими пути в атмосфере почти обратно пропорциональна $\sin h$ (рис. 11). Кривизну Земли необходимо учитывать только при очень малой высоте Солнца. Такое упрощение очень удобно. Для измерения длины пути солнечных лучей в атмосфере метеорологи пользуются специальной единицей, называемой *воздушной массой*. Единице воздушной массы соответствует путь, пройденный лучами при вертикальном падении. Тогда для любой высоты Солнца h воздушная масса равна $1/\sin h$. Такое допущение вполне оправдано, поскольку рассеяние и поглощение солнечного излучения при этом пропорциональны длине пути лучей, измеренной в воздушных массах. Например, если угол h принимает значения 42, 30 и 20°, то воздушная масса соответственно равна 1,5; 2; 3. В период зимнего солнцестояния в Северной

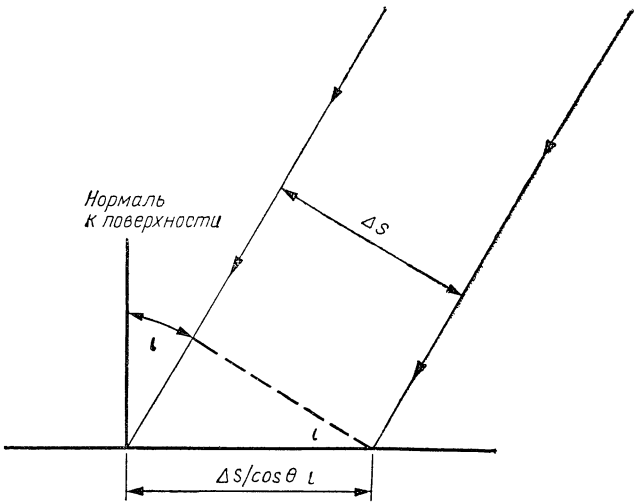


Рис. 9. Интенсивность солнечной радиации на наклонной поверхности.

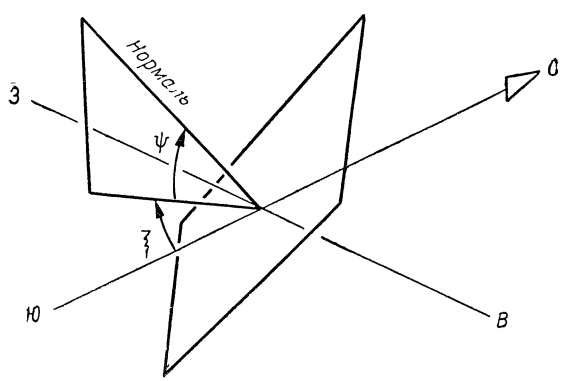


Рис. 10. Угловые координаты нормали к наклонной поверхности.

Европе или центральной Канаде максимальное значение высоты Солнца не превышает 15°, следовательно, величина воздушной массы равна 4, поэтому даже в полдень фактический путь солнечных лучей в атмосфере в 4 раза превышает их путь при вертикальном падении.

Уменьшение интенсивности и видоизменение спектрального распределения солнечной энергии, обусловленные поглощением и рассеянием в атмосфере, зависят от длины воздушного пути, или воздушной массы, довольно сложным образом. На рис. 12 приблизительно показана такая зависимость для безоблачной атмосферы. Как мы уже говорили, на интенсивность солнечного излучения существенно влияют рассеяние и избирательное поглощение молекулами водяного пара и углекислого газа. Площадь, ограничиваемая этими кривыми, представляет собой интенсивность I, то есть полную энергию, поступающую в единицу времени на единицу поверхности, обращенную непосредственно к Солнцу. Значениям высоты Солнца 90, 30, 20 и 12° (воздушная масса соответственно 1, 2, 3 и 5) при безоблачной атмосфере соответствуют интенсивности около 900, 750, 600 и 400 Вт/м^2. Интенсивности для других, промежуточных значений высоты с учетом соответствующих величин воздушной массы можно получить путем интерполяции. (Заметим, что, поскольку интенсивность есть скорость прохождения энергии солнечных лучей через единицу перпендикулярной им поверхности, то она соответствует мощности и оценивается в единицах удельной мощности Вт/м^2.)

В зависимости от местоположения, а также от времени суток и сезона распределение энергии по длинам волн может несколько отличаться от приведенного выше: для длин волн менее 0,35 мкм в среднем лишь на один процент и для видимой и инфракрасной областей спектра — до 50%.

В действительности полная энергия падающего излучения превышает указанные значения, поскольку она включает не только *прямую* составляющую, но и *рассеянную*. В последнюю, в частности, входит та часть излучения, которая рассеивается различными компонентами атмосферы, но тем не менее попадает

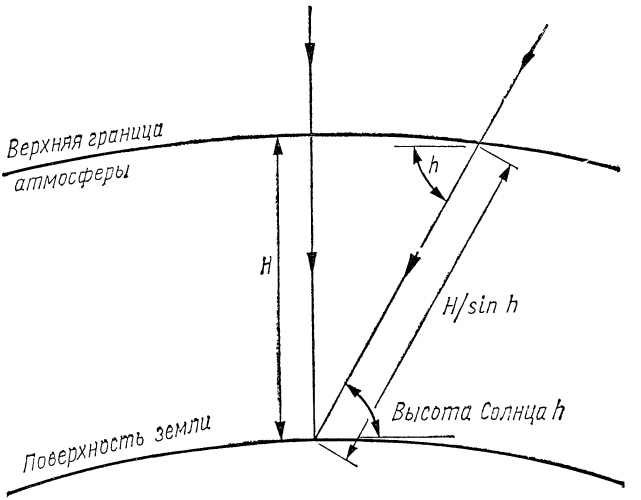


Рис. 11. Ход солнечных лучей в атмосфере.

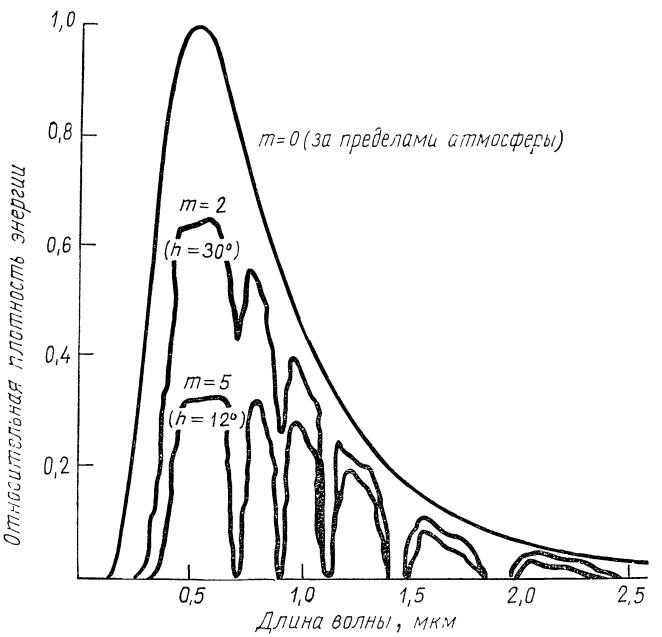


Рис. 12. Влияние атмосферы на распределение энергии солнечной радиации.

на поверхность Земли (см. рис. 5). Рассеянное излучение, которое иногда называют *небесным светом*, составляет значительную долю полной энергии (при низких высотах Солнца она может достигать половины ее). Поскольку интенсивность рассеянного излучения трудно оценить с большой точностью, в разных работах часто даются существенно отличающиеся ее значения. Для ориентировочных расчетов воспользуемся некоторыми приближенными значениями интенсивности, взятыми для прежних значений воздушной массы, а именно 1, 2, 3, 5. Величины рассеянной составляющей интенсивности излучения на горизонтальной поверхности при этих условиях соответственно равны 110, 90, 70 и 50 Вт/м^2. При необходимости эти значения интерполируются. В случае наклонных поверхностей мы не будем пытаться точно учитывать изменение рассеянной составляющей в зависимости от наклона. Мы воспользуемся ее значениями, полученными для горизонтальной поверхности, и умножим их на некий коэффициент, величина которого линейно уменьшается в зависимости от наклона от 1,0 для горизонтальной поверхности до 0,5 — для вертикальной. (При вертикальной поверхности можно «наблюдать» лишь половину неба.) Энергетический спектр рассеянной составляющей излучения несколько сдвинут в сторону более коротких волн по сравнению со спектром прямой составляющей, поскольку именно в области коротких волн рассеяние излучения в атмосфере максимально.

Суточные и сезонные колебания солнечной радиации

Чтобы обосновать целесообразность использования солнечного излучения, необходимо оценить общую энергию, получаемую на поверхности Земли в данное время дня или года. При этом мы должны учитывать вклад рассеянной компоненты излучения в общем объеме энергии. Интенсивность же прямой составляющей рассчитывается, как указывалось выше, с учетом временны́х колебаний воздушной массы и изменений пути лучей в атмосфере. Точность подобного расчета в значительной мере зависит от состояния

атмосферы, ее загрязненности, тумана, облачности и т. д. Перечисленные явления обычно способствуют уменьшению прямой составляющей, так как обусловливают поглощение и рассеяние, однако при этом рассеянная компонента может значительно возрасти. При достаточно плотной облачности до Земли доходит лишь рассеянная компонента излучения.

Наилучшим методом оценки мощности солнечной радиации является непосредственное долговременное измерение ее интенсивности в различных зонах земного шара. В настоящее время уже существует несколько метеорологических станций, на которых непрерывно регистрируется интенсивность солнечного излучения на горизонтальной поверхности (иногда ее неудачно называют *инсоляцией*). Таких станций пока еще слишком мало, чтобы можно было составить общую картину распределения интенсивности солнечной радиации по всему земному шару, но по мере повышения значимости получаемых ими данных число таких станций будет расти.

Однако и сейчас мы можем провести некоторые ориентировочные расчеты. Прежде всего рассмотрим местность с преобладающей безоблачной атмосферой, то есть с наибольшим значением интенсивности излучения, так как подобные районы создают самые благоприятные условия для использования солнечной энергии в крупных масштабах. В предыдущих разделах мы уже говорили о способах оценки интенсивности солнечного излучения для горизонтальной поверхности в любой точке земного шара. Для любого времени суток, заданного углом τ, из уравнения (2.3) мы получаем высоту Солнца h. Интенсивность прямого излучения I определяется исходя из величины воздушной массы, которая пропорционально $1/\sin h$. Интенсивность для любой данной поверхности равна $I\cos i$, а для горизонтальной — $I\sin h$. Одновременно по известному значению h можно оценить вклад рассеянной компоненты D.

На рис. 13 показано изменение интенсивности солнечного излучения со временем после полудня для широты центральной Англии ($\varphi = 52°$). Эти кривые соответствуют летнему и зимнему солнцестояниям. Площадь, ограниченная кривой, соответствует полной

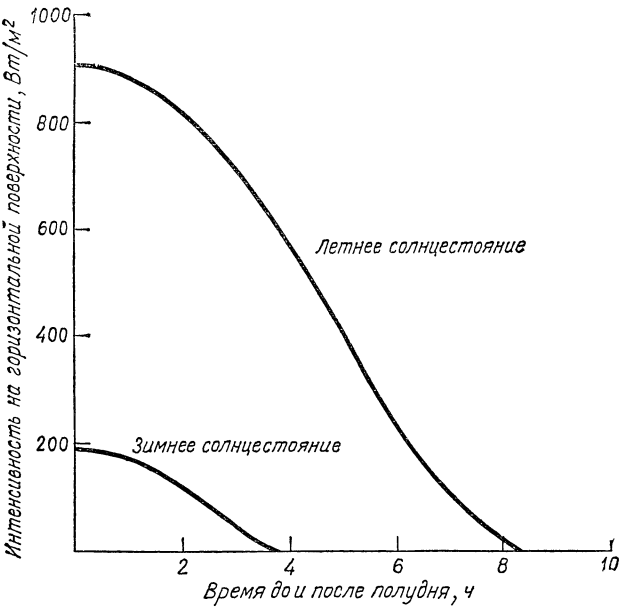


Рис. 13. Интенсивность солнечного излучения на горизонтальной поверхности при безоблачной атмосфере ($\varphi = 52°$ с. ш.).

энергии излучения, получаемой за весь день; сравнивая эти две кривые, мы можем оценить максимальное и минимальное количества энергии за год.

Результаты подобных расчетов для других широт приведены в табл. 1. Для каждого случая указаны два

Таблица 1

Инсоляция на различных широтах для чистой атмосферы

Местоположение	Широта	Инсоляция, кВт·ч/м²		
		наибольшее значение за день	наименьшее значение за день	годовое значение
Экватор	0°	6,5 (7,5)	5,8 (6,8)	2200 (2300)
Тропики	23,5°	7,1 (8,3)	3,4 (4,2)	1900 (2300)
Средние широты	45°	7,2 (8,5)	1,2 (1,7)	1500 (1900)
Центральная Англия	52°	7,0 (8,4)	0,5 (0,8)	1400 (1700)
Полярный круг	66,5°	6,5 (7,9)	0 (0)	1200 (1400)

значения: первое соответствует только прямой составляющей излучения, а второе (в скобках) учитывает вклад рассеянной составляющей. За единицу энергии здесь также принят кВт·ч.

Как мы уже говорили раньше, на экваторе интенсивность солнечного излучения достигает максимума при равноденствии, когда азимут Солнца в течение всего дня равен 90° — оно как бы висит над головой. В период летнего и зимнего солнцестояний интенсивность солнечного излучения на экваторе минимальна.

Общее количество солнечного излучения за год определяют путем суммирования суточных данных. Изменение солнечной радиации в течение года описывается кривой, по форме близкой к синусоиде, максимум и минимум которой распределены симметрично в двух полугодиях. В последней колонке табл. 1 приведены приблизительные годовые значения солнечной энергии для горизонтальной поверхности в условиях безоблачной атмосферы.

Из табл. 1 видно, что дневное количество солнечного излучения максимально не на экваторе, а вблизи широты 40°. Подобный факт также является следствием наклона земной оси к плоскости ее орбиты. Как показывает рис. 8, в период летнего солнцестояния Солнце в тропиках почти весь день находится над головой, и продолжительность светового дня (13,5 ч) здесь больше, чем на экваторе. С повышением широты продолжительность дня возрастает, и хотя интенсивность солнечного излучения при этом уменьшается, максимальное значение дневной инсоляции приходится на широту около 40° и остается почти постоянным (для условий безоблачного неба) вплоть до полярного круга. С другой стороны, интенсивность солнечного излучения в зимнее время с повышением широты резко падает, поэтому полное его количество за год в районе полярного круга составляет лишь половину его значения на экваторе.

Следует подчеркнуть, что данные табл. 1 справедливы лишь для чистой атмосферы. С учетом облачности и загрязнений атмосферы промышленными отходами, характерных для многих стран мира, приведенные в таблице величины следует уменьшить

по крайней мере вдвое. Например, для Англии годовое количество солнечной радиации составляет лишь 900 кВт·ч/м^2 вместо 1700 кВт·ч/м^2 (табл. 1).

Перспективы

В большинстве высокоразвитых стран годовое количество солнечной энергии, падающей на крыши жилых домов, значительно превосходит величину энергии, необходимой для их отопления или охлаждения. Поэтому естественно прежде всего говорить об использовании солнечной энергии для подобных целей. В гл. 5 мы рассмотрим, как это можно осуществить практически. В некоторых странах солнечная энергия уже применяется для приготовления сушеных пищевых продуктов и опреснения воды. В гл. 1 мы упоминали о той важной роли, которую может сыграть солнечная энергия для подъема сельского хозяйства слаборазвитых стран. Наибольший интерес представляет преобразование солнечной энергии в электрическую или механическую. В гл. 6—9 мы рассмотрим устройства для такого рода преобразования энергии. Как мы увидим в дальнейшем, к. п. д. большинства этих устройств чрезвычайно низок, поэтому полезно расходуется лишь незначительная часть (всего несколько процентов) от общего количества принятой солнечной энергии. Тем не менее перспективы ее использования представляются заманчивыми. Даже при к. п. д. 5% солнечной энергии, собранной с 6 м^2 горизонтальной поверхности в тропических районах, оказывается достаточно для удовлетворения энергетической потребности на душу населения на современном этапе развития человеческого общества. Для этих целей можно использовать обширные неосвоенные пространства, не принося ущерба производству пищи.

Наиболее подходящими районами для сооружения энергостанций, работающих на солнечной энергии, являются огромные зоны пустынь, которые опоясывают почти весь земной шар в районах тропиков. Как показано на рис. 14, пустыни занимают огромные массивы Земли, где господствуют сухие ветры. Последние образуются вследствие охлаждения воздуха при прохождении воздушных потоков у морского побережья или

над цепью гор. В таких районах почти не бывает облачности, а дожди выпадают нерегулярно, лишь в результате случайных изменений структуры воздушных масс. Это области с годовой нормой осадков не более 25 см. Они занимают $^1/_8$ всей поверхности суши и располагаются в тропическом поясе по обе стороны от экватора. Севернее экватора вдоль тропика Рака лежат Большая Западная пустыня в Северной Америке, пустыня Тар в Индии, Аравийская пустыня и Сахара, а южнее экватора вдоль тропиков Козерога тянутся пустыня Атакама в Южной Америке, южноафриканская пустыня Калахари, занимающая около половины территории Австралии пустыня Большая Виктория и т. д. Общая площадь этих безжизненных неплодородных районов составляет около $2 \cdot 10^7$ км^2. Годовое количество солнечной энергии в этих областях достигает $5 \cdot 10^{16}$ кВт·ч. Если использовать хотя бы 5% такого количества энергии, то существующие ныне энергетические потребности можно было бы перекрыть более чем в двести раз. [Для сравнения укажем, что это количество энергии в 12 раз превышает предполагаемые в будущем потребности (см. гл. 1).]

Приведенные цифры могут показаться слишком грандиозными, тем не менее перспективы получения солнечной энергии в достаточно больших масштабах в принципе вполне реальны. Однако вследствие низкой

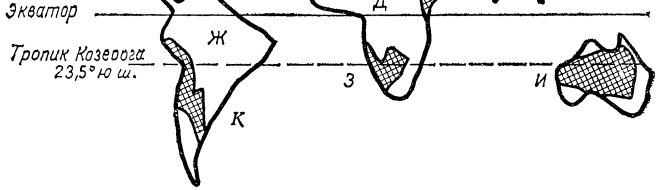


Рис. 14. Крупнейшие пустыни мира:
А — Большая Западная; *Б* — пустыни Центральной Азии; *В* — Гоби; *Г* — Тар; *Д* — Сахара; *Е* — Аравийская пустыня, *Ж* — Атакама; *З* — пустыни Калахари; *И* — Большая пустыня Виктория; *К* — пустыни Патагонии.

интенсивности солнечного излучения для этого потребуются коллекторы весьма внушительных размеров. Например, для производства энергии в объеме выработки современной электростанции необходим коллектор площадью около 3 км^2. Чтобы перекрыть пустыни земного шара сетью простейших коллекторов соответствующих размеров, потребуется столько металла, сколько не смогут дать все известные ныне месторождения земного шара. Поэтому правильнее поступают те, кто преследует более скромные цели. Районы, богатые солнечной энергией, включают в себя не только пустыни. Ведь на площадях, ограниченных сороковыми параллелями, проживает около 80% населения земного шара, и годовое количество солнечного излучения здесь составляет по крайней мере 1500 кВт·ч/м^2. Количество солнечной энергии, которое можно получить в этих районах, полезно сравнивать не с годовой производительностью современной электростанции (около $3 \cdot 10^9$ кВт·ч), а с работой, совершаемой парой волов (она оценивается в 1000 кВт·ч за год), интересно также сопоставить годовую стоимость получения солнечной энергии и затрат на 25 000 кг фуража, необходимого для питания этих волов.

В этой книге мы не сможем провести подобные сравнения. Главная цель ее состоит в рассмотрении научных основ получения солнечной энергии для удовлетворения потребностей людей. Но прежде всего мы позволим себе отступление, в котором рассмотрим ряд фундаментальных научных положений и понятий.

3. Основные понятия и определения

Сладкое и горькое, теплое и холодное, цвет и т. п. — понятия условные; реально существуют только атомы и пустота.
Демокрит (460 г. — 370 г. до н. э.)

В этой книге мы часто будем обращаться к определенным терминам и понятиям, поэтому нам очень важно знать их значение. Такие термины, как энергия, тепло, температура и работа, вошли в нашу повседневную практику. Однако с научной точки зрения их значения строго ограничены. Пользуясь этими понятиями в быту, мы даже не подозреваем, насколько иногда бывает трудно вследствие их взаимосвязи дать им четкие определения. Вот почему весьма полезно исследовать происхождение данных терминов.

Перечисленные выше понятия относятся к разделу физики, называемому *термодинамикой*. Наша книга не является ни учебником по этой дисциплине, ни даже введением в нее, поэтому мы не будем рассматривать подряд все основные термины, используемые в термодинамике, а ограничимся лишь теми из них, которые понадобятся нам для дальнейшего изложения. Конечно, это явится некоторым отступлением от основной темы нашей книги, но мы постараемся сделать его как можно более кратким.

В дальнейшем все вновь вводимые термины и понятия мы будем пояснять по мере их возникновения на страницах. Если мы хотим рассмотреть различные способы применения человеком солнечной энергии, нам придется пересечь традиционные границы, разделяющие научные дисциплины, коснуться таких, по-видимому, малоизвестных широкому читателю дисциплин, как квантовая механика и радиационная химия. Подобный путь не нов для инженера, который при своих изысканиях всегда игнорирует эти границы,

ему часто приходится вникать в такие области знаний, которые выходят за рамки его непосредственной специальности. И здесь ему помогают так называемые фундаментальные научные принципы и положения, то есть общая схема представлений, являющаяся основополагающей для науки. В нашей книге мы обсудим ее лишь в той мере, в какой это необходимо. Кое-что нам придется принять на веру, но это не должно противоречить исходным научным принципам. В настоящей главе мы рассмотрим основные понятия и положения, которые относятся к той области физики, которую называют *динамикой частиц* и которая является лишь частью громадного наследия Исаака Ньютона (1642—1727).

Действительность и модели

Как и во многих других областях науки, здесь приходится иметь дело с вещами, которые нельзя непосредственно проверить на опыте. Мы говорим об атомах и молекулах, электронах и волнах и т. д., но они недоступны не только нашим органам чувств, но и самой чувствительной и точной аппаратуре. Например, в существовании электрона мы убеждаемся только вследствие того, что множество различных многократно воспроизводимых физических явлений можно объяснить, лишь допустив существование такого обладающего совершенно определенными свойствами физического объекта. Но бесполезно пытаться обнаружить или наглядно представить себе электрон в его естественном виде [1]. Мы тоже попытаемся вообразить себе электрон со всеми присущими ему свойствами. Но это безусловно не реальность, а лишь определенная концепция, которая позволяет говорить о вероятностном поведении электрона в тех или иных условиях. В рамках подобных теоретических концепций и производится большинство научных анализов.

[1] Невозможность непосредственно увидеть или представить электрон в его «естественном» состоянии, равно как и приводимое ниже описание двух моделей поведения электрона, — то как частицы, то как волны, — не означает отрицания его физической реальности. — *Прим. ред.*

Например, поведение электрона во многих экспериментах показывает, что он имеет определенную массу, вполне определенные размеры и другие свойства, которыми обычно характеризуется материальное тело. Тогда естественно рассматривать его как классическую частицу. Движение материальных частиц (или тел), размеры которых достаточно велики, чтобы мы могли их наблюдать, описываются законами движения Ньютона (в определенных условиях они оказываются несостоятельными, и тогда вступают в силу принципы теории относительности Эйнштейна). Эти законы относятся к разряду фундаментальных научных положений, и вековой опыт человека подтвердил их правильность. Если мы используем эти законы для предсказывания поведения электрона в тех или иных условиях, мы обычно находим, что подобные знания достаточно точны. Итак, представление электрона в виде частицы оказалось весьма полезным.

Но это не означает, что электрон является частицей, поскольку при некоторых обстоятельствах он проявляет качества, совершенно не присущие частице. Например, как показывают некоторые опыты по дифракции, электрон должен одновременно проходить через два «отверстия» (а точнее между атомами в кристаллической решетке), отстоящих на расстоянии, превышающем размеры электрона, установленные на основании других экспериментов. Здесь электрон проявляет свойства, характерные, скажем, для световых волн. Теперь известно, что всем телам в микромире присуща некая *двойственность* (*дуализм*) поведения, и мы должны привыкнуть к этому. Таким образом, электрон иногда проявляет свойства частицы, а иногда — волновые свойства. Поскольку невозможно представить нечто, обладающее совокупностью подобных свойств, то при описании поведения электрона в различных ситуациях пользуются той или иной его моделью.

Как мы уже говорили, многие особенности поведения электрона достаточно хорошо объясняются, если рассматривать его как частицу. В тех случаях, когда нет необходимости дополнительно оговаривать неадекватность модели частицы, мы можем пользоваться этой простейшей моделью электрона без всякого

ущерба для точности. Нам не следует беспокоиться о том, что некоторые наши модели непригодны для более тонкого анализа, но мы не должны забывать, что наша модель не всегда отражает реальное положение вещей. Поэтому бессмысленно спрашивать, что такое электрон. Используя модель частицы, мы не говорим, что электрон — частица, мы просто полагаем, что в рамках определенной задачи можно адекватно описывать его свойства, исходя из предположения, что он ведет себя как частица. Подобная особенность модельного представления интересна и с философской точки зрения. Иногда мы можем отбросить неадекватную модель, раз и навсегда установив ее неадекватность, но такую модель можно продолжать использовать, если она облегчает понимание тех или иных явлений. Примером служит развитие понятия об *энергетических уровнях*, оно осуществлялось с помощью моделей, от которых позднее отказались. Говоря об энергетических уровнях, мы покажем, как происходил этот процесс.

В дальнейшем при необходимости мы будем кратко останавливаться на той или иной физической модели, стараясь, насколько возможно, упростить подобное рассмотрение.

Структура вещества

Принято считать, что любое вещество состоит из *атомов*. Каждый атом имеет *ядро*, которое образовано из плотно «упакованных» относительно массивных частиц, *нейтронов* и *протонов*; последние определяют его положительный *электрический заряд*. В целом атом электрически нейтрален, поскольку вокруг ядра вращаются *электроны*, каждый из которых заряжен отрицательно и имеет относительно малую массу. Для наших целей вполне применима модель атома, предложенная Бором (1913). Установлено, что для электронов в атоме разрешены только определенные орбиты, которые заполняются в строгой последовательности и образуют *оболочки* вокруг ядра. Каждая оболочка может содержать некоторое максимальное количество электронов, однако во многих атомах оболочки заполнены не до конца. Химическое соединение

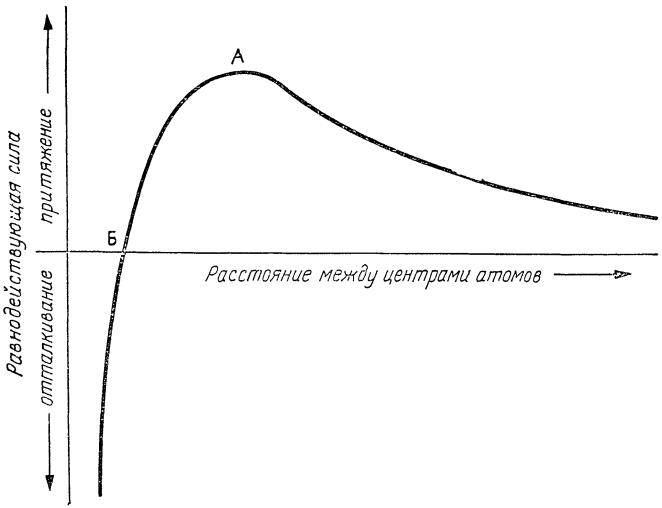


Рис. 15. Сила взаимодействия между атомами.

атомов в *молекулы* происходит в результате соединения внешних оболочек, и число электронов на этих оболочках определяет, какие элементы могут вступать во взаимодействие друг с другом и каковы свойства получаемых при этом соединений. Способность элементов вступать во взаимодействия характеризуется *валентностью*, а электроны внешней оболочки соответственно называются *валентными электронами*. У электрических проводников, в частности металлов, некоторые электроны находятся столь далеко от ядра и так слабо с ним связаны, что их нельзя считать принадлежащими определенному атому или молекуле. В любом теле всегда существует достаточное количество электронов, благодаря чему оно остается электрически нейтральным, но сами электроны могут относительно свободно перемещаться внутри тела.

В теле между атомами и молекулами действуют силы электростатического взаимодействия. Предполагается, что результирующая сила взаимодействия между двумя покоящимися атомами меняется с расстоянием между их центрами так, как показано на рис. 15. Оказывается, эта сила складывается из двух: силы отталкивания, которая очень быстро уменьшается

с расстоянием, и силы притяжения, которая также уменьшается с расстоянием, но гораздо медленнее. Если два атома сближаются, сила их взаимодействия сначала определяется притяжением, увеличивающимся по мере их сближения до точки *А*, где начинает сказываться отталкивание. С этого момента отталкивание становится преобладающим и результирующая сила быстро падает, пройдя через нулевое значение в точке *Б*. Два атома, находящиеся в состоянии покоя на расстоянии *Б* друг от друга, должны оставаться на этом расстоянии, поскольку действующие на них внешние силы взаимно уравновешиваются.

В действительности атомы и молекулы никогда не находятся в состоянии покоя. В твердом теле, где они в основном расположены в пределах некой регулярной структуры, называемой *решеткой*, они сохраняют свое положение вблизи равновесной точки *Б* (хотя их положение зависит и от их ближайших соседей), относительно которого они совершают колебательные движения. Как видно из рис. 15, в точке *Б* сила отталкивания с уменьшением расстояния увеличивается значительно быстрее, чем направленная в противоположную сторону сила притяжения. При колебательном движении атомов их смещения различны в разных направлениях, в результате чего их равновесное положение смещается относительно точки *Б*. Как мы увидим позже, с повышением температуры размах, или *амплитуда*, таких колебаний возрастает. Следовательно, расширение вещества при нагревании обусловлено увеличением среднего расстояния между атомами, что является результатом их более интенсивного колебательного движения.

Дальнейший рост амплитуды колебаний приводит к разрушению регулярной структуры, характерной для *твердого состояния*, и более свободному размещению атомов, которое присуще *жидкому состоянию*. Расстояние между атомами и молекулами в жидкости больше, чем в твердом теле, но они все еще продолжают находиться под действием сил притяжения и отталкивания. При *газообразном состоянии* движение молекул становится достаточно интенсивным, и они утрачивают связь друг с другом. Перемещаясь во всех направлениях, молекулы сближаются и удаляются

друг от друга, не вступая в постоянное взаимодействие; они могут «разлететься» настолько, что заполнят любой резервуар, в который их помещают. Тем не менее именно благодаря их частым сближениям, приводящим к столкновениям, в любой момент времени в объеме газа поддерживается некоторая средняя скорость, хотя скорости отдельных молекул всегда отличаются от нее в ту или иную сторону.

Энергия

Энергия является одним из ключевых понятий науки, но к нему подошли не сразу. Учитывая широкий диапазон применения этого понятия, полезно рассмотреть его подробнее.

Начнем с понятия *работы*. Это есть некая количественная характеристика, которую мы можем проверить на опыте, совершая физическое усилие. Формально ее определяют через понятие *силы*, под действием которой происходит движение. Если под действием силы P тело перемещается на расстояние x в направлении ее действия, то работа, совершенная над телом, равна произведению $P \cdot x$. При этом работа может производиться несколькими способами. Если сила приложена к телу, которое может свободно перемещаться, то возрастет его скорость v; если же сила действует на деформируемое тело, например пружину, то изменится его форма. В таких простейших случаях говорят, что *энергия* тела увеличилась на величину, равную совершенной над ним работе. В настоящее время, если не считать химических реакций и тому подобное, можно утверждать, что, как правило, любое увеличение энергии системы, связанное с изменением ее состояния, равно работе, которую необходимо совершить над системой, чтобы вызвать это изменение.

Энергия может «сохраняться» в теле в различных видах. Здесь нас интересуют лишь два наиболее общих вида энергии: *кинетическая и потенциальная*. Пусть частица с массой m, находившаяся первоначально в состоянии покоя, постепенно ускоряется и приобретает скорость v. Легко показать, что при этом над ней совершается работа, равная $mv^2/2$, которая

и приводит к увеличению ее кинетической энергии, или энергии движения. Если же под действием силы постепенно сжимается пружина, то совершаемая работа способствует повышению потенциальной энергии последней, то есть изменению положения системы.

Чтобы понять сущность этих видов энергии, проанализируем поведение атомов и молекул. Молекулы газа движутся относительно друг друга, кинетическая энергия является мерой их *поступательного* движения. Для повышения интенсивности вращения также необходимо совершить работу, поэтому вращающиеся молекулы обладают кинетической энергией, которая теперь служит мерой их *вращательного движения.* Энергия вращательного движения отдельных атомов одноатомного газа ничтожно мала, но при группировании их в молекулы она значительно увеличивается, так что вращательная составляющая их кинетической энергии весьма существенна. Межатомные силы в молекуле действуют в какой-то мере подобно пружинам, соединяющим атомы, поэтому такие системы молекул обладают и потенциальной энергией. При колебаниях атомов относительно друг друга происходит взаимное превращение кинетической и потенциальной энергии. Аналогичным образом можно исследовать движение молекул в твердом теле, но здесь оно много сложнее.

Потенциальная и кинетическая энергия электронов в атоме обусловлены силами притяжения между электронами и положительно заряженным ядром. Предполагается, что под действием этих сил электрон приобретает центростремительное ускорение, которое обеспечивает его вращение вокруг ядра. Для перемещения электрона на более удаленную орбиту необходимо совершить некоторую работу, в результате его энергия увеличивается. К этому вопросу мы еще вернемся в гл. 4.

В рассмотренных примерах энергия связывается с чисто локальным движением молекул и их составных частей. Такой вид энергии мы будем называть *внутренней энергией.* Ее следует отличать от энергии, связанной с движением тел, состоящих из молекул, например с движением жидкости в трубке. Последнее

имеет очень сложный характер; оно является комбинацией множества макро- и микродвижений, но эти два вида энергии принято строго разграничивать.

Теплота и работа

Как мы уже говорили, чтобы внутренняя энергия тела возросла, над ним необходимо совершить работу. Если таким телом является, например, содержащийся в сосуде газ, увеличения его внутренней энергии можно добиться либо интенсивным перемешиванием, либо сжатием. Но энергию газа можно увеличить и путем его нагревания. Мы знаем, что вода при нагревании превращается в пар. При переходе из жидкого состояния в газообразное среднее расстояние между молекулами увеличивается, а их движение становится более интенсивным. Во всех перечисленных примерах энергия сообщается системе извне, причем либо в виде *теплоты*, либо *работы*. Мы рассмотрели примеры, связанные с увеличением внутренней энергии системы, однако внутренняя энергия системы может и уменьшаться, когда часть ее передается окружающей среде. В последнем случае энергия также проявляется в виде теплоты или работы.

Итак, изменение внутренней энергии системы может осуществляться различными путями, которые отличаются друг от друга по способу передачи энергии. Если при этом изменяется положение одной из границ системы, как, например, при сжатии газа в результате перемещения поршня в цилиндре, говорят, что энергия передается в виде работы. Теплота же представляет собой энергию, которой обменивается тело, с окружающей средой при наличии между ними разности *температур*. Прежде чем рассматривать процесс передачи энергии, остановимся на этом новом понятии.

Температура

Тепло и холод мы воспринимаем через наши органы осязания. Подобные ощущения довольно примитивны и субъективны, однако даже таким путем многие из нас смогут более или менее правильно оценить нагрев тел и, если потребуется, расположить их по степени нагрева. В таких экспериментах мы определяем относительный нагрев тел. Но, по-видимому,

нужна и некоторая абсолютная оценка. Для этого мы должны сопоставить нагрев тела с какой-то хотя бы грубой *шкалой* нагрева; следовательно, необходим некоторый стандарт, сравнение с которым позволит нам судить о нагреве тела. Так возникли шкала температур и понятие *температуры*, которое стали использовать для абсолютного цифрового выражения степени нагрева тела. Мы еще вернемся к вопросу об установлении шкалы температуры, а пока будем применять слово температура для качественной оценки степени нагрева, полагая, что более горячее тело имеет более высокую температуру. Итак, с повышением температуры перемещения, вращения и колебания атомов и молекул становятся более интенсивными. Мы не можем видеть непосредственно все эти изменения, но мы предполагаем их, наблюдая различные явления, которые служат логическим следствием подобных изменений.

Если сложить вместе два твердых тела с различной температурой, то атомы и молекулы контактирующих поверхностей будут взаимодействовать друг с другом. В результате колебания атомов и молекул более холодного тела усилятся и, наоборот, в более горячем теле они ослабнут. В этом случае работа совершается за счет межмолекулярного взаимодействия, благодаря которому и осуществляется передача энергии от более нагретого тела к менее нагретому. Если процесс передачи энергии обусловлен разностью температур, то мы можем отождествлять энергию с теплотой и называть этот процесс *передачей теплоты.*

В зависимости от физического состояния тел передача теплоты сказывается на них по-разному. В газах дополнительное поступление теплоты приводит к повышению средней кинетической энергии молекул. Молекулы начинают интенсивнее ударяться о стенки сосуда, в таком случае мы говорим об увеличении давления газа. В твердых телах возрастает амплитуда колебаний атомов, что приводит к смещению их средних положений. При огромном количестве атомов твердого тела мы можем наблюдать эти смещения по изменению размеров тела, и тогда мы говорим о расширении тела. Подобным же образом мы можем объяснить и такие более сложные явления, как плав-

ление и парообразование. Необходимо отметить, что изменение температуры различных тел не находится в строгом соответствии с количеством сообщаемой им энергии. Изменение температуры зависит от числа частиц, участвующих в процессе, их массы, способов передачи энергии и т. д.

Если соприкасаются два тела с различной температурой, то передача теплоты происходит до тех пор, пока в системе не установится *равновесие*. В состоянии равновесия взаимодействие атомов уже не вызывает каких-либо изменений в наблюдаемых свойствах тел. Внутренняя энергия каждого из тел в таком состоянии также не изменяется. Из общих соображений мы можем предполагать и равенство их температур. Как показывают наблюдения, любое третье тело, приведенное в состояние равновесия с одним из двух исходных тел, стремится к равновесию и с другим, если с ним также устанавливается контакт. Это так называемый *нулевой закон термодинамики*, который носит универсальный характер. Его необычное название связано с тем, что этот закон не признавался до тех пор, пока не были установлены первое и второе начала термодинамики (которые мы рассмотрим позже), хотя логически он должен был им предшествовать [1].

Что же общего между различными телами, отличающимися формой, размером и составом, если все они находятся в тепловом равновесии? Одно из этих тел можно использовать для отсчета температуры. Очевидно, что в условиях равновесия температура всех этих контактирующих тел будет одинаковой. Такой логический вывод из нулевого закона термодинамики впервые сделал Джеймс Клерк Максвелл в 1868 г.

Температурные шкалы и идеальный газ

Итак, мы подошли к первому определению температуры. Температура — это некая характеристика тела, которая имеет одинаковое значение для всех тел,

[1] Большинство современных руководств и учебников по термодинамике не выделяют «нулевой закон» в качестве основного положения, а рассматривают его как одно из следствий второго начала термодинамики. — *Прим. ред.*

находящихся в тепловом равновесии. Но для количественных оценок теплового поведения тел мы должны ввести стандартный способ задания температуры. И здесь нам необходимо устройство, с помощью которого мы можем измерять какой-либо доступный для наблюдения параметр, изменение которого согласуется с изменением температуры. Такое устройство называется *термометром*. При измерении температуры тела термометр, соприкасаясь с ним, приходит с телом в состояние равновесия и показывает общую температуру системы в значениях измеряемого параметра, например высоты столбика ртути или электрического сопротивления проводника. Основная трудность при этом заключается в том, что различные измеряемые параметры по-разному зависят от температуры, поэтому показания подобных термометров необходимо приводить в соответствие со стандартной шкалой температуры.

Наибольшее распространение в качестве стандартной получила *температурная шкала идеального газа*. Считается, что внутренняя энергия идеального газа равна кинетической энергии его молекул. Зависимость температуры идеального газа от его внутренней энергии проста. Свойства идеального газа изучаются в рамках так называемой *кинетической теории газов*. Систематическое изложение этой теории в последнее время приписывается немецкому физику Рудольфу Клаузиусу (1857), хотя определенные ее положения возникли и получили распространение по крайней мере столетием раньше. Согласно этой теории, молекулы газа ведут себя подобно классическим частицам, то есть движутся независимо друг от друга и их отталкивание от стенок сосуда совершается без потерь энергии.

Движение молекул в закрытом сосуде (рис. 16) в любой момент времени можно условно изобразить в виде двух равных и противоположно направленных потоков в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений. Предположим, что один из этих потоков движется параллельно стороне сосуда длиной l. Пусть масса каждой молекулы равна m, а средняя скорость — v. Если в сосуде N молекул, а в каждом потоке соответственно $N/6$, то за некий малый интервал

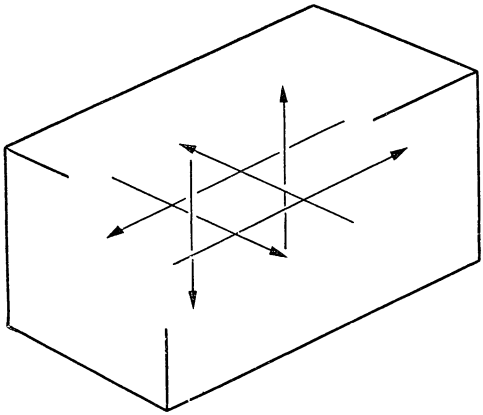


Рис. 16. Движения молекул согласно кинетической теории газов.

времени t достигнет противоположной стенки и ударится о нее $Nvt/6l$ молекул. Давление в сосуде не изменяется, поскольку при соударениях молекул со стенкой потерь энергии не происходит. В этом случае лишь меняется направление скорости v. Произведение $m \cdot v$ называется *количеством движения,* или *импульсом* молекулы. При изменении направления скорости общее изменение количества движения молекулы составляет $2mv$. За время t изменение количества движения всех молекул равно $(Nvt \cdot 2mv)/6l$. Согласно второму закону Ньютона, сила, с которой молекула давит на стенку, равна скорости изменения общего количества движения молекул, или $2Nmv^2/6l$. Тогда давление p находится из соотношения

$$p = \frac{2Nmv^2}{6Al}. \qquad (3.1)$$

Произведение Al равно объему V сосуда, поэтому

$$p = \frac{1}{3}\frac{N}{V} \cdot mv^2. \qquad (3.2)$$

Очевидно, что для других стенок сосуда эта величина определяется аналогично. Поскольку кинетическая энергия E молекулы равна $mv^2/2$, окончательно получаем:

$$p = \frac{2NE}{3V}$$

или

$$p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot E. \tag{3.3}$$

Давление p и объем V газообразного тела легко измерить. Еще в 1660 г. Бойль установил, что при постоянной температуре газа (независимо от ее величины) остается неизменным и произведение $p \cdot V$. Если же газ нагревать или охлаждать, то значение $p \cdot V$ соответственно увеличивается или уменьшается. Как видно из уравнения (3.3), $p \cdot V$ пропорционально кинетической энергии молекулы, отсюда мы легко можем установить связь между энергией и температурой. Следовательно, мы подошли к определению температуры через свойства идеального газа. Таким образом, температура прямо пропорциональна кинетической энергии молекул:

$$E = \text{const} \times T. \tag{3.4}$$

Это простейшее соотношение между E и T. Для определения величины T в уравнение (3.3) подставим значение E, полученное из (3.4):

$$p \cdot V = \text{const} \times NT$$

или

$$pV = k \cdot N \cdot T. \tag{3.5}$$

Значение постоянной k (одной из основных физических констант) зависит от того, в каких единицах мы измеряем p, V и T. Она была введена австрийским физиком Больцманом (1844—1906) и в честь него получила название *постоянной Больцмана.*

Величина кинетической энергии молекулы идеального газа равна $3k \cdot T/2$. Причем, как показывает кинетическая теория газов, эта величина не зависит от природы частиц, из которых состоит газ. В нашем примере мы говорили о молекулах, но это могут быть и атомы и даже элементарные частицы, например электроны. Итак, независимо от природы частиц их энергия при одной и той же температуре одинакова. Она зависит только от их массы. Мерой относительной массы молекул служит так называемый *молекулярный вес* M_1 (это масса m какой-либо молекулы, отнесенная к эталонной массе, в качестве которой

выбран вес атома углерода, равный 12). Тогда масса молекулы определяется из соотношения

$$m = \text{const} \times M_1 = k_1 \cdot M_1. \tag{3.6}$$

Общая масса M газа в сосуде равна $N \cdot m$, или $k_1 \cdot N \cdot M_1$, а число молекул равно $M/k_1 \cdot M_1$. Тогда уравнение (3.3) принимает вид

$$p \cdot V = \frac{M}{M_1} \cdot \frac{k}{k_1} \cdot T;$$

видоизменив его, получаем

$$p \cdot V = M \cdot \frac{R_1}{M_1} \cdot T, \tag{3.7}$$

где R_1 — новая константа, называемая *универсальной газовой постоянной.*

Уравнение (3.7) называют уравнением состояния идеального газа. С его помощью мы можем определять цифровое значение температуры. Из уравнения (3.7) находим, что при определенной массе газа в закрытом сосуде постоянного объема температура пропорциональна давлению. Другими словами, если при давлении p_1 температура равна T_1, то давлению p соответствует температура T, то есть

$$T = \left(\frac{T_1}{p_1}\right) \cdot p. \tag{3.8}$$

Следует отметить, что описываемая этим соотношением закономерность была экспериментально установлена Чарлзом (1787).

Температура, равная 273,16 К по шкале Кельвина, есть температура, при которой воспроизводится физическое состояние, известное под названием *тройственная точка воды.* Уравнение (3.8) можно использовать для калибровки газового термометра, при этом нужно просто для каждого значения температуры измерять давление, что сравнительно нетрудно. Постоянную (T_1/p_1) можно выбирать произвольно, но наиболее удобно использовать отношение 273,16 К на 1 атм, так как при атмосферном давлении по этой шкале точки замерзания и кипения воды отстоят друг от друга также на 100 градусов, как и по стоградусной шкале Цельсия. В нашей книге мы будем пользоваться значениями температуры, измеренными по

шкале Кельвина [она названа так в честь английского физика Уильяма Томсона, позднее лорда Кельвина (1824—1907)] с помощью термометра на основе идеального газа.

Теплоемкость

В последующих разделах книги нам неоднократно придется пользоваться понятием *теплоемкости*. Читатель, по-видимому, встречался с ним и раньше, однако это понятие нуждается в некотором пояснении.

Удельная теплоемкость — это количество энергии, которое необходимо для повышения температуры единицы массы вещества на одну единицу. Предположим, что закрытому сосуду с идеальным газом сообщается некоторое количество энергии Q. При достижении равновесия эта энергия распределится среди N молекул, что приведет к повышению внутренней энергии U на величину ΔU, то есть

$$Q = \Delta U. \tag{3.9}$$

Как мы уже знаем, внутренняя энергия идеального газа равна кинетической энергии его молекул, следовательно

$$\Delta U = N \times \Delta E. \tag{3.10}$$

Но поскольку общая масса M газа пропорциональна числу молекул N, а величина ΔE пропорциональна приращению температуры ΔT, то уравнение (3.9) принимает вид

$$Q = \text{const} \times M \Delta T,$$

или

$$Q = c_V \cdot M \Delta T. \tag{3.11}$$

Постоянная c_V называется *удельной теплоемкостью при постоянном объеме*. Оговорка относительно постоянства объема необходима, так как при нагревании газа в сосуде, объем которого может изменяться, температура газа изменяется иначе. Например, если газ находится в баллоне, то увеличение давления газа может привести к расширению баллона. Тогда сообщаемая энергия расходуется и на расширение, и на повышение внутренней энергии газа. В этом случае теплоемкость оказывается больше, чем при постоянном объеме.

Уравнение (3.11) позволяет определять теплоемкость любого вещества. При нагревании твердого тела не всегда возможно полностью предотвратить его расширение. Тогда вводят понятие *удельной теплоемкости при постоянном давлении*. Очевидно, при других ограничениях мы получим иные значения теплоемкости.

Идеальный газ и другие вещества

Для упрощения изложения мы пользовались понятием идеального газа. Его поведение и свойства можно предсказывать, исходя из основных положений кинетической теории газов. Реальные элементарные газы своим поведением во многом напоминают идеальный газ, но при более сложной структуре газа кинетическая теория оказывается бессильной. Даже в простейших составных газах, например в углекислом газе CO_2, молекулы могут запасать энергию не только в виде кинетической энергии поступательного движения, но и в другой форме. Такие достаточно большие молекулы обладают значительной кинетической энергией вращательного и колебательного движений. Можно показать, что удельная теплоемкость c_V для идеального газа равна $3R_1/2M_1$. Согласно кинетической теории, величина c_V для газа, молекулы которого состоят из трех атомов, равна $3R_1/M_1$, удельная теплоемкость газа возрастает с появлением дополнительной степени свободы, соответствующей энергии вращательного движения. Однако даже для простого реального газа CO_2 теплоемкость при обычных температурах оказывается на 15% выше (чем для трехатомного идеального газа). Теплоемкость жидких и твердых тел, если не воспользоваться более точной моделью, рассчитать довольно трудно, поскольку движения молекул в таких системах имеют очень сложный характер.

Однако, несмотря на всю ограниченность применения, значение кинетической теории и модели идеального газа чрезвычайно велико, поскольку они позволили установить такие новые понятия, как температура и теплоемкость, которые применимы и к более сложным реальным системам. В тех разделах книги,

где потребуется ввести некоторые дополнительные понятия термодинамики, мы вновь будем обращаться к идеальному газу.

Единицы физических величин

Итак, мы уже ввели основные термодинамические величины. Остальные понятия мы будем рассматривать по мере их возникновения. Для количественного выражения этих величин необходимы соответствующие стандартные единицы измерения.

Все используемые в книге основные физические характеристики, такие, как масса, длина, время и температура, мы будем выражать в единицах Международной системы единиц (СИ): килограмм, кг; метр, м; секунда, с (а иногда час, ч) и Кельвин, К. Если мы измеряем температуру по шкале Кельвина, то записываем ее в виде T К; для перехода к стоградусной шкале Цельсия (где начало отсчета соответствует точке замерзания воды) необходимо воспользоваться соотношением

$$T°\mathrm{C} = T\mathrm{K} - 273. \qquad (3.12)$$

Интервал температуры t, отсчитанной по шкале Кельвина, мы обозначим как t К. Напомним, что 1 К = = 1° С. За единицу энергии (а следовательно, теплоты и работы) в системе СИ принят *джоуль*, Дж, а за единицу *мощности* — ватт, Вт, равный 1 Дж/с. В настоящее время единица Дж еще не получила широкого распространения, и для наших целей она безусловно мала, так как, например, затраты энергии на обогрев дома в зимнее время оцениваются в сотни миллионов джоулей.

Более подходящей для нас единицей мощности является ватт, в ваттах принято выражать мощность электрических, световых и нагревательных приборов. Более того, в быту для измерения потребляемого нами количества электричества мы привыкли пользоваться единицами киловатт-час, кВт·ч; эта единица хорошо известна нам по счетам за электроэнергию. В нашей книге в качестве единицы энергии мы будем использовать 1 кВт·ч, который соответствует энергии, вырабатываемой (потребляемой)

электрической цепью мощностью в 1 кВт в течение 1 ч. Для перевода кВт·ч в Дж можно воспользоваться соотношением 1 кВт·ч $= 3{,}6 \cdot 10^6$ Дж.

Говоря об энергетической потребности земного шара, мы оценивали ее в сотни миллионов кВт·ч. Однако подобное обозначение довольно громоздко. В системе СИ для выражения таких больших величин используется ряд приставок, которые добавляются к основным единицам: мега (М) — миллион, гига (Г) — тысяча миллионов, тера (Т) — миллион миллионов и т. д. Мы уже встречались с аналогичными приставками, обозначающими доли основных единиц, например микрометр (мкм), то есть миллионная доля метра. Все эти приставки широко применяются в науке, но в обыденной практике, за исключением таких, как микро-, милли-, кило-, мега-, они малоизвестны. Данное положение вряд ли изменится, если мы не будем применять их постоянно. В нашей книге использование этих единиц целесообразно. Так, энергетическую потребность в будущем мы оценим величиной 200 Т кВт·ч. При обозначении слишком малых величин мы вновь сталкиваемся с подобными же трудностями (например, заряд электрона составляет около 0,16 аттокулон (аКл). Для упрощения обозначений мы будем использовать десятичную систему ($10^2 = 100$, $10^7 = 10\,000\,000$ и т. п.). Подобное описание кратко, понятно и не требует никаких приставок. Следовательно, величину энергетической потребности в будущем мы можем записать в виде $2 \cdot 10^{14}$ кВт·ч (или $2 \cdot 10^{17}$ Вт·ч), а заряд электрона $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

В дальнейшем мы по-прежнему будем записывать некоторые величины в тысячах, миллионах и т. д. единиц, но там, где это выглядит слишком громоздко, будем применять десятичную систему обозначений.

4. Собирание солнечной энергии

Так быстро светлые тела приходят в беспорядок.
Вильям Шекспир (1564—1616)

Общеизвестно, что на солнце предметы нагреваются. Солнечную энергию можно использовать либо непосредственно — для обогрева домов или приготовления пищи, либо косвенно — для генерирования электричества. В дальнейшем мы рассмотрим, в каких случаях такие процессы экономически целесообразны. Сначала познакомимся с методами, которые используются в отдельных частных случаях для расчета нагрева. Но прежде всего нам необходимо детально исследовать процесс взаимодействия излучения с материальными телами. На солнце предметы нагреваются в результате поглощения ими энергии солнечного излучения. Для объяснения этого явления в свое время предлагалось множество механизмов, но только появившаяся в этом столетии *квантовая теория* оказалась в состоянии справиться с подобной проблемой. Хотя эта теория и возникшая на ее основе *волновая механика* чрезвычайно сложны, мы попытаемся строить наше объяснение на основе простейших моделей, таких, как модель атома Бора. Более глубокого анализа здесь и не требуется.

Элементы квантовой теории

Квантовая теория исходит из признания двойственной природы частиц (частица — волна). В предыдущей главе мы видели, что во многих случаях свет проявляет волновые свойства, и его длину волны легко измерить. Ньютон (1704) впервые начал рассматривать свет как поток частиц, или корпускул; в дальнейшем такой подход нашел свое отражение в понятии

фотон, которое ввел Эйнштейн (1905) для объяснения процесса испускания электронов атомом под действием света. В этом процессе, названном *фотоэффектом*, свет проявляет свойства частиц, энергия которых зависит от длины световой волны. Подобные корпускулярные свойства обнаруживают все виды электромагнитного излучения. Позднее де Бройлем (1924) была сформулирована и обратная мысль: все объекты, которые обычно ведут себя как частицы, проявляют волновые свойства и характеризуются определенной длиной волны, зависящей от их энергии. Двойственная природа обнаруживается даже у таких относительно больших объектов, как атомы, которые также иногда проявляют волновые свойства.

Существенным моментом квантовой теории является положение о том, что энергия любой системы, проявляющей волновые свойства, может изменяться лишь дискретно определенными элементарными порциями, так называемыми *квантами*. Энергия кванта прямо пропорциональна *частоте* соответствующего колебания. Итак, если волна длиной λ распространяется со скоростью v, то ее частота ν (определяемая числом волн проходящих через данную точку в единицу времени), очевидно равна

$$\nu = \frac{v}{\lambda}. \tag{4.1}$$

Например, скорость световых волн составляет около $3 \cdot 10^8$ м/с, а длины волн видимой области спектра около $0{,}6 \cdot 10^{-6}$ м, тогда их частота равна $5 \cdot 10^{14}$ герц (Гц).

Величина кванта энергии для такой волны находится из уравнения

$$E = h \cdot \nu, \tag{4.2}$$

где h — *постоянная Планка* (названная в честь Макса Планка, который в 1901 г. получил подобное соотношение в другой связи). Эта постоянная весьма мала — $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж/с. Поэтому дискретный характер изменения энергии заметно проявляется лишь на очень высоких частотах, для которых квант энергии достаточно велик. Кстати, квант света, то есть энергия светового фотона, составляет $3 \cdot 10^{-19}$ Дж. Изменения энергии такого порядка важны лишь на уровне атома.

До сих пор мы говорили только о понятии энергии в квантовой теории. Теперь рассмотрим другую характеристику частиц — *количество движения*, или *импульс*, который определяется как произведение массы частицы на ее скорость mv. В гл. 3, рассматривая кинетическую теорию газов, мы получили соотношение между количеством движения молекул газа и его давлением на стенки сосуда. С помощью чувствительной аппаратуры можно обнаружить давление света [1] на освещаемый объект, которое обусловлено наличием у фотонов света импульса. Импульс фотона q связан с его длиной волны следующим соотношением:

$$q = \frac{h}{\lambda}. \tag{4.3}$$

Когда в 1924 г. де Бройль приступил к рассмотрению основных положений квантовой теории, он предположил, что длина волны частицы связана с ее импульсом той же зависимостью, которая характерна для любого вида излучения, то есть соотношением (4.3). В дальнейшем это положение было подтверждено результатами многочисленных экспериментов.

Цель настоящего раздела книги — подготовить читателя к анализу процесса взаимодействия излучения с материальными телами. Для лучшего понимания подобного рода явлений обратимся к простейшей модели атома водорода — модели Бора. В этой модели электроны рассматриваются как классические частицы, которые, вращаясь вокруг ядра, удерживаются на своих орбитах кулоновскими силами электростатического взаимодействия с положительно заряженным ядром. Для поддержания движения частицы по окружности необходимо наличие силы, направленной к центру этой окружности. Если же частица движется без какого-либо воздействия внешней силы, то ее движение, согласно первому закону Ньютона, будет прямолинейным. Легко показать, что при движении со скоростью v по круговой траектории радиуса r частица постоянно испытывает ускорение, равное v^2/r и направленное к центру окружности. Как мы знаем из

[1] Давление света на тела впервые было экспериментально установлено в 1899 г. выдающимся русским физиком П. Н. Лебедевым. — *Прим. ред.*

второго закона Ньютона, в этом случае на частицу должна действовать сила, также направленная к центру окружности и пропорциональная ускорению и массе частицы. Сила электростатического взаимодействия электрона с ядром прямо пропорциональна заряду ядра Z и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Орбита электрона будет устойчивой, если выполняется соотношение

$$\frac{CZ}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \tag{4.4}$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Отсюда получаем радиус круговой орбиты электрона

$$r = \frac{CZ}{mv^2}. \tag{4.5}$$

Если импульс электрона равен mv, то из уравнения (4.3) мы получаем выражение для длины волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \tag{4.6}$$

Согласно этой модели, если поведение электронов не изменяется во времени, то должен существовать ряд длин волн, соответствующих данной круговой орбите, то есть

$$2\pi r = n\lambda, \tag{4.7}$$

где n — целое число (1, 2, 3 и т. д.). На основании уравнений (4.5), (4.6) и (4.7) получим

$$r = \frac{n^2h^2}{4\pi^2CZm}. \tag{4.8}$$

Таким образом, электроны могут находиться только на определенных орбитах, радиусы которых определяются из уравнения (4.8) для каждого n. Далее, каждый электрон обладает кинетической энергией, поскольку он движется, и потенциальной энергией, обусловленной электростатическим взаимодействием с ядром (так как для увеличения расстояния между ними необходимо совершить работу). Можно показать, что полная энергия электрона равна

$$E = A - \frac{CZ}{2r}, \tag{4.9}$$

где A — постоянная, зависящая от выбора положения, при котором потенциальная энергия электрона приравнивается нулю. С учетом уравнения (4.8) находим

$$E = A - \frac{2\pi^2 C^2 \cdot Z^2 m}{n^2 h^2}. \qquad (4.10)$$

Если в это уравнение последовательно подставлять n (1, 2, 3 и т. д.), мы получим возрастающий ряд значений энергии, которые называются *разрешенными энергетическими уровнями* электрона. Если электрон характеризуется одним из этих значений энергии, он находится в *стационарном состоянии*. И покуда электрон остается в атоме, он должен быть в одном из этих состояний.

При переходе электрона с одной орбиты (радиуса r_1) на другую (радиуса r_2) его энергия возрастает на величину

$$\Delta E = \frac{CZ}{2}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{2\pi^2 C^2 \cdot Z^2 m}{h^2}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \qquad (4.11)$$

Если переход происходит за счет поглощения излучения, то энергия захваченного фотона должна равняться ΔE. Тогда соответствующую энергии такого фотона частоту мы находим из уравнения

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{2\pi^2 C^2 \cdot Z^2 m}{h^3}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right). \qquad (4.12)$$

Если какую-либо исходную орбиту электрона охарактеризовать *главным квантовым числом* n_1, то можно определить спектр частот (и, следовательно, длин волн) излучения, испускаемого при переходе электрона на различные более удаленные орбиты, характеризуемые главными квантовыми числами n_2. Очевидно, если энергия поглощаемого фотона выше энергии, необходимой для перехода электрона на самую удаленную орбиту, то электрон покидает атом, что и наблюдается при фотоэлектрическом эффекте.

Итак, чтобы получить представление об энергетических уровнях, о поглощении фотона и т. д., мы воспользовались очень простой моделью атома. Боровская модель достаточно хорошо описывает атом водорода, содержащий лишь один электрон. Для атомов

более сложного строения такая модель оказывается слишком упрощенной. Тем не менее теперь мы уже можем приступить к анализу поведения более сложных систем, учитывая при этом, что наши приближения достаточно грубы. В современной квантовой механике отказались от представления об электронах как о частицах, вращающихся вокруг ядра. Однако понятие *энергетических уровней*, полученное на основе простейших моделей, является существенным элементом и более поздних работ.

Взаимодействие излучения с твердыми телами

Мы видели, что взаимодействие между падающим фотоном и электроном происходит лишь в том случае, если энергия фотона точно соответствует значению энергии, необходимой для перехода электрона на другую допустимую орбиту. В этом случае говорят, что атом обладает *дискретным поглощением*, то есть из всего спектра длин волн поглощаются лишь те, которые соответствуют квантовым числам. Однако в твердом теле число допустимых энергетических уровней значительно больше, чем в изолированном атоме. Атомы расположены настолько близко друг к другу, что электроны каждого атома оказываются под влиянием и других ядер. А в электрических проводниках внешние, или валентные, электроны перемещаются настолько свободно, словно они не принадлежат «своим» атомам. Кроме того, сами атомы в твердом теле совершают колебательные движения, что также увеличивает число возможных энергетических уровней. Поэтому твердые тела поглощают излучение в очень широком диапазоне длин волн, и обычно они характеризуются не дискретным, а сплошным (непрерывным) спектром поглощения.

Однако твердое тело поглощает не все падающие на него фотоны: одни из них рассеиваются в столкновениях, а другие проходят сквозь тело без взаимодействия.

Но даже для твердых тел, обладающих почти непрерывным спектром поглощения, вероятность поглощения фотона зависит от энергии последнего и,

следовательно, длины волны. Если число фотонов, прошедших сквозь тело либо без всякого взаимодействия, либо после рассеяния, составляет значительную долю от общего числа падающих на его поверхность фотонов, то говорят, что тело проницаемо для излучения. Когда речь идет лишь о видимой части спектра излучения, вещество называют *прозрачным*, если большинство падающих фотонов проходит сквозь него, или *просвечивающим*, если многие из них рассеиваются без поглощения.

Некоторые фотоны рассеиваются в обратном направлении, и их можно вновь обнаружить у поверхности, на которую они падали. В материале, проницаемом для излучения, фотоны могут претерпевать внутри тела многократное рассеяние, но если поглощение в материале велико, назад возвращаются лишь те фотоны, которые рассеиваются вблизи поверхности. В обоих случаях мы говорим, что тело отражает фотоны. Таким образом, падающие на тело фотоны могут отражаться, поглощаться или проходить сквозь него. Доля фотонов каждой из названных категорий в общем количестве падающих фотонов соответственно характеризует *отражательную*, *поглощательную* и *пропускательную* способность тела. Сумма всех этих показателей должна составлять единицу. Их величина зависит не только от длины волны, но и угла падения излучения, а также состояния поверхности тела. Например, отражательная способность гладкой поверхности высока, особенно при наклонном падении излучения, при шероховатой же поверхности некоторые фотоны могут оказаться во впадинах, и тогда вероятность их поглощения возрастает.

Излучение энергии

При поглощении излучения тело переходит в возбужденное состояние, при котором электроны находятся на более высоких энергетических уровнях, а интенсивность колебаний атомов в решетке возрастает, то есть температура тела повышается. Случайные фотоны исчезают в этом беспорядке. Тело стремится вернуться в исходное состояние, испуская избыточную энергию. Теперь происходит обратный процесс: длины

волн испускаемых фотонов соответствуют изменению энергии тела, но число их возможных значений часто столь велико, что спектр такого излучения можно считать непрерывным. Атом или молекула остаются в возбужденном состоянии очень недолго, после чего они испускают фотон той же энергии. Однако в твердом теле или плотном газе благодаря действию межатомных сил до испускания фотона возможна передача энергии от возбужденного атома к соседнему. В результате температура тела выравнивается. Вследствие такого перераспределения и связанного с ним поглощения энергии испускаемое телом излучение имеет весьма широкое распределение по длинам волн.

Взаимодействие радиации с любым телом настолько сложно, что предсказать его характер на основе общих фундаментальных положений совершенно невозможно. Поэтому для этой цели используется модель тела с определенными и достаточно простыми свойствами. Это так называемое *черное тело* с бесконечным числом разрешенных энергетических уровней, которое поглощает все падающее на него излучение независимо от длины волны. Радиационные свойства черного тела впервые были предсказаны Максом Планком (1901) на основе квантовой теории, и это явилось одним из самых выдающихся моментов в истории развития физики. Основная особенность черного тела заключается в том, что испускаемое им излучение определяется его температурой, а плотность энергии D, как и в рассмотренном ранее случае солнечной радиации, зависит от длины волны следующим образом:

$$D = T^5 \times \text{некоторая функция от } (\lambda T)^1, \qquad (4.13)$$

где λ — длина волны, а T — абсолютная температура тела. Необходимо подчеркнуть, что особенно важна зависимость плотности энергии от произведения λT.

Эта функция от (λT), представленная на рис. 17, характеризует зависимость излучения от длины волны при любой данной температуре. (Необходимо

[1] Точный вид соотношения: $D = c_1 T^5/(\lambda T)^5 \cdot \{\exp(c_2/\lambda T) - 1\}$. Если D измерять в Вт/м^2·мкм, T в кельвинах, а λ в мкм, то константы c_1 и c_2 соответственно равны $3{,}74 \cdot 10^8$ и $1{,}44 \cdot 10^4$. Exp x — экспоненциальная функция e^x, где $e = 2{,}7183$.

напомнить, что здесь используется именно абсолютная температура, то есть температура, измеренная по шкале, началом отсчета которой является абсолютный нуль, — точка, где невозможно никакое излучение.) Плотность энергии излучения достигает максимума в окрестности точки $(\lambda T) = 2900$ мкм·К. Очевидно, что длина волны λ, при которой достигается максимальное значение (λT), падает с повышением температуры в соответствии с соотношением $\lambda = 2900/T$ (мкм). Применительно к какой-то определенной длине волны кривая на рис. 17 характеризует зависимость плотности излучения от температуры. Например, если считать солнце черным телом с поверхностной температурой 5800 К, то его максимальная плотность энергии соответствует длине волны 0,5 мкм (как и есть на самом деле), однако температура тела в типичных земных условиях составляет 290 К (17° С), и тогда максимум плотности приходится на длину волны 10 мкм, то есть на инфракрасную область спектра.

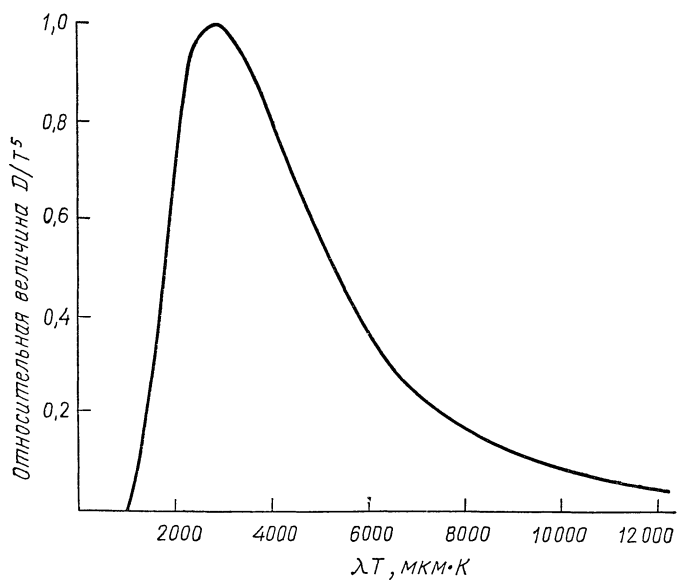


Рис. 17. Обобщенная кривая распределения энергии излучения абсолютно «черных тел».

Для начала заметим, что если тело имеет достаточно высокую температуру, при которой максимум плотности его излучения лежит вблизи красного конца видимой области спектра, то оно должно быть более ярким по сравнению с окружающими его холодными предметами. Подобное явление наблюдается при температуре около 1500 К (1200° С), когда максимум плотности энергии соответствует длине волны около 2 мкм. В этом случае говорят, что тело разогрето докрасна. Мы, конечно, можем ощущать излучение по его тепловому воздействию на кожу и при значительно более низких температурах. При комнатной температуре мы чувствуем тепловое излучение предметов, если их температура хотя бы на 10 К превышает температуру окружающей среды.

Общее количество излучаемой черным телом энергии получают, суммируя вклад всех длин волн, который мы можем оценить из графика на рис. 17. Как видно из уравнения (4.13), энергия излучения на какой-либо длине волны пропорциональна T^5, однако суммарное излучение во всем диапазоне длин волн, отнесенное к единице поверхности, то есть интенсивность излучения, пропорционально абсолютной температуре в четвертой степени:

$$P_e = \sigma \cdot T^4, \tag{4.14}$$

где коэффициент пропорциональности σ есть постоянная Стефана — Больцмана.

Это уравнение удобно переписать в виде

$$P_e = \left(\frac{T}{64{,}5}\right)^4 \text{ Вт/м}^2, \tag{4.15}$$

если температура измеряется в градусах Кельвина, а $\sigma = (1/64{,}5)^4$ Вт/м^{2}К^4. Поскольку P есть скорость передачи энергии, то она соответствует мощности и измеряется в Вт.

Излучение реальных тел с чрезвычайно сложным распределением энергетических уровней существенно отличается от излучения черного тела как в смысле диапазона длин волн, так и направления испускаемого излучения. Однако иногда для простоты мы используем модель черного тела для анализа свойств и по-

ведения реального тела. При этом мы полагаем, что реальное тело характеризуется некоторой полной *излучательной способностью* ε, или «степенью черноты», соответствующей температуре T, и ε составляет определенную долю энергии, излучаемой черным телом при той же температуре. Кроме того, полагают, что реальное тело обладает *отражательной* ρ, *поглощательной* α и *пропускательной* τ способностями; тогда, если интенсивность падающего на тело излучения равна P, то количества отраженной, поглощенной и прошедшей через тело энергии составляют соответственно ρP, αP и τP. Отметим, что для реального тела величины ε, ρ, α и τ лежат в интервале от 0 до 1, тогда как для абсолютно черного тела они принимают значения 1; 0; 1 и 0.

Радиационные свойства различных тел существенно отличаются друг от друга, но для каждого данного тела они зависят от длины волны излучения. Эта зависимость обусловлена самой спецификой процессов поглощения — излучения. Она проявляется при определении таких свойств, как температура тела (для излучательной способности) или температура, а следовательно, и длина волны источника падающей радиации (для других свойств). В таблице 2 дана количественная оценка радиационных свойств.

Таблица 2

Радиационные характеристики веществ

Вещество	Температура тела или источника излучения				
	20—100° С			5000° С	
	ρ	α	ε	ρ	α
Полированные металлы	0,9	0,1	0,1	0,7	0,3
Оксидированные металлы	0,2	0,8	0,8	0,8	0,2
Белое глянцевое покрытие	0,1	0,9	0,9	0,8	0,2
Черное матовое покрытие	0,05	0,95	0,95	0,1	0,9
Алюминиевое покрытие	0,5	0,5	0,5	0,8	0,2
Бетон	0,1	0,9	0,9	0,4	0,6
Черепичная крыша	0,1	0,9	0,9	0,2	0,8
Стекло	0,1	0,9	0,9	0,1	0,0

Известно, что излучательная способность полированных металлических поверхностей мала при любой температуре, хотя большую роль здесь играет состояние поверхности, наличие окисных пленок и т. д. Хорошо видимая разноцветная окраска этих пленок может иметь высокую или низкую поглощательную способность для излучения, подобного солнечному. Но следует отметить, что в длинноволновой области спектра, то есть при низкой температуре, и поглощательная и излучательная способности этих пленок велики. Исключительно важное значение имеют радиационные свойства стекла. Стекло прозрачно в коротковолновой, то есть видимой области спектра. Благодаря этому оно находит очень широкое применение. Для более длинных волн стекло почти непроницаемо, что, как мы увидим позже, в некоторых случаях также может оказаться полезным.

Равновесная температура

Итак, вернемся к рассмотрению тела, освещаемого солнцем (рис. 18). Рис. 18 показывает, сколь многообразны пути, посредством которых тело приобретает и теряет энергию. Чтобы нам было легче понять поведение такого тела, сначала несколько упростим наблюдаемую картину. Предположим, что интересующее нас тело представляет собой тонкую пластину, лежащую на теплоизолирующем основании (рис. 19, *а*). Здесь мы встречаемся с элементами так называемого *плоского солнечного коллектора*. Получая энергию от солнца, такое устройство вновь излучает ее, не обмениваясь излучением с окружающей средой. В данном случае мы пренебрегаем теплообменом с атмосферой через конвекцию и лучеиспускание, которые рассмотрим позже.

Обозначим интенсивность солнечного излучения через P, а поглощательную способность пластины для этого вида радиации через α_c. Под действием солнечного излучения пластина нагревается до тех пор, пока не достигнет равновесной температуры T. При такой температуре интенсивности падающего и испускаемого

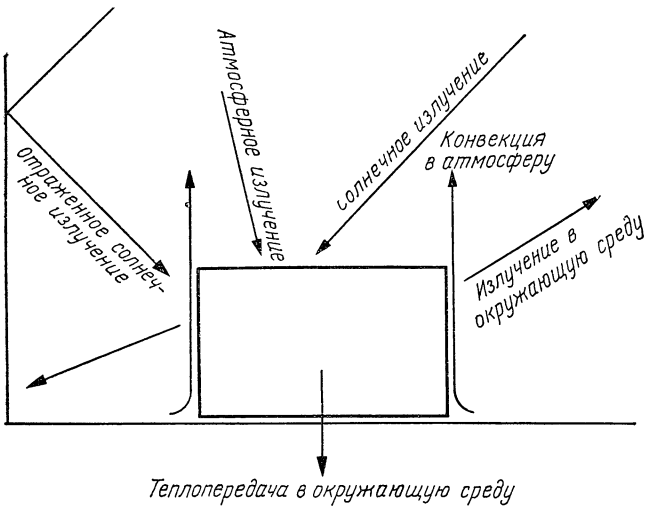


Рис. 18. Потоки солнечной энергии, падающие на облучаемое тело и отраженные им.

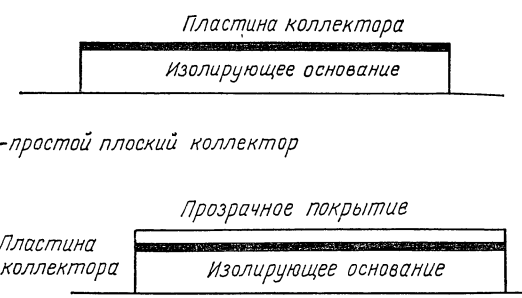


Рис. 19. Плоские солнечные коллекторы.

излучения равны, что позволяет записать равенство

$$\alpha_c \cdot P = \varepsilon\sigma T^4, \qquad (4.16)$$

где ε — излучательная способность нашей пластины при низких температурах. Тогда равновесную температуру T мы получим из уравнения

$$T^4 = \frac{\alpha_c}{\varepsilon} \cdot \frac{P}{\sigma}. \qquad (4.17)$$

Очевидно, равновесная температура тем выше, чем больше отношение α_c/ε. Судя по данным табл. 2, это отношение иногда, в частности для полированных металлов, достигает значений 2—3, но чаще оно много меньше. Однако полированные металлы вследствие их низкой поглощательной способности непригодны для изготовления коллекторов солнечного излучения. Для подобных целей обычно выбирают материалы с высокой поглощательной способностью, для которых отношение α_c/ε близко к 1. Мы будем называть такие материалы *нейтральными поглотителями* (происхождение названия станет ясно из дальнейшего изложения). Полагая $P = 800$ Вт/м^2 (типичная интенсивность солнечного излучения в тропиках в летнее время), из уравнения (4.17) мы находим значение равновесной температуры, равное 343 К (70° С). Как оказалось, несмотря на приближенный характер наших оценок, эта величина действительно близка к реальной температуре черной пластины, установленной на длительное время под тропическим солнцем.

Теперь несколько усложним картину, в частности учтем такой важный фактор, как тепловые потери в воздухе, обусловленные конвекцией. Механизм этого явления прост. Соприкасаясь с горячей поверхностью, воздух нагревается и расширяется; его плотность уменьшается, и он плавно поднимается вверх. На смену приходят другие более прохладные и плотные слои воздуха, в результате возникает конвективное воздушное течение. (Благодаря преломлению света, обусловленному изменениями плотности воздуха, это течение мы часто можем наблюдать визуально.) При неподвижном воздухе интенсивность конвективных тепловых потерь для малой горизонтальной или слегка наклонной поверхности составляет около 4 Вт/м^2 на каждый

градус разности температур поверхности и воздуха, хотя строгой пропорциональности между тепловыми потерями и разностью температур в действительности не наблюдается. При интенсивном движении воздуха над поверхностью, например при ветре, тепловые потери значительно возрастают. Так, при скорости ветра около 10 м/с и малой разности температур интенсивность тепловых потерь на конвекцию достигает 30 Вт/(м^2·К). Все эти значения мы должны принимать как экспериментальные результаты. Конвекционные потери можно оценить и теоретически, но теория этих процессов столь сложна, что мы не будем излагать ее здесь, дабы не осложнять нашего повествования.

Другим важным фактором, влияющим на собирание солнечной энергии, является длинноволновое излучение, приходящее из атмосферы. Оно испускается главным образом молекулами углекислого газа и водяного пара при поглощении ими прямого солнечного излучения, а также излучения, отраженного от земли и обусловленного конвекцией. Спектры поглощения этих молекул, связанные с их колебательными и вращательными движениями, лежат в видимой и инфракрасной областях. Перед испусканием энергия частично перераспределяется, однако в спектре атмосферного излучения вполне отчетливо проявляются линии и полосы, соответствующие длинам волн поглощения.

Общая интенсивность P_a этого излучения существенно зависит от содержания в атмосфере водяного пара, особенно вблизи земной поверхности. При повышенной влажности и сплошной облачности атмосфера ведет себя примерно так же, как черное тело с температурой около 280 К (10° С); соответствующая интенсивность излучения на горизонтальной поверхности составляет около 300 Вт/м^2. На широтах Англии длинноволновое атмосферное излучение иногда достигает этой величины. При безоблачном небе в условиях засушливого климата распределение атмосферного излучения по длинам волн оказывается менее упорядоченным; поглощение, обусловленное молекулами CO_2, сосредоточено в узкой полосе вблизи 15 мкм, тогда как полосы поглощения, связанные с молекулами H_2O, разбросаны в интервале длин волн 20—100 мкм. Тем

не менее общая интенсивность атмосферного излучения редко падает ниже 100 Вт/м². Это весьма существенная радиация, благодаря которой ночью на поверхности Земли поддерживается приемлемая температура. В отсутствие подобного излучения температура земной поверхности в ночные часы должна резко падать (вследствие излучения энергии в пространство), как это и наблюдается на Луне, где атмосфера отсутствует. Температура поверхности Земли в течение ночи иногда снижается настолько, что появляется *иней*, но, за исключением полярных районов, она редко опускается ниже 0° С.

Теперь ясно, почему выше с помощью уравнения (4.17) мы получили удовлетворительное значение равновесной температуры (70° С), хотя и не учитывали теплообмен с атмосферой. При температуре окружающей среды, равной 17° С, и интенсивности конвективных потерь примерно 4 Вт/м²·°С эти потери оцениваются примерно в 212 Вт/м², что как раз компенсируется длинноволновым атмосферным излучением.

Усовершенствование плоского коллектора

Как мы уже видели раньше, характеристики плоского коллектора, определяемые равновесной температурой, можно улучшить, если, не ухудшая существенно его поглощательной способности α во всем спектре солнечного излучения, увеличить отношение α_c/ε в длинноволновой части спектра. Этого можно добиться с помощью так называемых *селективных поглотителей*. Обычно такой поглотитель представляет собой полированную металлическую поверхность, покрытую тонкой темного цвета защитной пленкой окисей никеля или меди. Его поглощательная способность в коротковолновой области довольно высока, порядка 0,9. При очень тонком покрытии подобный поглотитель прозрачен для излучения с длиной волны, превышающей его толщину. Тогда его излучательная способность в длинноволновой части спектра должна быть не выше, чем у металла, то есть около 0,1. Равновесная температура такого селективного поглотителя с величиной отношения α_c/ε, близкой к 9, в рассмотренных ранее

условиях должна повыситься до 427 К, или 154° С (если интенсивность длинноволнового атмосферного излучения составляет 200 Вт/м², а поглощательная способность к этому виду излучения равна 0,1). Однако добиться такого существенного улучшения практически очень сложно. Основная трудность заключается в том, что большинство селективных покрытий очень чувствительно к пылевому загрязнению, и в естественных условиях их характеристики со временем быстро ухудшаются.

Одним из наиболее эффективных методов усовершенствования солнечного коллектора является наложение на поверхность поглотителя одного или нескольких прозрачных покрытий, как это показано на рис. 19, *б*. Большинство тонких пленок из стекла и чистых пластмасс пропускают около 90% солнечного излучения, причем на долю излучения с длинами волн более 2 мкм приходится менее 10%. Такие характеристики стекла позволяют усилить так называемый «тепличный эффект»: стекло, покрывающее теплицу, хорошо пропускает солнечное излучение, но поглощает длинноволновое излучение, испускаемое внутренними поверхностями теплицы. Процесс теплообмена между поглотителем и воздухом теперь протекает иначе, через промежуточную стадию конвективного теплообмена между поглотителем и его покрытием. В результате потери на конвекцию снижаются до минимума. Интенсивность тепловых потерь на расстоянии в несколько сантиметров составляет в таких поглотителях около 4 Вт/м² на градус разности температур между пластинами поглотителя и покрытия, которая теперь значительно меньше, чем в случае непосредственного контакта поглотителя с воздухом, благодаря чему потери уменьшаются. Между пластинами осуществляется также радиационный обмен энергией, который благоприятнее обмена с атмосферой. Внутренний конвективный теплообмен между пластинами, как и теплообмен между открытой пластиной и окружающей средой, не строго пропорционален разности температур, но мы будем считать, что прежнее допущение о пропорциональности остается в силе. Выбранное нами значение интенсивности теплообмена, равное 4 Вт/м²·К, более приемлемо по сравнению с

интенсивностью обычной теплопередачи через слой воздуха толщиной 2 см, величина которой составляет около 1,25 Вт/м²·К. Таким образом, конвективный теплообмен между поглотителем и покрытием, вызывающий дополнительную передачу энергии, приводит к увеличению интенсивности теплообмена почти втрое.

Введем несколько новых упрощений. Мы не допустим серьезной ошибки, если предположим, что покрытие пластины, будучи полностью прозрачным для солнечного излучения, одновременно абсолютно непроницаемо для длинноволнового излучения. Его излучательную способность следует также принять равной 1. Покажем, что обмен энергией между двумя пластинами, одна из которых является черным телом с температурой T, а другая характеризуется излучательной способностью ε при температуре T_1, оценивается выражением $\varepsilon\sigma\left(T^4 - T_1^4\right)$. Тогда интенсивность теплообмена P_1 между поглотителем и покрытием можно записать в виде

$$P_1 = h_1 (T - T_1) + \varepsilon\sigma\left(T^4 - T_1^4\right), \qquad (4.18)$$

где h_1 — коэффициент теплопередачи для конвективной составляющей теплообмена.

Уравнения энергетического баланса для поглотителя и покрытия запишутся соответственно:

$$\alpha_c P = P_1 \qquad (4.19)$$

и

$$P_1 + P_a = h (T_1 - T_a) + \sigma T_1^4, \qquad (4.20)$$

где P_a — интенсивность длинноволнового атмосферного излучения, поглощенного покрытием. Тогда, решая совместно уравнения (4.18) и (4.20) с учетом (4.19), для любых заданных условий получим равновесные температуры T_1 и T.

Даже наличие одного слоя покрытия на пластине дает значительный эффект. В наших примерах равновесные температуры нейтрального и селективного поглотителей соответственно равны 386 К (113° С) и 467 К (194° С). Дальнейшее усовершенствование коллектора иногда достигается нанесением дополнительных слоев прозрачных покрытий. Однако с увели-

чением их числа не только уменьшаются потери энергии в поглотителе, но и вследствие поглощения в пленках покрытий (которым можно пренебречь при наличии одного покрытия) ослабляется передача к нему солнечной энергии.

Другой недостаток многослойного покрытия связан с тем, что оно затрудняет прохождение наклонно падающего излучения. На основе законов геометрической оптики, в частности законов Снелла и Френеля, мы можем рассчитать направление и интенсивность отклоненных стеклянной пластиной лучей. Так, для тонколистового стекла, подобного оконному, ориентировочное значение коэффициента пропускания при углах наклона лучей к нормали до 60° составляет 0,9, а при увеличении угла от 60 до 90° коэффициент линейно уменьшается до нуля.

Дальнейшего повышения равновесной температуры поглотителя можно добиться, если с помощью зеркал сконцентрировать на нем энергию солнечного излучения. На рис. 20 схематически показано одно из таких простейших устройств с плоскими зеркалами. Очевидно, что при использовании полностью отражающей зеркальной системы интенсивность облучения поглотителя увеличивается пропорционально отношению общей облучаемой поверхности зеркал к поверхности поглотителя. Этот показатель называется *коэффициентом концентрации K*. Зеркала монтируют таким образом, чтобы все падающие лучи были направлены на поверхность поглотителя. Если поглотитель квадратной формы снабжен, как показано на рис. 20, четырьмя зеркалами того же размера (что облегчает компоновку и сборку устройства), установленными под углом $\beta = 60°$, то в этом случае коэффициент концентрации равен 3. На практике реализовать все достоинства подобной конструкции оказывается невозможным, поскольку отражающая способность зеркал меньше 100%, а при малых углах падения поглощательная способность поглотителя снижается. Тем не менее величина K, как правило, бывает не ниже 2. В данных условиях равновесная температура плоского солнечного коллектора с зеркальными отражателями рассмотренного типа достигает 180° С (для нейтрального поглотителя) и 332° С (для селективного

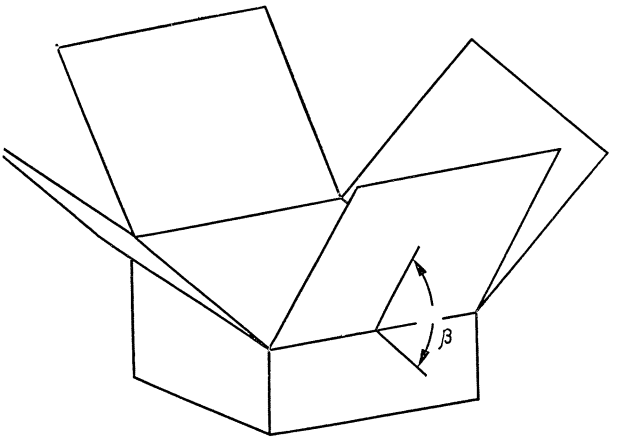


Рис. 20. Концентрация солнечного излучения с помощью плоских зеркал.

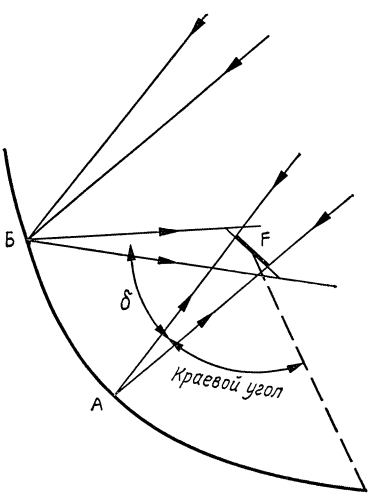


Рис. 21. Концентрация солнечного излучения с помощью параболического зеркала.

поглотителя). Следует заметить, что в данном случае с помощью рефлекторов усиливается лишь прямая составляющая солнечной радиации, так как сконцентрировать рассеянную составляющую оказывается невозможным.

Наиболее совершенной конструкцией обладает параболический концентратор, который фокусирует солнечные лучи так, как это показано на рис. 21. В результате коэффициент концентрации значительно увеличивается. На первый взгляд кажется, что в фокусе такого концентратора можно получить совершенно невероятную равновесную температуру, однако на практике этому препятствует непараллельность солнечных лучей. С Земли мы можем рассматривать Солнце как источник излучения, имеющий форму диска с угловым размером 32′. Степень непараллельности солнечных лучей оценивается как отношение диаметра Солнца к его расстоянию от Земли, выраженное в угловых единицах; оно составляет около 0,0093 радиана. Обозначим этот угол через γ. Если для плоского зеркального отражателя подобное обстоятельство не имеет существенного значения, то в случае параболического концентратора оно ограничивает величину коэффициента концентрации. Вследствие непараллельности лучей их энергия собирается не точно в фокусе (точке), а в некоторой области вокруг него. На рис. 21 показаны траектории лучей, исходящих от противоположных краев солнечного диска и попадающих в точки *А* и *Б*. Лучи, отраженные в середине зеркальной поверхности (точка *А*) создают в фокусе изображение солнечного диска диаметром $2f \operatorname{tg} \gamma/2$, или $f\gamma$ в силу малости угла γ (при фокусном расстоянии $f = 2$ м размер изображения составляет около 2 см). Лучи, отраженные в другой, более удаленной от фокуса точке зеркала, например в точке *Б*, создают изображение большего размера. Кроме того, это изображение лежит в плоскости, повернутой относительно фокальной на краевой угол δ, а его проекция на фокальную плоскость имеет эллиптическую форму. Результирующее изображение, создаваемое всеми отраженными от параболической поверхности лучами, представляет собой множество налагающихся друг на друга эллипсов, размеры кото-

рых увеличиваются по мере смещения A точек падения и отражения образующих эти эллипсы лучей. При равномерной яркости солнечного диска центральная область изображения освещена равномерно, а по мере удаления от центра освещенность уменьшается. Можно заметить, что с увеличением угла δ вклад лучей, отраженных более удаленными от центра параболической поверхности точками, становится меньше. Создаваемые этими лучами изображения оказываются более размытыми. С другой стороны, чем больше угол δ, тем больше площадь зеркальной поверхности концентратора. Учитывая эти факторы, мы можем построить график зависимости K в окрестности центра изображения от краевого угла δ (рис. 22). Как показывает график, для зеркал с краевыми углами до 25° величина K возрастает очень медленно, а при углах выше 70° она практически не меняется. Тем не менее величина K для центральной области (в окрестности фокуса) довольно велика: от 10 000 до 40 000, при двух упомянутых выше значениях краевых углов соответственно. На самом деле вследствие неравномерной яркости солнечного диска значения K оказываются несколько ниже.

Если небольшое тело разместить в фокусе параболического концентратора, то его равновесная температура будет в основном определяться его радиационными потерями. Конвективные тепловые потери в этом случае незначительны. Для черного тела, излучающего только с лицевой стороны, справедливо следующее уравнение:

$$P \times K = \varepsilon\sigma T^4. \qquad (4.21)$$

Тогда при $P = 800$ Вт/м^2 и $K = 10\,000$ и 40 000 равновесные температуры соответственно равны 3440 К (около 3170° С) и 4850 К (около 4580° С).

Как известно, радиационные потери зависят от температуры в четвертой степени, однако зависимость равновесной температуры от K оказалась значительно слабее, чем можно было ожидать. Так, при прочих равных условиях для $K = 5000$ равновесная температура составляет 2890 К (2620° С). Даже с помощью невысокого качества зеркал можно получить достаточно высокую температуру. Однако высокая равно-

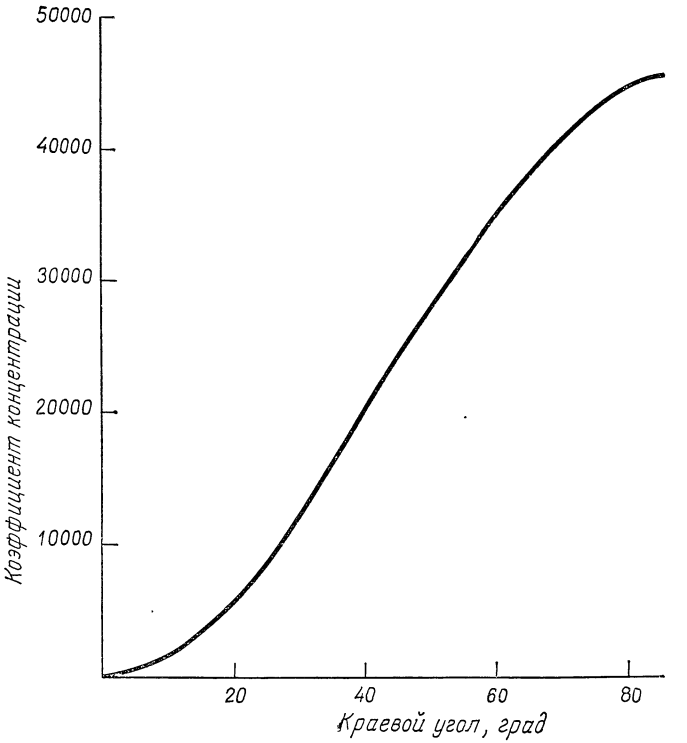


Рис. 22. Влияние краевого угла на коэффициент концентрации в центре фокального изображения.

весная температура является не единственным критерием качества солнечного коллектора.

Для получения максимального количества энергии облучаемое тело должно быть достаточно большим, чтобы принять все лучи, отраженные от концентратора. Как мы уже знаем, интенсивность отраженного излучения уменьшается по мере удаления от центра концентратора. Кроме того, с ухудшением оптических свойств зеркальной поверхности концентратора и с увеличением размеров приемника солнечной энергии уменьшается эффективное значение K, а следовательно, и равновесная температура.

В дальнейшем при рассмотрении систем с параболическими и прочими концентраторами мы будем характеризовать их *эффективным коэффициентом концентрации* $K_э$, не останавливаясь на возможностях его практической реализации. Введение этого коэффициента значительно упрощает расчеты величин в уравнении (4.21). Таким образом, интенсивность на входе приемника равна произведению $P \times K$, деленному на площадь его поверхности. Определенный таким образом коэффициент $K_э$ зависит как от состояния воспринимающей поверхности коллектора, так и степени ее перекрытия солнечным изображением. При среднем качестве зеркал и использовании приемников, достаточно полно воспринимающих отраженное излучение, $K_э$ обычно не превышает 10 000. Равновесная температура составляет для такого коллектора около 1930 К (1660° С).

Солнечный бассейн

Доктор Табор с сотрудниками из Национальной физической лаборатории Израиля разработал и исследовал весьма остроумную разновидность плоского коллектора — *солнечный бассейн.* В таком устройстве поглотителем служит непосредственно водный бассейн, который при необходимости можно оборудовать любым покрытием. Под воздействием солнечной радиации температура воды повышается как за счет непосредственного поглощения водой фотонов энергии, так и за счет теплообмена между поглощающим излучение днищем бассейна и водой. При нагревании вода расширяется и нагретые более легкие слои поднимаются вверх. В таком виде солнечный бассейн, казалось бы, не имеет никаких преимуществ перед обычным поглотителем на основе твердого тела. Однако было обнаружено, что в некоторых природных водоемах самые нагретые слои воды оказываются скорее на дне, чем на поверхности. Как предполагают, это явление обусловлено высоким содержанием соли в таких водоемах.

Еще из школьных опытов мы помним, что с повышением температуры воды растворимость солей увеличивается. Это нетрудно объяснить. Переход частиц

твердокристаллических тел в раствор осуществляется благодаря тому, что силы их взаимодействия с молекулами растворителя оказываются больше сил, удерживающих эти частицы в структуре твердого тела. Проанализировать эти силы взаимодействия теоретически довольно трудно, но мы можем пронаблюдать их экспериментально. При повышении температуры колебания помогают частицам преодолеть силы, удерживающие их в кристаллической решетке, связь между ними ослабевает и они легче переходят в раствор.

Однако повышенное содержание в воде некоторых определенных солей препятствует уменьшению плотности растворителя, обусловленному расширением последнего. Таким образом достигается устойчивое состояние, при котором более нагретые слои жидкости уплотняются и остаются на дне бассейна. Следовательно, температура изменяется с глубиной бассейна так же, как и концентрация соли, которая у поверхности воды оказывается ниже, чем у дна. Результаты экспериментов показали, что равновесная температура в подобных бассейнах может достигать 100° С.

Мы не будем рассматривать подробно принцип действия солнечного бассейна, поскольку анализ протекающих в нем процессов тепло- и массообмена довольно сложен. Процесс поглощения солнечной радиации осуществляется здесь отчасти в толще воды, а отчасти у дна бассейна. Он сопровождается сложным перераспределением энергии между различными слоями жидкости за счет теплопроводности и излучения. Вследствие этого характеристики излучения бассейна определяются его поглощающими свойствами. Для наших целей можно считать, что такой бассейн подобен плоскому коллектору, поглотитель которого по своим свойствам занимает некоторое промежуточное положение между рассмотренными ранее нейтральным и селективным поглотителями.

Солнечные бассейны имеют ряд преимуществ перед коллекторами других типов. Это наиболее дешевые приемники больших количеств солнечной энергии; благодаря высокой теплоемкости воды они обладают широкими возможностями сохранения внутренней

энергии. В бассейнах малого размера теплообмен между водой и окружающей атмосферой, а также близлежащими слоями почвы протекает интенсивнее, чем в больших бассейнах, поэтому наиболее эффективны бассейны площадью выше 50 м². В бассейнах подобных размеров волнение воды под действием ветра вызывает нарушение устойчивости в распределении температуры и концентрации соли, поэтому в них приходится устанавливать специальные защитные приспособления. Однако, несмотря на различные технические трудности, солнечные бассейны находят все большее применение.

В этой главе мы рассказали о поглощении солнечной радиации молекулами материальных тел, связанном с ним процессе изменения температуры изолированного тела, а также способах повышения равновесной температуры изолированного тела. В дальнейшем мы расскажем о том, как реализуются на практике все эти явления и процессы.

В гл. 5 мы увидим, как повышение температуры тел под действием солнечной радиации непосредственно используется, например, для отопления зданий и сушки пищевых продуктов. Такие приложения гелиотехники уже освоены человеком. В главах 6 и 7 мы остановимся на процессах преобразования солнечной энергии в механическую и электрическую. В обоих случаях разогретое на первой стадии процесса тело используется как промежуточный источник для получения энергии. Цикличность процесса преобразования энергии накладывает на его к. п. д. ряд принципиальных ограничений. Так, при интенсивности солнечной радиации 800 Вт/м² мы не можем получить в виде работы более 200 Вт/м². В главах 8 и 9 рассмотрим естественные процессы преобразования энергии, которые протекают в природе и в которых промежуточная тепловая стадия отсутствует. Даже в этих случаях высокий к. п. д. труднодостижим, хотя здесь имеют место ограничения совершенно иного рода.

Чтобы полнее представить механизм таких процессов, мы проанализируем их с позиций термодинамики и квантовой механики. В первых главах книги мы уже познакомили читателя с основными положе-

ниями этих фундаментальных научных дисциплин, в дальнейшем с их помощью мы попытаемся оценить принципиальные возможности тех или иных систем преобразования энергии. Особенно серьезные ограничения связаны со вторым началом термодинамики, вот почему этому закону и его приложениям уделено особое внимание. Прежде всего мы остановимся на нескольких простейших применениях солнечной энергии в системах, работа которых основана лишь на эффекте повышения температуры.

5. Преобразование солнечной энергии в тепловую

> Он восемь лет вынашивал идею получения солнечной энергии из огурцов, для чего помещал их в банку и в прохладные летние дни извлекал для обогрева воздуха.
>
> *Джонатан Свифт (1667—1745)*

Итак, при поглощении телом солнечной радиации его температура повышается. Это явление можно использовать для отопления, горячего водоснабжения жилых домов и больниц, общественных и промышленных зданий. Такое непосредственное превращение солнечной энергии в тепловую издавна находит также применение для сушки пищевых продуктов и опреснения воды. В настоящее время возможности использования солнечной энергии для этих и других целей значительно расширились.

Устройства, работа которых основана на непосредственном применении солнечной радиации, получили сейчас более широкое распространение, чем преобразователи солнечной энергии в другие виды, в частности в электроэнергию. Например, солнечные нагреватели воды уже становятся неотъемлемым атрибутом жизни в таких странах, как Израиль и Япония, где благоприятные климатические условия делают такое преобразование экономически целесообразным. В этой главе мы рассмотрим простые методы оценки качества различных устройств, предназначенных для непосредственного использования солнечной энергии. Приобретение даже сравнительно небольшого опыта в этой области знаний может привести к результатам, имеющим важное экономическое и общественное значение.

Время установления равновесия

В гл. 4 мы познакомились с условиями получения высокой температуры в процессе установления равновесия между поступлением лучистой энергии и поте-

рями тепла в окружающее пространство. Время установления такого равновесия определяется величиной, называемой *теплоемкостью* системы. Последняя оценивается количеством поглощенной энергии, необходимым для повышения температуры системы на один градус. В гл. 3 мы уже встречались с понятием *удельной теплоемкости* c, которая равна количеству энергии, требуемой для повышения температуры единицы массы вещества на один градус. Следовательно, теплоемкость тела массы m определяется произведением mc. Тогда общая теплоемкость системы равна сумме произведений mc составляющих ее частей.

Как было показано ранее, внутренняя энергия твердого тела складывается из энергии движения электронов и энергии колебаний атомов и молекул. Удельная теплоемкость вещества зависит от числа атомов в единице массы и числа возможных направлений их колебаний. При нормальной температуре для многих материалов она определяется законом Дюлонга и Пти, согласно которому произведение (удельная теплоемкость $\times$ молекулярный вес) постоянно и равно 7 Вт·ч/(кг·К). Эта величина получена на основе кинетической теории газов. Как мы видели, удельная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме равна $3R_1/2M_1$. В идеальном газе удельная теплоемкость определяется кинетической энергией атомов. В твердом теле, где атомы и молекулы совершают еще и колебательные движения относительно некоторого среднего положения, мы полагаем, что они обладают не только кинетической, но и некоторой средней потенциальной энергией, равной по величине средней кинетической. Поэтому удельная теплоемкость твердого тела равна $3R_1/M_1$. Таким образом, постоянная в соотношении Дюлонга и Пти равна $3R_1 \approx 7$ Вт·ч/(кг·К).

Рассмотрим в качестве примера плоский коллектор, поглотитель которого выполнен из медной пластины ($c=0{,}11$ Вт·ч/кг·К) толщиной 2 мм ($m=14$ кг/м^2) с теплоемкостью около 1,5 Вт·ч/(м^2·К). Теплоемкость обычного покрытия составляет около 2,5 Вт·ч/(м^2·К). Тогда для нагревания поглотителя и покрытия на 100 К и 60 К соответственно необходима энергия 300 Вт·ч/м^2. При интенсивности солнечной

радиации, характерной для тропического полудня, такую величину энергии можно получить в течение получаса. Если даже учесть теплоемкость других составляющих системы и увеличение тепловых потерь с температурой, то можно предполагать, что равновесная температура установится в системе довольно быстро — примерно в течение часа. Эти предположения подтверждаются практикой эксплуатации стационарных солнечных установок.

Произведем некоторые ориентировочные подсчеты. Чтобы упростить вычисления, разделим весь период нагревания тела на три интервала и предположим, что в каждый из них скорость теплообмена с окружающей средой соответствует среднему значению температуры в этот промежуток времени. Для примера рассмотрим простейший случай черной пластины с теплоемкостью 2,5 Вт·ч/(м²·К), на которую воздействует солнечная радиация интенсивностью 800 Вт/м², потери тепла на излучение оцениваются величиной $(T/64{,}5)^4$ Вт/м². Конвективные потери составляют около 4 Вт/(м²·К), а интенсивность длинноволнового излучения 200 Вт/м².

Используя метод, рассмотренный в гл. 4, покажем, что для нейтрального поглотителя равновесная температура близка к 70° С. При исходной температуре около 16° С средняя температура в первом из трех равных температурных интервалов равна 24° С (297 К); при такой температуре собственное излучение и конвективные потери составляют 48 Вт/м². Тогда при интенсивности входной радиации 520 Вт/м² на первом этапе нагревания температура пластины достигает среднего значения за (2,5·18)/520 ч, или 5 минут. Однако продолжительность второй трети температурного промежутка равна уже 8 мин, а последней трети — 23 мин. В сумме это составляет около 40 мин. (Большая продолжительность последнего температурного интервала дает возможность повысить точность наших расчетов путем дальнейшего разделения последнего на меньшие промежутки. Более подробный анализ показывает, что в рассмотренном случае примерно через час работы температура пластины отклоняется от равновесного значения не более чем на 1° С.)

Из приведенного примера мы можем заключить, что с изменением интенсивности солнечного излучения температура поглотителя должна меняться довольно быстро. Очевидно, при значительной теплоемкости системы положение несколько иное, но для упрощения дальнейшего рассмотрения мы будем полагать, что изучаемые нами системы все время находятся в состоянии равновесия. Поэтому в большинстве случаев мы не будем учитывать влияние теплоемкости.

Солнечные кухни и печи

По-видимому, самым простым способом непосредственного применения солнечной энергии является приготовление пищи — процесс, который всегда требует больших затрат энергии и человеческих усилий. Один из вариантов конструкции солнечной печи показан на рис. 23. Такая простая печь быстро нагревается и позволяет приготовить пищу за несколько часов. Затраты энергии на приготовление пищи (около 300 Вт·ч/кг) обычно не превышают количества энергии, идущей на нагревание самой печи. Если печь защищена от ветра, равновесная температура устанавливается в ней в течение часа.

Для более быстрого приготовления пищи и осуществления таких требующих высокой температуры процессов, как, например, жарение, солнечные печи снабжаются параболическими рефлекторами. Конструкции, подобные изображенным на рис. 24, с диаметром зеркала около 1,5 м испытывали в различных частях земного шара. Эффективный коэффициент концентрации таких систем с краевым углом 30° (даже при плохо обработанной поверхности зеркала) достигает 500—1000. В тропических условиях мощность, получаемая в фокусе такого устройства, составляет 0,5—1,0 кВт. Тень, отбрасываемая на зеркало сосудом для приготовления пищи диаметром около 15 см, весьма незначительна, но тем не менее несколько раз в течение часа необходимо регулировать положение зеркала относительно солнца. Однако эта операция очень проста — она сводится к тому, чтобы поддерживать положение тени от сосуда в центре зеркала, — и осуществление ее доступно как ребенку, так и старику.

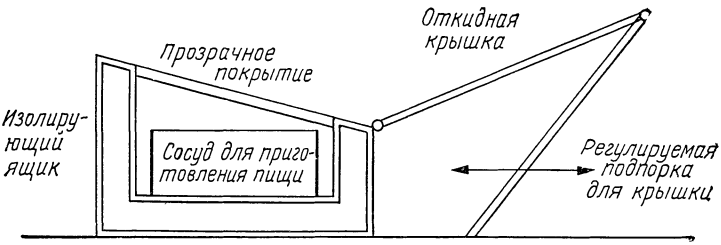


Рис. 23. Солнечная кухня типа «горячий ящик».

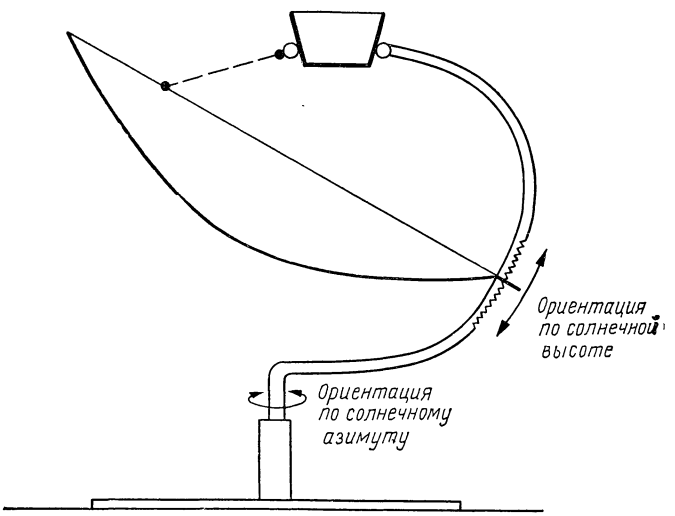


Рис. 24. Солнечная кухня с параболическим зеркалом.

При использовании такого рода устройств для научных исследований ориентировку зеркал следует производить более тщательно. Для получения очень высоких температур обычно используют несколько больших параболических зеркал, установленных так, что они имеют общий фокус. В системах, состоящих из нескольких зеркал, дополнительно устанавливается плоское зеркало, так называемый *гелиостат*, с помощью которого следят за кажущимся движением Солнца и направляют солнечные лучи на неподвижные зеркала. Параболическое зеркало является здесь частью стационарного лабораторного устройства с фиксированным фокусом, которое позволяет проводить

различные эксперименты, требующие высокой температуры. Такого рода исследования проводятся в лаборатории солнечной энергии Французского национального научно-исследовательского центра, расположенного в Западных Пиренеях вблизи границы с Испанией. В этой лаборатории с помощью солнечной печи с зеркалом диаметром около 10 м, установленной на горе Луис, впервые были проведены работы по очистке особо тугоплавких металлов. Теперь вместо этой лаборатории в районе Одейо создана новая печь, на которой установлено параболическое зеркало диаметром порядка 50 м. Оно изготовлено из 8000 небольших зеркал, каждое из которых имеет вогнутую форму. Формируя в фокальной плоскости изображение солнца в виде круга диаметром примерно 50 см, эта гигантская система обеспечивает мощность до 1200 кВт. Такая система позволяет производить очистку особо тугоплавких веществ в больших масштабах. Для нее были разработаны специальные вращающиеся тигли с водяным охлаждением, вмещающие одновременно сотни килограммов исследуемых материалов. Под действием сфокусированного солнечного излучения материал в центре фокального пятна расплавляется, расширяясь при этом, но в то же время благодаря вращению тигля удерживается в нем. В таких условиях плавление центральной части материала осуществляется в отсутствие контакта со стенками тиглей, что возможно только в солнечной печи. Таким способом были получены в значительных количествах наиболее тугоплавкие материалы, точки плавления которых достигают 3000° С. К их числу относятся соединения, имеющие большое экономическое значение, например окислы кремния и циркония. Благодаря тугоплавкости и химической стойкости эти материалы находят широкое применение в некоторых отраслях современного производства, где их химическая чистота имеет особое значение.

Отопление и горячее водоснабжение зданий

Использование солнечной энергии для отопления и горячего водоснабжения школ, фабрик, больниц, жилых домов, для бытовых нужд и т. д. является

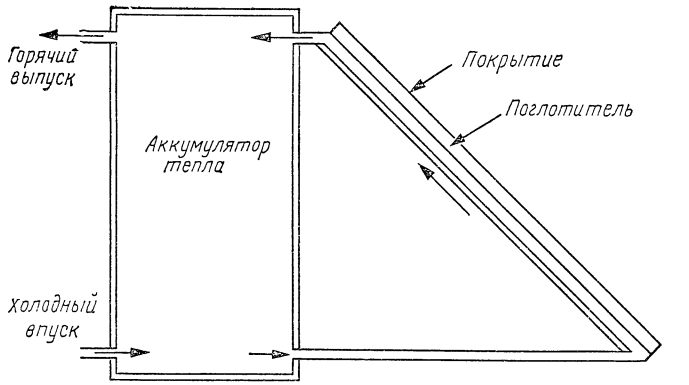


Рис. 25. Простой солнечный водонагреватель с естественной циркуляцией.

одним из наиболее привлекательных способов ее применения. Системы горячего водоснабжения на основе плоского солнечного коллектора уже сейчас получили широкое распространение в Израиле и Японии, а на юге США и даже в Европе действуют довольно большие экспериментальные установки для отопления домов и нагрева воды в плавательных бассейнах. Рис. 25 поможет нам понять принцип действия солнечного водонагревателя. Находясь в контакте с поглотителем коллектора, вода нагревается и при помощи насоса или естественной циркуляции отводится от него. Затем жидкость поступает в хранилище, откуда ее потребляют по мере надобности, или в теплообменник, через который энергия передается теплоносителю. Подобное устройство напоминает системы бытового горячего водоснабжения с непосредственным или косвенным подогревом. Конструкция этих устройств может быть весьма сложной, но чтобы оценить их экономичность, мы рассмотрим простейшее из них.

В устройстве, изображенном на рис. 25, основным теплообменником является поглотитель. Жидкость здесь либо непосредственно омывает тыльную часть пластины поглотителя, либо проходит через систему труб, являющихся по существу частью этой пластины. В воздухонагревательных коллекторах пластины по-

глотителей имеют множество отверстий, при прохождении через которые воздух нагревается. В условиях хорошего теплообмена между окружающей средой и пластинами (это характерно для нагревания жидкости) температуры поглотителя и жидкости одинаковы. Поскольку жидкость нагревается при прохождении через коллектор, очевидно, что на входе жидкости поглотитель холоднее, нежели на выходе. Перепад температуры зависит как от удельной теплоемкости жидкости, так и ее скорости. При естественной конвекции вследствие низкой скорости циркуляции жидкости разность температур составляет несколько десятков градусов. В условиях искусственной перекачки жидкости с помощью насоса скорость ее протекания и скорость теплообмена с коллектором увеличиваются. Поэтому при анализе подобных водонагревательных систем в большинстве случаев приходится учитывать изменение температуры вдоль пластины поглотителя. Однако при упрощенном рассмотрении принципов действия такого устройства мы будем полагать, что вся поверхность поглотителя имеет одинаковую температуру, при которой происходит теплообмен между ним и жидкостью. Результаты такого рассмотрения оказываются вполне применимыми к оценке систем, в которых разность температур жидкости на входе и выходе невелика. Конечно, и здесь, поскольку жидкость получает энергию, какой-то перепад температур существует.

Чтобы определить, какое количество тепла жидкость получает от коллектора при различных температурах, воспользуемся методом расчета, приведенным в гл. 4. Как и прежде, рассмотрим плоский коллектор с однослойным покрытием и поглотителем, поглощательная способность которого для солнечного излучения равна 0,9. Напомним, что нейтральным мы называем поглотитель, имеющий при равновесной температуре коэффициент излучения, близкий к 1,0, тогда как у селективного поглотителя он составляет примерно 0,1. В обоих случаях будем считать, что стеклянное или пленочное покрытие коллектора непроницаемо для длинноволнового излучения, а его характеристики пропускания солнечной радиации близки к рассмотренным в гл. 4.

Итак, если жидкость находится в тепловом контакте с поглотителем при температуре T, она получает от него энергию при мощности $P_{\text{п}}$. В условиях равновесия уравнение энергетического баланса для поглотителя принимает вид (см. 4.19)

$$\alpha_{\text{с}} P = P_1 + P_{\text{п}}, \tag{5.1}$$

где P — часть солнечной радиации, прошедшая через покрытие коллектора.

Для данной температуры поглотителя мощность P_1, теряемая вследствие теплообмена с покрытием (уравнение 4.18), постоянна. Поэтому полезная мощность $P_{\text{п}}$ будет тем больше, чем больше величина P_1, и наоборот, при снижении интенсивности солнечной радиации значение $P_{\text{п}}$ уменьшается. При некотором значении $P = P_0$ $P_{\text{п}} = 0$, тогда

$$\alpha_{\text{с}} P_0 = P_1. \tag{5.2}$$

Из уравнений (5.1) и (5.2) нетрудно определить P_1 и пороговую величину P_0, начиная с которой при данной температуре поглотителя можно получать некоторую полезную мощность $P_{\text{п}}$:

$$\alpha_{\text{с}} P_0 = \alpha_{\text{с}} P - P_{\text{п}}$$

или

$$P_0 = P - \frac{P_{\text{п}}}{\alpha_{\text{с}}}. \tag{5.3}$$

Если для соответствующих областей исходных значений P_0 рассчитывать равновесную температуру поглотителя по уравнениям (4.18) и (4.20), можно получить зависимости, показанные на рис. 26.

С помощью этих кривых на основе уравнения (5.3) можно определить мощность теплопередачи $P_{\text{п}}$ от поглотителя к жидкости при любой температуре и для любых значений интенсивности радиации P. Некоторые результаты подобных расчетов представлены на рис. 27. Как видно из рис. 27, полученные зависимости носят линейный характер, и при всех значениях входной мощности P и равновесной температуры T их можно выразить соотношениями:

$$P_{\text{п}} = 0{,}9P - 5{,}8T \tag{5.4}$$

и

$$P_{\text{п}} = 0{,}9P - 3{,}5T \tag{5.5}$$

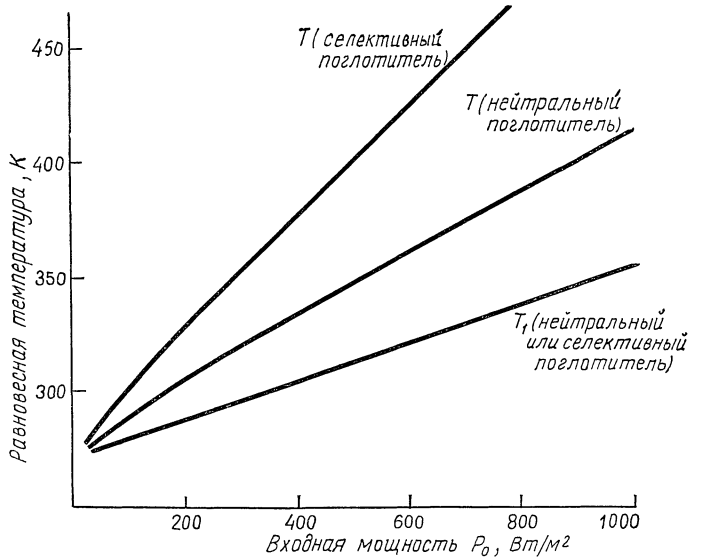


Рис. 26. Характеристические кривые простых плоских коллекторов.

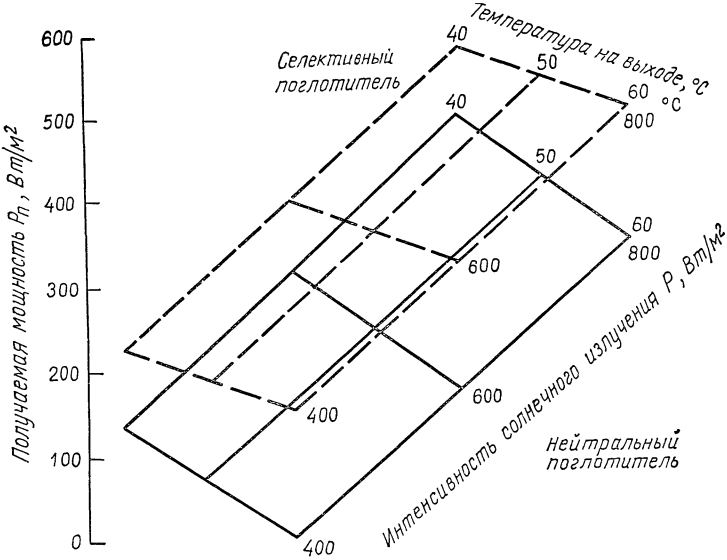


Рис. 27. Зависимость мощности солнечного водонагревателя от температуры.

для нейтрального и селективного поглотителей соответственно (если мощность измеряется в Вт/м^2, а температура — в градусах Цельсия).

Показывая преимущества селективного поглотителя, рис. 27 одновременно иллюстрирует важнейшую особенность систем получения тепловой энергии на основе плоского коллектора. Эта особенность состоит в следующем: с повышением температуры теплоносителя доля полезной мощности в общей мощности падающего излучения должна уменьшаться. Это неизбежно, поскольку увеличиваются потери тепла в окружающую среду, в связи с этим возникает ряд вопросов, связанных с оптимизацией условий работы плоских коллекторов.

Теперь, когда мы можем определить выходную мощность коллектора при любой интенсивности солнечного излучения и для любой равновесной температуры, посмотрим, как изменяется эта мощность в течение дня с изменением интенсивности солнечной радиации. В принципе любой коллектор с помощью соответствующего механизма можно было бы все время ориентировать на солнце, но это весьма удорожает систему и обычно экономически не оправдано. Поэтому в настоящее время используются преимущественно неподвижные коллекторы. Далее мы рассмотрим возможности системы на основе неподвижного коллектора.

Прежде всего необходимо выбрать наилучшую ориентацию коллектора. В гл. 2 мы говорили о том, как рассчитать кажущуюся траекторию солнца для любого времени года на любой широте. Отметим, что годовое изменение высоты солнца, обусловленное сезонным изменением склонения, составляет около 47° (для полудня). Следовательно, при оценке параметров коллектора особое внимание следует уделить зимнему периоду времени, когда к системе предъявляются наиболее высокие требования, а ее эффективность оказывается минимальной.

В середине зимы склонение составляет — 23,5°, однако самое холодное время года наступает обычно позже, когда склонение несколько меньше. Поскольку обладающие высокой теплоемкостью суша и Мировой океан выполняют роль некоего аккумулятора тепловой

энергии, то в большинстве районов земного шара самое холодное время наступает спустя 4—6 недель после зимнего солнцестояния (в конце января или начале февраля — для Северного полушария). Поэтому в Северном полушарии неподвижный коллектор ориентируют на юг с таким наклоном, при котором нормаль к его поверхности указывает наивысшее полуденное положение солнца в середине зимы. Тогда для поверхности коллектора получим $\xi = 0$ (см. рис. 10), а ψ превышает величину $(90° - \varphi - 23{,}5°)$ примерно на 10°. Интересующий нас угол наклона поверхности коллектора к горизонтали равен $(90° - \psi)$. Для центральной Англии этот угол составляет около 65,5°. На таких широтах для получения оптимального выхода в зимнее время плоский коллектор следует располагать вертикально. Если солнечные лучи падают на поверхность почти вертикально, изменение наклона плоскости коллектора слабо влияет на выходные параметры, поскольку эффективная интенсивность солнечного излучения пропорциональна $\cos i$ (см. гл. 3), а последний очень мало меняется при приближении угла i к 0, По этой же причине для тропиков более целесообразно горизонтальное расположение коллектора, хотя оптимальным является угол, близкий к 30°.

В гл. 2 получены значения общей интенсивности солнечного излучения для различных широт. Там же приведен график изменения интенсивности солнечного излучения в течение дня для безоблачной атмосферы на широте центральной Англии (52°). Для примера подсчитаем, сколько энергии можно получить от простого коллектора на такой малоперспективной для подобного преобразования широте. Эффективное значение интенсивности солнечного излучения P для любого времени дня и сезона мы определяем с помощью рассмотренного в гл. 3 метода, учитывая, что интенсивность излучения уменьшается как при наклоне поверхности, так и вследствие потерь при прохождении покрытия коллектора. Результаты расчетов представлены на рис. 28. На основе рис. 27 и рис. 28 нетрудно определить полную энергию, получаемую от плоского коллектора при данной температуре. Как оказывается, даже в середине зимы селективный коллектор площадью 5 м^2 при

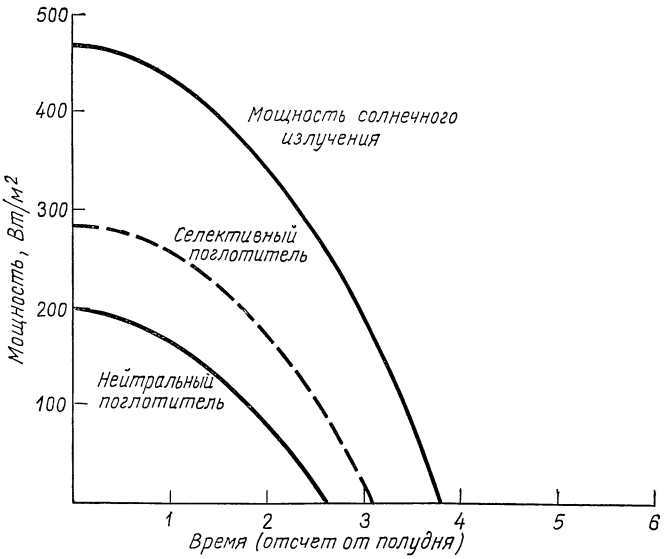


Рис. 28. Суточные изменения выходной мощности солнечного водонагревателя (зимнее солнцестояние, $\varphi = 52°$ с. ш.).

температуре 40° С обеспечивает ежедневно до 30 кВт·ч энергии. Однако эти результаты соответствуют безоблачной атмосфере, которая в Англии бывает крайне редко. В дальнейшем мы еще коснемся вопроса экономической рентабельности подобных устройств, здесь же на нескольких примерах мы постараемся показать, насколько полезными могут быть солнечные нагреватели для горячего водоснабжения зданий и плавательных бассейнов в Англии.

В гл. 2 мы говорили, что наибольшего эффекта в освоении солнечной энергии человек может добиться в пустынях тропического пояса. Поэтому для сравнения оценим выходные параметры плоского коллектора применительно к условиям таких районов. Расчеты показывают, что параметры плоского коллектора, установленного на широте 23,5° с. ш. с наклоном около 37° к горизонтали ($\psi = 53°$), практически не меняются на протяжении года. На рис. 29 представлены результаты расчетов для селективного и нейтрального коллекторов. Оказывается, с каждого квад-

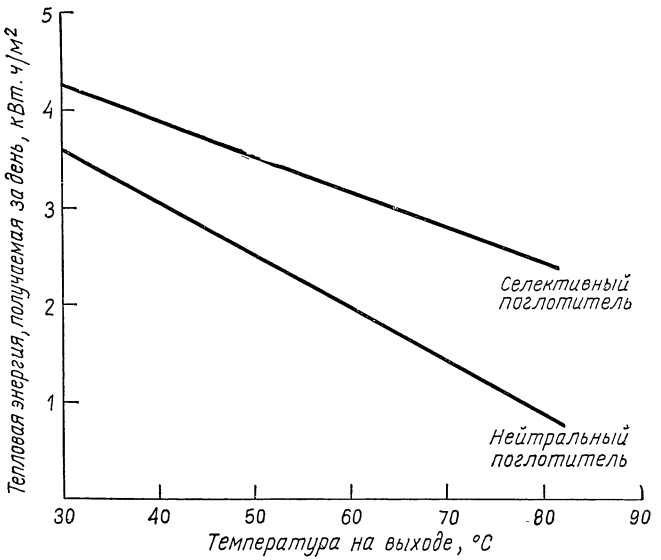


Рис. 29. Зависимость выходной мощности солнечного водонагревателя от температуры в любое время года ($\varphi = 23{,}5°$ с. ш.).

ратного метра поверхности коллектора при температурах, наиболее подходящих для водонагревательных систем школ, больниц и т. п., можно ежегодно получать около 1000 кВт·ч энергии. Ежегодная потребность в энергии для горячего водоснабжения больших больниц в странах тропического пояса в настоящее время составляет ориентировочно около 500 МВт·ч. Таким образом, ее можно было бы относительно дешево удовлетворить с помощью плоского коллектора общей площадью 500 м². Коллектор такого размера удобно разместить на крыше больницы, тогда для него не нужно будет отводить специального места на земле; кроме того, подобное сооружение обеспечит тень вокруг здания больницы.

Аккумулирование тепловой энергии

Аккумулирование тепла в любой водонагревательной системе позволяет приспособить ее к условиям изменяющегося на протяжении суток спроса на

горячую воду. Применение различных средств для накопления энергии при использовании солнечных энергетических установок позволяет также преодолеть и другую трудность, связанную с непостоянством интенсивности солнечной энергии в течение суток. Как мы уже видели, даже в условиях безоблачного неба приемлемое количество энергии при подходящей температуре жидкости можно получать лишь в течение нескольких часов до и после полудня. Более высокие температуры требуются лишь на короткие промежутки времени. Например, солнечные энергетические установки, предназначенные для отопления зданий, поддерживают температуру теплоносителя на уровне 60° С лишь около трех часов в сутки. Поскольку в подобных системах периоды потребления и получения энергии не совпадают, то очевидно, что ее нужно накапливать в течение суток, чтобы затем отбирать при подходящей температуре.

В развитых странах с похожим на английский климатом в зимнее время средний ежесуточный расход энергии на горячее водоснабжение и отопление жилых домов оценивается в 15 и 150 кВт·ч соответственно. Ежедневные затраты энергии на горячее водоснабжение крупных больниц в странах тропического пояса составляют несколько МВт·ч. Если для накопления энергии используется вода, подогретая, скажем, на 10 К, то при ее удельной теплоемкости 1,2 Вт·ч/(кг·К), малой скорости расхода в жилом здании и без учета потерь для получения в течение суток необходимого количества энергии требуется около 14 тыс. л воды, а занимаемый ею объем составляет 14 м². Эта цифра выглядит более или менее реальной, но применительно к больнице она достигает 200 тыс. л; а соответствующее сооружение технически осуществить чрезвычайно трудно.

С подобной трудностью сталкиваются при разработке бытовых ночных электронагревателей, получивших сейчас в Англии широкое распространение. В таких нагревателях, потребляющих сравнительно малую мощность, электрические элементы разогревают специальный материал, который хорошо удерживает тепло. Запасенная таким образом энергия затем постепенно расходуется, поддерживая температуру по-

мещения в определенных пределах. При этом материал настолько перегревается, что обычно для теплоизоляции в нагревательных элементах используют огнеупорный кирпич. В результате подобные нагреватели оказываются весьма громоздкими.

При использовании солнечных коллекторов энергия накапливается либо в подземных резервуарах с водой, либо в заполненных камнями отсеках. Второй вариант предпочтительнее для воздухонагревательных систем, где воздух нагревается, проходя между камнями. Если предположить, что камни имеют одинаковый размер и сферическую форму, то пустоты между ними составляют около трети общего объема отсека. Это обеспечивает большую поверхность контакта нагреваемого воздуха и хорошие условия для теплообмена. Основным недостатком подобных систем является их низкая теплоемкость (в четыре раза меньше теплоемкости воды).

В рассмотренных устройствах тепловая энергия накапливается за счет повышения кинетической и потенциальной энергии молекул среды. Значительно большая энергия расходуется при фазовых переходах, то есть в процессе разрушения упорядоченной структуры, например при плавлении или парообразовании. В таком случае входная энергия преимущественно тратится на повышение потенциальной энергии молекул, обусловленное увеличением расстояния между ними. В одной из разновидностей солнечного нагревателя в качестве такого накапливающего тепло вещества используется парафин, температура плавления которого равна примерно 55° С, а скрытая теплота плавления составляет около 40 Вт·ч/кг. При охлаждении парафина мы вновь получаем эту энергию, но при более удобной температуре. В подобном устройстве для накопления 150 кВт·ч тепловой энергии объем резервуара не превышает 4 м^3. В качестве теплоносителей применяются также гидраты некоторых солей. Например, глауберова соль $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ плавится при температуре около 32 °С, при этом на разрушение кристаллической структуры затрачивается приблизительно 67 Вт·ч/кг. При охлаждении ее до той же температуры накопленная энергия высвобождается. Процесс плавления — затвердевания соли

можно повторить многократно, однако установлено, что если расплав соли не перемешивать, то возникает перераспределение концентрации, затрудняющее рекристаллизацию соли. Благодаря постоянным поискам и исследованиям удалось найти и другие вещества с большой скрытой теплотой плавления, в которых обратимые фазовые переходы осуществляются при температуре 40—60° С. К сожалению, многие из них непригодны из-за высокой стоимости, взрывоопасности, токсичности, коррозионной активности и т. д.

Радиационное охлаждение

Вечером, когда температура аккумулирующего устройства оказывается выше температуры коллектора, последний необходимо отключать. Если в качестве рабочей жидкости используется вода, во избежание ее замерзания коллектор также закрывают. Снижение температуры коллектора может произойти в результате потерь энергии на длинноволновое излучение, которое аккумулирующее устройство начинает испускать в окружающее пространство при безоблачном небе. Однако при определенных климатических условиях этот же эффект можно успешно использовать для создания дешевых систем охлаждения.

Такой вид охлаждения возможен в тех случаях, когда атмосферное длинноволновое излучение оказывается менее интенсивным, чем подобное излучение, испускаемое поверхностью тела при температуре окружающей среды. Как явствует из гл. 4, такие условия создаются с наступлением темноты. При облачности или повышенной влажности атмосфера ведет себя как черное тело, поглощая и, следовательно, излучая радиацию. Поскольку и земля проявляет подобные свойства, то при возникновении даже незначительной разности между их температурами начинается процесс излучения в пространство через вышележащие слои атмосферы. В условиях сухого климата при отсутствии поглощения (или слабом поглощении) излучения атмосферным водяным паром спектр поглощения уже не является непрерывным; в нем обнаруживаются так называемые окна, в которых атмосфера

фактически прозрачна. Часть излучения в этом случае беспрепятственно рассеивается в пространство и компенсируется длинноволновым излучением атмосферы в меньшей степени.

Большая часть длинноволнового излучения, падающего на землю, испускается нижними слоями атмосферы, лежащими не выше нескольких сотен метров. Надо полагать, что интенсивность этого излучения определяется температурой и влажностью атмосферы вблизи поверхности земли. Безусловно, энергетический спектр этого излучения не соответствует спектру абсолютно черного тела, но, как показывают измерения, его можно рассматривать как часть излучения черного тела при температуре окружающей среды. Обычно мощность длинноволнового излучения атмосферы определяют из следующего соотношения:

$$P_a = \sigma \cdot T_a^4 (0{,}48 + 2{,}5 \sqrt{w_a}), \qquad (5.6)$$

где w_a есть мера влажности атмосферы, значение которой мы подробно рассмотрим в следующем разделе.

Сейчас же мы ограничимся предположением, что в условиях сухого климата интенсивность длинноволнового атмосферного излучения в два раза ниже интенсивности излучения черного тела при температуре окружающей среды.

Устройство подобного холодильника показано на рис. 30. Хотя по своей конструкции он напоминает солнечный нагреватель, все процессы осуществляются в нем в противоположном направлении. Действительно, коллектор нагревателя можно использовать ночью в качестве радиатора, соединенного с другим аккумулирующим устройством. С учетом предположений, сделанных при анализе работы нагревателя, уравнение теплового баланса радиатора запишется в виде

$$P_p + P_a = \sigma T^4 + h(T - T_a), \qquad (5.7)$$

где P_p — скорость передачи энергии радиатору при циркулировании жидкости в системе аккумулирующее устройство — радиатор. Чтобы оценить возможности

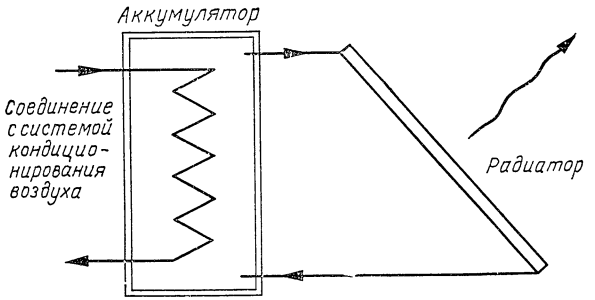


Рис. 30. Простой радиационный охладитель с естественной циркуляцией.

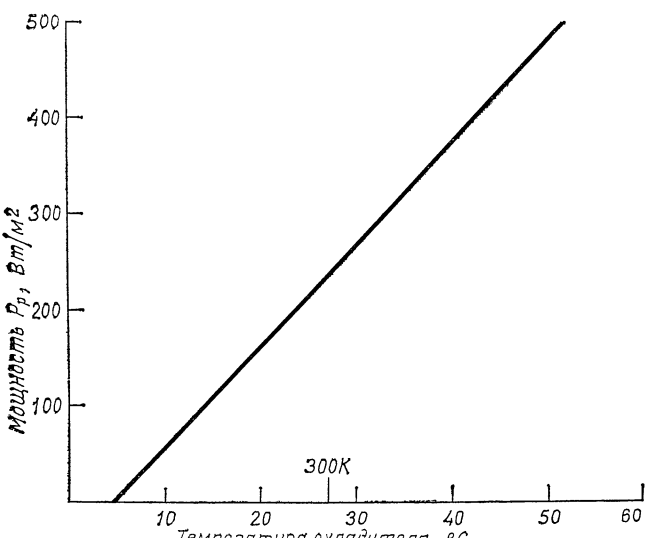


Рис. 31. Характеристика радиационного охладителя (в условиях очень сухого климата).

P_p — скорость поступления энергии от аккумулятора холода.

такого охлаждающего устройства (кондиционера), рассмотрим случай, когда температура окружающего воздуха равна 300 К (27° С). Работа такого устройства, как и работа нагревателя, сопровождается изменением (в данном случае понижением) температуры аккумулятора энергии, в качестве последнего используется вода, галька или какое-либо вещество, в котором происходит фазовый переход. Результаты подобных изменений в состоянии аккумулирующего вещества используются лишь на следующий день, но не для нагревания, а для охлаждения воздуха в системе кондиционирования. На рис. 31 представлен график, с помощью которого мы можем оценить энергию (или мощность $P_р$), отдаваемую аккумулятором энергии при различных температурах. В этом простейшем случае зависимость $P_р$ от температуры аккумулятора практически линейна. Из графика также видно, что если радиатор не получает энергию, то его равновесная температура лишь едва выше точки замерзания воды. Используемые на практике аккумулирующие устройства должны быть достаточно велики, чтобы поддерживать температуру постоянной на том уровне, который определяется из соображений экономической целесообразности и комфорта. В нашем примере, где ночная температура аккумулятора поддерживается в среднем около 300 К, в течение ночи необходимо рассеивать свыше 200 Вт энергии с каждого квадратного метра поверхности радиатора. Таким образом, днем мы можем поддерживать в здании нужную температуру.

При определенных климатических условиях такая радиационная система охлаждения оказывается не только удобной, но и чрезвычайно эффективной. Например, на крышах больших зданий фабрик, школ, больниц можно смонтировать комбинированные установки, сочетающие функции солнечного нагревателя и радиационного охлаждающего устройства, в которых одни и те же панели в сочетании с разными аккумуляторами энергии днем выполняют функции коллектора, а ночью — радиатора. Подобные системы особенно удобны для больниц, где одновременно необходимы и большое количество горячей воды, и в меру прохладный воздух в палатах и операционных.

Если коллектор площадью 500 м², предложенный в гл. 5 для гипотетической больницы, ежедневно по 8 ч использовать в качестве радиатора, то за это время можно рассеять до $^3/_4$ МВт·ч энергии. Для такой больницы этого было бы вполне достаточно, чтобы поддерживать в палатах, операционных и других помещениях температуру по крайней мере на 10 К ниже, чем дневная температура снаружи.

В следующей главе, говоря о холодильных установках, мы снова вернемся к вопросу охлаждения. Здесь же мы рассматриваем главным образом системы, работа которых основана на процессах теплового обмена, и прежде чем перейти к исследованию возможностей этих процессов, коротко остановимся еще на нескольких системах подобного рода.

Опреснение воды

Во многих богатых солнцем районах земного шара люди испытывают недостаток пресной воды. И неудивительно, что издавна солнечную энергию здесь использовали для получения питьевой воды из загрязненных или соленых источников. Для этой цели применяли разнообразные устройства различной степени сложности. На рис. 32 показана одна из простейших систем подобного назначения. Предназначенная для очистки вода набирается в поддон, расположенный в нижней части устройства, где она нагревается за счет поглощения солнечной энергии. Поверхность поддона обычно чернят, так как вода почти беспрепятственно пропускает коротковолновую часть солнечного излучения. (Иногда воду подкрашивают в черный цвет, и она становится поглотителем.) С повышением температуры движение молекул воды становится более интенсивным и часть из них покидает поверхность воды. Подхваченные конвективными воздушными потоками такие молекулы уносятся прочь. Насыщенный водяными парами воздушный поток поднимается вверх, охлаждается; соприкасаясь с поверхностью прозрачного покрытия, пары частично конденсируются, а образовавшиеся капли стекают по ней вниз. Охлажденный воздух вновь опускается к поверхности воды, замыкая цикл конвективного движения.

Для повышения эффективности системы необходимо, чтобы при конденсации на поверхности покрытия образовывалась водная пленка, так как при конденсации воды в виде капель значительная часть падающей на поверхность покрытия солнечной радиации отражается ими; даже при сравнительно больших углах наклона поверхности, когда вода довольно быстро стекает, примерно половина всей поверхности покрытия занята каплями воды. В зависимости от величины поверхностного натяжения воды и материала панели покрытия вода конденсируется на нем в том или ином виде. На тщательно очищенной от следов жира стеклянной поверхности обычно образуется пленка воды, тогда как почти на всех, даже более чистых пластмассовых поверхностях сконденсированная вода выпадает в виде капель. Это свойство пластических материалов читатель, вероятно, мог заметить, наблюдая поведение капель воды на поверхности сумок и плащей.

На некоторых новых пластических материалах возможна пленочная конденсация воды, но такие материалы вследствие высокой стоимости (приближающейся к стоимости стекла) для рассматриваемых целей непригодны.

Средняя производительность солнечной опреснительной установки приравнивается к скорости выпадания осадков, последняя составляет 0,5 см в день. Попытаемся обосновать это утверждение, проанализировав работу изображенного на рис. 32

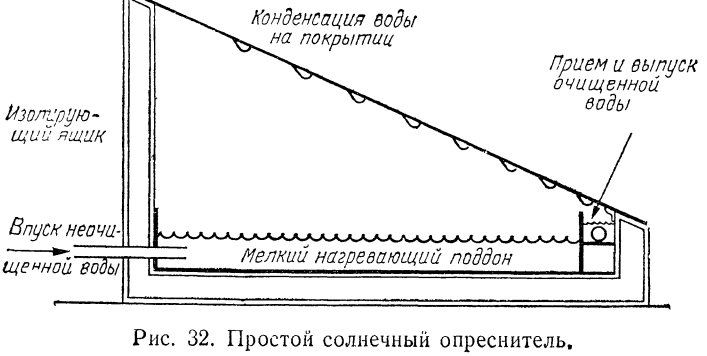


Рис. 32. Простой солнечный опреснитель.

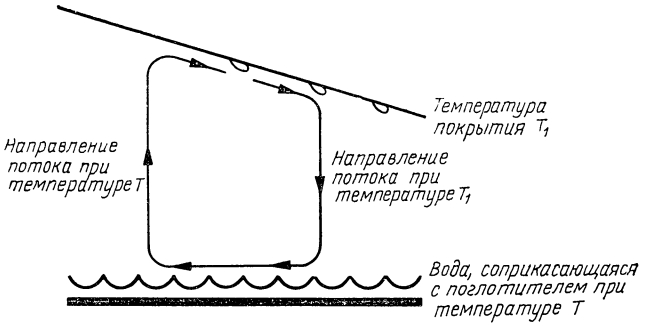


Рис. 33. Конвективные потоки в солнечном опреснителе.

опреснительного устройства. Детальный анализ процессов переноса массы весьма сложен, и мы ограничимся здесь весьма упрощенным их рассмотрением.

Предположим, что поглотитель и соприкасающаяся с ним вода находятся при температуре T (рис. 33). Температура покрытия опреснителя, как и в прежних примерах, равна T_1. Ранее, при рассмотрении плоского поглотителя, мы установили, что между поглотителем и покрытием происходит конвективный теплообмен, скорость которого через единицу поверхности определяется из соотношения:

$$q = h(T - T_1), \tag{5.8}$$

где h — коэффициент теплоотдачи, равный скорости передачи тепла через единицу поверхности в единицу времени при разности температур в один градус. Тогда, как показано на рис. 33, процесс конвекции можно представить в виде двух противоположно направленных воздушных потоков, каждый из которых через единицу поверхности в единицу времени переносит массу воздуха m.

Если считать, что по своим свойствам воздух близок к идеальному газу, то внутреннюю энергию единицы массы воздушного потока при любой температуре T можно представить произведением cT, где c — удельная теплоемкость воздуха. Тогда более теплый поток, перемещающийся вверх от поглотителя к покрытию, характеризуется внутренней энергией mcT. Более холодный поток противоположного направления

обладает энергией mcT_1. Следовательно, скорость теплообмена запишется в виде

$$q = mc\,(T - T_1). \qquad (5.9)$$

Из уравнения (5.8) и (5.9) находим количество массы воздуха, переносимой через единицу поверхности в единицу времени (скорость массообмена) при условии идеальной конвекции:

$$mc = h \quad \text{или} \quad m = \frac{h}{c}. \qquad (5.10)$$

Например, при удельной теплоемкости воздуха $c = 0{,}28$ Вт·ч/(кг·К) и $h = 4$ Вт/(м²·К), $m = 14{,}3$ кг/(м²·ч).

В дальнейшем мы будем полагать, что при переносе паров воды характер конвекции и скорость массообмена существенно не изменяются. Подобные допущения обычно оправданы при анализе элементарных процессов переноса массы, то есть при малой скорости процессов. Кроме того, мы предполагаем, что потоки воздуха, унося с данной поверхности определенное количество влаги, не нарушают ее равновесного состояния при данной температуре. В условиях контакта газа с жидкостью некоторые молекулы покидают поверхность жидкости, затем снова возвращаются, поэтому устойчивое состояние система сохраняет в том случае, когда скорости испарения и конденсации жидкости равны. Тогда вблизи поверхности жидкости устанавливается некоторая определенная концентрация молекул жидкости, или пара в газе, называемая *удельной влажностью* w. Эта величина, характеризующая содержание пара в единице массы газа, строго зависит от температуры. Подобная зависимость для контакта воды с воздухом представлена на рис. 34. Мы полагаем, что в такой системе равновесие устанавливается достаточно быстро и не нарушается при конвекции воздуха вблизи поверхности воды, а также при последующей конденсации воды на поверхности покрытия.

Если рассматривать процесс конвекции как одновременное протекание двух встречных потоков, каждый из которых характеризуется скоростью переноса массы m на единицу поверхности панели, то скорость

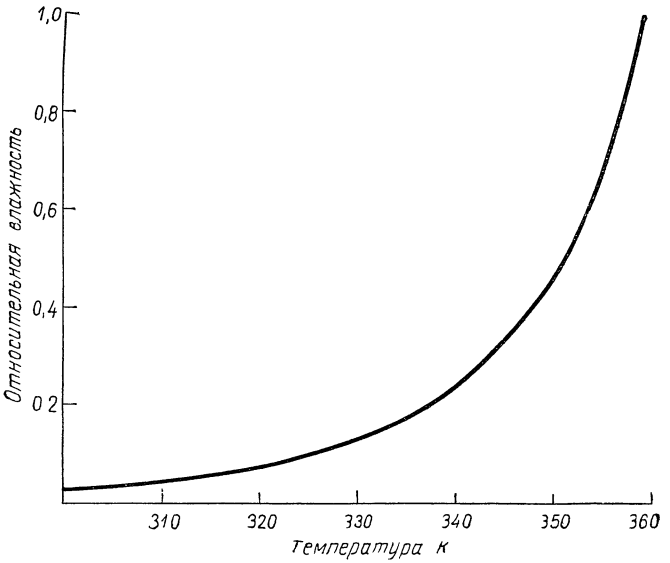


Рис. 34. Температурная зависимость относительной влажности воздуха при атмосферном давлении.

испарения воды равна mw. Тогда скорость процесса конденсации составляет mw_1, а результирующая скорость переноса воды к панели выражается разностью $m(w - w_1)$; последняя определяет производительность процесса опреснения воды M, приведенную к единице поверхности панели.

Чтобы преодолеть силы притяжения, действующие со стороны молекул жидкости, и присоединиться к молекулам пара, молекула жидкости должна получить определенную кинетическую энергию. При данной температуре не все молекулы жидкости имеют достаточную для этого скорость (кинетическую энергию). С повышением температуры средняя энергия молекул возрастает, но всегда существуют молекулы, энергия которых больше или меньше этого среднего значения. При дальнейшем увеличении температуры все большее число молекул оказывается в состоянии вырваться из жидкости. (Этот процесс очень напоминает термоионную эмиссию с поверх-

ности твердых тел, которую мы подробно рассмотрим в гл. 7.)

Величина энергии, которую должна приобрести молекула, чтобы покинуть поверхность воды, составляет в среднем около 660 Вт·ч на кг испарившейся воды; поэтому энергия пара весьма значительна. Когда пар, достигая более прохладной поверхности покрытия, частично конденсируется на ней, он передает энергию молекулам покрытия. Таким образом, возникает дополнительный процесс теплопередачи от поглотителя к покрытию. Действие его настолько велико, что разность температур между поглотителем и покрытием падает до 10 К и ниже, тогда как эта разность для плоского коллектора, работающего в условиях сухого воздуха, составляет около 40 К. Чтобы учесть этот процесс, необходимо несколько видоизменить уравнения теплопередачи (4.18) и (4.20). Тогда уравнение (4.18), определяющее скорость энергообмена между поглотителем и покрытием, принимает вид

$$P_1 = h_1 (T - T_1) + \varepsilon\sigma \left(T^4 - T_1^4\right) + ml (w - w_1), \quad (5.11)$$

где l — энергия, переносимая единицей массы водяного пара (*скрытая теплота парообразования и конденсации*). Уточнив таким образом уравнение (4.18), мы предполагаем, что присутствие паров воды не препятствует энергообмену через излучение.

Уравнения (4.19), (4.20) и (5.11) решаются совместно методом последовательных приближений с учетом температурной зависимости w, показанной на рис. 34. Для иллюстрации возможностей солнечной опреснительной установки мы воспользуемся теми же характеристиками, которые мы применяли при описании плоского коллектора, считая при этом, что излучательная способность поглотителя и нагретой воды $\varepsilon = 1$. Как видно из рис. 35, зависимость между входной мощностью солнечной радиации и количеством опресненной воды носит линейный характер и может быть достаточно точно аппроксимирована следующим уравнением:

$$M = \frac{P - 160}{660}, \quad (5.12)$$

где M выражена в кг/м²·ч, а P — Вт/м².

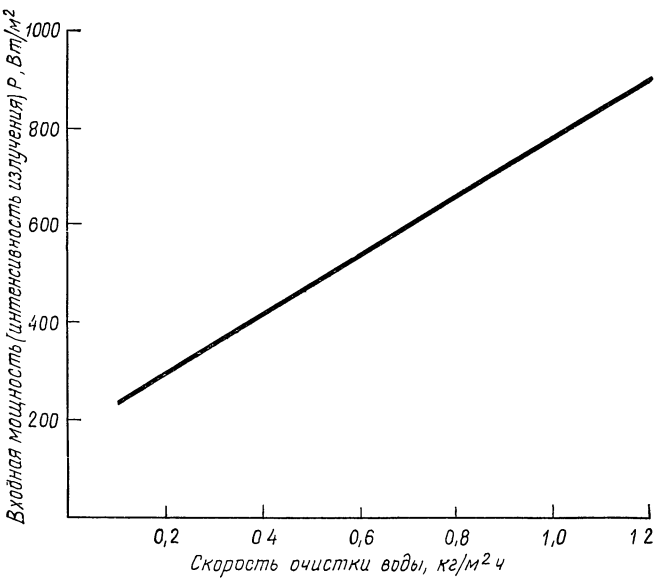


Рис. 35. Характеристика солнечного опреснителя.

Для расчета дневной производительности опреснительной установки необходимо знать, как меняется в течение дня величина P. Тогда, используя рис. 35 или уравнение (5.12), мы можем рассчитать производительность установки в любое время суток. Например, в ясные дни в центральных районах Англии (изменение величины P для этих широт представлено на рис. 13) с 1 м^2 панели солнечной опреснительной установки можно получить 7,6 кг воды летом, а зимой почти ничего. В тропиках ($\varphi = 23{,}5°$) ежедневная производительность такой установки составляет 8,2 кг/м^2 и 3,3 кг/м^2 соответственно, или в среднем 5 кг/м^2 ежедневно на протяжении года. Если поместить 5 кг воды (занимаемый ею объем 5000 см^3) в бак площадью 1 м^2, или 10 тыс. см^2, образуется слой глубиной $^1/_2$ см, что как раз соответствует средней норме выпадения осадков в этом районе.

Очевидно, что производительность такой солнечной опреснительной установки меняется в течение дня в соответствии с изменением интенсивности солнечной радиации P. При очень мелком поддоне ско-

рость получения питьевой воды в любой момент времени зависит только от величины P. Этот случай мы уже рассмотрели. Но при глубоком поддоне температура воды устанавливается лишь через несколько дней, и в дальнейшем питьевую воду можно получать непрерывно на протяжении суток. Для этого необходимо, чтобы количество воды в таком резервуаре во много раз превышало дневную производительность установки, скажем, составляло бы 100 кг/м^2 при глубине около 10 см.

Одним из недостатков подобного рода опреснительных установок является сезонное изменение их производительности. Предпринимались различные попытки преодолеть эту трудность. Например, была предложена установка, в которой вода испарялась с листа темного поглотителя, впитывавшего воду подобно фитилю. Положение такого поглотителя можно регулировать; его можно наклонить так, чтобы интенсивность падающего излучения была максимальна и, как следствие этого, обеспечивалась максимальная производительность установки на протяжении года. Другим хорошо известным типом опреснителя является плавающая пластмассовая установка, включаемая в снаряжение летчиков и моряков многих государств. Большинство разработок в этой области в последние несколько десятилетий связано с именем *доктора Марии Телкес.*

Другие применения солнечного тепла

На протяжении столетий человек использовал тепловое действие солнечных лучей в различных областях своей деятельности, многие из которых имеют важное экономическое и социальное значение в развитии общества. Например, для получения соли путем выпаривания ее из морской воды или сушки таких пищевых продуктов, как фрукты и рыба. Обычно подобные заготовки носят сезонный характер. Удаление воды из пищевых продуктов предотвращает размножение в них бактерий и позволяет сохранить их в течение года.

Сушка на солнце происходит медленно, и это ограничивает производительность таких процессов,

как получение соли, заготовка дров, каучука и т. п. Ускорение сушки позволяет повысить эффективность перечисленных процессов, и тогда все это направление в целом может приобрести важное значение в экономике некоторых стран. Проводятся поиски возможных путей повышения эффективности сушки за счет более рационального размещения обезвоживаемых предметов на солнце и лучшего использования солнечной энергии. Примером подобного исследования может служить работа, проведенная в Национальной физической лаборатории Индии. Было показано, что с помощью простейших солнечных концентраторов можно существенно ускорить процесс сушки пальмовых листьев и сахарного тростника, которые используются сельскими жителями в качестве топлива и для получения сахара.

Эффективность плоских концентраторов мы можем оценить на примере простого устройства для сушки продуктов, показанного на рис. 36. В нем использованы отражатели из полированного металла, что при удачном исполнении позволяет получить коэффициент концентрации K около 2. Чтобы поддерживать близкое к этому значение коэффициента концентрации на протяжении целого дня, необходимо через каждые полчаса изменять ориентацию устройства в соответствии с положением солнца.

Если связать скорость массообмена для влажного воздуха со скоростью конвективного теплообмена, то уравнение теплового баланса для единицы поверхности такой системы запишется в виде

$$P_a + \alpha_c P \cdot K = \varepsilon\sigma T^4 + h(T - T_a) + ml(w - w_a), \quad (5.13)$$

где $m = h/c$.

Для упрощения анализа предположим, что окружающий воздух и воздух, непосредственно соприкасающийся с осушаемым предметом, насыщены парами воды при соответствующих температурах. Величина P_a представляет собой мощность несконцентрированного излучения, содержащего рассеянную составляющую солнечной радиации и длинноволновую атмосферную радиацию; при температуре окружающего воздуха T_a, равной 300 К, P_a составляет около 300 Вт/м^2. Тогда при интенсивности прямой компо-

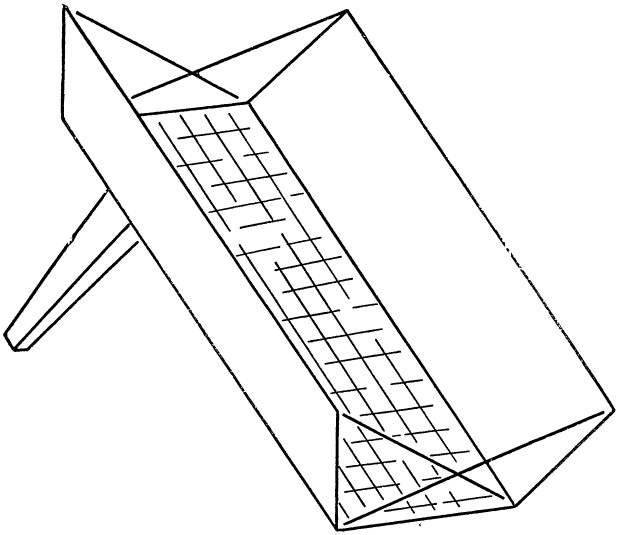


Рис. 36. Солнечная сушилка с плоскими концентраторами.

ненты солнечного излучения $P = 800$ Вт/м^2 скорость испарения воды, определяемая выражением $m(w—w_a)$, составит 0,5 кг/м^2 в час в отсутствии концентратора и 1,4 кг/(м^2·ч) при наличии концентратора и $K = 2$. В среднем за день такой концентратор ускоряет процесс сушки приблизительно в 2,5 раза.

Полученные результаты справедливы, если установка работает в безветренных условиях. При наличии ветра процесс сушки ускоряется, поскольку возрастает скорость передачи тепла воздуху, проходящему над осушителем. Но зависимость между скоростями этих двух процессов не является пропорциональной, поскольку при ветре осушитель работает в условиях пониженной температуры, да и удельная влажность при насыщении уменьшается. О влиянии температуры на скорость испарения мы уже говорили в предыдущем разделе, анализируя работу опреснительной установки. Очевидно, при наличии покрытия, как и в случае опреснительной установки, эффективность процесса сушки возрастает. Несомненно, что появление более дешевых и прочных пленок с подхо-

дящими для покрытия свойствами позволит в большинстве случаев значительно увеличить скорость сушки.

Перспективы развития этой области применения солнечной энергии связаны с многочисленными исследованиями, проводимыми в различных частях земного шара. Более того, в отдаленных и слаборазвитых районах возможно появление новых видов производства, связанных с использованием солнечной энергии для нагревания и сушки при изготовлении картона, бумаги, кровельных материалов и т. п. Однако широкое внедрение таких процессов требует источников механической и электрической энергии. В следующих главах мы рассмотрим возможности использования солнечной радиации для получения этих более удобных видов энергии.

6. Преобразование солнечной энергии в работу

Когда бы розу превратить в бутон
Джон Китс (1795—1821)

До сих пор нас интересовало преобразование солнечной энергии в *теплоту* и связанные с этим ее применения. Если же мы хотим использовать эту энергию для приведения в действие машин, нам необходимо иметь ее в виде *работы.* К такого рода машинам прежде всего относится электрический генератор; вырабатываемую им электрическую энергию можно передавать на большие расстояния, а также использовать по назначению, преобразуя ее в теплоту или механическую работу. На первый взгляд кажется, что в работу можно преобразовать всю энергию солнечной радиации, исключая лишь неизбежные потери на трение, снижающие эффективность машин. Однако установлено, что если такая машина получает энергию через промежуточную стадию теплопередачи, то величина получаемой работы при непрерывном процессе преобразования энергии принципиально ограниченна. Это происходит, например, в тех случаях, когда энергию получают при поглощении солнечной радиации или при сжигании топлива в двигателях внутреннего сгорания, в таких случаях на вход системы поступает тепловая энергия. Необходимо подчеркнуть, что даже в случае идеальной машины, в которой отсутствуют какие-либо потери, в работу превращается лишь часть энергии, поступившей на ее вход. Подобный факт кажется абсолютно неожиданным, поэтому в первой части настоящей главы мы уделим этому вопросу особое внимание. Однако ставить его под сомнение — так же нелепо, как утверждать, что вы наблюдали омоложение розы.

В настоящей главе мы рассмотрим некоторые конструкции простых систем, состоящих из коллектора солнечной энергии и тепловой машины, и оценим экономическую эффективность таких устройств.

Первое начало термодинамики

Машину, предназначенную для получения механической работы, можно схематически представить состоящей из поршня и цилиндра, как показано на рис. 37. Вращение воображаемого выходного вала машины совершается здесь через поступательное движение поршня. Такое устройство называется *двигателем*. Результаты, полученные при рассмотрении этого простейшего типа двигателей, можно распространить на другие, реальные, двигатели. Для упрощения анализа термодинамического поведения такого двигателя будем считать, что пространство внутри цилиндра заполнено идеальным газом, о котором мы

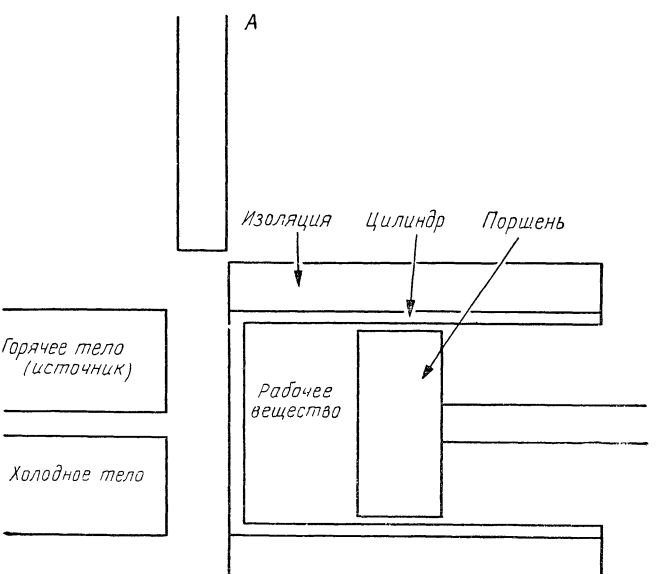


Рис 37 Простая тепловая машина.
А—отдельно показана изоляция цилиндра со стороны торца.

уже говорили в гл. 3. Вещество, содержащееся в пространстве между поршнем и цилиндром двигателя, обычно называют *рабочим веществом.*

Подробно описывать свойства этой среды нет необходимости, мы будем только предполагать, что давление здесь настолько ничтожно, что практически не оказывает сопротивления движению поршня.

Если мы приведем в контакт с цилиндром более нагретое тело, то внутренняя энергия газа увеличивается за счет дополнительной тепловой энергии, полученной цилиндром от тела. Для упрощения предположим, что энергия стенок цилиндра при этом не изменяется. Тогда поступившая на вход системы энергия Q_1 целиком идет на увеличение внутренней энергии газа. Если приращение внутренней энергии мы обозначим через ΔU_1, то получим соотношение

$$Q_1 = \Delta U_1. \qquad (6.1)$$

Согласно нашим представлениям, увеличение внутренней энергии идеального газа приводит к повышению его температуры и, как следствие этого (см. гл. 3), — к увеличению давления. Теперь удалим горячее тело, заменив его теплоизолирующим покрытием, которое препятствует рассеянию тепла из цилиндра. (Такая теплоизолирующая оболочка называется *адиабатической.*) Под действием увеличившегося давления поршень начинает перемещаться, при этом он совершает работу и может приводить в движение какой-нибудь механизм. В отсутствие теплопередачи через стенки цилиндра такая работа производится лишь за счет уменьшения внутренней энергии газа. Предположим, поршень перемещается до тех пор, пока внутренняя энергия газа не уменьшится до исходной величины, которую она имела перед нагреванием. Пусть в процессе перемещения поршень совершит некоторую работу W_1. Внутренняя энергия, полученная системой в результате нагревания, полностью преобразуется в работу. Тогда мы можем записать равенство $W_1 = \Delta U_1$ и, следовательно, $W_1 = Q_1$. (Однако не следует думать, что это предел. Если поршню позволить двигаться и дальше, то он и дальше будет совершать работу, при этом внутренняя энергия газа упадет ниже первоначального значения.)

Это, казалось бы, противоречит сделанному в начале главы замечанию о том, что система не может вернуться в исходное состояние. Когда внутренняя энергия газа падает до своего первоначального значения, поршень оказывается в положении, отличном от исходного. И для непрерывного получения работы мы должны каждый раз возвращать систему в исходное положение, а затем повторять описанный процесс, то есть система должна совершать определенный *цикл*. Чтобы вернуть систему в исходное состояние, недостаточно просто переместить поршень обратно, при этом необходимо совершить работу по сжатию газа, в результате чего его внутренняя энергия в конце процесса окажется больше исходной. Таким образом, мы видим, что вернуть систему в первоначальное состояние не просто. Прежде чем сжимать газ, нужно уменьшить его внутреннюю энергию, то есть понизить его температуру. С этой целью можно, например, удалить теплоизоляцию цилиндра, так чтобы часть энергии ΔU_2 перешла через стенки к другому более холодному телу в виде тепла $Q_2 = \Delta U_2$, причем это количество тепла равно работе, затраченной на возвращение поршня в исходное состояние. Следовательно, $W_2 = \Delta U_2$. Таким образом, количество тепловой энергии, затраченной на весь цикл, равно $Q_1 - Q_2$, при этом энергия, полученная в виде работы, составляет $W_1 - W_2$. Поскольку мы считаем, что внутренняя энергия системы в целом не изменилась, то справедливо соотношение

$$Q_1 - Q_2 = W_1 - W_2. \qquad (6.2)$$

Это уравнение представляет собой одну из форм записи *первого начала термодинамики*, гласящего, что для любой системы, совершающей полный цикл, при котором она снова возвращается в первоначальное состояние, затраты тепловой энергии равны совершенной системой работе. В этом случае можно говорить о сохранении энергии. Хотя к подобной мысли пришли давно, но впервые она была сформулирована в 1908 г. *Пуанкаре*, правда, в несколько ином виде: для любого процесса, в котором системе передается тепло Q, а совершаемая при этом работа равна W, равновесие достигается при изменении внутренней энергии системы

на величину ΔU, которая определяется из соотношения

$$Q - W = \Delta U. \qquad (6.3)$$

Это уравнение часто используют в термодинамике как основополагающее для определения внутренней энергии системы, не прибегая к рассмотрению поведения частиц с точки зрения кинетической теории.

На первый взгляд кажется, что в таких процессах теплота ничем не отличается от работы. Напомним, что в 40-х годах прошлого столетия английский физик *Джоуль* поставил серию экспериментов, в которых определенное повышение температуры, а следовательно, и соответствующее изменение внутренней энергии простой системы было получено как за счет ее нагревания, так и при совершении над ней механической работы. В своих экспериментах, знакомых многим из нас, Джоуль наблюдал повышение температуры при трении, при прохождении электрического тока через цепь с сопротивлением и т. д. В результате была установлена связь между единицами теплоты и работы и введен некий коэффициент пропорциональности, получивший название механического эквивалента теплоты. В настоящее время для измерения и теплоты, и работы пользуются одной и той же единицей, которая называется *джоулем*. (В этой книге мы будем использовать более удобную и широко известную единицу — 1 кВт·ч = 3,6 МДж.)

Второе начало термодинамики

Обратимся снова к нашему элементарному циклу. Заметим, что уравнение (6.2) не должно наводить нас на мысль, что мы имеем дело с идеальной системой для преобразования теплоты в работу. Как мы помним, величина Q_1 обозначает теплоту, которую получила наша система при контакте с внешним телом. Из гл. 3 мы знаем, что для подобной теплопередачи необходимо, чтобы температура этого тела была выше температуры газа. Однако затем, когда поршень выдвинулся для понижения температуры газа перед его выпуском мы воспользовались другим телом, которое холоднее газа. Таким образом, в первом случае тело

служит *источником*, а во втором — *охладителем*, и естественно, что одно и то же тело не может одновременно выполнять эти две функции. Здесь мы в простейшем виде столкнулись с одним из важнейших научных принципов, который называется *вторым началом термодинамики*. Согласно этому всеобщему закону природы, для реализации любой сложности циклических процессов с целью получения механической работы необходимо наличие источника и охладителя. Вы, наверное, замечали, что все электростанции, большие заводы и т. п. снабжены охлаждающими башнями или другими устройствами для передачи тепла в атмосферу или водоем, например реку (последние выступают здесь в качестве охладителей). По-видимому, впервые существование этого закона природы отметил французский инженер *Карно* (1824), занимавшийся изучением паровых двигателей. В дальнейшем основные положения этого закона и их математическая формулировка были разработаны такими выдающимися учеными, как *Клаузиус* (1850), *Кельвин* (1851), *Планк* (1897) и *Пуанкаре* (1908). В нашем рассмотрении мы будем опираться на принципы, установленные Кельвином и Планком. Согласно этим принципам, невозможно создать циклически действующее устройство, которое бы совершало работу при условии, что обмен тепловой энергией осуществляется с одним-единственным телом. Однако, как мы видели, необходимость существования источника и охладителя вытекает из того факта, что теплопередача происходит только в одном направлении: от более горячего тела к более холодному. Это послужило основой известной формулировки второго начала термодинамики, предложенной Клаузиусом.

Из нашего примера следует также, что при передаче энергии теплоте и работе отводятся различные роли. Если мы захотим сначала увеличить внутреннюю энергию газа, то это можно сделать либо путем его нагревания, либо при помощи активного перемешивания. Однако если мы затем захотим уменьшить его внутреннюю энергию, то добиться этого можно только посредством охлаждения газа, поскольку невозможно превратить его внутреннюю энергию в работу, не изменяя границ (положения поршня) системы. Следова-

тельно, определенные изменения в системе могут быть реализованы лишь через механическое воздействие. Это наблюдение послужило основой для иной формулировки второго начала термодинамики, предложенной *Каратеодори* (1909), которую иногда рассматривают как общую отправную точку в развитии термодинамики.

Эти трактовки второго начала термодинамики недостаточно широко известны, возможно, потому, что ни одна из них не является универсальной. Формулировка, предложенная Клаузиусом, оказывается несколько предпочтительней, по-видимому, вследствие того, что она отражает не формальную сторону происходящих в двигателях процессов, а существенно необратимый характер процессов, протекающих во Вселенной. Здания разрушаются, люди умирают, нагретые тела остывают, а роза никогда не станет вновь бутоном.

Коэффициент полезного действия циклических процессов

Цель наших исследований состоит в том, чтобы оценить, какое количество солнечной энергии можно превратить в работу, если использовать эту энергию для приведения в действие тепловой машины.

Если снова обратиться к нашему простому циклу, то можно сразу заметить, что ограничения, обусловленные вторым началом термодинамики, снижают эффективность цикла. Тепловая энергия Q_1 поступает от источника, а Q_2 — передается охладителю, который, имея низкую температуру, не может выполнять функцию источника в следующем цикле. Если количество энергии Q_2, составляющее некоторую часть от Q_1, безвозвратно теряется, то полезное количество энергии равно $Q_1 - Q_2$ и, следовательно, *коэффициент полезного действия* (к. п. д.) η определится отношением полезной энергии ко всей затраченной, то есть

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \qquad (6.4)$$

Одновременно заметим, что полезная работа, совершенная за цикл, равна $W_1 - W_2$, поэтому к. п. д. можно также записать в виде

$$\eta = \frac{W_1 - W_2}{Q_1}, \qquad (6.5)$$

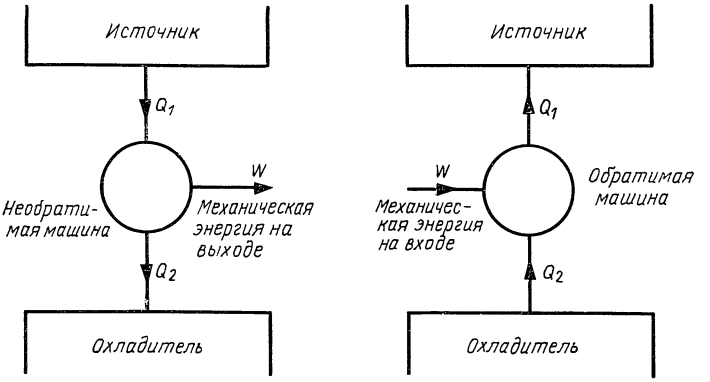


Рис. 38. Потоки энергии в тепловой машине.

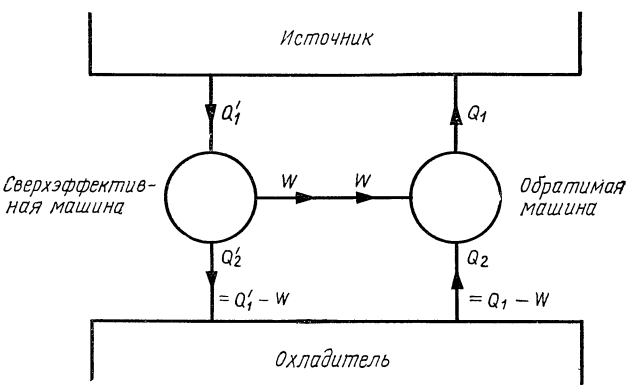


Рис. 39. Гипотетическая «сверхэффективная» машина.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что снижение эффективности цикла заложено в самой сути вещей и не связано с недостатками механизмов, используемых для его практической реализации. Тогда интересно узнать, каково, с учетом указанных ограничений, наивысшее из возможных значение к. п. д., соответствующее наиболее «совершенной» машине. Установлено, что такая машина должна обладать свойством *обратимости*. Рис. 38 помогает понять сущность этого свойства. Если изображенной в левой части рисунка машине дать обратный ход, то направления всех по-

токов энергии в ней изменятся на противоположные. В этом случае машина будет приводиться в действие работой, а получаемая тепловая энергия поступать от охладителя к источнику. Подобные процессы осуществляются в *рефрижераторе* или *тепловом насосе*, которые мы рассмотрим позднее. Нетрудно показать, что такая обратимая машина является самой эффективной из всех возможных. Предположим, что в качестве привода для нашей машины, работающей в обратимом режиме, используется еще более эффективная машина, изображенная на рис. 39. Для получения работы W эта сверхэффективная машина должна отбирать от источника энергию $Q_1' < Q_1$. Следовательно, отдаваемая в этом случае охладителю энергия, равная $Q_1' - W$, также оказывается меньше, чем аналогичная величина для обратимой машины. Тогда полная энергия, полученная от охладителя, составляет $Q_1 - Q_1'$ и энергия, отданная источнику, также равна $Q_1 - Q_1'$; следовательно, общее количество работы равно 0. Если бы нечто подобное могло произойти, то это означало бы нарушение второго начала термодинамики в формулировке Клаузиуса, то есть энергия $Q_1 - Q_1'$ передавалась бы от холодного тела к горячему без вмешательства извне. Отсюда следует вывод, что более эффективной машины, чем обратимая, не может быть.

Поскольку наша идеальная машина ничем другим не отличается, кроме того, что она обратимая, можно заключить, что все обратимые машины, работающие между источником и охладителем, одинаково эффективны, независимо от принципа их действия, рабочего вещества и т. п. От чего же зависит к. п. д. идеальной машины? Другими параметрами, характеризующими подобные системы, являются лишь температуры источника и охладителя, следовательно, к. п. д. идеальной обратимой машины зависит лишь от их величин. Тогда мы можем записать следующее соотношение, вытекающее из (6.4):

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - f(T_1, T_2), \qquad (6.6)$$

где $f(T_1, T_2)$ есть некоторая функция от T_1 и T_2, вид которой мы еще не определили. Теперь рассмотрим устройство, схематически изображенное на рис. 40.

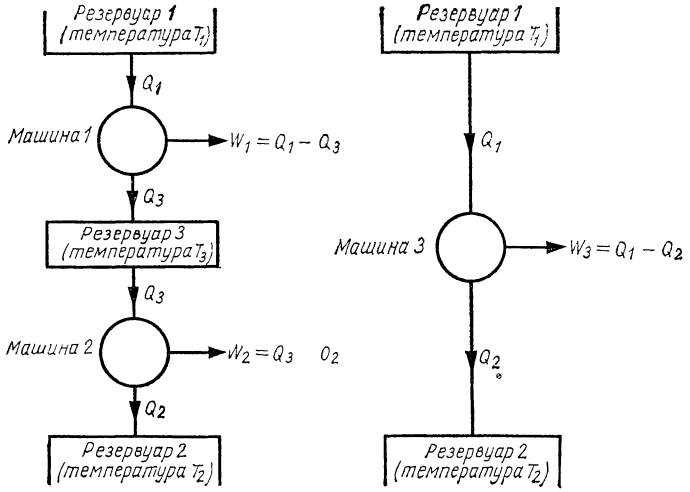


Рис. 40. Система на основе тепловых машин.

Две обратимые машины работают от трех источников. Если эту систему выполнить так, чтобы нижняя машина отбирала от источника точно такое же количество энергии, сколько верхняя машина ему отдает, то такая система оказывается эквивалентной единственной обратимой машине, общая производительность которой составляет $(Q_1 - Q_3) + (Q_3 - Q_2)$, что равно $Q_1 - Q_2$. Тогда уравнение (6.6) для каждой из машин можно записать в виде

$$\frac{Q_3}{Q_1} = f(T_1, T_3),$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = f(T_3, T_2)$$

и

$$\frac{Q_2}{Q_1} = f(T_1, T_2),$$

где функция f в каждом случае должна иметь один и тот же вид. Далее, поскольку $Q_2/Q_1 = Q_2/Q_3 \cdot Q_3/Q_1$, то функция f должна удовлетворять соотношению

$$f(T_1, T_3) \cdot f(T_3, T_2) = f(T_1, T_2). \qquad (6.7)$$

Как известно, уравнению (6.7) удовлетворяют несколько функций. Простейшей из них (которая применима и для других термодинамических рассмотрений) является следующая:

$$f(T_a, T_b) = \frac{T_b}{T_a}. \tag{6.8}$$

Тогда уравнение (6.7) принимает вид

$$\frac{T_3}{T_1} \cdot \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Таким образом, в своем исследовании мы подошли к самому важному соотношению. На основе уравнений (6.6) и (6.8) мы установили, что к. п. д. любого двигателя, использующего теплообмен с источником и охладителем, определяется уравнением

$$\eta = 1 - \frac{\text{температура охладителя}}{\text{температура источника}}, \tag{6.9}$$

а соотношение между энергиями источника и охладителя определяется равенством

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

или

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}. \tag{6.10}$$

К. п. д., выраженный уравнением (6.9), иногда называют *к. п. д. цикла Карно.*

Уравнение (6.9) позволяет понять суть ограничений, накладываемых самой природой на работу тепловых машин. К. п. д. машины можно увеличить путем повышения температуры источника или понижения температуры охладителя. Однако здесь наши возможности не беспредельны. С одной стороны, температура источника ограничивается предельной температурой, которую может выдержать его материал, с другой стороны, в природе не существует каких-либо «вечных» охладителей, температура которых была бы значительно ниже атмосферной. Поэтому на практике в качестве охладителей обычно широко используют либо непосредственно воздух, либо воду различных водоемов (рек, морей и т. п.).

Эффективность тепловых двигателей

Полученные выше результаты имеют особое значение для преобразования солнечной энергии. Если считать, что температура естественных охладителей в тропических областях не может быть ниже 290 К (17° С), то полученную из уравнения (6.9) температурную зависимость максимального к. п. д. теплового двигателя для определенного интервала изменения температуры источника можно представить в виде кривых, изображенных на рис 41. Сплошная кривая показывает изменение к. п. д. идеального двигателя. Мы видим, что и этот двигатель не совершенен: максимальное значение его к. п. д. не превышает 70% даже в том случае, когда он изготовлен из материала, позволяющего работать при температурах около 1000 К. Однако на практике при самом тщательном исполнении невозможно даже представить механический двигатель, к. п. д. которого превышал бы две трети от к. п. д. цикла Карно. Наибольшие значения к. п. д. реального двигателя представлены на рис. 41 пунктирной кривой. Чтобы понять это, необходимо более подробно разобраться в идеальных, или обратимых, циклах (сплошная кривая).

Обратимым является такой цикл, при протекании которого в обратном направлении и рабочее вещество, и среда в любой его точке занимают те же положения, что и в прямом цикле. При обратном цикле направления передачи механической и тепловой энергии противоположны их направлениям в прямом цикле. В дальнейшем мы еще вернемся к рассмотрению циклов обратимых машин.

Однако, как мы скоро увидим, наш простой цикл нельзя считать обратимым. Термодинамический цикл условно представляют в виде диаграммы, построенной в системе координат, где по осям отложены давление газа и занимаемый им объем. (Напомним, что для идеального газа эти величины определяют также его температуру.) Такая диаграмма представлена на рис. 42. Если в исходной точке *1* к машине подвести тепловую энергию, давление сначала возрастет до величины P_2, а затем при выдвижении поршня, совершающего работу, уменьшится до P_3. При передаче тепла охла-

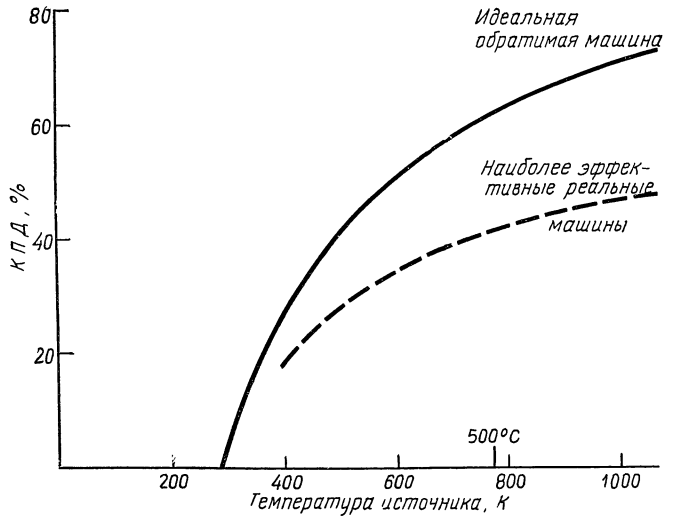


Рис. 41. К. п. д. тепловых машин при температуре охладителя 290 К (17° С).

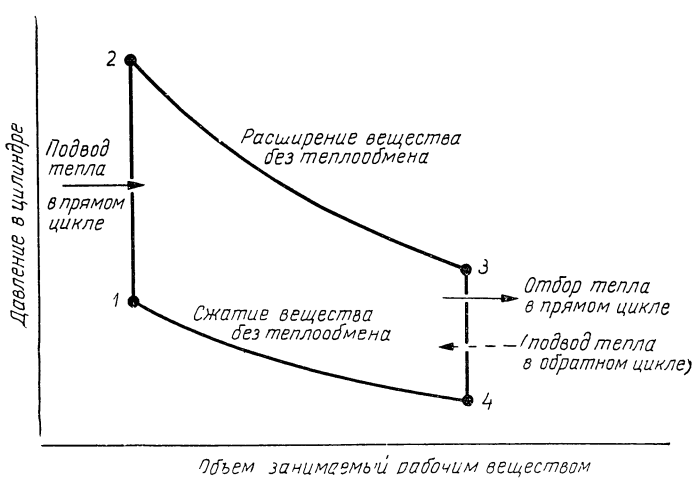


Рис. 42. Термодинамический цикл простой тепловой машины.

дителю давление упадет до значения P_4, а восстановление его до первоначальной величины P_1 возможно путем сжатия. Теперь если из точки *1* цикл начать с выдвижения поршня, то вместо прежнего сжатия газа произойдет его расширение на участке *1—4*, то есть цикл пойдет в обратном направлении. Уже на этой стадии работы появляются определенные затруднения, однако здесь мы их опустим, чтобы подойти к главному препятствию. При тех же положениях машины, что и в исходном цикле, невозможно преодолеть препятствия, возникающие сначала на участках *4—3*, а затем *2—1*. Суть этих препятствий состоит в том, что тепловую энергию нельзя отобрать у охладителя (или передать источнику) в условиях, когда рабочее вещество теплее охладителя и холоднее источника.

Теплопередача возможна лишь в одном направлении. В нашем цикле температура источника не ниже T_2, а температура охладителя не выше T_4. Тогда к. п. д. действительно обратимой машины при таких источнике и охладителе определится соотношением $(1 - T_4/T_2)$, тогда как на самом деле он оказывается ниже. [Можно показать, что фактически он не превышает $(1 - T_3/T_2)$.]

В рассмотренном примере необратимость и, как следствие этого, снижение эффективности машины в известной мере обусловлены значительным теплообменом. Исходная предпосылка, принятая Карно для обратимого цикла, диаграмма которого показана на рис. 43, состоит в том, что процессы теплообмена на участках *1—2* и *3—4* осуществляются при постоянной температуре рабочего вещества (соответственно и постоянных температурах источника и охладителя), а не при постоянном объеме. Механическая энергия, полученная на участке 1—2, точно равна сообщенной машине тепловой энергии, поэтому внутренняя энергия (и, следовательно, температура) остается постоянной. Поскольку процесс теплопередачи происходит лишь при наличии разности температур, то очевидно, что температура рабочего вещества не может достигать температуры источника на участке *1—2* или температуры охладителя на участке *3—4*. Отсюда следует, что, уменьшая эти разности темпера-

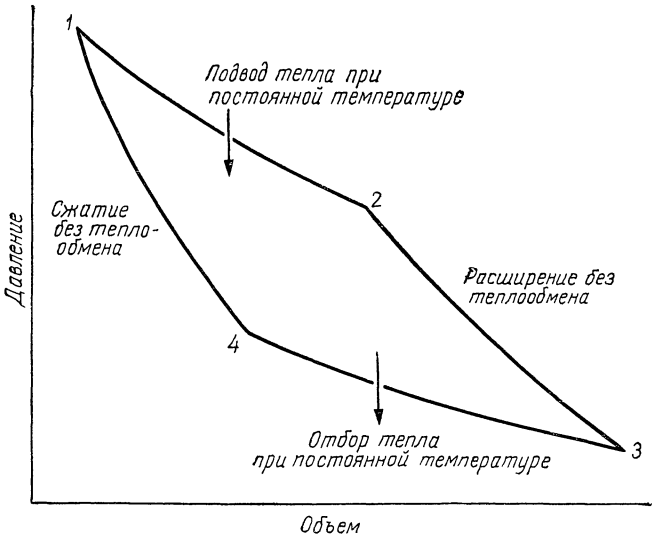


Рис. 43. Термодинамический цикл обратимой машины Карно.

тур, можно лишь пытаться приблизить реальный цикл к обратимому. Если же на одном из этих участков разность температур будет нулевой, то реализация цикла в соответствующем направлении затруднена. Когда указанные условия соблюдаются, мы имеем идеальный цикл, и он характеризуется к. п. д. Карно.

Другим значительным препятствием для реализации обратимого цикла является трение, например трение поршня о стенки цилиндра. Оно всегда препятствует движению, поэтому при попытке реализовать обратимый цикл следует иметь в виду, что сила, действующая на поршень в данной точке, различна при различных направлениях его перемещения. Трение возникает и между молекулами жидкости, а также на границе жидкости и твердого тела.

Далее, в реальных машинах невозможно обеспечить полной теплоизоляции, что является отличительной чертой идеальных обратимых систем. Следовательно, обратимых машин в действительности не существует. К. п. д. даже самых остроумных конструкций реальных машин только стремится к к. п. д. Карно, никогда

его не достигая. В тепловой машине, широко известной под названием двигателя внутреннего сгорания, рабочее вещество претерпевает изменения, описываемые циклом Отто (рис. 44); последний чем-то напоминает наш простой цикл (см. рис. 42). Однако здесь источника как такового не существует, энергия на участке *1—2* увеличивается за счет сжигания топлива в воздухе, который предварительно был подвергнут сжатию на участке *4—1*. После расширения при рабочем ходе *2—3* газ в точке *3* выбрасывается; его нельзя использовать в новом цикле, поскольку запасы кислорода в нем уже исчерпаны, и поддерживать процесс горения дальше невозможно. Выпуск этого горячего газа и впуск свежего холодного воздуха в точке *4* равносильны теплоотдаче охладителю, в данном случае атмосфере.

При использовании солнечной энергии или любого другого внешнего источника можно было бы работать в замкнутом цикле все время с одним и тем же рабочим веществом. Для этих целей хорошо подходит газовый цикл, известный под названием цикла Стирлинга, диаграмма которого изображена на рис. 44. Так же, как и в цикле Карно, теплопередача здесь осуществляется при постоянной температуре на участках *2—3* и *4—1*. При этом за счет расширения рабочего вещества на участке *2—3* производится механическая работа, а на участке сжатия *4—1* механическая работа затрачивается. На участке *1—2* рабочее вещество нагревается, тогда как на *3—4* оно охлаждается при постоянном объеме. Поскольку изменение температуры на участках *1—2* и *3—4*, а следовательно, и обмен энергией одинаковы, то целесообразно тепло, отданное рабочим телом на участке *3—4*, вернуть ему же на участке *1—2*. Этот теплообмен осуществляется в *регенераторе*. Цикл Стирлинга приближается к обратимому, поэтому его к. п. д. довольно высок. Цикл Стирлинга положен в основу работы хорошо известной воздухонагревательной машины, которая выпускается голландской фирмой «Филипс», а также других машин, созданных американской фирмой «Дженерал моторс». Судя по сообщениям, к. п. д. подобных машин приближается к 70%, то есть величине к. п. д. Карно. Оригинальные конструкции этих машин,

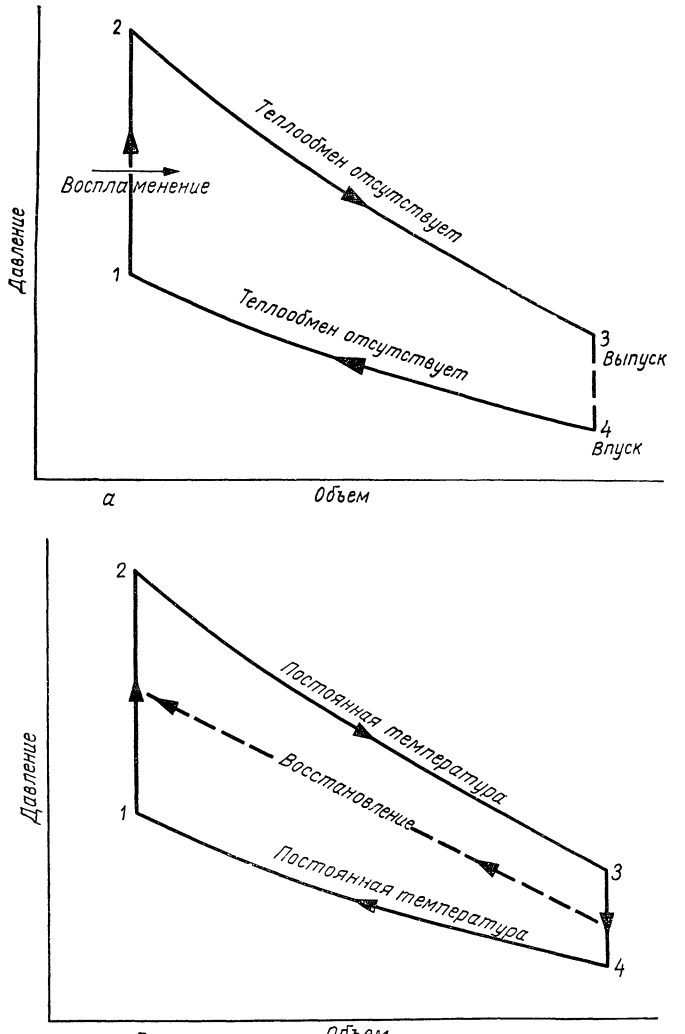


Рис. 44. Идеальные термодинамические циклы:

а — незамкнутый цикл Отто, напоминающий рабочий цикл двигателя внутреннего сгорания; *б* — замкнутый цикл Стирлинга, подобный рабочему циклу воздухонагревательной машины.

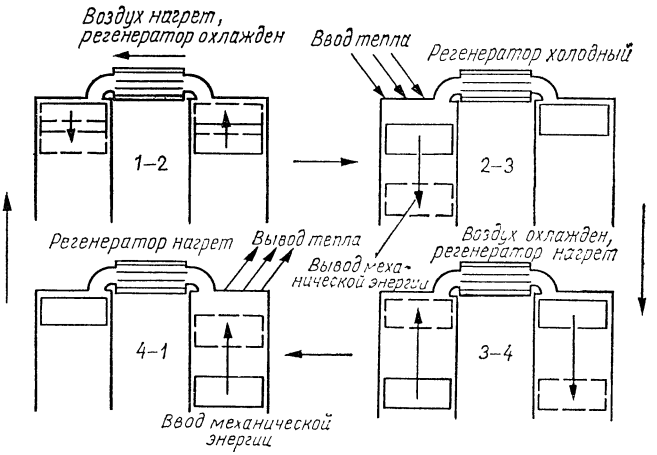


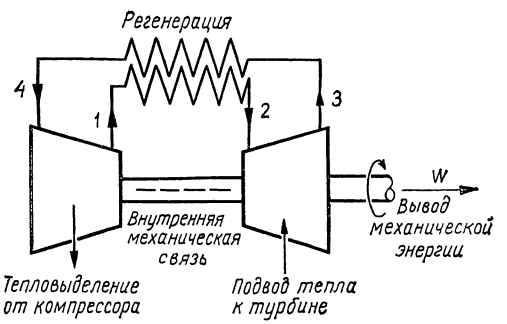
Рис. 45. Двухцилиндровая воздухонагревательная машина.

использующих идеальный цикл Стирлинга, схематически показаны на рис. 45. Здесь при прохождении рабочего газа через регенератор в соответствующие моменты цикла используется некий эквивалент поршня, а для осуществления процессов сжатия и расширения применяется специальный мощный поршень. По этому принципу был создан целый ряд машин, управляемых солнечной энергией, так что подобную конструкцию можно считать апробированной.

Другим регенеративным циклом, в котором регенерация протекает при постоянном давлении, а не при постоянном объеме, является цикл Эриксона, изображенный на рис. 46. Не следует считать, что в конструкциях всех тепловых машин непременно должны использоваться поршни и цилиндры. На рис. 46 показано одно из возможных устройств на основе цикла Эриксона, в котором расширение на участке *2—3* производится турбиной, а сжатие на участке *4—1* механически связанным с ней *компрессором.* Это замкнутая система, в которой осуществляется непрерывное устойчивое движение рабочего вещества. Трудности практической реализации подобного цикла, как и цикла Стирлинга, заключаются в соответствующем выборе регенераторов и устройств, предназначенных для сжатия и расширения рабочего вещества в условиях

почти постоянной температуры и соответствующего теплообмена.

Из всех тепловых машин наиболее широкое распространение получили те, в которых рабочее вещество в различных точках цикла претерпевает фазовые переходы от испарения до конденсации. На рис. 47 схематически показано устройство такой системы, напоминающее обычную мощную паровую турбину, используемую для выработки электроэнергии. В этом случае солнечный нагреватель как бы выполняет функцию парового котла. Такие системы к настоящему времени претерпели значительные изменения, стали более сложными и совершенными, их к. п. д. сейчас достигает 40%, то есть около 60% к. п. д. Карно.



Цикл Эриксона

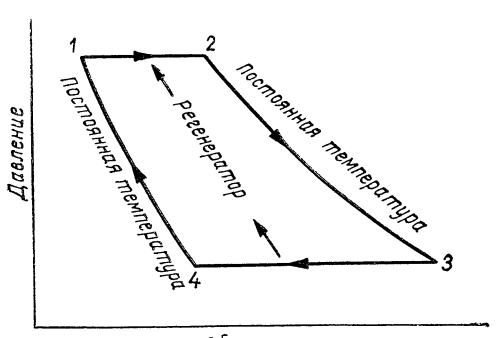


Рис. 46. Идеальный замкнутый газовый цикл и его практическая реализация.

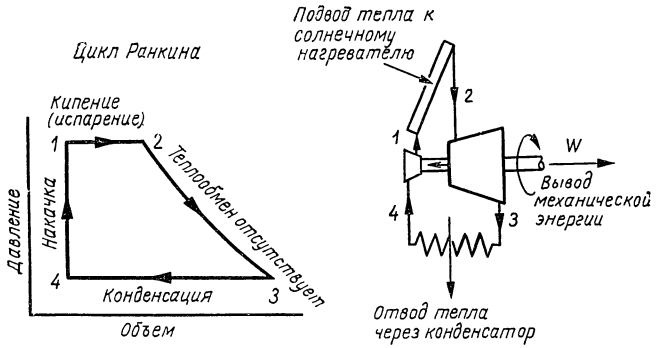


Рис. 47. Идеальный замкнутый паровой цикл и его практическая реализация.

В последнее столетие разработано множество интересных разновидностей термодинамических циклов и средств для их практического осуществления, останавливаться на которых здесь не имеет смысла. В начале этой главы мы рассмотрели вопрос о том, сколько энергии требуется сообщить тепловой машине, чтобы она выполняла необходимую работу, и увидели, что никакими путями на выходе машины нельзя получить энергии больше, чем это соответствует к. п. д. Карно. В настоящем же разделе мы показали, что на практике к. п. д. простой тепловой машины в лучшем случае составляет половину к. п. д. Карно. И это необходимо иметь в виду, когда нам придется рассматривать возможности машин для получения энергии с помощью солнечной радиации.

Особенности работы комбинированных систем машина — коллектор

При создании систем, в которых тепловые машины комбинируются с коллектором солнечной энергии, возникают значительные трудности. Как мы видели, повышение максимальной температуры в цикле приводит к увеличению к. п. д. машины, однако из гл. 5 нам известно, что к. п. д. плоского коллектора при повышении температуры снижается. Уравнения (5.4) и (5.5), наглядно иллюстрирующие этот факт, можно

переписать таким образом, чтобы выразить к. п. д. коллектора $\eta_к$ как отношение получаемой от коллектора энергии к общему количеству падающей на него солнечной энергии. При условии, что к. п. д. тепловой машины $\eta_м$ составляет половину к. п. д. цикла Карно, можно записать

$$\eta_м = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{T_a}{T}\right), \qquad (6.11)$$

где T_a — температура атмосферы, выполняющей функции охладителя. Тогда общий вид к. п. д. системы коллектор — машина определяется произведением

$$\eta = \eta_к \cdot \eta_м. \qquad (6.12)$$

При интенсивности солнечной радиации на поверхности коллектора P получаемая от машины мощность $P_2 = \eta P$.

С повышением температуры T для любого значения P величина $\eta_м$ увеличивается, а $\eta_к$ — уменьшается. Результирующее значение к. п. д. сначала повышается, а затем падает (рис. 48). (Приведенные кривые свидетельствуют о том, что подобная система, состоящая из коллектора и машины, имеет очень низкий к. п. д.) Если представить систему, в которой все время поддерживалось бы максимальное значение к. п. д., то ее выходная мощность P_2 будет меняться в зависимости от входной мощности P, как показано на рис. 49. Мы видим, что в условиях тропического полудня с 1 м^2 поверхности коллектора можно получить лишь 20—40 Вт. Как показывают расчеты, произведенные рассмотренным в гл. 5 методом, ежедневная производительность установки даже в середине лета в тропиках лишь немного выше 100 Вт/м^2. Следовательно, использование тепловых машин в сочетании с плоскими коллекторами для получения высоких мощностей не экономично, поскольку в этом случае необходимы коллекторы исключительно больших размеров. Тем не менее подобные системы уже используются для таких, например, целей, как перекачка воды и энергоснабжение удаленных радиостанций. Примером могут служить изготовленные в Италии устройства «Сомор», выходная энергия которых в зависимости от размеров коллекторов может достигать 5 кВт.

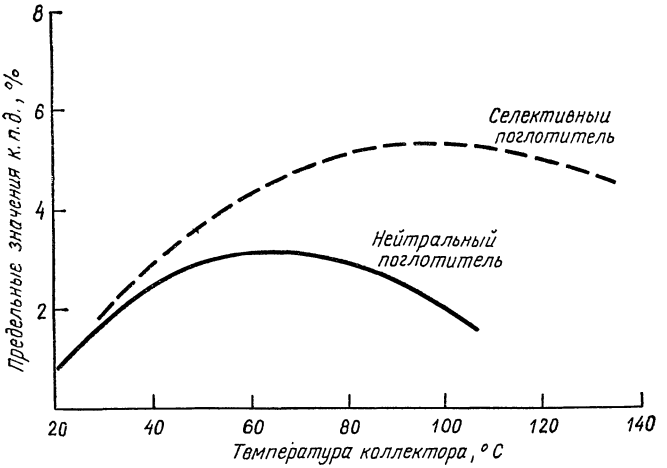


Рис. 48. Предельный к. п. д. системы плоский коллектор — тепловая машина ($P = 800$ Вт/м^2).

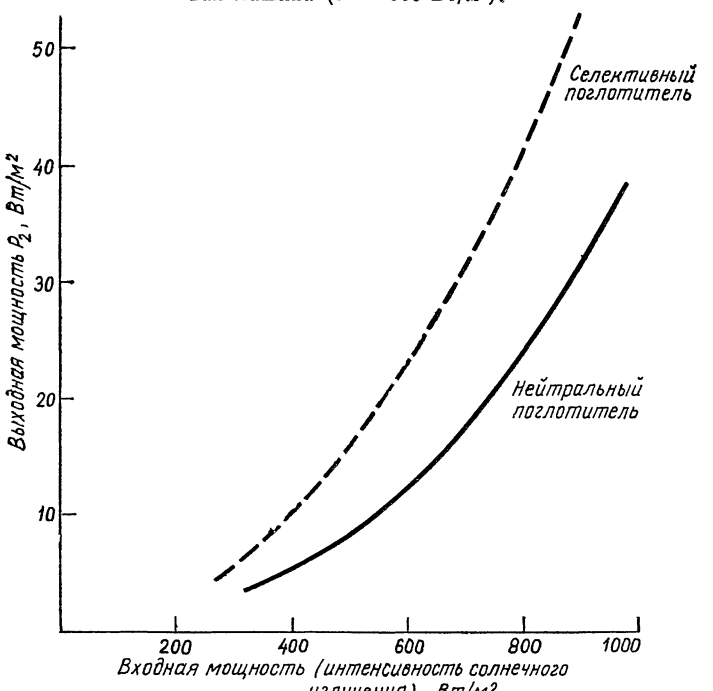


Рис. 49. Максимальная выходная мощность системы плоский коллектор — машина.

В некоторых машинах (в том числе в ряде модификаций устройства «Сомор») плоские коллекторы используются вместе с зеркальными концентраторами, предназначенными для усиления интенсивности солнечной радиации, падающей на поглотитель коллектора. Это еще одно из применений мощных концентраторов, которые мы рассмотрим в следующем разделе. Применение простейших концентраторов не требует регулировки положения коллекторов в соответствии с кажущимся перемещением солнца. Например, при интенсивности падающей на коллектор с нейтральным поглотителем солнечной радиации 800 Вт/м^2 и коэффициенте концентрации $K = 2$ максимальная выходная мощность системы коллектор — машина составляет около 80 Вт/м^2. (Следует отметить, что примерно 90 из 800 Вт/м^2 приходится на долю рассеянной составляющей, которая не попадает на коллектор при отражении от поверхности концентратора.)

Тепловые машины с концентраторами

В гл. 4 мы видели, что при фокусировке солнечных лучей с помощью параболического концентратора можно получить очень высокие температуры. Хотя при одних и тех же размерах плоского и параболического отражателей принимаемая ими энергия солнечной радиации одинакова, но во втором случае благодаря ее концентрации машина получает возможность работать при более высокой температуре и, следовательно, с более высоким к. п. д. Соответственно на выходе установки мы получаем большее количество механической энергии, и даже простейший концентратор позволяет значительно повысить выходную мощность системы.

Предположим, что фокусирующее солнечное излучение устройство, которое является источником энергии для тепловой машины, работает при такой температуре, когда тепловые потери в окружающую среду обусловлены теплоизлучением. Для начала будем считать также, что благодаря изоляции этот источник излучает энергию лишь через открытую поверхность. Поскольку излучающая поверхность практически

почти всегда оказывается несколько большей, то при определении эффективного значения коэффициента концентрации мы введем соответствующую поправку. Тогда уравнение теплового баланса для единицы поверхности источника принимает следующий вид:

$$\alpha_c P \cdot K = P_e + \sigma\varepsilon T^4, \qquad (6.13)$$

где K — эффективное значение коэффициента концентрации отражателя (см. гл. 4). Следовательно, тепловая мощность, которая может быть получена с единицы поверхности источника равна

$$P_e = \alpha_c P \cdot K - \sigma\varepsilon T^4.$$

Если этот источник используется для приведения в действие тепловой машины с к. п. д., равным половине к. п. д. цикла Карно, охладителем в которой служит атмосфера при температуре около 290 К (17° С), то мощность на единицу поверхности источника находится из уравнения

$$P_3 = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{T}{T_a}\right)(\alpha_c P \cdot K - \sigma\varepsilon T^4), \qquad (6.14)$$

а в пересчете на единицу поверхности коллектора мощность приблизительно должна быть равна

$$P_2 = \frac{P_3}{K} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{T}{T_a}\right)\left(\alpha_c P - \frac{\sigma\varepsilon T^4}{K}\right). \qquad (6.15)$$

Как и в случае системы, состоящей из плоского коллектора и тепловой машины, здесь существует некая температура источника, при которой мощность P_2 максимальна. Однако с помощью уравнения (6.15) можно показать, что в большинстве случаев эта оптимальная температура значительно превосходит предельные возможности металлов. Нельзя рассчитывать, чтобы такие системы, работали при температурах источника выше 1000 К (около 700° С). На рис. 50 представлена зависимость выхода системы от величины падающей солнечной энергии для этой предельной температуры источника. Из рис. 50 видно, что при наличии такого ограничения ни увеличение K до 1000, ни применение селективного поглотителя не обеспечивают существенного повышения выходной мощности

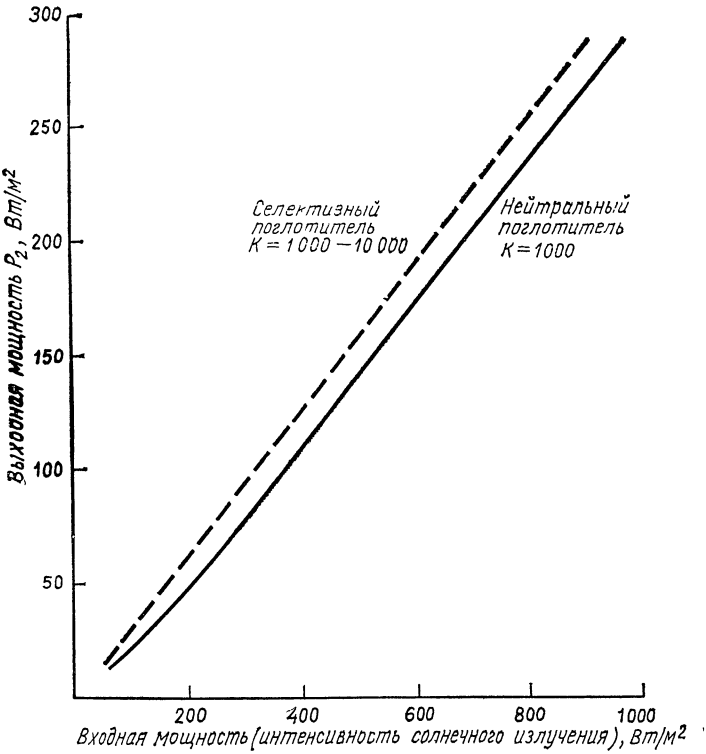


Рис. 50. Максимальная выходная мощность машины с параболическим концентратором.

системы. Но, сравнивая эти кривые с теми, что представлены на рис. 49, можно заметить значительное повышение выходной мощности при максимальном к. п. д., близком к 30%. Практически же выходная мощность значительно ниже, поскольку мы не учли некоторые виды потерь, а потери на излучение могут оказаться выше, чем мы полагали. Тем не менее в условиях тропического климата подобная система позволяет получить выходные мощности до 200 Вт на 1 м² площади коллектора, что соответствует ежедневной производительности около 1 кВт·ч.

Для реализации такой системы параболические зеркала должны иметь соответствующие размеры,

а их конструкция обеспечивать слежение за движением Солнца. К обсуждению всех этих проблем мы еще вернемся.

Применение солнечной энергии для охлаждения

Утверждение, что солнечную энергию можно применять для охлаждения, на первый взгляд кажется странным. Но именно благодаря использованию солнечной энергии для приведения в действие холодильных установок удается получать охлаждение там, где это особенно необходимо. В странах с жарким климатом охлаждение не только обеспечивает соответствующие условия работы и жизни людей, но и помогает продолжительное время сохранять скоропортящиеся продукты питания. Подсчитано, что около четверти получаемых на земном шаре продуктов портится при хранении. Обычное охлаждение, скажем, до температуры 5—10° С, позволяет значительно продлить срок хранения определенных продуктов, особенно фруктов и овощей. При благоприятных условиях их можно сохранить до следующего урожая.

В гл. 5 мы уже говорили, что в условиях сухого климата процесс радиационного охлаждения ночью протекает с интенсивностью около 100—200 Вт/м^2. Там, где позволяют метеорологические условия, этот

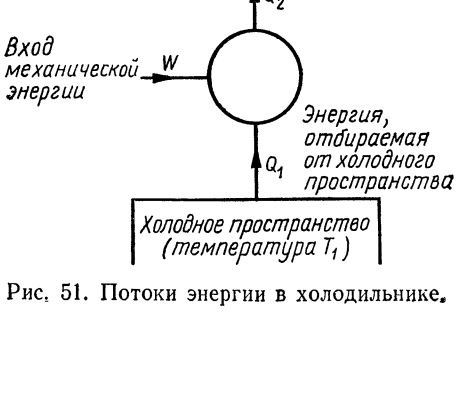


Рис. 51. Потоки энергии в холодильнике.

способ охлаждения оказывается самым эффективным и экономичным. Однако мы рассмотрим и другие методы охлаждения, пригодные для применения в менее благоприятных климатических условиях.

В простейшем случае холодильник можно представить в виде тепловой машины, работающей в обратном цикле. Этим мы и воспользуемся.

Обратный цикл машины — это прямой цикл (см. рис. 44—47), но пройденный в противоположном направлении, то есть против часовой стрелки. Здесь попрежнему существенным моментом является наличие источника и охладителя, но передача энергии между ними происходит в обратном направлении. Представим себе некоторый обобщенный холодильник в виде схемы, показанной на рис. 51; его принцип действия заключается в том, что тепловая энергия Q_1 отбирается от холодного пространства, при этом затрачивается механическая энергия W. Одним из существенных моментов работы такого холодильника является рассеивание тепловой энергии в более теплое пространство. (В бытовых холодильниках тепловая энергия, рассеиваемая змеевиками, расположенными с задней стороны холодильника, передается в помещение.) Эффективность холодильной машины обычно характеризуется *холодильным коэффициентом*, который равен отношению энергии, отобранной от холодного пространства, к затраченной механической работе:

$$K_{\text{х}} = \frac{Q_1}{W}. \tag{6.16}$$

Согласно первому началу термодинамики, $Q_1 + W = Q_2$, тогда

$$K_{\text{х}} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}. \tag{6.17}$$

Основываясь на аргументах, близких к тем, которые мы использовали при анализе работы тепловых машин, можно показать, что величина холодильного коэффициента не может превышать его значения для машины, использующей обратный цикл Карно. Установлено, что и в этом случае

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \tag{6.18}$$

тогда холодильный коэффициент запишется в виде

$$K_x = \frac{T_1}{T_2 - T_1}. \qquad (6.19)$$

Наиболее типичными для работы холодильника являются условия, когда температура холодного пространства T_1 равна 273 К (0° С), а роль горячего пространства выполняет либо окружающий воздух, либо вода при температуре T_2, значение которой не превышает 300 К (27° С). Тогда максимальная величина коэффициента K_x может достигать 10, то есть отобранная от холодного пространства тепловая энергия в 10 раз превышает затраты механической энергии.

На практике этот коэффициент обычно значительно ниже. На рис. 52, *а* схематически показана одна из разновидностей подобного класса машин, в которой сжатие газа осуществляется компрессором, а его расширение — детандером. Необратимость процессов, обусловленная трением и рассеиванием тепла в различных частях системы, существенно снижает ее качество. Важнейшим условием нормальной работы подобной системы является поддержание требуемой скорости теплообмена, а это возможно только в том случае, если разность температур горячего и холодного пространств не меньше 5—10 К. Вследствие этих ограничений холодильный коэффициент, как правило, редко бывает выше 4. Уравнение (6.19) показывает, что холодильный коэффициент увеличивается по мере сближения температур горячего и холодного пространств, однако при определенных условиях преобладающее значение приобретает указанная выше разность температур, в результате возможность дальнейшего повышения холодильного коэффициента исчезает.

Работа идеального холодильника существенно отличается от простого цикла машины, где в качестве рабочего вещества используется газ. Во многих случаях эту роль выполняет какая-либо рабочая жидкость, которая на одних стадиях цикла проявляет свойства жидкости, а на других — пара. Обычно применяется аммиак NH_3 или соединения фтора, например CCl_2F_2. Типичное устройство такого рода показано на рис. 52, *б*. В конденсаторе, выполняющем функции горячего пространства, рабочее вещество нахо-

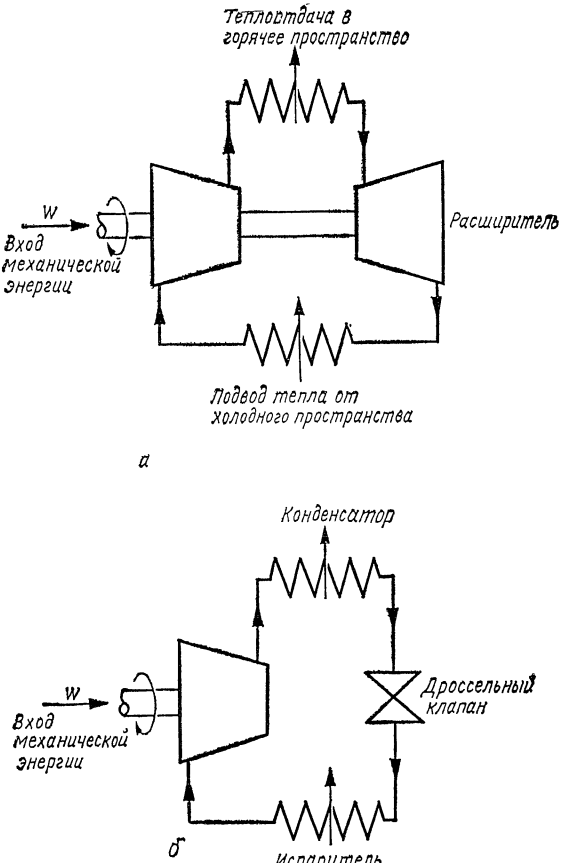


Рис. 52. Простые холодильники:
а—газовый цикл; *б*—паровой цикл.

дится в жидком состоянии, поэтому вместо прежнего детандера для уменьшения давления в жидкости ее просто пропускают через клапан дросселя. Хотя наличие этого устройства еще более усугубляет необратимость системы, но ее конструкция упрощается. Однако при всех преимуществах парового цикла или любой другой системы действие второго начала термодинамики не исключается, поэтому в дальнейшем

мы будем считать, что для любого холодильника при соответствующих условиях холодильный коэффициент равен 4.

Отсюда следует, что применение машины на основе высокотемпературного цикла Стирлинга в сочетании с параболическим отражателем для приведения в действие хорошего холодильника, вероятно, позволило бы отбирать от холодного пространства энергию 700 ÷ 800 Вт на 1 м² поверхности коллектора. При использовании же низкотемпературных плоских коллекторов в тропических районах аналогичная величина не превысит 100 Вт с 1 м² поверхности коллектора.

Иногда путем усложнения системы можно достигнуть лучших результатов, чем при радиационном охлаждении. Целесообразно также создание других систем, в которых удастся совместить функции тепловой машины и холодильника, что позволит избежать определенных недостатков, присущих их раздельной работе. Примером подобного устройства является *абсорбционный холодильник*, изображенный на рис. 53, который обеспечивается тепловой энергией от солнечной

Рис. 53. Абсорбционный холодильник.

установки. В абсорбционной машине нет компрессора. Его заменяет насос, перекачивающий жидкость с растворенным в ней хладагентом (например, раствор аммиака в воде). Этот раствор попадает на вход солнечного нагревателя. Известно, что растворимость газообразного вещества значительно снижается с повышением температуры. Благодаря этому в солнечном коллекторе из раствора выделяется газообразный хладагент, а растворитель через дроссельный клапан удаляется из коллектора в абсорбер.

Газообразный хладагент, находящийся под повышенным давлением, попадает в охлаждаемый конденсатор, где сжижается за счет теплоотвода в окружающее пространство. Далее сжиженный хладагент через дроссельный клапан проходит в испаритель и, испаряясь, производит охлаждающее действие. Пары хладагента вновь соединяются с растворителем в абсорбере при отводе тепла, и указанный цикл непрерывно повторяется.

Поскольку жидкость практически несжимаема, работа, затрачиваемая на привод насоса, невелика, и система работает главным образом за счет энергии, поглощенной в солнечном коллекторе, выполняющем функцию генератора хладагента.

Термодинамический анализ такой системы довольно сложен, и нет надобности им заниматься. Заметим только, что холодильный коэффициент этой системы близок к таковому у компрессионных холодильных машин.

В заключение этого раздела оценим емкость аккумулятора холода для кондиционирования воздуха в помещении, которое производится системой плоских коллекторов, смонтированных на крыше здания. Рассмотрим прямоугольное здание, длина которого L, ширина $^1/_3L$ и высота $^1/_5L$. Таким образом, площадь наружной поверхности стен составляет около $^1/_2L^2$. Предположим, что вся крыша занята коллекторами, которые так затеняют здание, что обогревом его через крышу можно пренебречь.

Для начала оценим приблизительно равновесную температуру наружной поверхности стен. Она определяется тепловой энергией длинноволнового излучения, частично прямой и рассеянной составляющими сол-

нечной радиации (которые значительно уменьшаются при белой окраске стен), а также теплообменом с окружающей средой, обусловленным лучеиспусканием и конвекцией. Очевидно, что с точки зрения процессов энергообмена стены можно рассматривать наравне с окружающими предметами, если не считать, что через них тепловая энергия проходит внутрь здания, где температура ниже, чем снаружи. При грубой оценке можно предположить, что температура наружной поверности стен все время равна температуре окружающего воздуха. Тогда мы вправе пренебречь всеми видами энергообмена, за исключением проводимости тепла через стены. Скорость теплопередачи через стены здания зависит от разности температур наружного и внутреннего воздуха, проводимости стен и характера конвекции воздуха с той и другой стороны стен. Обычно вводят некий коэффициент U, который учитывает суммарное влияние перечисленных факторов. Тогда скорость q передачи энергии через единицу поверхности стены определяется из уравнения

$$q = U\,\Delta T, \tag{6.20}$$

где ΔT — разность температур воздуха снаружи и внутри здания. Значения коэффициента U для различных конструкций стен с теплоизоляцией изменяются в широких пределах. Разумно принять низкое значение коэффициента $U = 1{,}0$ Вт/м^{2}К. Тогда результирующая ежедневная теплопередача через стены здания оценивается величиной $12L^2\Delta T$, где L измеряется в метрах, а ΔT — в кельвинах.

Основываясь на ранее принятой методике расчета, находим, что в отсутствие облачности в тропических районах подобная охлаждающая система позволяет ежедневно отбирать до 500 Вт·ч энергии с каждого квадратного метра поверхности коллектора. При условии, что температура холодного пространства остается неизменной, для ориентировочной оценки мы можем воспользоваться этой величиной. Если площадь крыши равна $^1/_3L^2$, то уравнение дневного баланса энергии запишется в виде

$$500 \cdot \frac{1}{3} L^2 = 12L^2\Delta T,$$

отсюда находим $\Delta T = 14$ К. Следовательно, в охлаждаемом пространстве температура поддерживается на 14 К ниже средней температуры снаружи здания.

Теперь сопоставим эти результаты с данными, полученными для радиационного охлаждения ночью. Для оценки возможностей такой гипотетической системы ночного радиационного охлаждения воспользуемся рис. 31, согласно которому средненочная температура в тропических районах составляет около 300 К. Тогда при температуре холодного пространства T К мощность отбираемой от него тепловой энергии $P_р$ Вт/м^2 определяется соотношением

$$P_р = 9{,}5\,(T - 275). \qquad (6.21)$$

Если принять среднюю наружную температуру равной 305 К и предположить, что система ежедневно по 6 ч в сутки обеспечивает указанную мощность отбора тепловой энергии, то с использованием уравнения (6.21) получаем

$$6 \cdot 9{,}5\,(T - 275) \cdot \frac{1}{3} L^2 = 12L^2\,(305 - T).$$

Отсюда $T = 289$ К, что при радиационном охлаждении соответствует разности температур $\Delta T = 16$ К. Хотя этот расчет носит довольно ориентировочный характер, тем не менее он показывает, что при прочих равных условиях простота системы радиационного охлаждения делает ее предпочтительной перед холодильными системами, основанными на термодинамических циклах.

На этом мы закончим обсуждение чисто механических систем. Они получили широкое распространение для привода машин и станков на заводах, насосов для водораспределения и т. п. Однако во многих случаях нужны источники не механической, а электрической энергии. Поэтому в следующих двух главах мы исследуем возможности получения электроэнергии на базе солнечных энергетических установок, которые принципиально отличаются от рассмотренных систем с использованием генераторов и тепловых машин.

7. Преобразование солнечной энергии в электрическую

> Существует две разновидности электричества — хорошее и плохое. Разница, я думаю, в том, что одно из них можно получать в течение длительного времени, но с большими затратами, другое дешевле, но его мало.
>
> *Стивен Ликок (1869—1944)*

Несомненно, электроэнергия является наиболее удобной для использования формой энергии. Основная доля электричества вырабатывается на земном шаре с помощью электромагнитных генераторов, приводимых в действие тепловыми машинами того или иного вида. В предыдущей главе мы видели, что солнечные системы, в состав которых входят тепловые машины, обычно малоэффективны. (Исключение составляют системы с использованием концентраторов.) Как уже говорилось, возможности этих систем ограничиваются наибольшей и наименьшей температурами цикла машины. Применение концентраторов позволяет увеличить получаемую механическую мощность до 100 Вт на 1 м^2 площади коллектора. Однако ввиду своей сложности системы с концентраторами применяются лишь для привода маломощных электрических генераторов в десятки—сотни ватт. В этой главе мы рассмотрим и другие способы преобразования солнечной энергии в электрическую, а также возможности повышения их эффективности. Для этого необходимо как-то обойти ограничения второго начала термодинамики, и это не просто вопрос замены механической машины другим устройством.

Взаимный переход электрической и механической форм энергии в принципе может протекать без потерь, например, в идеальном соленоиде или в двигателе. Электрические машины, преобразующие одну форму энергии в другую, обычно весьма эффективны: их к. п. д. иногда достигает 90% (для больших машин, где потери обратно пропорциональны размерам

машин). Поэтому пределом совершенства не без оснований считают машину с к. п. д. 100%, допускающую обратимое преобразование. Но такая машина в принципе не отличается от идеальной обратимой механической машины, поэтому здесь также вступает в силу второе начало термодинамики. Как известно, некоторые термодинамические ограничения проявляются при непрерывном процессе преобразования тепловой энергии в механическую. При использовании солнечной энергии подобных ограничений удалось бы избежать в том случае, если бы отпала необходимость в промежуточной стадии превращения радиации в теплоту. Подобную возможность мы также исследуем, но сначала остановимся на обычных системах, которые могли бы работать ближе к пределам термодинамических ограничений, чем механические системы, или допускали бы более простую и экономичную реализацию. В этой главе мы рассмотрим сначала некоторые принципы и устройства для получения энергии, в которых исходной является тепловая стадия. Преимущества и недостатки теоретически более перспективных устройств, работающих без тепловой стадии, обсуждаются в следующей главе.

Электрический ток, потенциал и мощность

Обычно под потоком электричества в цепи понимают прохождение тока под влиянием *разности потенциалов*. Такое представление напоминает нам прохождение воды через трубку, соединяющую резервуары, находящиеся на различной высоте. Подобные аналогии были уместны, пока не стало понятно, что электрический ток представляет собой движение электронов. Прежние положения оказались в противоречии с принятой теперь электронной точкой зрения. Познакомившись с особенностями поведения электронов, мы сможем в дальнейшем лучше понять смысл такого противоречия.

Первоначально знак (положительный или отрицательный) приписывался электрическим зарядам произвольно. Впервые это сделал *Франклин* (1747), который присвоил положительный знак электрическому заряду, полученному при натирании стеклянной па-

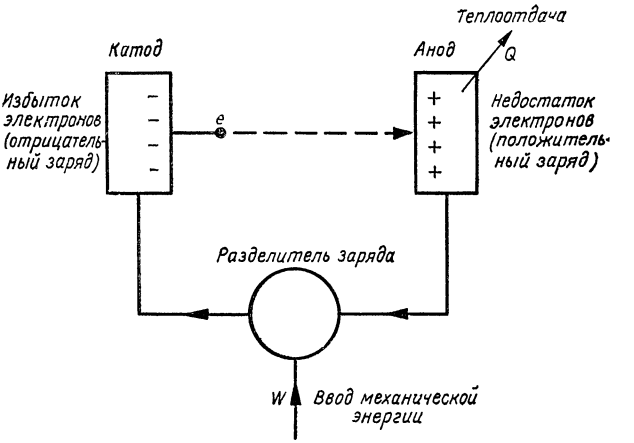
лочки о шелк. Более глубокие представления об электростатических явлениях возникли лишь в XIX в. и позже. В 1785 г. *Кулон* экспериментально открыл важный закон (носящий его имя), определяющий силу электростатического взаимодействия двух малых заряженных тел. Если два тела с зарядами q_1 и q_2 находятся на расстоянии x, то сила их взаимодействия пропорциональна величине q_1q_2/x^2; под действием этой силы разноименные заряды притягиваются, а одноименные отталкиваются. Используя это соотношение и определив, с какой силой притягиваются два разноименно заряженных малых (точечных) тела, расположенных на заданном расстоянии друг от друга, мы можем найти величину единичного заряда, приписываемого каждому из этих тел. Найденная таким путем единица заряда названа кулоном (Кл).

Однако, как теперь известно, наиболее удобной единицей заряда является заряд электрона. Существование электрона впервые было обнаружено в «катодных лучах», исходящих с отрицательного электрода, или катода, газоразрядной трубки. Измеряя энергию этих лучей и определяя их отклонение в электростатическом поле, *Томсон* (1897) показал, что их можно рассматривать как состоящие из мельчайших частиц, каждая из которых имеет отрицательный (по Франклину) заряд величиной около $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. (Термин «электрон» происходит от греческого названия янтаря, на котором при трении наводится отрицательный заряд.) Такой заряд появляется при возникновении избытка электронов там, где до этого были электрически нейтральные атомы. Электроны находятся в атомах и молекулах, и поэтому, если электроны проникли в какое-либо тело и сообщили ему отрицательный заряд, то у исходных атомов и молекул обнаруживается их недостаток. Эти атомы и молекулы становятся положительно заряженными ионами. Таким образом, в опыте Франклина при трении стеклянной палочкой о шелк электроны переходят к шелку, а в стекле образуется положительно заряженные ионы.

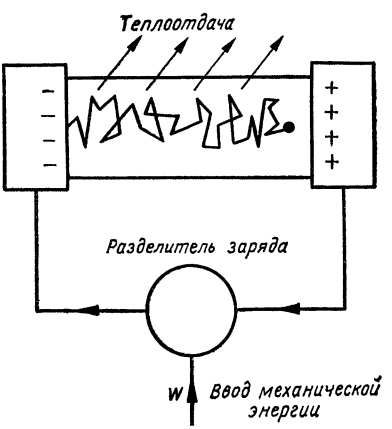
Чтобы оторвать электрон от положительного иона, необходимо совершить работу по преодолению кулоновских сил, удерживающих их вместе. Действие этих сил в какой-то степени напоминает натяжение соеди-

няющей их пружины (хотя это была бы необычная пружина, способная неограниченно растягиваться, а после натяжения расслабляться). Как мы говорили в гл. 3, работу, совершенную над системой, можно условно представить как увеличение внутренней энергии системы. Следовательно, энергия должна быть заимствована извне. Так, например, в электрической батарее энергия черпается в химическом процессе, сопровождающемся понижением энергии вещества, в результате совершается работа, необходимая для отделения большого числа электронов от атомов и молекул.

Существуют и другие способы освобождения зарядов. Некоторые из них мы подробно рассмотрим в этой главе. На рис. 54, *а* показана схема, на которой два заряженных тела разделены свободным пространством. Распределение зарядов в телах регулируется соответствующим устройством. При этом, как мы видели, необходимо затратить работу на преодоление кулоновских сил, стремящихся соединить заряды. Если электрон не связан с *катодом,* то он под действием кулоновских сил будет двигаться к *аноду.* Эти силы ускоряют его движение до тех пор, пока он не достигнет анода; при этом электрон приобретает кинетическую энергию, равную работе, затраченной на его отделение от исходного иона. При ударе об анод электрон передает эту энергию «фиксированным» ионам анода, в результате их колебания усиливаются и температура анода повышается. Таким образом, работа, затраченная на отделение заряда, обязательно приводит к повышению внутренней энергии. Несколько иное положение возникает в том случае, если анод и катод соединены электрическим проводником, как показано на рис. 54, *б.* Движение электрона к аноду здесь затрудняется фиксированными ионами проводника. Электрон следует по очень извилистому пути, испытывая частые столкновения с ионами. Вместо того чтобы свободно ускоряться, электрон движется теперь вдоль проводника со скоростью в несколько сотен метров в секунду, но скорость его поступательного движения к аноду весьма незначительна, обычно она составляет несколько сантиметров в секунду. В промежутках между столкновениями



а



б

Рис. 54. Разделение зарядов и движение электронов:
а—в вакууме; *б*—в проводнике.

кулоновские силы увеличивают составляющую скорости электрона, направленную к аноду, так что он приобретает некоторую кинетическую энергию. Однако при каждом столкновении он расходует энергии в среднем столько же, сколько приобретает между ними. Это вызывает усиление колебаний ионов проводника, и его температура повышается. Снова работа, затраченная на отделение исходного заряда, приводит к повышению внутренней энергии. Таково упрощенное объяснение *сопротивления*, возникающего в проводниках при прохождении тока. Внутреннюю энергию, приобретенную ионами проводника, называют *теплотой Джоуля.*

Во всех этих случаях мы обычно говорим о существовании *разности потенциалов* между катодом и анодом. По определению, разность потенциалов V между двумя точками равна работе, которую необходимо совершить, чтобы переместить между ними исследуемое тело с малым положительным зарядом, отнесенной к величине этого заряда. Таким образом, разность потенциалов V — это работа, приходящаяся на единицу положительного заряда. Если в наших примерах мы вместо электрона будем рассматривать положительно заряженное тело, то очевидно, что на его перемещение от катода к аноду должна быть затрачена работа. Тогда, по определению, *потенциал* анода выше потенциала катода. Поэтому анодом называют положительный электрод, то есть электрод с избыточным положительным зарядом. Но прежде чем стало известно, что реальные носители заряда имеют отрицательный знак, было принято считать, что ток проходит от положительного к отрицательному электроду, то есть в направлении, противоположном движению электрона. Даже сегодня часто удобнее пользоваться именно этим направлением, *условного тока*, а не реального тока электронов.

Простая модель поможет нам установить соотношение между разностью потенциалов, током, сопротивлением и мощностью. Если разность потенциалов на зажимах проводника равна V, то на перенос электрона с зарядом $(-e)$ от катода к аноду необходимо затратить работу $(-eV)$. Отрицательный знак означает, что в данном случае работе совершается самой

системой и не требуется поступления энергии извне. Наоборот, эта работа идет на повышение энергии, в частности энергии ионов. Если в единицу времени переносятся N электронов, то работа в единицу времени, или *мощность*, равна $-NeV$. Но $(-Ne)$ — это заряд, переносимый в единицу времени, который, по определению, и является *током* I. Поэтому мощность равна произведению $I \cdot V$. Как показывают эксперименты, для многих проводников ток I пропорционален разности потенциалов V, следовательно, $I = \text{const} \times V$. Эту константу называют проводимостью, но для нас более привычно пользоваться ее обратной величиной — *сопротивлением* R. Тогда мы получаем соотношение

$$I = \frac{V}{R}, \tag{7.1}$$

известное как *закон Ома* (1827). А уравнение для мощности принимает вид

$$P = I \cdot V = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}. \tag{7.2}$$

Теперь мы можем вернуться к более подробному рассмотрению поведения электронов в твердых телах, развивая далее нашу модель твердого тела, согласно которой ионы его решетки более или менее фиксированы по отношению друг к другу, но колеблются относительно своих средних положений.

Электроны в твердых телах

В гл. 3 мы уже отмечали противоречивость представлений об энергетических уровнях атома. Можно рассчитать величину энергетического уровня для каждого положения электрона в изолированном атоме. В ряде случаев определены энергетические уровни для комбинации из двух или трех атомов. Однако для твердого тела, состоящего из очень большого числа атомов и молекул, практически невозможно вычислить действительные значения энергетических уровней вследствие многочисленности последних. Электрон в твердом теле оказывается под влиянием всех близлежащих ядер и электронов, поэтому величина его энергетического уровня неопределенна. Некоторые из этих

уровней настолько близки друг другу, что возможно существование нескольких различных положений с практически одинаковой энергией. С учетом этого удобно рассматривать не отдельные уровни, а *энергетические зоны*, состоящие из множества уровней с близкими значениями энергий. Хотя такие зоны образованы из разрешенных уровней, однако переходы электронов, от уровня к уровню в пределах зоны подчинены законам квантовых чисел. Энергетические уровни, расположенные за пределами зоны, то есть в области неразрешенных уровней, недоступны электрону. Движение электронов в пределах зоны совершается только за счет приобретения или потерь энергии. Позже мы рассмотрим, как это происходит. В частности, электроны приобретают энергию при взаимодействии с другими электронами или ионами, совершающими колебания относительно своих положений в регулярной структуре твердого тела. Тем не менее электрон не может свободно перемещаться от уровня к уровню, так как два электрона не могут одновременно занимать один и тот же уровень. Более глубоко это положение сформулировано в так называемом *принципе Паули* (1925). Сущность этого принципа, разработанного в рамках квантовой механики, заключается в следующем: если бы два электрона находились точно в одном и том же состоянии, их нельзя было бы различить. Тогда при некоторых обстоятельствах они могли бы оказаться одной и той же частицей, имеющей двойную массу и заряд электрона, что исключается.

Исходя из представления об энергетических зонах, можно проанализировать определенные свойства веществ. Нам особенно важно уяснить, почему они обладают различной способностью проводить электричество, то есть различной подвижностью электронов. На рис. 55 схематически показаны две наивысшие энергетические зоны для трех различных твердых тел. Эти зоны называются *валентной зоной* и *зоной проводимости* в зависимости от степени заполненности электронами их энергетических уровней. Между наивысшим уровнем нижней зоны и низшим уровнем вышележащей зоны расположена так называемая *запрещенная зона*. В ней энергетические уровни отсутствуют,

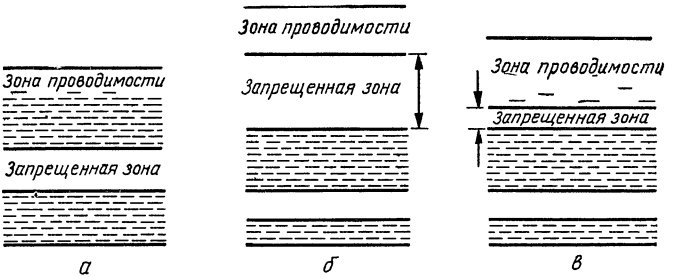


Рис. 55. Зонная структура твердых тел.

и электроны не могут иметь такой энергии, которая соответствовала бы этим уровням. Ширина запрещенной зоны для разных материалов различна.

Рис. 55, *а* соответствует таким веществам, для которых энергетические уровни одной разрешенной зоны заполнены до конца, а следующей, наиболее высокой разрешенной зоны,— только частично. Над самым высоким из заполненных энергетических уровней существует еще множество уровней, отличающихся от него по энергии лишь незначительно. В этой зоне электроны, называемые *электронами проводимости*, не связаны заданным положением и могут переходить с одного уровня на другой, поскольку это сопряжено лишь с незначительными изменениями энергии. Такие характеристики свойственны хорошему *проводнику*, подобному меди или серебру. На рис. 55, *б* представлена энергетическая диаграмма вещества, в котором электроны заполняют нижнюю (валентную) зону. Эти электроны, называемые *валентными электронами*, неподвижны на своих энергетических уровнях, поскольку отсутствуют другие более предпочтительные для них энергетические состояния в пределах зоны. Вещества с такими характеристиками считаются плохими проводниками. Увеличение подвижности электронов возможно здесь лишь в результате приобретения дополнительной энергии, которая была бы достаточна для перехода электронов через запрещенную зону в следующую, где имеется множество свободных энергетических уровней. Вероятность таких переходов зависит от ширины запрещенной зоны и возможности получения электронами соответствующей энергии.

Ранее мы видели, что одним из путей приобретения энергии является радиация. В этом случае вещество, в обычных условиях являющееся *изолятором,* благодаря облучению становится проводником. Электроны могут также получить энергию в результате электростатического взаимодействия с положительным ионом. По существу это атомы или молекулы, утратившие один или более электронов. В регулярной кристаллической решетке твердого тела ионы не абсолютно неподвижны, они колеблются относительно средних положений. При повышении температуры тела эти колебания становятся более интенсивными и энергия частично передается электронам, так что все большее их число приобретает энергию, достаточную для прохождения через запрещенную зону в зону проводимости, и вещество из изолятора становится проводником. Если ширина запрещенной зоны велика, то подобное изменение возможно только при высокой температуре. Многие вещества, которые в обычных условиях считаются изоляторами, например стекло, при достаточно высокой температуре утрачивают эти свойства.

У некоторых веществ запрещенная зона весьма узка (рис. 55, *в*), поэтому часть электронов может перейти через нее и при обычных температурах. С повышением температуры число таких электронов возрастает, следовательно, мы имеем вещество, проводимость которого при определенных обстоятельствах увеличивается с повышением температуры. Такие вещества, проводимость которых при обычных температурах низка — в тысячу, миллион раз ниже, чем у хороших проводников, — но с повышением температуры резко увеличивается, называются *собственными полупроводниками.* Их примером могут служить германий и кремний. Многие огромные достижения современной электронной техники связаны с использованием того или иного вида полупроводников.

Распределение электронов по энергиям

Электроны зоны проводимости способны свободно двигаться в твердом теле и являются носителями тока. Энергия таких электронов вследствие их

взаимодействия друг с другом и с колеблющимися ионами непрерывно меняется небольшими порциями. В результате обмена электронами между уровнями в какой-то момент наступает устойчивое распределение электронов по энергетическим уровням, соответствующее равновесному состоянию. Нам важно понять, каково распределение электронов на самых высоких энергетических уровнях. Расчет истинного распределения электронов требует сложного статистического подхода, которым мы не будем здесь пользоваться. Мы поясним, как происходит это распределение на простом примере с парой игральных костей. Очевидно, здесь возможны одиннадцать различных сочетаний от 2 до 12. Но если кости бросать много раз, некоторые сочетания наблюдаются чаще других. Пусть, например, это будет цифра 7. Ее можно получить из большего числа комбинаций, чем какое-либо другое число (цифра 7 может складываться из 1 и 6, 2 и 5, 3 и 4, 4 и 3, 5 и 2, 6 и 1, тогда как, например, цифру 3 можно получить только из сочетания 1 и 2, а также 2 и 1). Бросая кости достаточно много раз, подсчитывая количество случаев появления каждого из возможных чисел, мы в итоге получим распределение по разрешенным сочетаниям. Читатель может убедиться в том, что различные сочетания костей можно составить 36 различными способами, 6 из них дают нам цифру 7, цифру 3 можно получить лишь 2 способами. Из рис. 56 мы видим, что доля от общего числа бросков, приходящаяся на каждое из возможных сочетаний, составляет $^6/_{36}$ для 7, $^2/_{36}$ для 3 и т. д. Итак, при огромном числе бросков пар костей распределение сочетаний в какой-то момент принимает вид, показанный на рис. 56. Та же картина наблюдается и в любой другой момент, хотя сами сочетания пар костей изменяются. Подобным же образом можно представить и распределение электронов по разрешенным энергетическим уровням, хотя на него накладываются различные ограничения.

Для хороших электрических проводников энергетическое распределение получено в 1926 г. *Ферми* и *Дираком*, и поэтому оно известно как *распределение Ферми—Дирака* (рис. 57). Число отдельных энергетических уровней здесь столь велико, что заметить ступенчатый характер распределения, как в случае

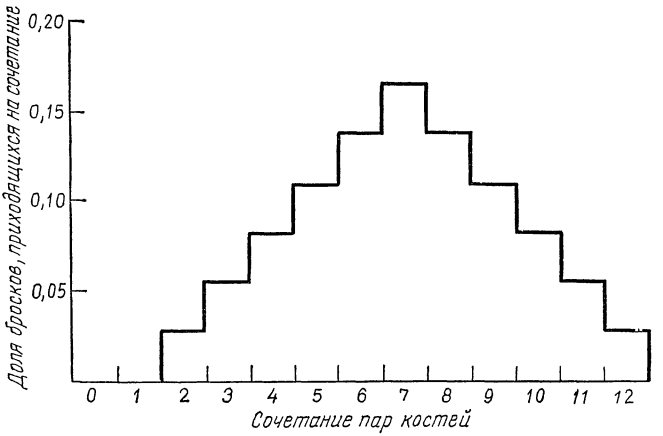


Рис. 56. Распределение сочетаний пар костей при многократном бросании.

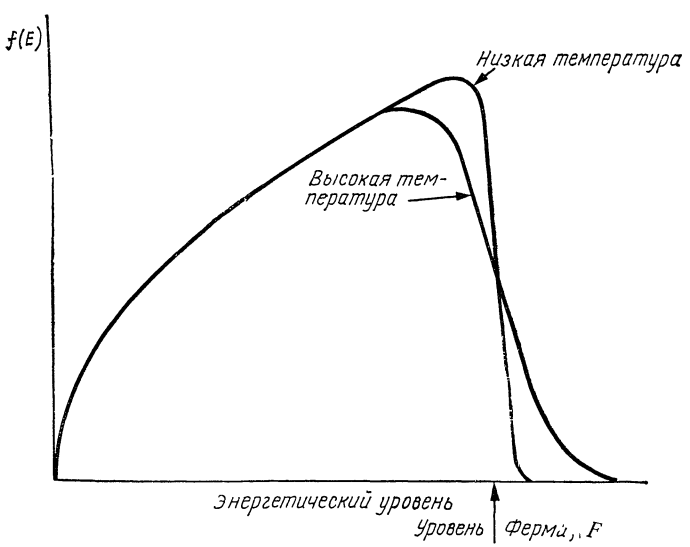


Рис. 57. Распределение Ферми — Дирака.

игральных костей, невозможно. Ступени так малы, что переходят в непрерывную кривую. На рис. 57 по вертикали отложена доля электронов, энергии которых лежат в узкой области в окрестности величины E. Приведенная кривая описывается уравнением

$$f(E) = \text{const} \cdot \frac{E^{1/2}}{1 + \exp[(E - F)/kT]}, \qquad (7.3)$$

где kT имеет тот же смысл, что и в уравнении (3.4), определяющем кинетическую энергию частицы при температуре T. Читатель, не знакомый со свойствами экспоненциальной функции, представленной в знаменателе уравнения (7.3), может понять их из графика. За исключением зоны шириной в несколько kT, лежащей вблизи значения энергии F, названной *уровнем Ферми*, распределение слабо зависит от температуры. Но вблизи F концентрация электронов резко падает с повышением температуры. Повышение температуры само по себе оказывает незначительное влияние на энергию электронов (так, для металлов при нормальной температуре kT близко к $^1/_{200}F$, а при $T = 1000$ К, $kT \approx (^1/_{70}F)$, но с ростом температуры все больше электронов имеют энергию выше уровня Ферми и меньше — энергию ниже F.

Теперь мы уже можем рассмотреть принцип действия первого устройства для преобразования теплоты в электричество. Однако прежде мы введем еще одну единицу энергии, называемую *электронвольтом* (эВ). Для характеристики энергий на атомном уровне такая единица, как джоуль, оказывается слишком большой. Например, кинетическая энергия электрона при обычной температуре составляет всего лишь около $4 \cdot 10^{-21}$ Дж. Электронвольт — значительно меньшая единица. 1 эВ равен работе, которую необходимо совершить, чтобы переместить электрон между двумя точками с разностью потенциалов 1 В (вольт). Очевидно, эта единица более подходит для нашего обсуждения. Соотношение между джоулем и электронвольтом легко получить. 1 Дж соответствует работе, выполняемой при мощности 1 Вт в течение 1 с. Мощность в 1 Вт выделяется, например, при прохождении тока в 1 А (ампер) в проводнике под действием разности потенциалов в 1 В. Току в 1 А соответствует

скорость протекания заряда 1 Кл/с, или $6{,}25 \cdot 10^{18}$ э/с. Следовательно, 1 Дж = 1 Вт·с = 1 А·В·с = $6{,}25 \cdot 10^{18}$ $\frac{э}{с}$ ·В·с = $6{,}25 \cdot 10^{18}$ эВ или 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Постоянную k мы впервые ввели при рассмотрении основ кинетической теории (см. гл. 3). Она называется, как уже говорилось, постоянной Больцмана и равна $^1/_{11600}$ эВ·К. Следовательно, kT при обычных температурах ($T = 300$ К) составляет около 0,026 эВ, а при $T = 1000$ К примерно 0,086 эВ. Для сравнения укажем, что уровни Ферми обычно лежат в диапазоне от 5 до 10 эВ.

Теперь, познакомившись с понятием электронных энергетических уровней и соответствующей единицей энергии, мы обратимся к первому типу устройств для прямого генерирования электрической энергии — термоионному генератору. Этот прибор разработан в последние десятилетия, и ему принадлежит исключительно важная роль при производстве электроэнергии в будущем. Широкому читателю он малоизвестен, поэтому мы считаем целесообразным познакомиться с ним более детально.

Термоионный генератор

Принцип действия термоионного генератора поясняет рис. 58. В основу работы генератора положен эффект, обнаруженный *Эдисоном* в 1883 г. и названный *термоионной эмиссией.* На возможность применения этого эффекта для создания термоионного генератора впервые было указано *Шлихтером* в 1915 г. При нагревании одного из электродов, который позднее стали называть *катодом,* до достаточно высокой температуры значительная часть его электронов приобретает энергию, при которой они способны покинуть его поверхность. Правда, этот процесс протекает небеспрепятственно, о чем будет сказано ниже. Если поблизости находится другой электрод — *анод*, то испущенные электроны можно направить к нему и там собрать. Это возможно лишь в том случае, если оба электрода соединить внешней цепью, поскольку в противном случае рост отрицательного заряда на аноде препятствует движению к нему эмиттируемых электронов, и при

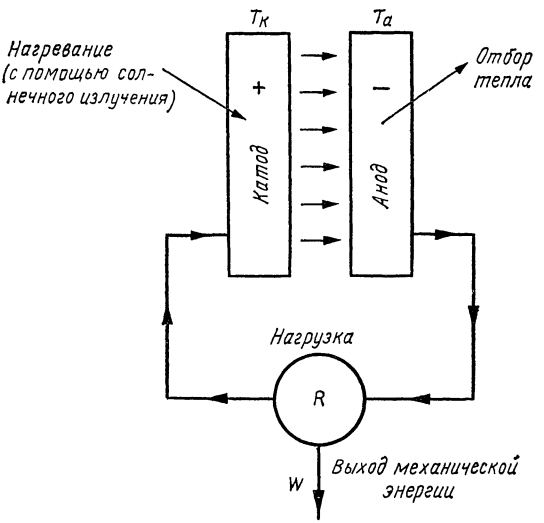


Рис. 58. Термоионный генератор.

определенных условиях они не смогут его достигнуть. Но в термоионном генераторе катод и анод соединены внешней цепью. Поэтому поток электронов, то есть электрический ток, проходит через эту цепь, совершая в ней работу. На рис. 58 внешняя нагрузка представлена сопротивлением R, но практически это может быть какое-либо устройство, например электродвигатель. Таким образом, в термоионном генераторе используется часть энергии (в интересующем нас случае это энергия солнечной радиации), израсходованной на нагревание катода, благодаря которой в нагрузке протекает ток и совершается работа.

Такое преобразование солнечной энергии в работу происходит не без потерь, и, естественно, встает вопрос о к. п. д. подобного устройства. Электроны покидают катод лишь при его нагревании, поэтому возникают потери энергии через теплоизлучение. Часть тепловой энергии попадает на анод, который при сильном разогреве также испускает электроны. Если хотя бы часть из них достигла катода, это привело бы к уменьшению тока в нагрузке. Поэтому на охлаждение анода также необходима энергия. Итак, возможности

этого способа преобразования энергии, как и других тепловых машин, также небеспредельны; ограничена, по-видимому, и величина его к. п. д. Но прежде чем перейти к определению к. п. д. такого устройства, рассмотрим процесс термоэлектронной эмиссии с нагретого твердого тела.

Термоэмиссия

Хотя число свободных электронов в проводнике велико, тем не менее, как показывает опыт, они «неохотно» покидают его поверхность. Это можно легко объяснить, если проанализировать поведение отдельного электрона в изолированном образце металла. Пока электроны остаются в твердом теле, оно электронейтрально, поскольку содержит равное число электронов и ионов. При испускании электрона в теле возникает дефицит отрицательного, или избыток положительного заряда. Этот избыточный положительный заряд не обязательно сосредоточен в какой-то определенной точке тела, но для любого данного положения электрона вне тела распределение заряда внутри тела можно считать таковым, как если бы положительный заряд был сосредоточен в некоторой особой точке. Эта *воображаемая точка* показана на рис. 59.

Притяжение электрона твердым телом определяется силой кулоновского взаимодействия между

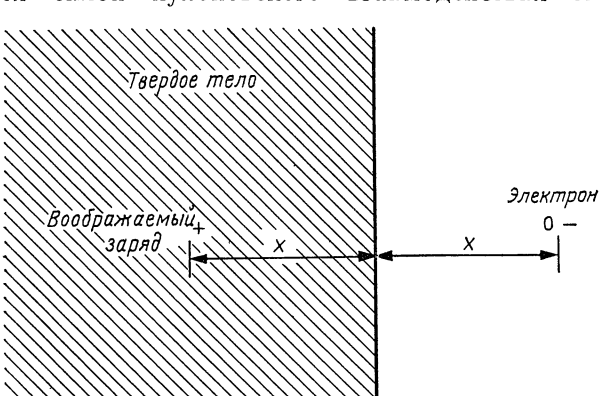


Рис. 59. К объяснению механизма электронной эмиссии.

разноименными зарядами, находящимися на расстоянии $2x$ друг от друга:

$$f = \text{const} \cdot \frac{e^2}{(2x)^2}. \qquad (7.4)$$

В этом уравнении точное значение x неизвестно, поскольку с точки зрения атомной структуры поверхность твердого тела нельзя считать гладкой (как показано на рисунке), и мы не в состоянии с уверенностью указать местоположение воображаемой точки. Однако мы можем оценить работу, которую нужно было бы совершить, чтобы переместить электрон с поверхности тела в направлении, противоположном действию этой уменьшающейся с расстоянием кулоновской силы. Работу по перемещению электрона за пределы тела называют *работой выхода* φ. Ее можно приблизительно подсчитать с помощью уравнения (7.4). Поскольку препятствующая перемещению электрона сила резко падает с увеличением расстояния, ее действие можно учесть в виде небольшой добавки к величине работы по перемещению электрона после того, как он отделен от поверхности тела более чем на несколько микрометров. Таким образом, работа выхода приблизительно равна кинетической энергии, которую должен приобрести электрон, находящийся внутри тела, чтобы покинуть последнее. Для металлов работа выхода составляет 2—5 эВ. Поскольку это значительно превышает величину kT при обычных температурах, то на основании выводов, сделанных в предыдущем разделе, мы можем заключить, что при обычных температурах электроны не в состоянии покинуть поверхность металла, что и соответствует действительности.

При повышении температуры тела электроны приобретают энергию, близкую к энергии уровня Ферми. Следовательно, величину φ можно рассматривать как дополнительную энергию, которая необходима электрону для выхода за пределы твердого тела из положения, соответствующего уровню Ферми F. Из уравнения Ферми — Дирака (7.3) для распределения электронов по энергиям видно, что число электронов с энергией, равной или превышающей $F + \varphi$, пропорционально $T^2 \exp(-\varphi/kT)$. Тогда зависимость числа

электронов, вылетающих с единицы поверхности в единицу времени, от температуры T определяется уравнением

$$j = AT^2 \exp - \frac{\varphi}{kT}, \qquad (7.5)$$

где A — постоянная. Поскольку полный поток электронов есть не что иное, как ток, то j характеризует *плотность тока*. Уравнение (7.5) известно как *уравнение Ричардсона* (первые исследования термоэмиссии Ричардсон осуществил в 1903 г.). Величина A — некоторая универсальная постоянная, приблизительно равная $1{,}2 \cdot 10^6$ А/м$^2 \cdot$ К^2. Оказывается, что процесс электронной эмиссии с поверхности твердых тел очень похож на испарение жидкости, которое мы кратко рассмотрели в гл. 5. При испарении также необходимо затратить работу на отделение молекулы от окружающих ее молекул жидкости, и доля молекул, обладающих достаточной для этого энергией, с повышением температуры резко увеличивается. Итак, эмиссионный ток, от которого зависит работа термоэмиссионного генератора, изменяется с температурой. В табл. 3 приведены значения плотности эмиссионного тока при различных температурах для типичных электродов из вольфрама с цезиевым покрытием и без него, а также из окиси серебра с цезиевым покрытием, работа выхода которых равна 2; 4,5 и 1 эВ соответственно.

Таблица 3

Плотность тока термоэмиссии (А/м^2) при различных температурах

	500 К	1000 К	1500 К	2000 К	2500 К
Вольфрам без цезиевого покрытия, W			0,1	25	$6{,}5 \cdot 10^3$
Вольфрам с цезиевым покрытием, CsW		100	$5 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^7$	
Окись серебра, Cs—Ag	25	$1 \cdot 10^7$			

Эта таблица наглядно показывает, насколько сильно эмиссия зависит от работы выхода при данной температуре и как с повышением температуры плотность термоэмиссионного тока растет (до величины

порядка 10^5 А/м^2). Однако рост температуры ограничен двумя факторами. Во-первых, при значительном увеличении плотности тока внутренние потери на сопротивление, или джоулевы потери, становятся чрезвычайно большими. Во-вторых, при слишком высокой температуре положительные ионы сами приобретают энергию, достаточную, чтобы покинуть кристаллическую решетку, и тогда возникают потери вещества в результате «испарения». Позже мы рассмотрим и другие факторы, определяющие выбор материалов электрода.

Выход и к. п. д. термоионных генераторов

Изменение потенциала в термоионном генераторе показано на рис. 60. При нагревании катода энергия электронов повышается от уровня Ферми $F_к$ до уровня, достаточного, чтобы они могли преодолеть барьер, соответствующий работе выхода катода $\varphi_к$: после этого электроны следуют к аноду. Там они соприкасаются с более холодным материалом, и их энергия падает до уровня Ферми анода $F_а$, а избыточная энергия, соответствующая работе выхода анода $\varphi_а$, рассеивается через излучение. Если $\varphi_а$ меньше $\varphi_к$, то разность энергий электронов на аноде и катоде оказывается достаточной, чтобы в нагрузке возник ток и генератор мог совершать полезную работу.

Отсюда следует, что для нормальной работы такой системы требуется малая величина $\varphi_а$, а это значит, что если температуру анода не поддерживать достаточно низкой, то он будет эмиттировать значительное количество электронов, перемещающихся в обратном

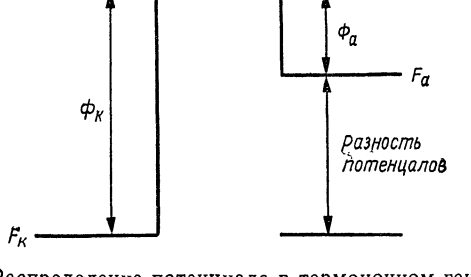


Рис. 60. Распределение потенциала в термоионном генераторе.

направлении. При низкой температуре анода анализ работы термоионного генератора упрощается, поскольку в этом случае можно пренебречь как обратной эмиссией электронов, так и теплоизлучением анода по сравнению с теплоизлучением катода. В дальнейшем будем полагать, что на аноде поддерживается сравнительно низкая температура. Очевидно, что при использовании солнечной энергии для нагревания катода до температур, при которых процесс термоэлектронной эмиссии протекает достаточно эффективно, необходимо применять концентраторы. В условиях равновесия потребляемая устройством солнечная энергия, которая оценивается величиной $\alpha_c P \times K_э$ на единицу поверхности катода, уравновешивается потерями энергии на теплоизлучение $\varepsilon\sigma T_к^4$ и электронную эмиссию с единицы поверхности. Если плотность электронного тока обозначить через $j_к$, то энергия, необходимая для вылета электронов, равна $j_к\varphi_к$. Поскольку при данной температуре, как мы видели, имеет место определенное распределение электронов по энергии, энергия многих из них превышает величину $\varphi_к$, минимально необходимую для вылета электронов с катода. Этот избыток энергии обычно учитывается в виде средней добавки $2kT_к$. Тогда баланс мощности для катода описывается уравнением

$$\alpha_c P \cdot K_э = j_к(\varphi_к + 2kT_к) + \varepsilon\sigma T_к^4. \qquad (7.6)$$

Использованный в этом уравнении эффективный коэффициент концентрации $K_э$, как и прежде, определяется с учетом разницы между всей излучающей поверхностью и поверхностью, фактически подверженной действию солнечной радиации. На практике в таком термоионном устройстве облучаемая солнечной радиацией поверхность обычно составляет около половины общей поверхности катода, что вызывает уменьшение предельного значения $K_э$ до 1000 и ниже.

Теперь, воспользовавшись соотношением (7.5), получим уравнение

$$\alpha_c P \cdot K_э = (\varphi_к + 2kT_к) AT_к^2 \exp\left(-\frac{\varphi_к}{kT_к}\right) + \varepsilon\sigma T_к^4, \quad (7.7)$$

с помощью которого находим соотношение между $\alpha_c P \times K_э$, выходной мощностью устройства на

единицу эмиттирующей поверхности и равновесной температурой катода $T_к$. Но если $K_э$ порядка 10 000, то даже при максимальной интенсивности солнечной радиации в тропиках величина $\alpha_c P \times K_э$ не превысит 1 МВт/м^2. Чтобы такая энергия рассеивалась через теплоизлучение, температура рассеивающей поверхности должна быть свыше 2000 К. Следовательно, необходимо выбирать такой материал катода, который обеспечивал бы эмиссию электронов при более низких температурах. По данным табл. 3, работа выхода катода в этом случае не должна превышать 3 эВ. Одним из наиболее распространенных типов катода является вольфрамовый катод с цезиевым покрытием, работа выхода его лишь незначительно больше работы выхода для цезия, она составляет около 2 эВ. Используя уравнение (7.7) и принимая величину эмиссионной способности при высоких температурах, равной 0,4, мы получим зависимость температуры катода от интенсивности солнечного излучения, показанную на рис 61. Как видно из графика, температура катода слабо зависит от интенсивности солнечного излучения (при увеличении интенсивности на два порядка $T_к$ возрастает в 1,5 раза).

Ток через единицу поверхности катода равен плотности тока $j_к$. Энергия, переносимая вылетающими с катода электронами, частично передается аноду и либо рассеивается через излучение, либо каким-то другим способом отводится от анода, чтобы предотвратить его разогрев. Оставшаяся энергия соответствует падению напряжения $\varphi_к - \varphi_а$ на нагрузке. Тогда выходная мощность на единицу поверхности катода, или мощность, выделяемая на нагрузке (7.2), определяется уравнением

$$P_з = j_к (\varphi_к - \varphi_а). \tag{7.8}$$

Выходную мощность на единицу поверхности коллектора мы можем получить из соотношения

$$P_2 = \frac{P_з}{K_э}. \tag{7.9}$$

Обычно в сочетании с вольфрамо-цезиевым катодом используется анод из окиси серебра с цезиевым

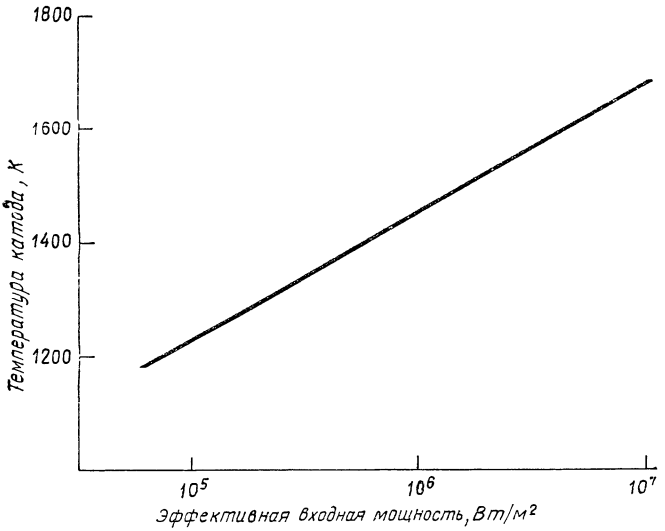


Рис. 61. Температурная характеристика катода термоионного генератора.

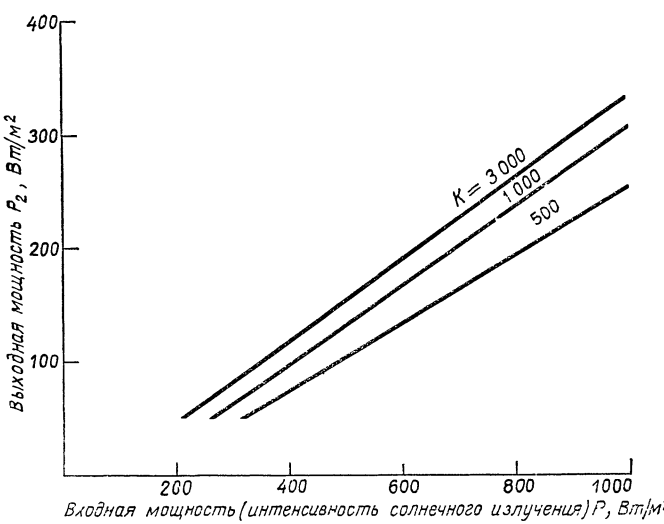


Рис. 62. Характеристика термоионного генератора с концентратором.

покрытием. При рабочей температуре работа выхода такого анода φ_a составляет около 1 эВ.

Используя равновесные температуры из рис. 61 и уравнения (7.5), (7.8), (7.9), мы можем найти соответствующие этим температурам выходные мощности P_2. На рис. 62 показано изменение выходной мощности в зависимости от интенсивности солнечной радиации для нескольких значений $K_э$. Коэффициент поглощения солнечной радиации при высоких температурах катода принимался равным 0,8.

Хотя результаты, представленные на рис. 62, получены на основании упрощенного приближенного анализа системы, тем не менее можно ожидать, что значения выходных мощностей реальных систем близки к расчетным. Однако до сих пор мы не учитывали одну трудность, с которой сталкиваются разработчики термоионных устройств. Мы имеем в виду эффект *пространственного заряда*, который проявляется в подобных устройствах при высокой плотности тока. В этом случае в пространстве между катодом и анодом находится большое число электронов, а так как они заряжены одноименно, между ними действуют кулоновские силы отталкивания. Для электронов, вылетающих с катода, эти силы создают дополнительный барьер. Для преодоления указанной трудности обычно стремятся уменьшить межэлектродное пространство, что позволяет снизить количество находящихся там электронов. Однако при этом существенно осложняется изготовление генераторов, так как для получения необходимого эффекта расстояние между электродами должно быть порядка нескольких микрометров. Другой метод заключается в том, что с целью нейтрализации заряда электронного облака в межэлектродное пространство вводят положительные ионы. Для этого межэлектродное пространство обычно заполняют парами цезия. Вблизи горячей поверхности катода атомы цезия приобретают энергию, достаточную для ионизации, в процессе которой атомы цезия теряют по одному электрону, превращаясь в положительно заряженные ионы. По сравнению с электронами эти ионы очень массивны, однако вместе с ними они тоже смещаются к аноду, но с очень малой скоростью. Цезий применяют для этой цели по-

тому, что у него энергия, необходимая для вылета электрона из атома, меньше, чем у любого другого элемента. Величину этой энергии называют *первым потенциалом ионизации*, для цезия он составляет около 3,9 эВ. Одной из причин выбора электродов с цезиевым покрытием послужила их совместимость с парами цезия в межэлектродном пространстве; при этом вольфрамо-цезиевый катод сам может служить источником ионов цезия в системе.

Термоионный генератор как источник энергии имеет существенный недостаток, сущность которого понятна из рис. 60. Разность потенциалов на внешней нагрузке, равная $\varphi_к - \varphi_а$, в нашем примере составляет 1 В. Это означает, что для получения практически целесообразных значений выходной мощности при столь низкой разности потенциалов сила тока в системе должна быть значительной. Например, для генератора с выходной мощностью 1 кВт ток нагрузки должен составлять 1000 А. Ток такой большой величины очень неудобен. В этом случае при передаче энергии на расстояние во избежание значительных джоулевых потерь необходимы очень толстые проводники. Более того, эти токи создают очень сильные магнитные поля, в результате чего в пространстве между проводниками возникают значительные напряжения. Поэтому на практике обычно соединяют последовательно несколько термоионных генераторов, что позволяет повысить выходное напряжение. Значительного повышения последнего добиваются также с помощью трансформаторов переменного тока. Благодаря этому термоионные генераторы можно использовать непосредственно для питания приборов, рассчитанных на напряжение 127 или 220 В и частоту 50 Гц.

Читатель, возможно, обратил внимание еще на одну деталь, которой мы лишь слегка коснулись в ходе нашего упрощенного анализа. Мы предполагали, что падение напряжения на нагрузке все время равно $\varphi_к - \varphi_а$. Очевидно, даже при установившемся режиме работы генератора сопротивление нагрузки не может оставаться постоянным. Падение напряжения на нагрузке определяется произведением $I \cdot R$, следовательно, с изменением тока I сопротивление нагрузки

$R = (\varphi_к - \varphi_а)/I$ также изменяется. Система, в которой сопротивление регулируется так, что падение напряжения на нагрузке поддерживается постоянным на уровне $\varphi_к - \varphi_а$, называется системой *с согласованной нагрузкой*. Ценой дальнейшего усложнения системы можно добиться того, чтобы это условие выполнялось при непрерывно меняющейся внешней нагрузке. Очевидно, самой простой нагрузкой такого типа является обычная аккумуляторная батарея, в которой даже при изменении тока разность потенциалов (определяемая химической реакцией) на зажимах почти не меняется. Стабильность работы генератора можно обеспечить также в том случае, если предотвратить температурные колебания на его входе. С этой целью в пространстве между корпусом генератора и собственно катодом помещается специальное устройство, поддерживающее температуру постоянной. В последнее время были исследованы материалы, температура плавления которых позволяет использовать их в подобных устройствах.

Не заостряя особого внимания на практических трудностях использования термоионного генератора, мы можем считать, что это устройство при всей простоте его конструкции по выходной мощности не уступает рассмотренным ранее тепловым машинам. Прежде чем перейти к анализу других систем, вырабатывающих электрическую энергию, остановимся на к. п. д. термоионного генератора.

Термоионный генератор и к. п. д. Карно

Выше отмечалось, что на термоионные генераторы, как и на другие тепловые машины, распространяются термодинамические ограничения, обусловленные тем, что часть энергии в процессе работы передается другому более холодному телу. Пока температура анода достаточно низка, чтобы пренебречь явлением вторичной эмиссии, характеристики генератора почти не зависят от температуры. Но с повышением температуры тепловую энергию анода необходимо использовать прежде чем она рассеется через теплоизлучение.

Во-первых, необходимо знать, какую максимальную температуру выдерживает анод. Это можно рассчитать на основе гипотетической модели идеального генератора. В гл. 6 мы показали, что тепловые машины не могут иметь к. п. д. выше, чем обратимая машина. Следовательно, справедливо равенство

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \tag{7.10}$$

[см. гл. 6, уравнение (6.10)]. При очень малых радиационных потерях термоионный генератор, вероятно, можно рассматривать как обратимую машину. В таком гипотетическом генераторе сообщаемая катоду энергия Q_1 должна равняться энергии, при которой электроны вылетают с катода. Наименьшее значение этой энергии, отнесенное к единице поверхности катода, равно $j_к\varphi_к$. Через Q_2 обозначим часть энергии анода, рассеиваемой в виде тепла, то есть $Q_2 = j_к \cdot \varphi_а$. Подставляя эти величины в уравнение (7.10), находим

$$j_к \cdot \frac{\varphi_к}{T_к} = j_к \cdot \frac{\varphi_а}{T_а}$$

или

$$T_а = \frac{\varphi_а}{\varphi_к} \cdot T_к. \tag{7.11}$$

$T_а$ обычно соответствует наиболее приемлемой температуре анода. Подобно к. п. д. Карно, к. п. д. обратимого генератора определяется соотношением $(T_к - T_а)/T_к$, или $(\varphi_к - \varphi_а)/\varphi_к$. В предыдущем разделе было показано, что в таком случае к. п. д. равен 50%. С помощью рис. 62 попытаемся установить, насколько к. п. д. реальных генераторов приближается к этому значению. При солнечной интенсивности 800 Вт/м^2 и $K_э = 1000$ выходная мощность составляет около 230 Вт/м^2, то есть к. п. д. $\approx 29\%$.

В нашем примере температура катода $T_к$ близка к 1500 К. Тогда в соответствии с уравнением (7.10) максимальная температура анода $T_а$ равна 750 К. Если бы рассеиваемую анодом энергию мы использовали для питания некой тепловой машины, работающей при температурах от 700 К до 300 К (температуры окружающей среды), то согласно оценкам, сделанным в предыдущей главе, количество механической энергии,

вырабатываемой такой системой, достигало бы 28% от величины тепловой энергии, выделяемой на аноде генератора. В нашем случае тепловые потери на аноде составляют 290 Вт/м², и если 28% этой мощности мы сможем использовать, то общая полезная выходная мощность системы достигнет 310 Вт/м². Следовательно, к. п. д. системы возрастает до 39%. Однако следует выяснить, окупается ли на практике значительное усложнение системы этим выигрышем в энергии.

Мы показали, что к. п. д. системы, состоящей из термоионного генератора и тепловой машины, оказывается выше, чем к. п. д. чисто механической системы. В обеих системах значения максимально возможных температур ограничиваются действием второго начала термодинамики. Поскольку отдельные части механической машины подвержены значительным напряжениям, то считается, что практически они не могут работать при температурах выше 1000 К. Однако в термоионном генераторе, где механические напряжения катода невелики, допустима значительно более высокая температура. Если в обоих случаях температуру охладителя принять равной 300 К и определить для них к. п. д. Карно, то можно видеть, что повышение температуры источника с 1000 до 1500 К позволяет увеличить предельное значение к. п. д. с 70 до 80%. Аналогичный рост к. п. д. наблюдается даже у менее совершенных реальных систем.

Теперь нам ясно, насколько существенно предельные возможности любых систем зависят от действия термодинамических ограничений, особенно в тех случаях, когда исходной является тепловая стадия. Дальнейшее исследование подобных систем может показаться читателю нецелесообразным. Однако низкий к. п. д. системы еще не ставит под сомнение ее значимость. Часто простота и малая стоимость системы заставляют отдать ей предпочтение даже при низком к. п. д. Именно по этим причинам для получения энергии на космических аппаратах и даже для производства ее в больших масштабах часто используется другое устройство, называемое *термоэлектрическим генератором*. Сразу же отметим, что к. п. д. этого генератора ниже, чем к. п. д. других рассмотренных нами

устройств, но благодаря относительной простоте конструкции он рассматривается как один из возможных преобразователей солнечной энергии.

Термоэлектричество

В 1821 г. Зеебек заметил, что если электрическую цепь составить из различных проводников и один из спаев поддерживать при более высокой температуре, чем другой, то в цепи потечет электрический ток. При разомкнутой цепи на ее концах возникает разность потенциалов V, величина которой пропорциональна разности температур:

$$V = S(T_1 - T_2), \qquad (7.12)$$

где S — *коэффициент Зеебека*. Его значение зависит от материала проводников (рис. 63, *а*). *Эффект Зеебека* обусловлен тем, что кинетическая энергия электронов на горячем конце цепи оказывается больше, нежели на холодном, поэтому процесс диффузии электронов в направлении холодного конца протекает с несколько большей скоростью, чем в противоположном. На холодном конце цепи избыток электронов накапливается до тех пор, пока под действием кулоновских сил их движение не прекратится. Такое распределение зарядов и обусловливает появление разности потенциалов на концах разомкнутой цепи.

При замыкании такой цепи электроны перемещаются вдоль обоих проводников (вследствие различной концентрации электронов в проводниках величина тока в них различна), в цепи же будет протекать некоторый суммарный ток. Если к цепи, показанной на рис. 63, *б*, мы подключим нагрузку, то получим генератор. Энергия поступает к горячему спаю и от него частично передается холодному спаю, а разница энергий соответствует полезной работе, совершаемой в нагрузке.

В 1834 г. Пельтье замегил, что если в такую цепь в качестве нагрузки подключить элемент, обеспечивающий в ней протекание тока, то энергия будет поглощаться в месте холодного спая, а выделяться на горячем спае. Это легко объясняется поведением электронов, энергия которых при повышении температуры

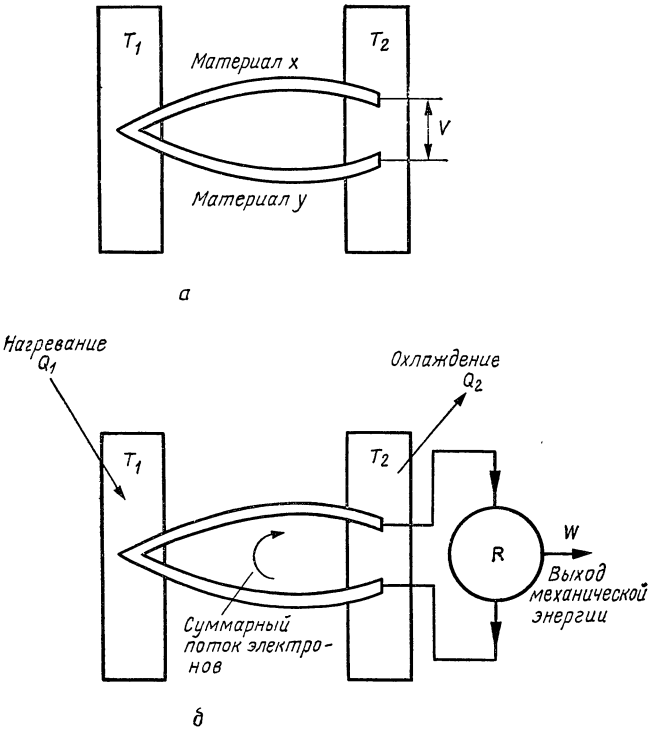


Рис. 63. Получение термоэлектричества:
а — эффект Зеебека; *б* — термоэлектрический генератор.

увеличивается, поэтому в месте горячего спая она оказывается выше. Пельтье установил, что и поглощенная, и выделенная энергия пропорциональна току, протекающему в цепи. Тогда для горячего и холодного спаев соответственно справедливы соотношения

$$Q_1 = \pi_1 \cdot I \quad \text{и} \quad Q_2 = \pi_2 \cdot I, \tag{7.13}$$

где π_1 и π_2 — *коэффициенты Пельтье*. Значения этих коэффициентов зависят от свойств металлов и температуры спая.

Изменяя направление тока, можно изменить направление потоков энергии. Эффект Пельтье наблюдается лишь в полностью обратимых системах, в

которых передача энергии подчиняется термодинамическому соотношению

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \tag{7.14}$$

соответствующему уравнению (6.10). Тогда с учетом (7.13) получаем $\pi_2/\pi_1 = T_2/T_1$, или $\pi_1/T_1 = \pi_2/T_2$, откуда вытекает, что отношение π/T представляет собой некоторую постоянную. В 1855 г. Томсон (позднее лорд Кельвин) впервые показал, что эта постоянная, зависящая от свойств материалов, тождественна коэффициенту Зеебека S. Для того чтобы устройство работало без потерь, то есть обратимо, необходимо, чтобы ток I был очень мал. В этом случае разность потенциалов на зажимах элемента (или нагрузке) приближается к значению V, определяемому из уравнения (7.12). Следовательно, мощность $I \cdot V$ равна $Q_1 — Q_2$, то есть

$$SI(T_1 - T_2) = I(\pi_1 - \pi_2).$$

С учетом равенства $\pi_1/T_1 = \pi_2/T_2$ приходим к результату, полученному Кельвином:

$$S = \frac{\pi}{T}. \tag{7.15}$$

Количественное значение S можно измерить, но мы будем пользоваться этой величиной просто как термоэлектрической характеристикой. Порядок величины S нетрудно оценить, но рассчитать ее точно весьма сложно. Для металлов S составляет около 10 мкВ/К. Именно малостью этой величины объясняется то обстоятельство, что термоэлектрическими эффектами обычно пренебрегали, пока не обнаружили, что в полупроводниках они значительны. В них электрон, чтобы попасть в зону проводимости, где он получает свободу перемещения и может выполнять функции носителя заряда, должен сначала перейти запрещенную зону. Это напоминает рассмотренный в гл. 7 процесс термоэмиссии, когда электрон становится носителем полезного заряда лишь после преодоления потенциального барьера, соответствующего работе выхода. Там же было показано, что энергия электронов, преодолевших этот барьер в результате теплового возбуждения, превышает высоту барьера в среднем на 2 kT.

Если предположить, что и в полупроводнике электроны, которые благодаря тепловому возбуждению преодолевают запрещенную зону, должны приобрести дополнительную энергию, равную $2\,kT$, тогда разность средних энергий электронов, соответствующих горячему и холодному спаям, можно оценить величиной $2k(T_1—T_2)$. Если полный ток в цепи равен I, то выделяемая при этом мощность составляет $2kI(T_1—T_2)$. Приравнивая эту мощность разности $Q_1—Q_2$, найденной с помощью уравнения (7.13), получим равенство

$$2kI(T_1 - T_2) = I(\pi_1 - \pi_2),$$

которое удовлетворяется при $\pi_1 = 2kT_1$ и $\pi_2 = 2kT_2$. Тогда из (7.15) находим, что $S = 2k \approx {}^1/_{6000}$ В/К $\approx$ ≈ 160 мкВ/К, что во много раз превышает величину S для металлов. Как показали эксперименты, для некоторых материалов S достигает 1000 мкВ/К. Однако на практике получение высоких значений коэффициента Зеебека в полупроводниковых термоэлектрических генераторах зависит от особенностей разделения заряда в местах соединения полупроводников. Однако мы отложим их рассмотрение до следующей главы. Пока же попытаемся оценить выходную мощность и к. п. д. термоэлектрических генераторов.

Термоэлектрический генератор

На рис. 64 показана типичная конструкция термоэлектрического генератора на основе проводников. Обычно проводники соединяются последовательно, так как разность потенциалов на выходе каждой пары проводников в реальных устройствах имеет величину порядка 300—400 мкВ на единицу разности температур. Поэтому при разности температур 500 К выходное напряжение на каждой паре элементов составляет не более 0,2 В.

Работу реальных устройств сопровождают определенные необратимые явления. Возможна теплопередача от источника к охладителю непосредственно через элементы генератора. Внутри элементов при протекании тока выделяется джоулево тепло. (Томсон показал также, что при наличии разности температур джоулево нагревание проводника усиливается, по-

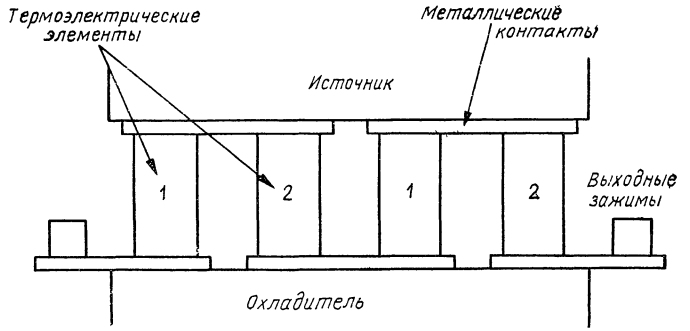


Рис. 64. Термоэлектрический генератор.

скольку электроны, двигаясь от более нагретой области к менее нагретой, имеют бо́льшую кинетическую энергию, чем передают холодному участку, поэтому часть ее они отдают ионам, колеблющимся относительно своих фиксированных положений в решетке. Однако для простоты исследования этим эффектом можно пренебречь.)

Для любой пары термоэлектрических элементов скорость теплопередачи через проводимость пропорциональна разности температур на их концах (при условии отсутствия рассеяния тепла). Тогда справедливо уравнение

$$Q_т = K(T_1 - T_2), \tag{7.16}$$

где K зависит от теплопроводности материалов, площади поверхности и длины элементов.

Джоулево тепло, выделяющееся при прохождении тока I, равно

$$Q_{дж} = I^2R, \tag{7.17}$$

где R — общее сопротивление элементов, зависящее (как и теплопроводность) от удельного сопротивления материала, размеров и формы элементов. Если опять же предположить, что тепловые потери отсутствуют, то половина энергии, преобразованной в джоулево тепло, проходит к каждому из соединений.

Уравнение баланса мощности для горячего соединения запишется в виде

$$Q_1 = ST_1I + K(T_1 - T_2) - \frac{1}{2}I^2R, \tag{7.18}$$

а для холодного соединения —

$$Q_2 = ST_2I + K(T_1 - T_2) + \frac{1}{2}I^2R. \qquad (7.19)$$

Тогда получаемая в нагрузке полезная мощность определяется из соотношения

$$P_2 = Q_1 - Q_2 = S(T_1 - T_2)I - I^2R, \qquad (7.20)$$

а к. п. д. преобразования энергии

$$\frac{P_2}{Q_1} = \frac{S(T_1 - T_2)I - I^2R}{ST_1I + K(T_1 - T_2) - \frac{1}{2}I^2R}. \qquad (7.21)$$

Итак, если считать неизменными другие величины, входящие в уравнение, значение к. п. д. определяется величиной тока. А сила тока в нашем случае зависит от сопротивления нагрузки во внешней цепи. Установлено, что при уменьшении сопротивления (от некоторого высокого значения) к. п. д. сначала возрастает, а затем падает. Величина к. п. д. максимальна при сопротивлении нагрузки

$$R_1 = R(1 + ZT_{ср})^{1/2}, \qquad (7.22)$$

где

$$Z = \frac{S^2}{KR}, \qquad (7.23)$$

а

$$T_{ср} = \frac{T_1 + T_2}{2} \qquad (7.24)$$

есть среднее значение температуры.

Если сопротивление нагрузки удовлетворяет уравнению (7.22), то максимальное значение к. п. д. определяется уравнением

$$\frac{P_2}{Q_1} = \frac{n-1}{n+r}(1 - r), \qquad (7.25)$$

где

$$n = (1 + ZT_{ср})^{1/2}, \qquad (7.26)$$

а

$$r = \frac{T_2}{T_1}. \qquad (7.27)$$

Отсюда видно, что максимальное значение к. п. д. зависит лишь от температуры соединений и величины Z. Очевидно, с увеличением Z к. п. д. повышается, но

интересно исследовать, какими факторами определяется сама величина Z.

Если обозначить через A площади поперечных сечений элементов (рис. 64), а через l — длину каждого из них, то коэффициент K равен $2\varkappa A/l$, где $\varkappa$ — *теплопроводность* материалов, которую мы будем считать одинаковой для обоих проводников пары. Аналогично (если пренебречь сопротивлением соединительных проводников) общее сопротивление равно $2\rho l/A$, где ρ — *удельное сопротивление* материала, которое также будем считать одинаковым для обоих проводников пары. Тогда величина Z определяется из уравнения

$$Z = \frac{S^2}{KR} = \frac{S^2}{4\varkappa\rho}. \qquad (7.28)$$

Итак, мы видим, что Z характеризует некоторую совокупность свойств материалов. И эту совокупность свойств, определяемых параметром Z, называют *добротностью*. Поскольку мы находим ее для пары элементов, образующих термоэлектрический преобразователь, следует напомнить, что коэффициент Зеебека S также характеризует свойства *пары*, а не каждого элемента в отдельности.

Расчет Z на основе фундаментальных принципов термодинамики не входит в нашу задачу, мы только условимся считать, что величину Z можно измерить для любой пары термоэлектрических материалов и выбрать из них такие, для которых Z максимальна. С помощью *легирования* (см. гл. 8) удается получать полупроводники, по своим термоэлектрическим свойствам значительно превосходящие металлы. Для наиболее хорошо изученных материалов значение Z при определенных температурах составляет 0,003 на 1 К, но затем уменьшается при изменении температуры в ту и другую стороны. Используя различные сочетания материалов в *каскаде*, как показано на рис. 65, можно в определенных пределах обеспечить во всем каскаде оптимальные термоэлектрические свойства. Как показано на рис. 65, между термоэлектрическими элементами размещен промежуточный электроизолятор, так что по одну сторону от него оказываются элементы, имеющие хорошие характеристики при

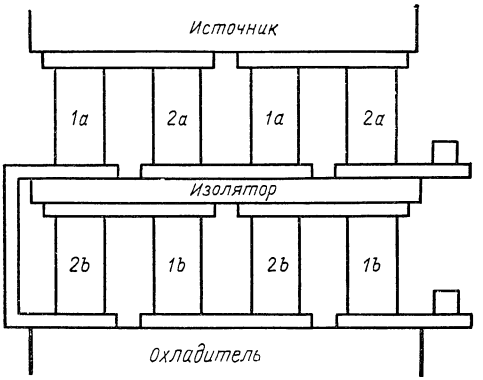


Рис. 65. Каскадное соединение термоэлектрических элементов.

более высокой температуре, а по другую — элементы, для которых благоприятной является более низкая температура. Обычно первые изготовлены из сплава германия с кремнием, а вторые — из теллурида свинца. Наличие промежуточного изолятора и особых электрических контактов позволяет в известной мере повысить качество термоэлектрического генератора, но даже в самом благоприятном случае его добротность Z не превышает 0,0005 на 1 К.

Из уравнений (7.24) и (7.26) видно, что использование в подобных системах тугоплавких материалов, имеющих такое значение Z, позволяет работать при температурах около 1000 К, тогда при температуре охладителя 300 К мы получаем n, равное 1,15. Следовательно, общий к. п. д. преобразования составляет лишь около 7%. Прежде мы видели, что эффективность собирания солнечной энергии даже при использовании высококачественных зеркал с высоким коэффициентом концентрации и температурой источника около 1000 К также ограничена. Таким образом, с помощью термоэлектрического генератора в настоящее время мы можем полезно реализовать не более 5% от падающей солнечной энергии. Тогда при интенсивности солнечной радиации 800 Вт/м² выходная мощность системы составит около 40 Вт/м², что едва ли превышает мощность на выходе системы на основе плоского коллектора и тепловой машины,

рассмотренной в гл. 6. Причину этого легко понять. Сопоставление уравнений (7.25) и (7.27) с уравнением (6.9) показывает, что величина $1 - r$ соответствует к. п. д. Карно для указанных температур. Таким образом, к. п. д. термоэлектрического генератора составляет лишь $(n-1)/(n+r)$ часть от к. п. д. Карно, и в любом случае он значительно ниже 50% (что считалось вполне приемлемым для тепловой машины).

Несмотря на то что к. п. д. современных термоэлектрических генераторов очень мал, интерес к ним продолжает расти. Если учесть, что еще несколько десятилетий назад к. п. д. термоэлектрических генераторов был в 10 раз ниже достигнутого в настоящее время, а поиск новых более совершенных материалов продолжается, то можно надеяться на дальнейшее усовершенствование этого типа генераторов. Например, уравнения (7.24), (7.25) и (7.26) показывают, что если удастся достигнуть величины добротности 0,005 на 1 К в диапазоне температур от 300 до 1000 К, то к. п. д. генератора увеличится с 7 до 31%.

Следует заметить, что температурные изменения добротности могут благоприятно отразиться и на эффективности системы, состоящей из плоского коллектора и термоэлектрического генератора (рис. 66). Максимальная температура в данном случае значительно ниже, но для достаточно узкого интервала температур можно подобрать такую пару термоэлектрических материалов, которые обеспечат сравнительно высокую добротность. При температуре $T_1 \approx 400$ К $Z = 0{,}002$ на 1 К получаем $n = 1{,}27$, и соответственно суммарный к. п. д. составляет около 3,5%. Если учесть, что получение такой рабочей температуры не связано с применением сложных концентраторов, снабженных устройством, следящим за движением солнца, то система подобной конструкции оказывается вполне приемлемой. Относительно низкая величина к. п. д. системы фактически обусловлена входящим в ее состав генератором. В гл. 5 мы видели, что при отборе энергии к. п. д. плоского коллектора падает. Систему на основе плоского коллектора и термоэлектрического генератора можно сравнительно легко построить по аналогии с рассмотренной в гл. 6 системой коллек-

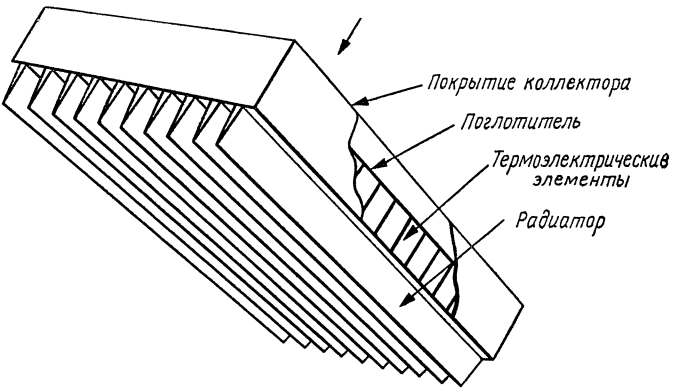


Рис. 66. Термоэлектрический генератор с плоским коллектором.

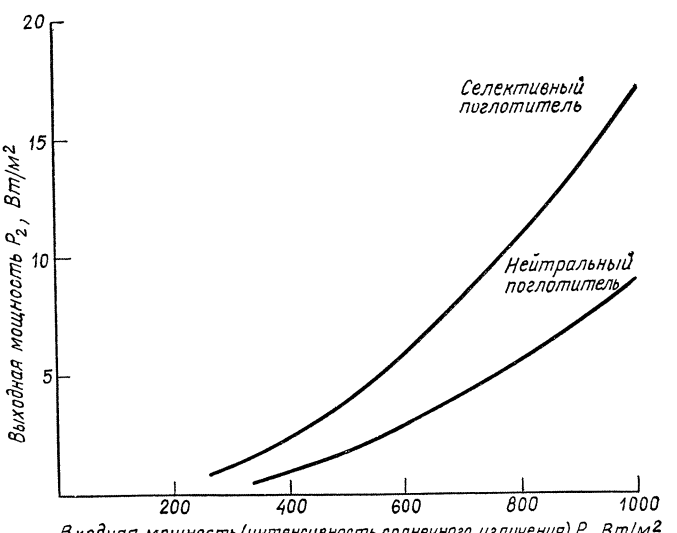


Рис. 67. Характеристика системы термоэлектрический генератор — плоский коллектор.

тор — тепловая машина. При $Z = 0{,}002$ на 1 К и максимальном к. п. д. выходная мощность системы зависит от интенсивности солнечной энергии, как показано на рис. 67. В этом случае при потоке солнечной радиации 800 Вт/м² выходная мощность с поверхности коллектора с использованием нейтрального поглотителя составляет около 6 Вт/м². Следовательно, суммарный к. п. д. равен 0,75%. (Такое устройство с использованием термоэлектрических элементов из сплава висмут — сурьма и сурьмянистого цинка было построено еще в 1954 г. доктором Телкес, на работы которой мы ссылались в гл. 5; его к. п. д. составлял 0,6%.) Использование селективного поглотителя при тех же условиях работы позволяет повысить к. п. д. до 1,4%.

Из всего сказанного в настоящей и предыдущей главах видно, что эффективность систем, в которых солнечная энергия используется для нагревания соответствующих устройств, принципиально ограничена, в результате чего полезно реализуется лишь незначительная доля падающей солнечной энергии. Даже по самым оптимистическим прогнозам к. п. д. подобных устройств не превысит 40%.

Таким образом, мы подошли к такому положению, когда дальнейшее исследование устройств для преобразования энергии, в которых исходная стадия является тепловой, кажется бесполезным. В одном из таких устройств, которому отводится важное место при решении вопросов крупномасштабного получения энергии, использован *магнитогидродинамический эффект*, или МГД-эффект. В следующих двух главах мы обратимся к другим методам получения энергии. Их существенное отличие заключается в том, что они позволят использовать энергию солнечной радиации без сколько-нибудь заметного повышения температуры элементов систем, то есть тепловая стадия в процессе преобразования энергии исключается.

8. Фотоэлектричество

Через изобретение — к открытию.
Фрэнсис Бэкон (1561—1626)

В гл. 7 мы уже встречались с одним из таких явлений, объяснить которые удается лишь в рамках квантовой теории. Речь идет о *фотоэлектрическом эффекте*. Его математическое описание было сделано *Эйнштейном* в 1905 г. В 1887 г. *Герц* впервые сообщил о взаимодействии фотона света с электроном металла, в результате которого электрон приобретает энергию, достаточную, чтобы покинуть пределы металла. При значительном количестве таких электронов их можно собрать на другой металлической поверхности и через внешнюю цепь вернуть к исходной поверхности, подобно тому как это происходит в термоионном генераторе. В таком случае отпадает необходимость в тепловой стадии преобразования энергии, поскольку энергия сообщается непосредственно электрону, и следовательно, подобная система должна иметь более высокий к. п. д.

В настоящей главе мы сначала исследуем работу *фотоэмиссионного генератора*, а затем рассмотрим важный с практической точки зрения метод генерирования фотоэлектричества с помощью *полупроводникового диода*. Мы увидим, как благодаря последним достижениям науки наконец-то удалось осуществить давнюю мечту — избежать определенных термодинамических ограничений, обусловленных наличием тепловой стадии в процессе преобразования энергии.

Фотоэмиссионный генератор

На рис. 68 схематически показан гипотетический фотоэмиссионный генератор. Фотоны света попадают на его катод, проходя через проволочную сетку, выпол-

няющую функции анода. Чтобы предотвратить влияние пространственного заряда, электроды в генераторе располагаются очень близко друг к другу.

При попадании фотона на катод его энергия поглощается электроном, который вследствие этого переходит на более высокий энергетический уровень. Если же энергия электрона превысит работу выхода катода, то электрон покидает его поверхность. Однако подобное действие оказывают не все фотоны, поскольку их энергия различна. Энергия фотона связана с частотой соотношением (см. гл. 4)

$$E = h\nu = \frac{h\upsilon}{\lambda}. \qquad (8.1)$$

Учитывая, что длины волн солнечного излучения лежат в области около 1 мкм, мы можем записать это соотношение в более простом виде:

$$E = \frac{1{,}24}{\lambda}, \qquad (8.2)$$

где энергия измеряется в эВ, а длина волны в мкм. Вызвать эмиссию электрона могут только фотоны с

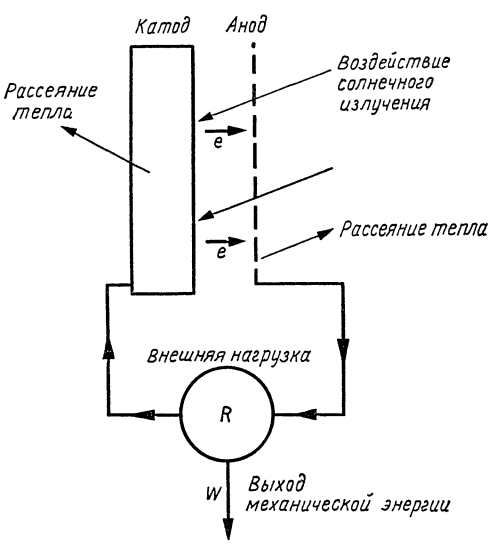


Рис. 68. Фотоэмиссионный генератор.

энергией, превышающей работу выхода катода. При $\varphi_к = 2$ эВ электронная эмиссия с катода возможна при длине волны света меньше 0,62 мкм. Обычно в спектре солнечного излучения у поверхности земли на долю этих длин волн приходится лишь около 30% от общей радиации. Таким образом, если бы работа выхода катода фотоэмиссионного устройства составляла 2 эВ, его к. п. д. не превышал бы 30%. Но как и в термоионном генераторе, по достижении анода вследствие передачи энергии колеблющимся ионам анода, а также излучения, энергия электронов уменьшается на величину $\varphi_к - \varphi_а$. Тогда к. п. д., равный 30%, соответствует лишь максимальной величине отношения $(\varphi_к - \varphi_а)/\varphi_к$. При $\varphi_а = 1$ эВ наибольшее значение к. п. д. падает до 15%.

Применяя электроды из других материалов с меньшей работой выхода, мы можем несколько повысить к. п. д., однако при этом сохраняется одно принципиально важное ограничение. Рассматривая принцип действия термоионного генератора, мы отмечали, что электронная эмиссия с катода становится значительной, когда при повышении его температуры энергия электронов превышает уровень Ферми на величину $\varphi_к$. В фотоэмиссионном генераторе необходимую энергию приобретают лишь те электроны, на которые непосредственно воздействует радиация; энергия же остальных электронов, а также ионов кристаллической решетки остается на уровне, определяемом температурой катода. Даже возбужденный электрон вскоре теряет свою энергию в процессе взаимодействия с соседними электронами, обладающими меньшей энергией. Поэтому лишь небольшая часть электронов, возбужденных вблизи поверхности катода или рассеянных в наружном направлении, может вырваться с его поверхности. В результате к. п. д. подобных устройств составляет даже не 15%, а всего лишь 0,15%! Поэтому катод следует нагревать с помощью концентратора. Таким образом мы вновь возвращаемся к термоионному генератору.

Столь низкий к. п. д. фотоэмиссионных генераторов является причиной того, что при исследовании вопросов получения энергии им отводится незначительная роль, хотя, возможно, используя какие-то оригиналь-

ные конструкции катодов с тонкими пленками, их к. п. д. можно значительно повысить. Однако все эти возможности остались неисследованными в связи с появлением фотоэлектрических генераторов.

Фотоэлектрический генератор

В гл. 5 (см. рис. 55) мы познакомились со структурой электронных энергетических зон для различных материалов. Как мы уже знаем, чтобы в материале возник ток, электроны должны получить некоторую дополнительную энергию, благодаря чему они занимают новые разрешенные уровни в энергетических зонах. Электроны с энергиями, соответствующими заполненной, или валентной зоне, не могут перемещаться, если им не сообщить энергию, достаточную для перехода через запрещенную зону в зону проводимости. Для преодоления запрещенной зоны электроны в таких естественных полупроводниках, как германий или кремний, должны получить энергию порядка 1 эВ. Но именно такой энергией обладают фотоны света. Принцип действия полупроводникового фотоэлектрического генератора заключается в следующем: при поглощении фотонов солнечной радиации электроны приобретают дополнительную энергию и перемещаются в зону проводимости. Энергия каждого электрона возрастает на величину, соответствующую ширине запрещенной зоны. Обычно электрон остается в этом состоянии в течении очень короткого времени. Затем он рекомбинирует с ионом, а высвобождающаяся при этом энергия идет на усиление колебаний решетки или же переизлучается. Как мы знаем, усиление колебаний ионов в кристаллической решетке твердого тела приводит к повышению его температуры. Именно этого следует избегать. В фотоэлектрическом генераторе возбужденные светом электроны проходят через полупроводниковый материал и успевают отдать избыток энергии полезной нагрузке, прежде чем израсходуют его на другие взаимодействия. Пытаясь избежать стадии превращения солнечной энергии в тепловую, мы надеемся освободиться от определенных термодинамических ограничений, но, к сожалению, *природа* воздвигает перед нами новые препятствия.

Уравнение (8.2) показывает, как изменяется (уменьшается) энергия фотонов солнечной радиации с увеличением их длины волны. Очевидно, существует такая длина волны, когда энергия фотонов оказывается недостаточной, чтобы возбужденные ими электроны могли перескочить через запрещенную зону. Например, ширина запрещенной зоны для кремния при обычных температурах составляет около 1,1 эВ, что соответствует энергии фотона с длиной волны около 1,1 мкм. Около 20% солнечной радиации у поверхности земли на уровне моря приходится на более длинные волны, таким образом они выпадают из сферы действия устройств на основе кремния. К сожалению, и более коротковолновую радиацию также нельзя использовать полностью. Поскольку электроны перемещаются только на разрешенные уровни, то возбужденное состояние долго сохраняют лишь те электроны, энергия которых близка к ширине запрещенной зоны. При облучении материала более энергичными фотонами избыток энергии электронов быстро расходуется на усиление колебаний решетки вещества, то есть на повышение его внутренней энергии. Таким образом, при облучении кремния фотонами с длиной волны 0,6 мкм (соответственно с энергией около 2,0 эВ) электрон может «принять» лишь 1,1 эВ, остаток же энергии бесполезно тратится на повышение температуры материала.

Теперь ориентировочно оценим максимальную эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью идеального фотоэлектрического генератора. Эта эффективность частично зависит от распределения энергии в спектре солнечной радиации, которое, как показано в гл. 2 (см. рис. 12), изменяется в зависимости от метеорологических условий и широты местности. Для примера в табл. 4 приведены данные, полученные для безоблачных условий в тропиках.

Приведенные в третьей колонке значения получены как отношение средней длины волны интервала к граничной длине волны, соответствующей ширине запрещенной зоны. Из уравнения (8.2) видно, что если энергия фотона с длиной волны λ равна $1{,}24/\lambda$, а энергию, точно соответствующую ширине запрещенной зоны,

Таблица 4

Максимальная эффективность преобразования солнечной энергии в кремнии (граничная длина волны равна 1,1 мкм)

Интервал длин волн, мкм	Доля солнечной энергии, приходящаяся на интервал, %	Доля использованной энергии в интервале	Доля использованной энергии от общего количества солнечной энергии, %
Менее 0,3	0	—	—
0,3—0,5	17	0,36	6
0,5—0,7	28	0,55	15
0,7—0,9	20	0,73	15
0,9—1,1	13	0,91	12
Более 1,1	22	0	0
Всего	100		48

имеют фотоны с длиной волны $\lambda_з$, то долю полезной энергии при облучении фотонами с длиной волны λ можно определить отношением $\lambda/\lambda_з$. Фотоны с длинами волн, превышающими *граничную длину волны*, вообще не возбуждают электроны.

Подобные расчеты, проведенные для различных граничных длин волн, показывают, что кремний ($\lambda_з = 1{,}1$ мкм) является, по-видимому, самым лучшим материалом для фотоэлектрических генераторов, хотя его максимальный к. п. д. для некоторого интервала длин волн вблизи $\lambda_з$ достигает всего лишь 45%. Следовательно, к. п. д. подобных фотоэлектрических устройств не превышает 45%. К сожалению, в реальных устройствах к. п. д. оказывается еще меньше. Чтобы объяснить это, нам следует более подробно рассмотреть процесс получения энергии от электронов, возбуждаемых солнечной радиацией.

Примесные полупроводники

Отделение возбужденного электрона от иона обычно проходит легче в *легированном* полупроводнике. Под легированием понимают введение в структуру решетки природного полупроводника примесных атомов различных элементов, содержащих по сравнению

с атомами основного материала большее или меньшее количество валентных электронов. Примесные атомы вводятся в объем полупроводника, например, путем диффузии, которая возникает при контакте соответствующих материалов в условиях повышенной температуры. Поясним это на конкретном примере.

На самой удаленной от ядра орбите полупроводникового кремния содержится четыре валентных электрона. В кристалле эти электроны соединены с электронами четырех соседних атомов так называемой *ковалентной связью.* В такой связи участвуют по одному из валентых электронов пары смежных атомов. В результате кристаллическая решетка имеет специфическую форму (ее можно наблюдать по очертаниям большого кристалла). Мы не можем дать ее точное пространственное изображение и проследить все связи электронов, однако схематически ее можно представить, как показано на рис. 69.

Итак, в кристалл кремния без существенного искажения его решетки можно ввести небольшое количе-

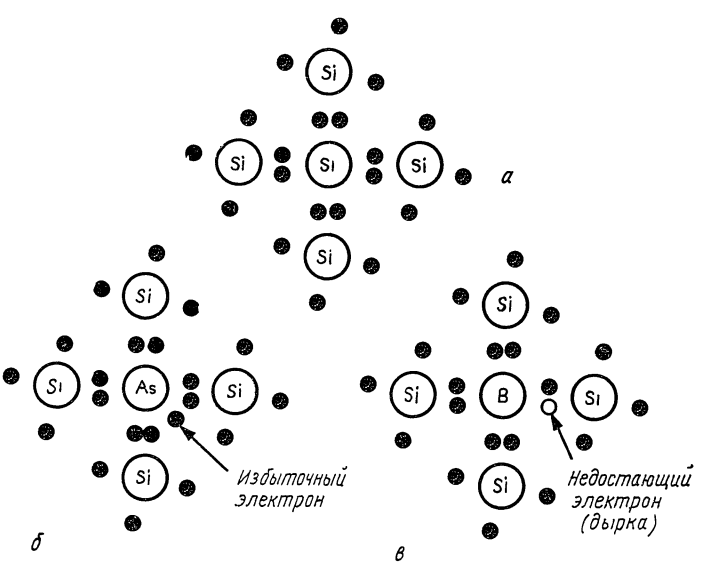


Рис. 69. Электронная структура легированного кремния:
а — чистый кремний; *б* — кремний, легированный мышьяком (полупроводник *n*-типа); *в* — кремний, легированный бором (полупроводник *p*-типа).

ство примесных элементов, атомы которых имеют по 3—5 валентных электронов. При незначительных различиях в размерах атомов допустимая концентрация примесей может достигать одной миллионной доли от общего объема основного кристалла. Если примесным элементом является мышьяк, то его атомы в кристаллической решетке занимают те же положения, что и атомы кремния, но они имеют по одному лишнему электрону. Этому электрону не нужна валентная связь. Его можно рассматривать как свободный носитель отрицательного заряда. Кристалл в целом остается электрически нейтральным, поскольку отрицательный заряд каждого свободного электрона уравновешивается соответствующим положительным зарядом ядра примесного атома, положение которого в решетке определяется его связями. Легированный таким образом материал называется *полупроводником n-типа*; это означает, что его свободные носители заряда имеют отрицательный (negative) знак.

Если вместо мышьяка в качестве примесных элементов использовать бор или алюминий, то их атомы, имеющие только три валентных электрона, также вписываются в кристаллическую решетку кремния. Однако теперь число электронов оказывается недостаточным для образования прежних связей. Место, которое за отсутствием электрона остается вакантным, называется *дыркой*. В дальнейшем электрон, появившийся вблизи дырки, может заполнить недостающую связь. При этом энергия электрона не изменяется. Перемещаясь, электрон нарушает ближайшую связь, оставляя там дырку. Такой процесс сводится к обмену положениями между электроном и дыркой. В обычном состоянии валентные зоны такого кристалла заполнены электронами, но наблюдаем мы лишь дырки. Когда электрон стремится занять место дырки, создается впечатление, что дырка перемещается в противоположном направлении, поэтому для такого вещества в целом характерно свободное перемещение дырок. Электрон, занимающий место дырки, делает это лишь однократно и затем фиксируется там, тогда как дырка перемещается непрерывно, занимая последовательно освобождаемые электронами места. По отношению к остальной части кристалла дырка

соответствует недостающему в данном месте отрицательно заряженному электрону и ведет себя подобно *носителю положительного заряда.* Так и условились считать дырки носителями положительного заряда, а легированный таким образом материал — *полупроводником р-типа* (positive). Как и прежде, кристалл в целом остается электрически нейтральным, поскольку ядра примесных атомов, занявших положения основных атомов кристалла, несут меньший положительный заряд, дефицит которого восполняется свободными дырками.

Хотя доля примесных атомов в легированных полупроводниках очень мала, но число создаваемых ими свободных носителей заряда в условиях обычных температур оказывается значительно больше, чем при облучении кристалла светом или при его нагревании. Поэтому носители заряда, обусловленные легирующими примесями, называют *основными носителями* в отличие от *неосновных носителей*, появляющихся при воздействии радиации или повышении температуры.

Итак, легированные полупроводники *n*-типа имеют фиксированные положительные и свободные отрицательные заряды, а *р*-типа, наоборот, имеют фиксированные отрицательные и свободные положительные заряды. В то же время в полупроводниках обоих типов могут присутствовать неосновные носители, возникшие в результате радиационного или теплового воздействия. До сих пор к категории носителей мы относили только электроны. Если электрон получает энергию, достаточную, чтобы перескочить запрещенную зону и покинуть пределы атома, то в результате на его месте возникает дырка. Таким образом, в этом случае и электрон, и дырка могут свободно перемещаться.

Прежде чем рассматривать вопрос об использовании этих свойств полупроводников в преобразователях энергии, необходимо исследовать влияние легирования на положение уровня Ферми. Этот уровень (см. рис. 57) соответствует такому значению энергии, при котором с повышением температуры увеличение числа электронов, имеющих энергию выше уровня Ферми, равно уменьшению числа электронов, энергия которых ниже этого уровня. Итак, в собственном (нелегированном) полупроводнике при низких температурах все

электроны находятся в валентной зоне, заполняя ее энергетические уровни. С повышением температуры некоторое количество электронов переходит через запрещенную зону и попадает в зону проводимости, а в валентной зоне при этом образуется соответствующее количество дырок. Отсюда следует, что уровень Ферми в таком материале находится в центре запрещенной зоны (рис. 70, *а*). При легировании такого материала с образованием кристалла *n*-типа энергия возникающих свободных электронов должна быть близка к энергии электронов в зоне проводимости. В таком кристалле уровень Ферми (рис. 70, *б*) смещается к нижней границе зоны проводимости. Аналогично этому легирование полупроводника с образованием кристалла *p*-типа вызывает смещение уровня Ферми к верхней границе валентной зоны (рис. 70, *в*). Эти диаграммы, наглядно иллюстрируя расположение электронных энергетических уровней в полупроводниках,

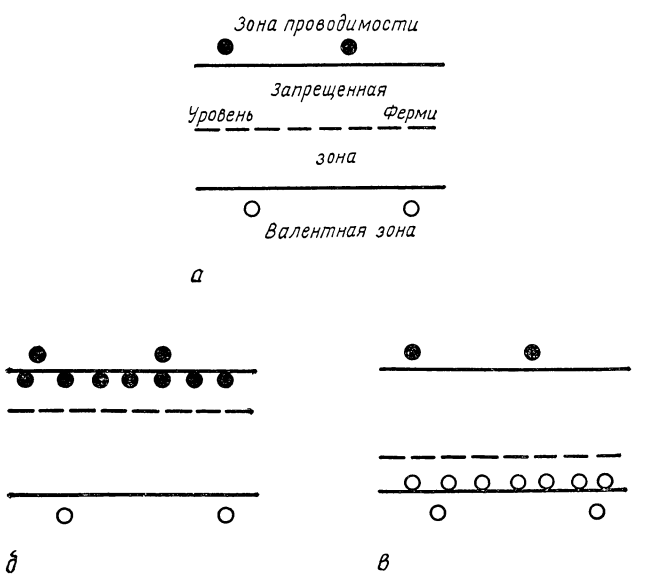


Рис. 70. Энергетические уровни в полупроводниках:
а—нелегированный полупроводник (только собственные неосновные носители); *б*—кристалл *n*-типа (неосновные носители и свободные электроны); *в*—кристалл *p*-типа (неосновные носители и свободные дырки).

помогают также понять роль дырок; они показывают распределение и возможности перемещения обоих типов зарядов, что поможет нам лучше разобраться в их поведении при рассмотрении более сложных ситуаций.

Электронно-дырочный переход

Если кристаллы *n*- и *p*-типов приведены в контакт, как показано на рис. 71, то их основные носители (свободные электроны — в первом и свободные дырки — во втором) проникают в материал с противоположным типом основных носителей. При этом они могут нейтрализовать друг друга и, следовательно, попарно исчезать. В результате в приконтактной области (вблизи перехода) образуется зона, в которой остаются только фиксированные либо положительные, либо отрицательные заряды. Это так называемый *обедненный слой*, в котором вместо прежнего распределения зарядов, соответствующего электронейтральному состоянию каждого из кристаллов, теперь наблюдается избыток положительного заряда в материале *n*-типа и отрицательного заряда — в материале *p-типа*. Такое распределение заряда (рис. 71) в обедненном слое (в отсутствие других воздействий) препятствует дальнейшему прохождению основных носителей заряда из одного кристалла в другой. Для неосновных же носителей прохождение через место соединения облегчается, поскольку ему способствует разность потенциалов, возникающая при новом распределении заряда. Поэтому в результате тепловых флуктуаций неосновные носители приобретают достаточную энергию, чтобы перейти из кристалла в кристалл (электроны из кристалла *p*-типа в кристалл *n*-типа, а дырки — наоборот). Таким образом, возникает движение зарядов через переход в двух направлениях. Представим себе, что установилось некое равновесие, при котором в каждом из направлений проходит одинаковое число неосновных носителей заряда (основные носители в этом потоке зарядов составляют лишь небольшую часть). В этом случае ток через переход практически отсутствует, так как результирующий поток электронов через него равен 0. Это означает, что

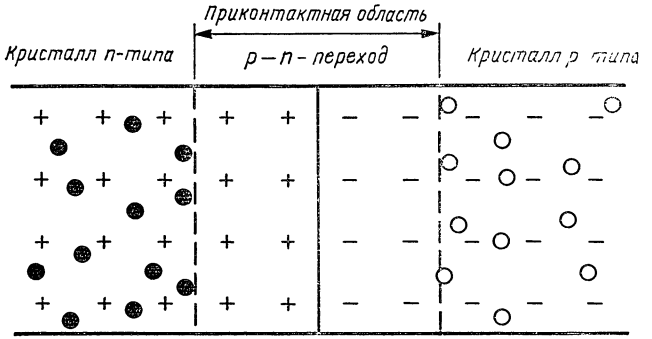


Рис. 71. Основные носители в области p — n-перехода. Знаками (+) и (−) изображены фиксированные заряды.

при установлении равновесия между кристаллами уровни Ферми по обе стороны от перехода имеют одну и ту же величину. Тогда соответствующие энергетические зоны в кристаллах и в области перехода располагаются так, как показано на рис. 72. Из этого рисунка видно, что изменение потенциала вдоль границы энергетической зоны при переходе от кристалла к кристаллу равно E_0. Величина E_0 представляет собой также разность расстояний от уровня Ферми до границы соответствующей энергетической зоны в кристаллах. Очевидно, E_0 в этом случае меньше ширины запрещенной зоны $E_з$.

Теперь мы имеем некоторое представление о приборе, который называется электронно-дырочным (n — p-) *переходом*, или *плоскостным диодом*. Особого внимания заслуживает свойство этого диода пропускать электроны со стороны p-кристалла (а дырки со стороны n-кристалла) и препятствовать прохождению этих носителей в противоположном направлении. Если такой переход подвергнуть воздействию радиации, то там образуются пары электрон — дырка. В этом случае действие перехода будет направлено на то, чтобы разделить пары носителей, что как раз и нужно для работы преобразователя энергии. Тогда нам необходимо сделать так, чтобы электроны отводились из n-области во внешнюю цепь и через нее возвращались в p-область диода, где они могут встре-

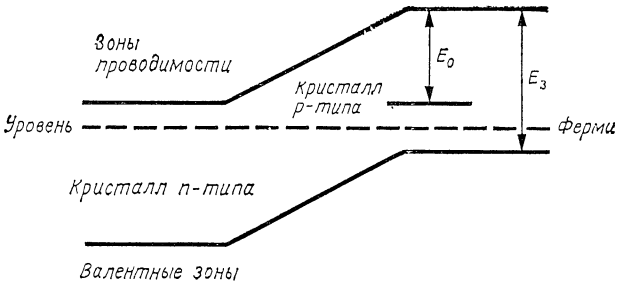


Рис. 72. Энергетические уровни в области $p-n$-перехода в отсутствие внешней нагрузки и освещения.

титься и рекомбинировать с дырками, движущимися в противоположном направлении. (Речь идет о движении дырок только в пределах полупроводника, но ни в коем случае не во внешней цепи.)

Ток во внешней цепи определяется разностью потенциалов, которая зависит от распределения энергетических уровней в области перехода. Об этом мы и поговорим в следующем разделе.

Выходная мощность и к. п. д. фотоэлектрических генераторов

При наличии внешней цепи последняя соединяется с полупроводниками в точках, называемых *контактами.* Обычно внешняя цепь образована металлическими проводниками, и в месте контактов металл — полупроводник вследствие диффузии электронов образуются новые обедненные слои (только в полупроводниках), подобные тем, которые возникают в $p-n$-переходах. Такие «полупереходы» препятствуют возникновению при равновесии в местах контактов разности потенциалов, о которой говорилось выше. (Фактически для любой внешней цепи ориентировочно можно считать, что изменения потенциала на каждом из таких зажимов вдвое меньше по сравнению с его изменениями на стыке двух полупроводников.) Если бы это условие не выполнялось, то при подключении внешней цепи под воздействием света, падающего на генератор, равновесие зарядов должно было бы нару-

шиться. Мы видели, что при переходе электронов в кристалл n-типа, а дырок в кристалл p-типа первый как бы заряжается относительно второго. В результате возникает новое состояние равновесия, которому соответствует иное распределение потенциала, сопровождаемое появлением разности потенциалов на контактах, называемой *напряжением разомкнутой цепи*. При слабом освещении оно мало, поскольку количество образующихся пар электрон — дырка значительно меньше количества основных носителей в легированном полупроводнике. Однако с повышением интенсивности освещения напряжение V_0 разомкнутой цепи возрастает до тех пор, пока оно не достигнет величины E_0, когда преобладание этих новых носителей приведет к исчезновению скачка потенциала в области перехода.

Другим (предельным) режимом работы генератора является режим *короткого замыкания*. Если свободные концы кристаллов соединены проводом, сопротивлением которого можно пренебречь, то уровень Ферми должен быть одинаков в обоих кристаллах. В этом случае пары электрона — дырка, возникающие при световом воздействии, должны интенсивно разделяться в области перехода, поскольку этому способствует разность потенциалов, существующая на переходе. Ток короткого замыкания $I_{кз}$ прямо пропорционален интенсивности падающей на полупроводники радиации. Но поскольку сопротивление внешней цепи близко к 0, то работы в ней не совершается.

Очевидно, с практической точки зрения представляет интерес некоторое промежуточное положение, когда во внешнюю цепь включена нагрузка, падение напряжения на которой не равно 0 (в отличие от режима короткого замыкания) и через которую проходит ток (в отличие от режима холостого хода). Разность потенциалов V, обеспечивающая прохождение тока в нагрузке, определяется разностью уровней Ферми в контактирующих кристаллах. Положения этих уровней и границ энергетических зон схематически показаны на рис. 73. В этом случае скачок потенциала на $p-n$-переходе, равный $E_0 - V$, меньше, чем в режиме короткого замыкания E_0. Следовательно, разделение пар электрон — дырка, генерируемых при освещении

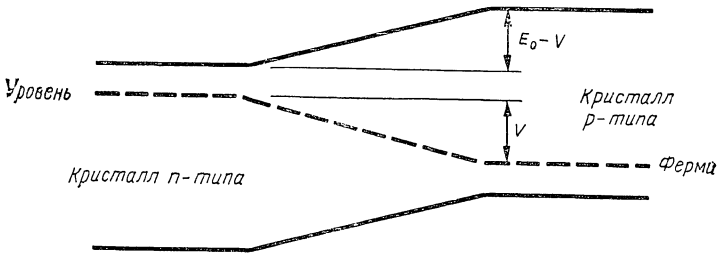


Рис. 73 Энергетические уровни освещенного $p-n$-перехода при наличии внешней нагрузки.

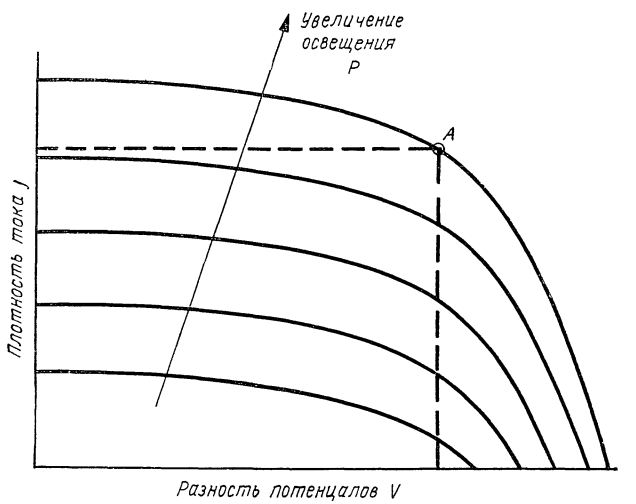


Рис. 74. Характеристики фотоэлектрического генератора.

$p-n$-перехода, происходит менее интенсивно, чем в режиме короткого замыкания. Тогда при одной и той же интенсивности радиации P с повышением напряжения V плотность тока j падает. Это обусловлено тем, что если первоначально достаточно большой скачок потенциала препятствовал перемещению части носителей, то при повышении V и, следовательно, уменьшении потенциального барьера они получают возможность «перескакивать» его. Типичные характеристики фотоэлектрического генератора, определяющие соотношения между P, j и V, приведены на

рис. 74. Такие кривые можно получить и расчетным путем на основании анализа сложного поведения освещаемого p—n-перехода. Однако это не входит в задачу книги, а для ориентировочной оценки реального к. п. д. фотоэлектрического генератора вполне достаточно проведенного нами рассмотрения основных особенностей его работы.

С помощью рис. 74 мы можем найти соотношение между током и падением напряжения на нагрузке. Однако нас интересует произведение этих величин $j \cdot V$, поскольку оно характеризует получаемую в нагрузке мощность, приходящуюся на единицу освещенной поверхности перехода. Из рис. 74 мы видим, что произведение $j \cdot V$ максимально в том случае, когда вписанный в эти кривые прямоугольник имеет наибольшую площадь. Такому режиму работы генератора соответствует отмеченная на графике точка A. В этом случае падение напряжения на нагрузке можно принять равным $0{,}5\,E_з$ (где $E_з$ — ширина запрещенной зоны). Плотность тока при этом мало отличается от плотности тока в режиме короткого замыкания $j_{кз}$, когда ток, возникающий за счет образования при воздействии света пар электрон — дырка, максимален. Величина этого тока зависит от того, насколько эффективно происходит разделение пар (без учета их частичной рекомбинации, которая в настоящее время пока еще не поддается точному расчету). Экспериментальные данные показывают, что при правильном выборе материалов и достаточно освещенной конструкции генераторов можно добиться того, чтобы в процессе генерирования полезной мощности участвовало не менее 80% всех возникающих под действием света пар электрон — дырка. В режиме, соответствующем выбранной нами рабочей точке, используется около 70% таких носителей. Следовательно, величина полезной мощности составляет около $0{,}5 \cdot 0{,}7 = 0{,}35$, то есть 35% от идеального значения определенной ранее выходной мощности, которая соответствует максимальному к. п. д. преобразования энергии фотонов. Там же было показано, что в процессе преобразования участвуют лишь около 45% солнечной энергии. Согласно нашим оценкам, реально мы можем рассчитывать лишь на 35% от этого значения, то есть не более 16%

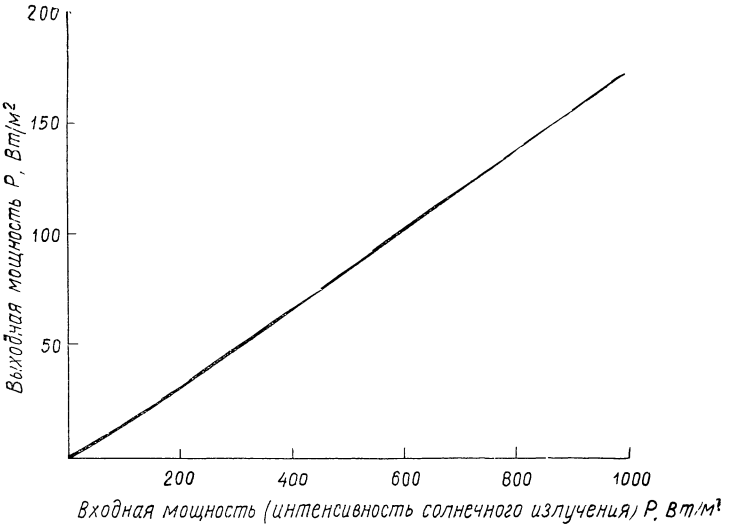


Рис 75. Зависимость выходной мощности фотоэлектрического генератора от интенсивности солнечного излучения.

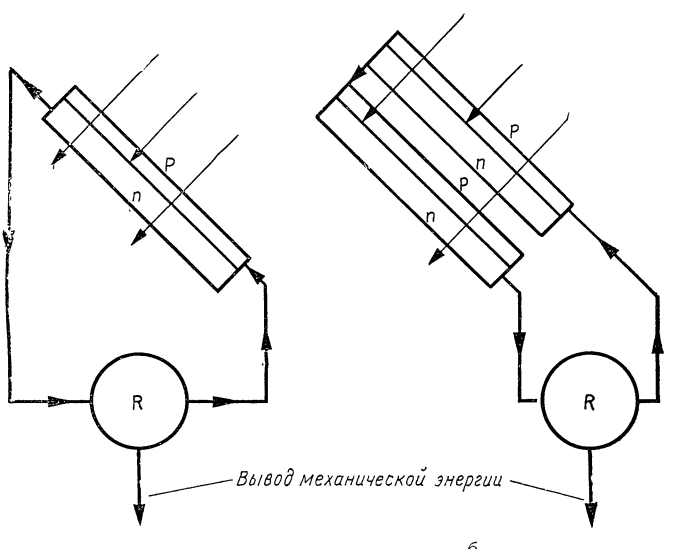


Рис. 76. Типы фотоэлектрических генераторов:
а — однокаскадный; *б* — многокаскадный.

солнечной энергии можно превратить в полезную мощность. К. п. д. многих реальных фотоэлектрических генераторов составляет лишь около 15%, так что наши оценки вполне верны.

Об эффективности хорошо согласованного с нагрузкой фотоэлектрического генератора, работающего в условиях тропиков, мы можем судить по данным рис. 75. Как следует из рис. 74, при малой интенсивности солнечной радиации к. п. д. ее преобразования заметно снижается, так как в этом случае на нагрузке невозможно получить достаточно большой разности потенциалов. Снова мы имеем прибор с низковольтным выходом: выходное напряжение кремниевых генераторов составляет около 0,6 В. При интенсивности солнечной радиации $P = 800$ Вт/м^2 полезная мощность практически не превышает 130 Вт/м^2. Куда же расходуется оставшаяся неиспользованной энергия? Следует избегать того, чтобы эта энергия затрачивалась на усиление колебаний кристаллической решетки, поскольку в противном случае возбужденные носители могут преодолевать потенциальный барьер различными «окольными» путями. Поскольку интенсивность колебаний решетки непосредственно связана с температурой, то в равной мере мы можем говорить о необходимости поддерживать температуру на низком уровне. Этого добиваются различными способами. Обычно при повышении рабочей температуры с 20 до 100° С к. п. д. установки снижается на одну треть. Очевидно, ту часть спектра солнечной радиации, которая расходуется непроизводительно, можно устранить с помощью соответствующих отражающих покрытий, но внутри генератора всегда происходят какие-нибудь тепловые процессы, поэтому необходимо обеспечить по возможности наилучший отвод тепла через теплопроводность или лучеиспускание.

В настоящее время в фотоэлектрических генераторах («солнечные батареи» космических кораблей и и других автономных объектов «малой энергетики») обычно применяются полупроводники, полученные при разрезании одного кристалла. Устройство такого типа схематически показано на рис. 76. В заключение этой главы рассмотрим некоторые возможные пути усовершенствования фотоэлектрических генераторов.

Перспективы развития фотоэлектрических генераторов

Вопреки нашим оптимистичным прогнозам простейшие фотоэлектрические генераторы по к. п. д. пока еще не превосходят системы на основе механических тепловых машин и термоионных преобразователей. Низкий к. п. д. фотоэлектрического генератора объясняется двумя основными причинами: с одной стороны, значительная часть световых фотонов обладает энергией, которая не оказывает нужного действия на электроны материала, а с другой—разность потенциалов V на нагрузке составляет лишь очень малую часть величины $E_з$. Весьма вероятно, что проводимые в настоящее время исследования позволят создать новые устройства, в которых указанные недостатки окажутся менее существенными. В высоколегированных полупроводниках, где ширина запрещенной зоны значительно больше, второй из названных недостатков выражен значительно слабее. В этом случае число носителей, преодолевающих $p-n$-переход «окольными» путями, уменьшается и величина $V/E_з$ возрастает. Теперь вместо ранее принятого значения 0,5 $E_з$ разность потенциалов V может достигать 0,7 $E_з$ и более, что способствует увеличению максимальной мощности генератора. Однако в начале гл. 8 мы показали, что при больших $E_з$ доля солнечного излучения, «воспринимаемая» электронами материала, оказывается меньше, чем при оптимальных значениях $E_з$, лежащих в диапазоне 1,0 — 1,4 эВ. Проводятся и другие перспективные исследования по созданию более сложных устройств, схематически показанных на рис. 76. Идея, положенная в основу построения таких устройств, напоминает принцип каскадирования в термоэлектрическом генераторе (см. рис. 65).

Солнечная радиация сначала попадает на элемент, изготовленный из полупроводника с большой шириной запрещенной зоны, благодаря чему он обладает высоким к. п. д. в нужной нам части солнечного спектра. Фотоны с энергиями ниже $E_з$ не оказывают воздействия на этот элемент, материал которого для них по существу является прозрачным. Пройдя через первый каскад, эти фотоны попадают во второй, выполненный

из материала с меньшей величиной $E_з$ (по сравнению с первым элементом). Его способность захватывать эти фотоны высока, хотя к. п. д. ниже, чем у первого элемента. Такое сочетание двух солнечных элементов позволяет получить более высокий суммарный к. п. д., чем для каждого из них в отдельности. Предположим, что граничная длина волны первого элемента составляет 0,7 мкм, а второго, как и прежде, 1,1 мкм. На основе данных табл. 4 в результате ориентировочного расчета находим, что доля поглощенной в первом элементе солнечной энергии в идеальном случае достигает 34%, а во втором — около 27%. Далее, если напряжение на выходе первого элемента $V = 0{,}7\ E_з$, а ток составляет 80% от значения тока в режиме короткого замыкания, то его к. п. д. оценивается величиной $0{,}7 \cdot 0{,}8 \cdot 34 = 19\%$. Аналогично находим к. п. д. второго элемента: $0{,}5 \cdot 0{,}7 \cdot 27 = 9\%$. Таким образом, общий к. п. д. такого устройства почти вдвое превышает к. п. д. рассмотренного ранее простейшего фотоэлектрического генератора. Возможность дальнейшего совершенствования такого рода устройств открывается с применением для их изготовления интегральной технологии и созданием так называемого интегрального генератора, в котором ширина запрещенной зоны изменяется с глубиной; она велика у облучаемой поверхности, а затем уменьшается в глубь материала. Эта и другие новые разработки фотоэлектрических генераторов открывают дальнейшие перспективы повышения их к. п. д.; предполагается, что к. п. д. фотоэлектрических систем может достигнуть 50—60%, то есть превысить к. п. д. любых других систем. Особое внимание уделяется вопросу удешевления конструкций фотоэлектрических генераторов, поскольку созданные до настоящего времени устройства оказались чрезвычайно дорогостоящими.

В настоящее время цена фотоэлектрического преобразователя площадью в 1 см^2 составляет в среднем несколько долларов. Причины такой высокой стоимости понятны, если учитывать чрезвычайно высокие требования к чистоте полупроводниковых материалов. Мы видели, что легирование представляет собой целенаправленное введение в полупроводник примесных атомов с концентрацией не выше одной миллионной,

Но этому предшествует очистка полупроводника от других примесей, в процессе которой добиваются снижения их концентрации до одной миллиардной. Едва ли где-нибудь еще предъявляются столь высокие требования к чистоте материала. Более того, совершенно недопустима какая-либо деформация структурной решетки полупроводника, так как это ведет к снижению к. п. д. генератора, вследствие этого полупроводниковые элементы необходимо вырезать из единого кристалла.

Кремний представляет собой твердый полупроводник, который получают либо из силикатов, в обилии содержащихся в горных породах, либо из кремнезема (SiO_2), составляющего основную часть некоторых песков. Таким образом, кремний является одним из наиболее распространенных элементов, занимая второе место после кислорода. Но для получения кремния высокой степени чистоты сырье должно пройти тщательную очистку, состоящую из нескольких стадий. Окончательное освобождение от примесей осуществляется в процессе так называемой *зонной очистки.* Слиток помещают внутрь катушки, через которую пропускают ток высокой частоты, создающий высокочастотное поле; под действием этого поля в слитке образуется небольшая зона расплава. Последняя постепенно распространяется вдоль слитка. Установлено, что примеси уносятся зоной расплава, благодаря чему в основной части слитка достигается высокая степень чистоты. Затем наиболее очищенную часть отделяют от слитка и переплавляют с соответствующим количеством легирующего элемента. Элементы фотоэлектрических преобразователей получают, разрезая единый кристалл (монокристалл) на части.

Монокристаллы кремния шириной до нескольких сантиметров также «выращивают» путем постепенной кристаллизации материала на зерне кристалла, которое закрепляют на зонде и опускают в тигель с расплавленным элементом. Затем зонд очень медленно вынимают, извлекая вместе с ним и выросшую колонку материала, имеющего структуру монокристалла. Последний для получения элементов фотопреобразователя распиливают на очень тонкие пластины. Затем с помощью диффузии атомов легирующего элемента

через поверхность преобразователей (которые выдерживают в «атмосфере» этого элемента при высокой температуре) получают $p-n$-переход. Диффузный слой должен быть очень тонким (несколько мкм), иначе свет не сможет проникнуть к переходу. Наконец на преобразователь наносят металлические пленки, к которым припаиваются электрические контакты так, чтобы их сопротивление было минимальным.

Не удивительно, что полупроводниковые материалы, используемые в термоэлектрических генераторах, оказались намного дешевле по сравнению с материалами для фотоэлектрических генераторов. Это объясняется отчасти тем, что в материале с хорошими термоэлектрическими свойствами концентрация легирующих примесей должна быть порядка одной тысячной. Соответственно в нелегированном материале допускается концентрация естественных примесей до одной миллионной. (Напомним, что в материале фотоэлектрического генератора этот показатель должен быть в тысячу раз ниже) Более того, элементы термоэлектрического генератора не нужно вырезать из монокристалла. Их можно отлить или получить путем спекания. В последнем случае материал сначала измельчают, а затем спрессовывают при высокой температуре (но ниже температуры плавления), в результате получается однородный блок.

Совершенно ясно, что получение высокого к. п. д. фотоэлектрических преобразователей значительно осложняется большой стоимостью производства. Одним из путей повышения их эффективности является использование фокусирующего коллектора солнечного излучения с фотоэлектрическим элементом малых размеров. Выходная мощность такого устройства пропорциональна интенсивности освещения без признаков насыщения при значениях коэффициентов концентрации вплоть до 10. С повышением выходного тока возрастают джоулевы потери, которые, как видно из уравнения (7.2), определяются произведением сопротивления на квадрат тока. Для уменьшения сопротивления фотоэлектрического элемента его контакты делают из металлической сетки, тем не менее использование высоких коэффициентов концентрации на

практике жестко ограничивается как джоулевыми потерями, так и обычной проблемой охлаждения элементов.

Выход из этого затруднительного положения можно найти, применяя легированный кремний и другие полупроводники в поликристаллической форме. Это позволяет избежать продолжительной и дорогостоящей стадии выращивания монокристалла. Размер кристалла в слитке контролируется путем регулирования скорости охлаждения, в результате число границ между смежными кристаллами в пластине фотоэлектрического преобразователя сокращается до минимума. Как известно, искажение структуры полупроводника вблизи таких границ приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны и, следовательно, уменьшению к. п. д. фотоэлектрического элемента. К. п. д. элементов из поликристаллического кремния снижается примерно на 4%, но при этом их стоимость уменьшается в 2—3 раза, так что стоимость 1 кВт полезной мощности оказывается примерно той же. С того времени, как в 1877 г. *Адамс* и *Дэй* впервые сообщили о фотоэлектрическом эффекте, обнаружено много других веществ, у которых проявляются подобные свойства. Например, хорошо известно устройство с использованием пленки окиси меди на меди. Однако сейчас особый интерес проявляется к сульфиду кадмия, который широко применяется в фотоэкспонометрах. Указанные вещества, как и кремний, можно получить в виде монокристалла, но в отличие от него ширина запрещенной зоны в них, к сожалению, далека от оптимальной. Однако при тонкопленочном исполнении кристалла CdS удается уменьшить ширину запрещенной зоны и приблизить ее к оптимальной величине. Тонкие пленки получают методом *вакуумного напыления*. Для этого материал нагревают в отдельном сосуде так, чтобы началось его испарение, а затем «испарившиеся» молекулы напыляют на нужную поверхность. К. п. д. фотоэлектрического преобразователя, изготовленного путем нанесения на медь пленки CdS, составляет около 3,5%. Тонкопленочные фотоэлектрические элементы монокристаллического типа еще не получили широкого распространения, поскольку фотоэлектрические преобразователи в настоящее время используются пре-

имущественно в космических аппаратах, где требования высокого к. п. д. и минимального веса являются определяющими, даже в ущерб стоимости. Значение тонкопленочных фотоэлектрических элементов в области преобразования солнечной энергии могло бы быть значительно больше. Применение таких элементов пока еще ограничено, однако считают, что при серийном производстве стоимость тонкопленочных элементов из сульфида кадмия может измеряться в долларах, но не за 1 $см^2$, а за 1 $м^2$. Если бы так оказалось в действительности, то положение в области создания мощных фотоэлектрических генераторов, вероятно, существенно бы изменилось.

Высокий к. п. д. фотоэлектрического генератора обусловлен тем, что энергия фотонов солнечного излучения непосредственно передается электронам устройства. Получаемую энергию необходимо либо непосредственно использовать, либо запасать в другом устройстве, например в электрохимической батарее. В следующей главе мы коротко рассмотрим возможности использования химических и биологических систем для накопления энергии. Поскольку процессы в них происходят на квантовом уровне, то их эффективность, по-видимому, достаточно высока.

9. Фотохимия и фотобиология

Эта сила через зеленый лист управляет цветком

Дилэн Томас (1914—1953)

Наверно, почти каждый ощущал на коже действие солнечных лучей, которое приводит к загару. Давно замечено, что солнечное излучение вызывает различные химические превращения, например отбеливает красители. Это явление веками использовалось людьми на практике. Но лишь в XVIII в. стало известно, что под влиянием освещения происходит почернение некоторых солей серебра. В 1839 г. *Беккерель*, исследуя подобный эффект, обнаружил, что при изменении освещенности одного из электродов химического элемента разность потенциалов на его электродах изменяется. Это послужило началом развития новой области знаний, названной *фотохимией*, а в последнее время известной как *радиационная химия*.

Хотя некоторые из результатов исследований в фотохимии имеют важнейшее значение для человечества — здесь в первую очередь мы должны назвать фотографию — однако другие практические приложения ее пока весьма ограниченны. Отчасти это обусловлено отсутствием надлежащей аппаратуры для постановки экспериментов. Только недавно стало возможным изучение ранних стадий фотохимических реакций, продолжительность которых иногда составляет миллионные доли секунды. И теперь фотохимия начала бурно развиваться. Здесь мы не ставим задачу подробно проследить за ее развитием. Мы рассмотрим лишь ее основные положения и возможный вклад в решение вопросов преобразования энергии в недалеком будущем.

Фотобиологические реакции далеко не ограничиваются одним лишь загаром. Природа постоянно де-

монстрирует нам удивительный пример *фотосинтеза*, благодаря которому зеленые растения и некоторые другие организмы, используя солнечную энергию, создают из воды и углекислого газа молекулы сложных органических соединений. Без такого источника пищи невозможно существование животных. Поэтому естественно наше стремление научиться управлять процессом фотосинтеза, так как это позволило бы найти новый подход к ведению сельского хозяйства. В дальнейшем мы коротко остановимся на этой проблеме, но лишь постольку, поскольку она перекликается с рассматриваемыми в книге вопросами производства энергии.

В настоящей главе в большей степени, чем в любом другом разделе книги, мы подошли к самым новейшим и перспективным исследованиям возможностей практического использования солнечной энергии. Поэтому в ней гораздо меньше деталей и математических выкладок, чем в других главах. Основная задача этой главы — дать читателю общее представление об одной из самых современных бурно развивающихся областей знаний.

Фотодиссоциация

Мы уже видели, что при поглощении радиации атомами и молекулами вещества в нем возникают разнообразные физические эффекты. Например, при нагревании тел под действием солнечного излучения колебательные и вращательные движения составляющих их молекул становятся более интенсивными. Эти эффекты обусловлены перераспределением внутри тела энергии фотонов падающего излучения. Говоря о фотоэлектричестве, мы интересовались непосредственными результатами поглощения электронами энергии фотонов в веществах с различной структурой энергетических зон. Теперь мы рассмотрим следующий этап воздействия радиации на вещество: разделение, или *лизис*, молекул и образование новых химических соединений.

С точки зрения преобразования энергии процесс *фотолиза* интересен тем, что он позволяет «запасать» солнечную энергию посредством получения более

устойчивых химических соединений. При необходимости эту энергию можно реализовать, например в виде тепла, выделяемого при сжигании таких веществ. Одной из разновидностей фотолиза является разложение воды на водород и кислород. Если бы такой процесс удалось осуществить с помощью солнечной энергии, то мы приобрели бы практически неограниченные запасы универсального и транспортабельного топлива из самого распространенного и дешевого сырья. Реакцию разложения воды можно записать в следующем виде:

$$2H_2O + \text{солнечная энергия} \rightarrow 2H_2 + O_2. \qquad (9.1)$$

Затраченную при этом солнечную энергию (по крайней мере часть ее) в дальнейшем мы могли бы получить либо при сжигании водорода и кислорода в печи или двигателе внутреннего сгорания, либо в топливном элементе, где в результате соединения водорода с кислородом с образованием воды вырабатывается электроэнергия. Отсюда видно, насколько важное значение в жизни людей могло бы иметь осуществление такого рода процессов. Они заслуживают того, чтобы исследовать возможность их реализации.

Почему же процесс, описанный уравнением (9.1), не возникает естественным образом в природе? (В противном случае в воздухе содержалось бы много водорода и было бы мало воды.) Такой процесс мог бы произойти, если бы энергия отдельного фотона оказалась достаточной для разложения молекулы воды. Если же какая-то молекула уже получила порцию энергии от одного фотона, то поглощение ею второго фотона исключено. Даже при обычных температурах молекулы газа или пара каждую секунду испытывают около 10^9 столкновений, поэтому любой избыток энергии довольно быстро перераспределяется среди соседних молекул. Сейчас разложение воды на кислород и водород осуществляется в процессе электролиза. Как всем известно еще из школьных опытов, в результате этого процесса под действием электрического напряжения молекулы воды разлагаются на ионы противоположного знака. Совершаемую при этом работу легко измерить. Для диссоциации одной молекулы воды необходима энергия около

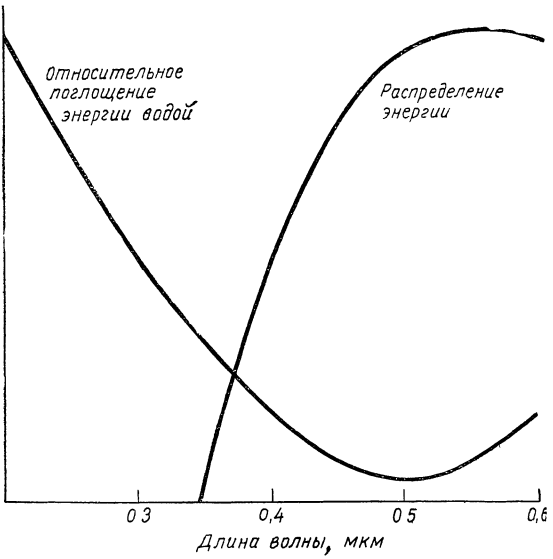


Рис. 77. Поглощение солнечной радиации в воде

3 эВ. Если процесс диссоциации производится под действием солнечной радиации, то длина волны световых фотонов [см. (8.2)] должна быть меньше 0,4 мкм. Однако в спектре солнечного излучения на уровне моря такие фотоны составляют лишь 3%, следовательно, к. п. д. процесса не превышает 2%. Несмотря на это, использование данного процесса могло быть практически целесообразно, если бы для его реализации не требовалось больших материальных затрат. Основная трудность заключается в том, что вода прозрачна для фотонов с длиной волны около 0,4 мкм (иначе говоря, поглощение таких фотонов молекулами воды слишком слабое), поэтому к. п. д. процесса оказывается еще меньше. Как видно из рис. 77, при этих длинах волн вода только начинает проявлять сколько-нибудь заметную поглощательную способность. Энергия фотонов в этой области достаточна для диссоциации воды, однако в солнечном спектре на уровне моря такие фотоны отсутствуют.

Рассмотрим теперь другую весьма полезную реакцию, в процессе которой вода в присутствии кислорода или богатых кислородом соединений диссоциирует с образованием перекиси водорода H_2O_2:

$$2H_2O + O_2 + \text{солнечная радиация} \rightarrow 2H_2O_2. \quad (9.2)$$

Перекись водорода представляет собой устойчивое соединение, в значительной степени прозрачное по отношению к свету. При необходимости запасенную в таком соединении энергию можно было бы выделить с помощью реакции, обратной (9.2). Последнюю легко осуществить, если пропустить перекись водорода над кристаллами марганцовокислого калия (марганцовки), который выполняет функцию *катализатора* такой реакции, не вступая в нее сам. (Эта реакция использовалась в ракетном двигателе Уолтера, разработанном в Германии во время второй мировой войны. Здесь полученная при высокой температуре смесь кислорода и пара непосредственно использовалась как топливо.) Для осуществления реакции (9.2) необходима энергия около 1,5 эВ, которой и обладают фотоны солнечного спектра. Однако, как следует из рис. 77, поглощательная способность воды в этой области спектра недостаточна для того, чтобы вызвать реакцию.

Подобное можно сказать и о ряде других, казавшихся многообещающими реакций, хотя исследования в этом направлении продолжаются. Созданию такого типа постояннодействующего аккумулятора энергии препятствует многое. Довольно часто продукты диссоциации оказываются настолько реактивными, что почти тут же вступают в реакции. В других случаях эти продукты сами поглощают энергию радиации, что приводит к образованию менее полезных промежуточных соединений. Однако поисковые исследования в этой области необходимо продолжать. В принципе совсем необязательно, чтобы исходный материал был дешевым и широкодоступным, поскольку возможны реакции, в которых происходит регенерация рабочего вещества, то есть запасенная в нем энергия восстанавливается, а само вещество можно использовать повторно и т. д. Таким образом, круг веществ, пригодных для осуществления рассматриваемых реак-

ций, значительно расширяется. Но покуда ведутся поиски наиболее подходящих соединений, необходимо разработать новые методы повышения степени диссоциации воды, например, путем введения какого-то соединения, увеличивающего поглощение водой солнечной энергии. Подобные способы давно используются в фотографии.

Фоточувствительность

Хотя «возраст» фотографии насчитывает уже свыше 100 лет и ее роль в жизни общества чрезвычайно важна, тем не менее ее фотохимию смогли объяснить лишь совсем недавно, да и то далеко не полностью. Остановимся кратко на фотографических процессах. Активным веществом в фотографической пленке являются крошечные кристаллики одной или нескольких солей серебра, главным образом бромида серебра. В таком кристалле — его относят к кристаллам ионного типа — ионы серебра и брома находятся в регулярной решетке, но, по-видимому, для фотографического процесса существенно, чтобы в структуре этих кристаллов наблюдалась некоторая нерегулярность. Под воздействием света энергия некоторых электронов в кристалле повышается настолько, что они переходят в зону проводимости и начинают относительно свободно перемещаться. Как только они оказываются вблизи структурных аномалий решетки, ионы серебра захватывают их, в результате чего образуются нейтральные атомы серебра. Для проявления пленки применяют раствор (проявитель), который действует на необлученный кристалл довольно слабо, но, оказывается, присутствие нескольких атомов серебра в кристалле как бы стимулирует действие проявителя в самом начале процесса и в результате содержание серебра в кристалле уменьшается. Таким образом, облученные и необлученные фотопленки ведут себя различно. Для фотохимических реакций вообще характерны сложные и тонкие механизмы.

Было установлено, что ширина запрещенной зоны для кристалла бромида серебра составляет около 2,5—3 эВ, следовательно, на такой кристалл [см. (8.2)] могут воздействовать лишь фотоны с длиной волны

менее 0,45 мкм. Это соответствует довольно слабой голубой области солнечного спектра, поэтому раньше фотографирование производилось с большой экспозицией, а изображение обычно получалось малоконтрастным. Однако вскоре обнаружили, что в присутствии определенных красителей пленка становится чувствительной к значительно более длинным волнам — так появилась *панхроматическая* пленка, имеющая достаточную чувствительность во всем видимом диапазоне спектра. В настоящее время изготовляют также специальные инфракрасные пленки, чувствительные к радиации с длиной волны выше 1,3 мкм.

Под действием ультрафиолетового излучения, энергия фотонов которого достаточно высока, протекают многие реакции с участием органических веществ. Так удается синтезировать в достаточно больших количествах вещества, которые нельзя получить иным путем. Таким способом еще 25 лет назад в Германии получен лекарственный препарат *аскаридол* (средство, применяемое против глистов). По-видимому, в большинстве реакций в органических веществах сначала разрушаются связи между атомами углерода, а затем образуются новые связи с использованием других атомов. Известно, что для нарушения связи между атомами углерода необходима энергия около 4 эВ, ею обладают фотоны с длиной волны менее 0,3 мкм. В ряде случаев фотону достаточно энергии, равной разности между энергиями, расходуемыми на разрушение старых и образование новых связей, но для многих известных органических веществ требуется энергия не менее 3 эВ. Путем использования определенных красителей удалось повысить чувствительность некоторых реакций этого типа настолько, что они могут протекать под воздействием световых фотонов с энергией менее 2 эВ.

Важнейшей отличительной особенностью таких *светочувствительных соединений* (фотосенсибилизаторов) является густая окраска, сильно поглощающая излучение, причем поглощение в какой-то одной части видимой области спектра выше, чем в других. Например, широко используемые для повышения чувствительности фотоэмульсий красители на основе цианистого углерода обладают близким к голубому бирю-

зовым цветом. Зеленый цвет растениям придает светочувствительное вещество, называемое *хлорофиллом*, который и в лабораторных условиях применяется для повышения чувствительности некоторых реакций.

Несмотря на интенсивные исследования, механизм действия фотосенсибилизаторов все еще остается непонятным. Можно предположить, что их действие обусловлено совокупностью простейших фотохимических процессов, каждый из которых, казалось бы, не несет в себе ничего особенного. Поскольку для протекания реакции требуется вполне определенное количество энергии, то, очевидно, основное действие фотосенсибилизаторов сводится к накоплению энергии поглощаемых фотонов до соответствующего уровня. Таким образом, фотохимические реакции состоят из ряда промежуточных стадий, и одной из целей их исследования в настоящее время является выяснение последовательности их протекания. С помощью современных методов удается исследовать даже наиболее реактивные, быстро протекающие этапы фотохимических реакций. Трудно понять, каким образом энергия, полученная при поглощении фотонов, может сколько-нибудь долго сохраняться и накапливаться до необходимого уровня в жидкости, где каждую секунду происходит около 10^{10} столкновений между молекулами. Известно, что одни из процессов, приводящих к распределению энергии между частицами (или процессов ударной дезактивации), протекают медленнее, другие — быстрей. Как мы уже знаем, существует четыре вида движения частиц в веществе: поступательное, вращательное, колебательное движения молекул и движение электронов; соответственно различаются и четыре вида энергии частиц. Особенно медленно происходит обмен энергиями поступательного и колебательного движений. Поэтому если возбужденные молекулы совершают интенсивные колебательные движения, то переход их из этого состояния в другое происходит очень медленно. Это означает, что поглощенная энергия может сохраняться какое-то время в течение миллиона или более столкновений (что составляет лишь десятую долю секунды!). Особенно трудно обнаружить самое «долгоживущее» возбужденное состояние, которое, как по-

лагают в настоящее время, является определяющим во многих светочувствительных реакциях. Это так называемое *триплетное состояние*. Оно отличается от других *спином* находящихся в этом состоянии электронов. Наша простая модель электрона позволяет довольно наглядно объяснить, что такое спин, тогда как для более сложных моделей это сделать значительно труднее. Мы представляем электрон как частицу, движущуюся по орбитальной траектории, и нам нетрудно вообразить, что при этом он вращается вокруг собственной оси (спин — это момент количества движения такого вращения), подобно тому как Земля, двигаясь по орбите вокруг Солнца, совершает суточное вращение вокруг собственной оси.

Как известно из квантовой механики, спин электрона может принимать два значения $+1/2$ и $-1/2$. Спиновое состояние атома или молекулы в целом выражается его *мультиплетностью*, которая равна удвоенному суммарному значению спина электрона плюс единица. В состоянии с минимальной энергией (основном состоянии) электроны распределены так, что их полный суммарный спин равен 0 (число электронов со спином $+1/2$ равно числу электронов со спином $-1/2$), а мультиплетность равна 1. Это самое низкое так называемое *синглетное* состояние. Возможны ситуации, когда возбужденная при поглощении энергии молекула вместо того, чтобы затем в результате ударной дезактивации или любого другого процесса возвратиться в состояние с минимальной энергией, изменяет свое состояние таким образом, что спин одного из электронов меняет знак на обратный. (Некоторое представление о соотношении между такими состояниями можно составить по рис. 78.) Тогда суммарный спин электрона будет равен $1/2 + 1/2 = 1$, а мультиплетность равна 3. Это первое *триплетное* состояние. Оно характеризуется меньшей энергией и большей продолжительностью времени жизни, чем исходное возбужденное состояние. Возвращение спина электрона в исходное состояние происходит в течение времени от десятитысячной доли секунды до секунды и более.

Таким образом, поглощенная энергия сохраняется в молекулах фотосенсибилизатора довольно продол-

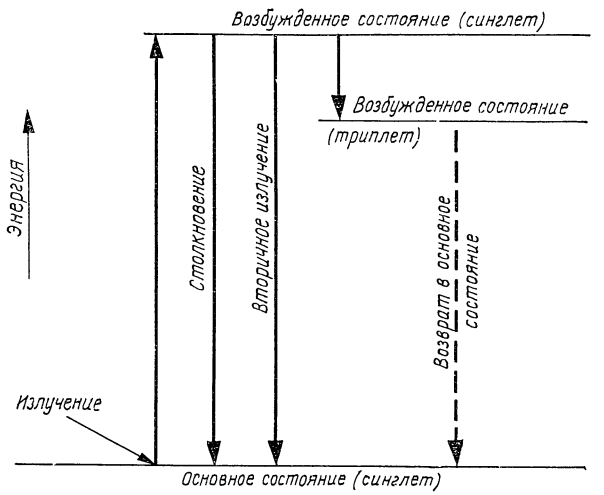


Рис. 78. Молекулярные энергетические переходы

жительное время. Благодаря этому становится возможным накопление энергии от многих фотонов, и величина ее оказывается достаточной для возбуждения фотохимической реакции.

Повышение чувствительности фотолиза воды

В начале главы мы рассмотрели два способа расщепления молекул воды в процессе фотолиза, приводящих к образованию энергетических устойчивых соединений, которые затем можно было бы использовать для получения энергии. Мы познакомились также с некоторыми известными механизмами, посредством которых энергия, полученная от одного фотона, может сохраняться, пока с поглощением других фотонов не будет накоплено необходимое ее количество. Однако следует помнить, что ни один из рассмотренных способов не обеспечивает такой чувствительности реакции, при которой мы могли бы под действием солнечного излучения производить фотолиз воды в нужных масштабах.

Тем не менее в этом направлении уже предприняты определенные шаги и продолжаются поисковые работы. В начале 50-х годов *Хейдт* из Массачусет-

ского технологического института предложил один из наиболее удачных способов повышения чувствительности фотолиза. В качестве фотосенсибилизатора он использовал перхлорат редкоземельного элемента церия. Последний относится к числу элементов, которые могут иметь несколько валентностей (вторая валентность церия обусловлена переходами электронов с внутренних оболочек, которые образуют дополнительные связи).

В следующем разделе мы увидим, что при диссоциации солей металлов в водных растворах ионы разделяются. Ион металла, входившего в состав молекулы исходной соли, передает часть электронов иону радикала, в результате последний приобретает отрицательный заряд, а первый становится положительно заряженным ионом. Валентность атома, из которого образуется ион, определяется количеством отданных зарядов.

Например, при диссоциации перхлората церия в воде высвобождаются ионы четырехвалентного Ce^{4+} (потерявшего четыре электрона) и трехвалентного Ce^{3+} (потерявшего три электрона) церия, что соответствует двум значениям валентности этого элемента. Хейдт представлял реакцию состоящей из одновременно протекающих процессов фотоактивации — восстановления иона Ce^{4+} (присоединение электрона) и окисление иона Ce^{3+} (отдача электрона):

$$\left.\begin{aligned} &4Ce^{4+} + 2H_2O + \text{радиация} \rightarrow 4Ce^{3+} + 4H^+ + O_2, \\ &4Ce^{3+} + 4H_2O + \text{радиация} \rightarrow 4Ce^{4+} + 4OH^- + 2H_2, \\ &4H^+ + 4OH^- \rightarrow 4H_2O. \end{aligned}\right\} \quad (9.3)$$

Суммарный результат реакции мы можем представить в виде

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2,$$

то есть получаем уравнение (9.1). В итоге мы имеем те же ионы церия, а из четырех ионов водорода H^+ и четырех ионов гидроксила OH^- в результате рекомбинации через короткое время вновь образуются молекулы воды.

К сожалению, описанная реакция не происходит под воздействием радиации с длиной волны выше

0,4 мкм, что снижает ее практическую ценность. (К числу ее недостатков следует отнести также замедление при наличии в воде постоянных примесей и слишком низкую продуктивность даже в идеальных условиях.) И за годы, прошедшие с момента осуществления этой реакции, положение существенно не улучшилось. Поэтому подробно останавливаться на ней едва ли целесообразно. Однако исследования продолжаются. Особенно интенсивно изучаются ранние стадии процесса фотодиссоциации. Ученые надеются найти фотосенсибилизаторы, действующие во всем спектре солнечного излучения, накапливающие энергию и увеличивающие к. п. д. фотолиза воды, причем это должны быть вещества, способные полностью восстанавливаться в ходе этих процессов. С таким гипотетическим веществом M процесс можно представить в виде возбуждаемой светом реакции восстановления

$$4M + 2H_2O + \text{радиация} \rightarrow 4M^- + 4H^+ + O_2 \quad (9.4)$$

с образованием кислорода, сопровождающейся последующей реакцией окисления:

$$4M^- + 4H^+ \rightarrow 4M + 2H_2, \quad (9.5)$$

когда наряду с водородом это вещество снова получают в прежнем виде. Добавим только, что реально такого вещества существовать не может; это условное вещество M мы просто будем использовать для удобства описания соответствующих процессов.

Фотохимический элемент

Одним из проявлений фотохимической активности вещества может служить упомянутое нами в начале главы возникновение разности потенциалов (обнаруженное в свое время Беккерелем) на зажимах химического элемента при освещении одного из его электродов. Чтобы говорить о возможности преобразования энергии в подобных элементах, необходимо понять, почему именно разность потенциалов играет здесь основную роль.

Химический элемент (рис. 79) обычно состоит из двух металлических электродов, погруженных в

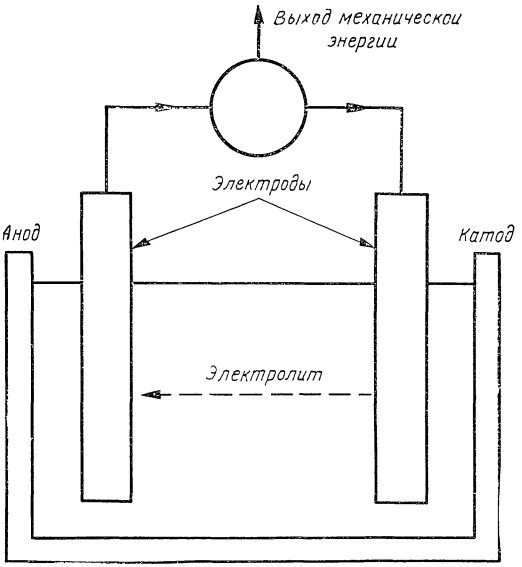


Рис. 79. Электрохимический элемент.

вещество, называемое *электролитом*. Как правило, электролит представляет собой жидкость или пасту, состоящую из одного или нескольких соединений, или же раствор кислот, оснований или солей металлов. Если электроды элемента подключить к источнику тока, то через него может протекать электрический ток. Для этого в элементе должны существовать условия для переноса электронов через электролит от одного электрода к другому. Природа этих носителей являлась предметом многолетних обсуждений. Считается, что основы современной ионной теории, в рамках которой анализируются подобные процессы, были заложены в 1887 г. шведским химиком *Аррениусом*. Однако еще в 1883 г. *Фарадей* установил, что при прохождении тока через элемент происходит либо отложение металла, либо выделение газа на поверхности электродов, то есть в местах контакта электрод — электролит. Очевидно, там протекали электрохимические реакции. Фарадей показал, что функции носителей заряда выполняют компоненты соединений, из

которых состоит электролит. Каждый из этих компонентов был назван ионом (что по-гречески означает «блуждающий»), а теперь так называют атомы или группы атомов (радикалы), имеющие избыток или недостаток электронов. Обладая определенным зарядом, ионы под действием кулоновских сил перемещаются к противоположно заряженному электроду и там «разряжаются» (нейтрализуются). Об этом процессе мы узнаем по числу электронов, отданных ионам (или полученных от них) соответствующего вещества, которое выделяется на электроде в виде нейтральных атомов твердого осадка или молекул газа. Впоследствии было обнаружено, что около электрода происходит и множество других процессов, в ходе которых осуществляется обмен электронами как между отдельными компонентами электролита, так и между ними и электродом.

Процесс возникновения ионов в электролитах не представляет из себя ничего таинственного. По отклонению рентгеновских лучей в различных материалах установлено, что многие соединения всегда находятся в ионной форме. Например, широко известная поваренная соль NaCl состоит из отдельных ионов Na^+ и Cl^-, находящихся в регулярной структуре; молекулы, как отдельной единицы, в твердом состоянии этого вещества не обнаружено. Отрицательный ион хлора Cl^- образуется в результате присоединения к атому хлора электрона, отданного атомом натрия, который при этом превращается в положительно заряженный ион. Создается впечатление, что при встрече атомы состязаются в борьбе за электроны. При передаче электрона от одного атома к другому между ними возникает особого рода связь, и, кроме того, поскольку они заряжены, начинают действовать кулоновские силы. Однако при диссоциации такой соли в воде с увеличением расстояния между ионами эти силы ослабевают настолько, что ионы становятся совершенно не связанными. В последнем случае мы имеем так называемый сильный электролит.

Ионная связь является типичной формой связи для многих солей и оснований, тогда как для большинства кислот характерна *ковалентная* связь, при которой атомы не обмениваются электронами, а

владеют ими сообща. В таких соединениях подобным же образом связаны между собой не только атомы, но и целые электронейтральные молекулы. Тем не менее в воде под действием определенных реакций многие из них разлагаются на ионы.

Поведение ионов в растворе довольно сложно. Будучи заряженными, они притягиваются или отталкиваются; кроме того, в процессе непрерывного теплового движения они находятся под влиянием множества других подобных ионов. Ионы взаимодействуют и с молекулами воды. При очень высокой концентрации растворенного вещества ионы оказываются близко друг к другу, и даже в сильных электролитах между ними возникают связи того же характера, что и в твердом теле. С другой стороны, в очень разбавленных растворах, даже в слабых электролитах, возможна почти полная ионизация. Следовательно, эффективная концентрация ионов в растворе, называемая активностью, может быть меньше фактической концентрации. По существу в слабом электролите число ионизированных молекул всегда поддерживается неизменным.

Что же происходит при погружении металлического электрода в электролит? Атомы электрода и ионы электролита вступают в реакции, в процессе которых они обмениваются электронами. Рассмотрим простейший пример, когда металлический электрод погружен в электролит, содержащий ионы того же металла. Здесь возможны два процесса. Атом металла, отдавая электрон, переходит в раствор в виде положительного иона, при этом на электроде образуется избыток электронов. Этот процесс можно представить уравнением

$$M \rightarrow M^+ + e. \tag{9.6}$$

С другой стороны, возможен обратный процесс, когда ион из электролита, присоединяя электрон, выделяется на электроде в виде атома:

$$M^+ + e \rightarrow M. \tag{9.7}$$

Оба процесса продолжаются до тех пор, пока не устанавливается равновесие, при котором их скорости

сравниваются. В состоянии равновесия на электроде наблюдается избыток или недостаток электронов, то есть он оказывается заряженным. Величина его заряда определяет так называемый *электродный потенциал*. Поскольку процесс, определяемый уравнением (9.7), зависит от активности ионов электролита, то от нее зависит и потенциал электрода.

Далее, если подобрать пару электродов с различными электродными потенциалами и соединить их внешней цепью, то под действием разности потенциалов в ней потечет электрический ток. Тогда мы получим электрохимический элемент, показанный на рис. 76. При протекании тока ионы будут перемещаться к электродам до тех пор, пока связанные с этим изменения концентрации не уменьшат разность потенциалов между электродами до нуля. Элемент разряжается. Для поддержания тока во внешней цепи следует обеспечить такую активность ионов вблизи электродов, при которой между электродами сохраняется необходимая разность потенциалов.

К простейшим относится элемент, в котором оба электрода из одного металла погружены в раствор, содержащий ионы того же металла. В таком элементе разность потенциалов возникает лишь в том случае, если активность ионов вблизи электродов различна. В слабом электролите различие в активности можно получить освещением одного из электродов, как в опыте Беккереля. Мы уже видели, что радиация вызывает самые разнообразные эффекты — от простейшего возбуждения до эмиссии электронов из атомов. Большинство таких эффектов приводят к нарушению равновесия в процессах (9.6) и (9.7), происходящих на электродах. Таким образом, если один из электродов элемента освещать солнечными лучами, то благодаря поглощению энергий световых фотонов электроны могут проходить через внешнюю цепь и совершать там работу.

Однако до сих пор еще не обнаружены реакции, в которых указанные процессы происходят с достаточно высоким к. п. д. Тем не менее принципиально возможно осуществление целого ряда таких реакций, например, под воздействием ультрафиолетового излучения, фотоны которого имеют достаточно высокую

энергию. К. п. д. фотохимического элемента определяется в основном тремя факторами. Во-первых, к. п. д. процесса поглощения солнечной энергии. Как мы уже видели, он обусловлен квантовой природой этого процесса, и с учетом распределения солнечной энергии по длинам волн его максимальное значение не превышает 45%. Во-вторых, суммарный к. п. д. непосредственно зависит от соотношения скорости обратного процесса, или *обратной реакции,* и скорости миграции ионов к поверхности электрода, последняя определяется их *подвижностью.* Наконец, определенные изменения в электродных реакциях происходят при протекании тока во внешней цепи. Особенно серьезную проблему представляет *перенапряжение,* при котором потенциал электрода зависит от плотности тока. Оно обусловлено главным образом ограниченной подвижностью ионов (вследствие взаимодействия с другими ионами они могут перемещаться между электродами лишь с некоторой средней скоростью). Так же, как и в фотоэлектрическом элементе, разность потенциалов на зажимах фотохимического элемента изменяется от максимального значения в режиме холостого хода до 0 в режиме короткого замыкания, а наилучшему режиму работы элемента соответствует некоторое промежуточное ее значение.

Если принимать во внимание не только неорганические, но и органические вещества, то можно назвать миллионы электродных реакций, пригодных для использования в фотохимических элементах. Современный уровень знаний в большинстве случаев не позволяет точно предсказать скорости протекания таких реакций (а также связанных с нею факторов, в частности подвижности ионов). В последнее время отмечается повышенный интерес к изучению различных способов производства энергии, в том числе с использованием электрохимических и фотохимических процессов. Поэтому необходимо исследование всех реакций, которые могут оказаться перспективными в этом отношении. Ученые не теряют надежды, хотя полученные до настоящего времени значения суммарного к. п. д. для реакций, казавшихся весьма перспективными, очень разочаровывают.

Фотосинтез

Удостоверившись в том, насколько трудно осуществить процессы, которые позволили бы преобразовать или аккумулировать солнечную энергию, обратимся теперь к вопросу о том, как они протекают в живых клетках. Здесь они осуществляются удивительно экономично. При благоприятных условиях растения могут накапливать до 10% энергии падающей на них солнечной радиации в виде «горючего», молекулы которого имеют чрезвычайно сложное строение. Общее количество энергии, получаемой на земном шаре посредством такого рода преобразований, оценивается по-разному. Считается, что только для своего существования растения расходуют энергии в 10 раз больше, чем в настоящее время потребляет все человечество. Мельчайшие живые организмы, густо населяющие моря, по-видимому, используют еще больше энергии.

Цель проводимых в этой области исследований заключается в том, чтобы научиться воспроизводить хотя бы часть таких процессов и управлять ими. Однако процессы фотосинтеза необычайно сложны и до сих пор в значительной степени остаются непонятными. Их изучение продолжается, а пока особое внимание уделяется применению растений в качестве преобразователей энергии в энергетических системах, созданных человеком и действующих по другому принципу. В этом разделе мы рассмотрим несколько характерных особенностей фотосинтеза растений, чтобы понять возможности их использования в работе энергосистем.

Реакцию фотосинтеза, происходящую в зеленых растениях, часто представляют уравнением

$$n\mathrm{CO_2} + n\mathrm{H_2O} + \text{радиация} \rightarrow n\,(\mathrm{CH_2O}) + n\mathrm{O_2}. \quad (9.8)$$

Из него мы видим, что в растениях в результате взаимодействия углекислого газа и воды образуются углеводы и выделяется кислород. Это, конечно, грубое упрощение, которое, однако, позволяет нам уяснить существенные моменты метаболизма растений. Для протекания такого процесса необходимы углекислый газ и вода (первый обычно заимствуется из воздуха, где его содержится около 0,03%). Как показывает

уравнение (9.8), на каждую поглощенную молекулу углекислого газа растение выделяет одну молекулу кислорода. Молекулы углеводов участвуют в цепи химических превращений, в результате которых образуются органические вещества, необходимые для роста и развития растений. Простейшей формой углевода $n(CH_2O)$ является *глюкоза* $C_6H_{12}O_6$ ($n = 6$). В какой-то степени она присутствует в растениях в чистом виде, но чаще всего входит как составная часть в более сложные молекулы жиров, белков и других веществ с высоким содержанием углеводов, щедро представленных в живых растениях. Не останавливаясь на рассмотрении всех этих последовательных преобразований, заметим лишь, что роль катализаторов в них играют очень сложные белковые соединения, называемые *ферментами*. Энергия, требующаяся для осуществления указанных «строительных» операций, получается при окислении некоторых простейших углеводов с образованием снова углекислого газа CO_2 и воды. Эффективность таких операций зависит от содержания в почве микроколичеств определенных элементов. От них иногда зависит, будет ли урожай щедрым или плохим.

Пути движения веществ, участвующих в процессе (9.8), исследовались методом радиоактивных, или «меченых», атомов. Установлено, что кислород выделяется только из воды, но не из углекислого газа. Таким образом, процесс, по существу, сводится к разложению молекул воды, то есть к реакции (9.1). В первых разделах этой главы мы видели, что энергия одного фотона видимого света недостаточна для осуществления подобной реакции и поэтому нужны вещества, которые могут накапливать энергию поглощаемых фотонов до требуемого уровня. В зеленых растениях эту роль выполняет порфирин магния ($MgN_4C_{55}H_{72}O_5$), известный как *хлорофилл-А*, сосредоточенный в *хлоропластах* растений; он поглощает свет во всем видимом спектре, но особенно сильно в красной области. Отсутствие красного цвета в отраженном растениями свете и дает резко выраженный зеленый цвет. Полагают, что это вещество выполняет каталитическую функцию, переходя в одно из своих триплетных состояний.

Энергия, необходимая для протекания реакции фотосинтеза, велика. С учетом энергии, затрачиваемой на восстановление углекислого газа, она достигает в целом около 5 эВ на единицу синтезируемого углевода. Однако этот процесс может происходить под действием радиации с длинами волн, лежащими за пределами красного конца видимой области спектра, которым соответствуют энергии фотонов лишь около 1,7 эВ. Такие фотоны не учитываются при определении полного к. п. д. процесса, тем не менее их роль в этом процессе пока остается неясной. Большинство исследователей считают, что для синтезирования одной молекулы углевода требуется около восьми фотонов красного света. Если это так, то потребляемая при этом энергия достигает примерно 14 эВ. Поскольку запасенная энергия составляет около 5 эВ, то общий к. п. д. процесса накопления энергии при облучении красным светом равен 35%. Предполагается, что потери возникают на различных стадиях фотосинтеза, большинство из которых принято считать до некоторой степени необратимыми.

В гл. 8 мы видели, как определяется общий к. п. д. использования солнечной энергии в простейшем квантовом процессе. Если порог фотосинтеза соответствует самому краю красного конца спектра ($\lambda \approx 0{,}7$ мкм), то значительная часть солнечной энергии (около 55%), приходящаяся на инфракрасную область спектра, остается неиспользованной. Более того, если процесс фотосинтеза в чем-то подобен фотоэлектрическому процессу, то и короткие волны в нем не участвуют. Для простоты предположим, что к фотосинтезу применим рассмотренный в гл. 8 метод расчета к. п. д. фотоэлектрического процесса, учитывающий граничную длину волны (там мы получили к. п. д. = 35%). Тогда максимальный к. п. д. использования растениями солнечной энергии оказывается не более 11%. Близкое к этому значение к. п. д. получают при выращивании растений в искусственных условиях, тогда как для естественных условий развития растений к. п. д. на порядок ниже, около 1%. Это и есть предел, к которому стремятся ученые, занимающиеся растениеводством и биологией почвы, и который дает нам надежду, что земля еще сможет нас прокормить.

Выращивание растений с целью получения энергии

В этой книге нас интересует в основном возможность преобразования солнечной энергии. Мы можем извлекать энергию, накопленную в органических материалах растущих растений, путем их сжигания или использования какого-нибудь другого процесса их разложения. Так, при сжигании в воздухе мы получаем около 6 кВт·ч тепловой энергии на каждый килограмм сжигаемого растительного материала. При благоприятных условиях, например во влажном тропическом климате, такая культура, как растущий круглый год сахарный тростник, дает годовой урожай сухого органического продукта до 10 кг с 1 м^2 поверхности. При сжигании его в качестве топлива можно получить до 60 кВт·ч/м^2 энергии. При годовой интенсивности солнечной радиации около 2000 кВт·ч/м^2 (см. гл. 2) это соответствует к. п. д. $\approx 3\%$.

Однако достигнуть такого максимального (теоретического) значения к. п. д. в реальных условиях даже при выращивании растений, специально предназначенных для топлива, невозможно. Во-первых, вследствие затенения одних растений другими при частой посадке к. п. д. изменяется в широких пределах. Другие причины носят еще более глубокий характер. Одна из них связана с углекислым газом. На открытом воздухе углекислый газ CO_2 поступает к листьям растений благодаря перемешиванию воздушных масс. Этот процесс определяется характером потоков воздуха и значительно ускоряется при ветре. В спокойных условиях перемешивание происходит лишь в результате диффузии и тепловой конвекции потоков воздуха, а этого, как правило, далеко не достаточно. К ускоренному выращиванию растений сейчас проявляется огромный интерес. Для ежегодного получения 10 кг сухого топлива с 1 м^2 поверхности необходимо почти такое годовое количество CO_2, которое соответствует ежедневному потреблению в среднем около 0,015 м^3 CO_2 с 1 м^2 поверхности. Это означает, что в период наибольшего роста растения ежедневная норма потребляемого ими CO_2 составляет не менее 0,04 м^3 на 1 м^2 поверхности. Если учесть, что концент-

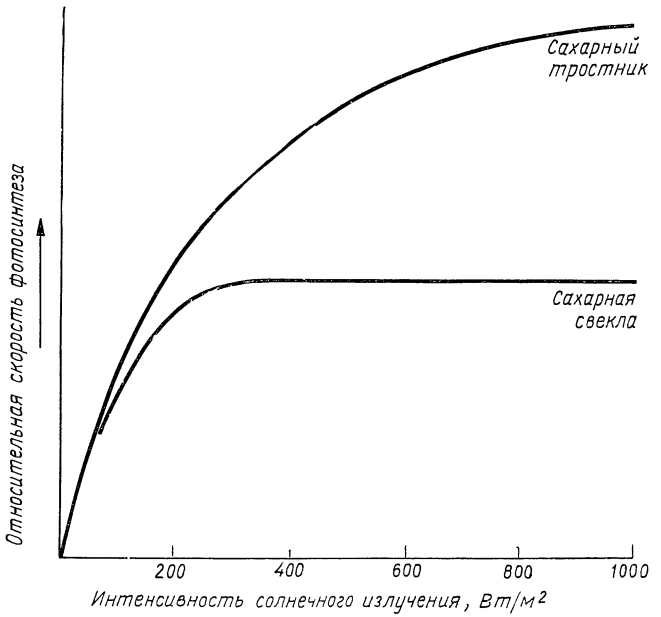


Рис. 80. Эффект светонасыщения у высших растений.

рация CO_2 в атмосфере порядка 0,03%, то для обеспечения необходимых темпов роста растения понадобилось бы использовать весь CO_2, содержащийся в воздухе от поверхности земли до высоты 130 м. Приведенные цифры показывают, что запасов CO_2 не всегда оказывается достаточно для поддержания высоких темпов роста растений.

Однако, если даже в экспериментальных условиях мы обеспечим необходимый запас CO_2, то это еще не решит проблемы. Установлено, что скорость фотосинтеза не пропорциональна скорости поступления солнечной энергии (рис. 80). Для ряда растений скорость фотосинтеза, достигнув при определенном уровне освещения некоторого значения, в дальнейшем стабилизируется. Полагают, что это «светонасыщение» обусловлено одной или несколькими стадиями процесса фотосинтеза, в которых при повышении интенсивности радиации скорость поступления фотонов оказывается выше скорости использования их энергии

для дальнейшего построения углеводородной цепи. Поскольку это явление наблюдается лишь для некоторых видов растений, следует ожидать, что путем соответствующего отбора и разведения в любой области земного шара можно выращивать такие растения, которые имеют наибольшую скорость фотосинтеза.

Скорость фотосинтеза заметно зависит также от температуры и влажности. У растений, приспособленных к условиям значительной солнечной радиации, устойчиво отмечается высокая скорость роста при температурах свыше 30° С, но при отсутствии осадков их развитие задерживается. Растения поглощают углекислый газ из воздуха через поры листьев, называемые устьицами. В сухой атмосфере через поры испаряется много воды, но наступает момент, когда устьица закрываются, что препятствует дальнейшему обезвоживанию и увяданию растений. В свою очередь, это ограничивает поглощение CO_2 и, следовательно, задерживает рост. Установлено, что во влажном тропическом климате темп роста растений наиболее высок. В таких условиях ежедневное количество получаемого растительного горючего материала достигает 40 г на 1 м^2 открытой поверхности.

Подобные урожаи стали возможны в результате накопления опыта интенсивного ведения хозяйства на протяжении десятилетий и даже столетий. Мы уже видели, что достижение максимального теоретического значения к. п. д. процессов фотосинтеза позволило бы повысить урожайность растений в 3—4 раза по сравнению с современным уровнем. Как реализовать эти резервы, пока не ясно. Однако предполагается, что при наиболее интенсивных способах культивирования высокопродуктивных растений уже в ближайшее время можно было бы ежегодно получать около 20 кг/м^2 горючего материала. Это эквивалентно примерно 6% поглощенной солнечной энергии. С учетом потерь при сжигании, на парообразование, на преобразование в механическую и электрическую виды энергии, даже при использовании для этих целей самой современной техники мы могли бы получить в виде работы около 2% поглощенной растениями солнечной энергии. Но оправданы ли наши затраты при столь разочаровывающих результатах?

Выращивание низших растений

Неоднократно предпринимались, особенно в Японии и США, серьезные попытки крупномасштабного производства органического материала в искусственных условиях, в которых на протекание процессов фотосинтеза можно оказывать большее воздействие. Исследования проводились преимущественно с крошечными одноклеточными растениями — разновидностями *морских водорослей.* Эти удивительные, отличающиеся высокой продуктивностью организмы широко распространены в прудах. При сильном солнечном освещении они придают воде темно-изумрудный цвет. В естественных водоемах находятся в огромных количествах такие их разновидности, как хлорелла и сценедесмус. Каждый такой одноклеточный организм в отдельности имеет характерную овальную форму длиной около 10 мкм. При выращивании в атмосфере CO_2 и в благоприятной питательной среде клетка в процессе митоза делится на две, а иногда на четыре дочерние клетки в течение примерно 12 ч, то есть за один световой день. Скорость размножения настолько велика, что через месяц из каждой клетки образуется до 10 млрд. клеток. Для всех видов исследованных до сих пор морских водорослей до некоторой степени характерно рассмотренное насыщение в процессе фотосинтеза, которое обычно наступает при интенсивности радиации от 50 до 100 Вт/м^2. Используя медленные стадии фотосинтеза, которые протекают и в темноте, путем чередования периодов экспозиций при высокой и при низкой интенсивности освещения, в этих организмах можно устранить эффект светонасыщения. В «темные» периоды реакции синтеза продолжаются за счет энергии, запасенной в «светлые» периоды. Среднюю интенсивность освещения живущих в воде клеток можно уменьшить, перемешивая их так, чтобы отдельные водоросли сначала подвергались воздействию освещения вблизи поверхности, а затем погружались в глубину.

Водоросли, живущие в такой среде, нужно обеспечивать питательными солями, которые обычные растения получают из почвы. Чтобы создать условия для протекания химических реакций, необходимо также

пропускать через воду углекислый газ или обогащенный им воздух. Для непрерывного развития водорослей в воду добавляют основные питательные соли (нитраты, фосфаты, сульфаты и небольшие, но достаточные количества таких элементов, как железо и магний), причем со скоростью, соответствующей скорости потребления их растениями. При крупномасштабном выращивании водорослей иногда среду непрерывно подпитывают солями, извлеченными из сточных вод. Поскольку отходы, поступающие через бытовую канализацию, содержат входившие в состав пищи органические вещества, они вполне подходят для питания растений, по крайней мере в период подкормки. Подобно тому как эти отходы применяют в ряде областей для удобрения почвы, их использовали и для подкормки водорослей.

Все сточные воды содержат *бактерии*, а сосуществование водорослей и бактерий благоприятно для тех и других. Бактерии также являются микроорганизмами, часто даже более мелкими, чем одноклеточные водоросли. Большинство бактерий развивается в кишечниках людей и животных и выделяется вместе с экскрементами. В почве, воде и воздухе обитает бесчисленное множество других бактерий. Их основные экологические функции сводятся к обеспечению растений и животных азотсодержащими веществами в удобном для них виде; они образуют эти вещества, захватывая азот из атмосферы или превращая в более простые соединения сложные органические вещества, содержащиеся в остатках растений и отходах животных. Бактерии, содействующие росту растений, относят к типу *аэробных*, или потребляющих кислород, бактерий. Они превращают содержащиеся в сточных водах органические вещества в другие, необходимые для роста водорослей, а именно в углекислый газ, воду, нитраты, фосфаты и другие питательные вещества. В свою очередь водоросли выделяют необходимый для бактерий кислород. Колонии сосуществующих таким образом бактерий и водорослей выращивались круглогодично в открытых искусственных резервуарах в различных частях земного шара. Даже в северной Европе результаты ускоренного выращивания водорослей на открытом воздухе были весьма успешными.

Непрерывное выращивание водорослей с использованием отходов и одновременная очистка воды от нечистот и вредных примесей призваны сыграть важную роль в жизни людей. Действительно, этот способ обеспечивает разложение и повторный синтез органических веществ, которые иначе все равно разлагаются естественным образом. Мы не можем даже в простейшем виде дать уравнения процессов, приводящих такую систему к устойчивому состоянию, поскольку при этом необходимо учитывать концентрацию и характер отходов, активность бактерий и водорослей, интенсивность солнечной радиации, температуру и другие факторы. Однако возможности такой системы проверены во многих достаточно солидных экспериментах. Урожай водорослей можно периодически собирать, поддерживая их концентрацию приблизительно постоянной. Водоросли получают, пропуская среду, в которой они обитают, через *центрифугу* (напоминающую центрифугу бытовой стиральной машины). Было показано, что отношение энергии, которую можно выделить из высушенных водорослей, к количеству солнечной энергии, падающей на резервуары, где выращиваются водоросли, приближается к 8%, то есть к. п. д. такой системы имеет величину, близкую к максимальному теоретическому значению. Это соответствует примерно 30 кг/м^2 сухого материала за год, но при продолжительной работе системы эта величина падает до 10—15 кг/м^2, то есть приближается к годовой продуктивности более высокоорганизованных растений.

Получение энергии из растений

Большинство опытов по выращиванию водорослей и других растений проводилось с целью получения из них пищевых продуктов. Водоросли хорошо себя зарекомендовали в этом качестве. По относительному содержанию белков, жиров и витаминов водоросли превосходят почти все другие растительные продукты. Возможно, вследствие малых размеров и водной природы водоросли гораздо легче усваиваются в организме животных, чем ткани высших растений. Было установлено, что высушенные водоросли по питательным свойствам приближаются к дрожжам и некото-

рым богатым белками продуктам животного происхождения, таким, как сливки и яйца. Вот почему водоросли исследуются как потенциально возможные новые источники белков, недостаток которых все острее ощущается на земном шаре. Однако здесь водоросли интересуют нас как потенциальные источники энергии, и по этим показателям они оказываются несколько предпочтительнее высших растений.

Один из недостатков использования водорослей состоит в том, что их приходится выделять из слабой водной суспензии, а на это требуется энергия. Даже выделенные из водной среды организмы на 75% состоят из воды, поэтому для хранения и транспортировки их необходимо высушивать. И снова нужна энергия; даже при сушке на солнце потребляется энергия потенциального источника. Высушенные водоросли представляют собой кусочки материала диаметром около 1 мкм каждый. В прошлом к сжиганию такого мелкого порошка не предъявляли каких-то особых требований — казалось, что этот процесс не представляет значительной технической трудности. Но для подачи подобного топлива в топку парового котла, в газовую турбину или тепловую машину необходимо приготовить смесь порошка с воздухом.

Вместо сушки иногда осуществляют *разложение* водорослей в закрытых камерах без доступа кислорода под воздействием другого вида бактерий. Такие бактерии, живущие в бескислородной атмосфере, называются *анаэробными*. Подобный метод широко применяется при обработке сточных вод, и его технология достаточно хорошо отработана. Массу, состоящую из частично обработанных сточных вод и водорослей, помещают в закрытые емкости, где органические вещества почти полностью разлагаются, образуя богатый нитратами и фосфатами водный раствор (используемый для удобрения) и горючий газ. Этот газ более чем на 60% состоит из метана CH_4, простейшего члена парафинового ряда. Хотя точка кипения его значительно ниже, чем у родственного ему пропана C_3H_8 (последний широко используется в качестве топлива), его можно сжижать, хранить и легко транспортировать. Один из возможных вариантов устройства для

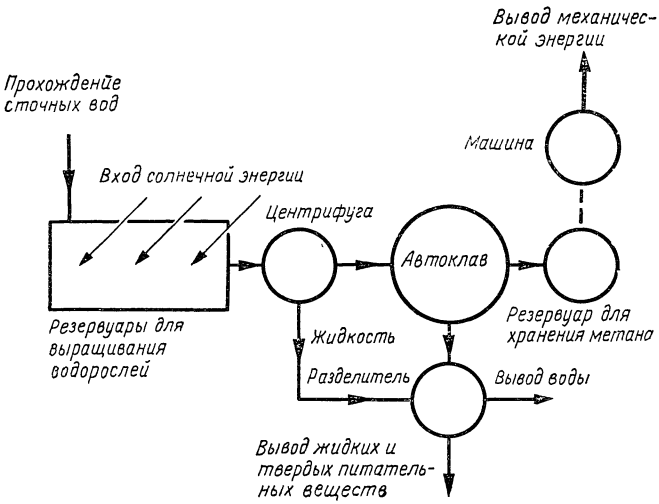


Рис. 81. Энергетическая установка с использованием микробиологической системы.

производства энергии на основе рассмотренной методики схематически показан на рис. 81.

Подобное получение метана считается наиболее простым и дешевым методом использования водорослей в качестве топлива. Возможен и другой процесс — преобразование углеводов в спирт с помощью дрожжей; он описывается уравнением *Гей-Люссака*:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 3CO_2. \qquad (9.9)$$

Названные способы применимы и для более высокоорганизованных растений. Однако к. п. д. преобразования солнечной энергии, например в электрическую, через промежуточную стадию получения растительного вещества оказывается очень низким по сравнению с к. п. д. других методов преобразования энергии, рассмотренных в предыдущих главах. Как при выращивании водорослей в резервуарах, так и при возделывании плантаций более высокоорганизованных растений ежедневное количество полученной энергии не превысит 70 Вт/м^2. В следующей, последней главе нашей книги мы обсудим вопрос о месте, которое может занять каждая из рассмотренных энергетических систем в общем энергобалансе земного шара с учетом потребностей в новых источниках энергии.

10. Перспективы получения солнечной энергии

Мир, в котором из ничего не бывает ничего.

Артур Хью Клуф (1819—1861)

Солнечную энергию часто считают беспредельной, поскольку она почти повсюду без всякого участия с нашей стороны льется мощными потоками. Многих удивляет, почему же этот огромный источник не обеспечивает нас в изобилии дешевой энергией. Но она, как и энергия других источников, недешева. Любое получение энергии связано с материальными затратами, а затраты на получение солнечной энергии особенно велики. В этой главе мы коротко остановимся на некоторых особенностях солнечной энергии, обусловливающих ее дороговизну, и оценим перспективы ее использования.

Интенсивность солнечной радиации

Одним из препятствий широкому использованию солнечной энергии является низкая интенсивность солнечной радиации даже при наилучших атмосферных условиях.

В гл. 2 мы узнали, как подсчитать интенсивность солнечного излучения в любой точке земного шара для любого времени суток и года. Около полудня в тропиках на освещенной поверхности коллектора она достигает 1 кВт/м^2. Но и в этих идеальных условиях многие из рассмотренных нами устройств, предназначенных для преобразования солнечной энергии в другие более удобные для практического применения виды, дают на выходе не больше 150 Вт/м^2. Ежедневное же количество получаемой таким способом энергии не превышает 0,5—1 кВт·ч/м^2. Необходимость использования коллекторов огромных размеров делает такой

способ преобразования неэкономичным и ограничивает его возможности удовлетворением относительно небольших энергетических потребностей местного значения. В наиболее развитых странах ежедневная энергетическая потребность на душу населения составляет около 50 кВт·ч (см. гл. 1). Следовательно, чтобы обеспечить энергией город с населением порядка 100 тыс. человек даже при наиболее эффективном методе преобразования солнечной энергии, нужны коллекторы общей площадью около 5 км^2. Подобных размеров установка заняла бы всю территорию такого города (даже при плотности застройки, соответствующей прежним образцам градостроительства). При размещении коллекторов вокруг такого города они образовали бы кольцо шириной в сотни метров. Во многих частях земного шара с менее благоприятными климатическими условиями скорость потребления энергии превышает скорость поступления солнечной энергии на всей земной поверхности, включая и необитаемые районы.

Предлагались проекты размещения солнечных коллекторов вдоль шоссейных и железных дорог, то есть там, где они не помешают использованию солнечной радиации в сельском хозяйстве. Казалось бы, в развитых странах таким путем можно получить значительные количества энергии. Возможно, подобные проекты и будут когда-нибудь реализованы, однако в обозримом будущем энергию в этих странах будут по-прежнему получать другими методами, без использования солнечного излучения.

В развивающихся же аграрных странах с их более скромными энергетическими запросами перспективы применения солнечной энергии весьма разнообразны. Солнечные энергоустановки в таких условиях могли бы успешно конкурировать с источниками энергии других типов. Известен опыт успешного применения здесь солнечных водонагревателей. Как мы видели в гл. 5, даже в развитых странах солнечный водонагреватель мог бы полностью обеспечить горячей водой обычный жилой дом, причем необходимая площадь коллектора оказывается несколько меньше крыши дома. Миллионы подобных устройств успешно прошли испытания.

Существует бесчисленное множество хозяйственных задач местного значения, которые из-за отсутствия энергии в настоящее время либо совсем не решаются, либо выполняются с применением ручного труда или с помощью животных; их осуществление оказалось бы вполне возможным с использованием солнечных установок, имеющих коллекторы площадью несколько десятков или сотен квадратных метров. Внедрение таких устройств имеет важное экономическое значение, хотя, как любое новое дело, и сопряжено с определенными трудностями, которые мы кратко рассмотрим несколько позже. Основное препятствие к широкому практическому использованию солнечной энергии заключается в значительных сезонных и суточных колебаниях интенсивности солнечной радиации и отсутствие ее в течение большей части суток.

Непостоянство интенсивности солнечной радиации относится к числу важнейших ее особенностей, с которыми приходится считаться при использовании солнечной энергии. С помощью рассмотренных в гл. 2 методов мы можем оценить дневные изменения интенсивности солнечного излучения в условиях безоблачной атмосферы и выделить период времени, на протяжении которого солнечная радиация практически отсутствует. В ряде случаев некоторые колебания выходной мощности солнечной установки вполне допустимы. Например, при использовании преобразователей солнечной энергии для орошения засушливых районов непостоянство солнечной радиации не только не является серьезным препятствием к применению подобных установок, но и достаточно хорошо согласуется с запросами потребителя. Но такие случаи редки, гораздо чаще требуется обеспечить постоянный уровень выходной мощности установки. Тогда избыточную энергию, поступающую днем, необходимо аккумулировать, чтобы затем использовать ее в ночное время. Некоторые примеры такого построения систем с солнечными установками мы уже рассматривали в гл. 5.

Как мы видели в гл. 2, большая продолжительность летнего дня в более высоких широтах в известной мере компенсирует меньшую высоту солнца,

поэтому в значительной полосе широт дневная инсоляция в летнее время практически постоянна. Однако, как показывают измерения интенсивности солнечного излучения, летом возможны существенные колебания инсоляции даже на одной и той же широте. Это обусловлено облачностью. Известно, что в определенных областях земного шара, в частности в обширных прибрежных районах, облачность значительно выше, чем в глубине континента, а ее влияние трудно учесть вследствие различных размеров облаков и изменения протяженности облачности в целом. Фотографии, полученные с искусственных спутников Земли, показывают, что образование облачности в любом районе земного шара связано с движением воздушных масс. В любой конкретной местности изменения солнечной радиации зависят от мельчайших структурных деталей облачности, которые в лучшем случае можно предсказать лишь на основе статистической обработки результатов многолетних наблюдений.

Исследование абсорбционных характеристик воды (см. рис. 77) приводит к выводу, что облака поглощают лишь незначительную долю солнечной энергии (в противном случае, они испарились бы). Часть падающей на облако радиации рассеивается содержащимися в нем мельчайшими капельками воды, остальная — проходит через облако. Радиация частично рассеивается вверх, но в основном рассеянное излучение вместе с прямой составляющей достигает нижних слоев облака. Таким образом, общее количество попадающей на землю радиации зависит от толщины облака и размера водяных капель и может составлять от 10 до 100% падающей энергии. По этой причине невозможно установить простую зависимость инсоляции от степени облачности c (если оценивать ее по наблюдениям с Земли). Многие попытки определить связь между уровнем инсоляции и особенностями погоды в той или иной местности оказались почти безуспешными. На рис. 82 показана простейшая приблизительная зависимость инсоляции от степени облачности (под c понимается часть занятого облаками небесного пространства без учета толщины и типа облачности). Такая усредненная, пригодная для

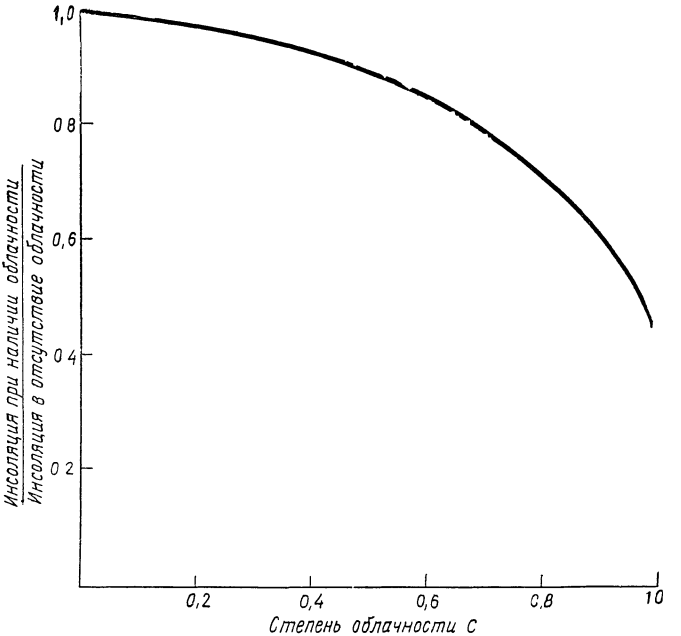


Рис. 82 Влияние облачности на инсоляцию

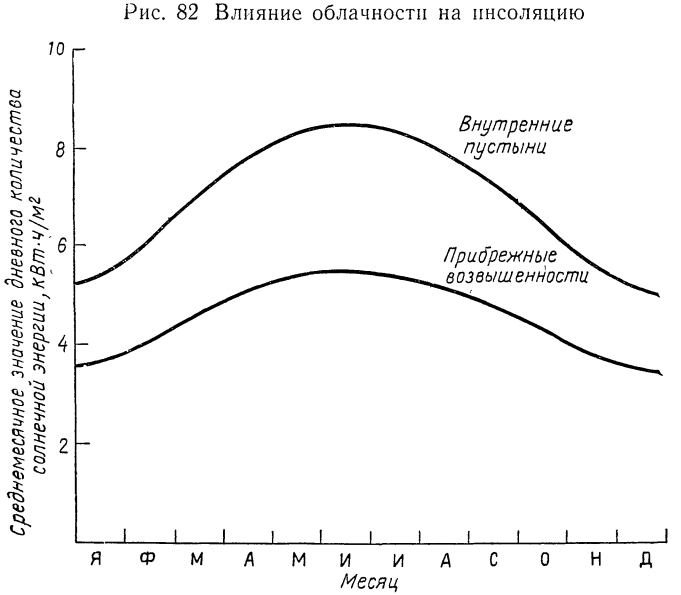


Рис. 83. Годовое изменение инсоляции, $\varphi = 23{,}5°$ с. ш.

ориентировочных расчетов кривая достаточно точно описывается уравнением

$$f = 1 - \frac{1}{2} c^2. \qquad (10.1)$$

С увеличением облачности инсоляция уменьшается незначительно, поскольку основная часть рассеянной радиации вместе с прямой составляющей солнечного излучения достигает поверхности земли. Даже в условиях сплошной облачности на землю в среднем передается около половины падающей солнечной радиации.

Тем не менее облачность оказывает довольно существенное влияние. Даже среднемесячное значение инсоляции иногда существенно изменяется от одного района к другому и от года к году. На рис. 83 представлены кривые наибольших и наименьших месячных значений инсоляции для тропических районов (широта 23,5°). Поскольку колебания интенсивности солнечной радиации достигают 50% и более, прежде чем приступить к созданию какой-либо системы с использованием солнечной энергии, в районе установки предполагаемой системы необходимо провести тщательные и продолжительные наблюдения климатических условий. Такие наблюдения должны предшествовать широкому внедрению в практику солнечных энергетических систем.

Требования к аккумуляторам энергии

Возможность аккумулирования энергии следует предусматривать во всех случаях, когда солнечная энергосистема предназначается для обогрева или охлаждения зданий, непрерывного энергоснабжения потребителей и т. д., то есть всегда, когда изменение нагрузки не совпадает с изменением режима работы источника. В районах пустынь, где бóльшую часть года безоблачно, достаточно было бы обеспечить накопление лишь суточного запаса энергии, поскольку погодные условия изо дня в день почти не изменяются. Такой сравнительно малой емкости аккумулятор выполняет роль источника энергии, когда (ночью) действие естественного источника прекращается. Боль-

шинство солнечных систем для обогрева зданий играет вспомогательную роль в общей системе отопления, поскольку неэкономично строить солнечную отопительную систему из расчета на самые пасмурные и холодные дни года, так как большую часть года такая энергосистема работала бы со значительной недогрузкой. Очевидно, что в таком случае необходимо выяснить соотношение между колебаниями интенсивности солнечной радиации, изменениями нагрузки, емкостью вспомогательного источника и количеством запасаемой энергии. Основой для расчета такой системы должны служить экономические соображения, и здесь мы не можем заниматься ее глубоким исследованием. Показатели подобной системы зависят от различных факторов, в том числе от местной стоимости топлива, материала, установки и затрат труда, изменения температуры окружающего воздуха и силы ветра на протяжении года. Некоторые из них, например инсоляцию для данной местности, невозможно предсказать точно, в этом случае пользуются данными ее регистрации за продолжительный период времени. При расчете системы следует исходить не столько из отдельных наибольших и наименьших зарегистрированных значений инсоляции, сколько из продолжительности периодов максимальной и минимальной инсоляций. На рис. 84 показан один из способов представления данных, полученных при регистрации интенсивности солнечной радиации для указанных целей. По горизонтальной оси здесь отложена продолжительность периодов в данном сезоне на определенной широте, в течение которых наблюдаемый уровень радиации был ниже некоторого выбранного значения.

Располагая такими данными, разработчики могут соответственно подбирать различные элементы системы: преобразователь энергии, вспомогательную установку (если такая существует) и аккумулирующее устройство. В главах 4 и 5 мы кратко рассмотрели некоторые методы аккумулирования тепловой энергии Как мы знаем, ее, в частности, можно запасать путем увеличения внутренней энергии соответствующих веществ. Известно, что для изменения физического состояния вещества, например для его плавления, при определенной температуре необходимо

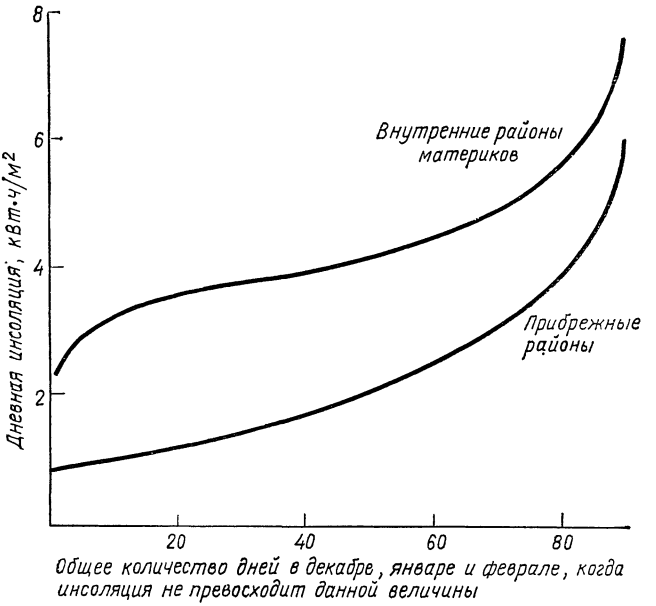


Рис. 84. Кривые распределения периодов с низкой инсоляцией, $\varphi = 40°$.

затратить энергию (часто значительную). Такой метод позволяет накапливать примерно до 50 Вт·ч энергии на 1 кг вещества. Тем не менее для накопления даже довольно скромного количества энергии порядка МВт·ч требуются хранилища (для содержания материала) больших размеров. Кроме того, в такой системе происходят непрерывные потери энергии, обусловленные рассеянием тепла в окружающее пространство.

Если на выходе преобразователя мы получаем механическую энергию, то ее наиболее удобно использовать для приведения в действие насосов (аккумулирование энергии с помощью насосов), которые перекачивают воду в резервуар, расположенный на определенной высоте. При необходимости эти запасы воды можно использовать для орошения земли или вращения турбин, в последнем случае мы вновь получаем механическую работу. Некоторые из таких систем

«насосного аккумулирования» уже использовались в различных странах с целью накопления избыточной энергии, в частности от ядерных реакторов. Эти реакторы, как и многие другие устройства, работают наиболее эффективно при номинальной нагрузке. При падении нагрузки, например ночью, экономично запасать энергию, чтобы затем при повышении нагрузки воспользоваться этими запасами. Водные аккумуляторы солнечной энергии оказываются очень громоздкими, поскольку вода занимает значительный объем. При подъеме 1 кг воды на высоту 1 м необходимо совершить работу по преодолению земного тяготения, которая равна примерно 10 Дж, а чтобы поднять 3600 кг воды на высоту 100 м величина такой работы составляет ≈ 1 кВт·ч. Эту энергию мы вновь получаем при понижении уровня воды. Конечно, подобный процесс нельзя считать полностью обратимым: накачка воды и вращение водяной турбины (в принципе и то и другое может осуществлять одна машина) нельзя отнести к разряду идеальных процессов; кроме того, следует учитывать потери на трение в трубопроводе, по которому подается вода. Тем не менее можно рассчитывать на восстановление до 60% от первоначально затраченной энергии, однако в некоторых случаях, например при достаточно длинном трубопроводе, процент восстановления оказывается значительно ниже. Подобные аккумуляторы весьма дороги и размещают их, как правило, на возвышенностях. Как и во всех аналогичных резервуарах, вода в них непрерывно испаряется. В условиях сухого климата, особенно при наличии ветра, под влиянием которого пары воды перемещаются над водной поверхностью резервуара, потери на испарение ежедневно приводят к снижению уровня воды на несколько сантиметров. Это означает, что при подъеме воды на высоту 100 м ежедневно на каждые 100 м^2 поверхности резервуара 1 кВт·ч работы затрачивается только на то, чтобы скомпенсировать потери на испарение. Напрашивается вопрос, экономично ли использование воды в данном случае только для аккумулирования энергии.

Метод насосного аккумулирования энергии применим также и в солнечных установках с электрическим выходом. Здесь на выходе преобразователя можно

подключить электромеханическую систему двигатель — насос, которые в обратном режиме выполняют функции турбины и генератора соответственно. Несмотря на весьма высокую стоимость подобной системы, последняя вполне сопоставима с другими методами накопления электрической энергии. Наиболее целесообразно, конечно, непосредственное накопление энергии в электрохимических элементах, или аккумуляторах, в которых эта энергия затрачивается на разделение зарядов в химической системе, а при их воссоединении мы вновь ее получаем. Такие аккумуляторы имеют высокий к. п. д., но по своим размерам и стоимости они совершенно непригодны для накопления энергии в количествах, превышающих несколько кВт·ч. Так, в Англии автомобильные аккумуляторные батареи емкостью около 0,5 кВт·ч стоят около 20 долл.

Исследовался также метод накопления энергии, основанный на электролизе воды с образованием водорода и кислорода. Полученные газы можно собирать и хранить продолжительное время, запасенную в них энергию мы можем затем получить при их соединении, например в топливном элементе. В последнем случае восстанавливается до 60% энергии, затраченной при электролизе. Этот способ позволяет избежать потерь энергии в процессе ее хранения. Говоря о процессе разложения воды, мы отмечали, что для разделения одной молекулы воды на ее элементы с высвобождением одной молекулы водорода необходимо около 3 эВ энергии. Поскольку 1 кВт·ч соответствует $2{,}3 \cdot 10^{25}$ эВ, то в идеальном случае такая электролитическая система должна производить около $7{,}5 \cdot 10^{24}$ молекул водорода на 1 кВт·ч затраченной энергии. При обычной температуре это количество водорода занимает объем около 0,25 м^3. Следовательно, хранить водород в количествах, соответствующих нескольким МВт·ч энергии, необходимо в условиях высокого давления. При таком способе аккумулирования энергии важным фактором является стоимость компрессора и сосудов для хранения газа. Собирать кислород, полученный в процессе электролиза, вряд ли целесообразно, так как при необходимости его можно получить из воздуха.

В гл. 4 мы рассматривали устройство типа солнечного бассейна, в котором и получение и накопление энергии осуществляется с применением одной и той же жидкости. Такая система представляет интерес для крупномасштабного производства энергии, поскольку стоимость единицы получаемой таким путем энергии почти не зависит от размеров устройства. Но это устройство относится к разряду низкотемпературных систем, к. п. д. которых ограничен законами термодинамики.

Рассмотренные в книге фотобиологические системы относятся к числу таких систем, в которых процессы преобразования и накопления энергии происходят одновременно. Высушенные водоросли можно долго хранить и сжигать по мере надобности. Для получения горючего газа, который допускает длительное хранение, все органическое вещество можно подвергнуть разложению с помощью бактерий. Однако не следует думать, что здесь не требуются материальные затраты — и для высушивания на солнце, и для бактериологической обработки вещества необходимы существенные капиталовложения. Наибольший интерес при исследовании фотобиологических систем представляет изучение возможностей краткосрочного хранения энергии, которые открываются в период роста растений. Уборку урожая водорослей можно производить непрерывно, в соответствии с ежедневным приростом их массы. Ежедневная скорость прироста высших растений, определяемая приростом массы их ствола, весьма незначительна. В этих случаях возникают кратковременные значительные расхождения между приростом запасов органического вещества и его потреблением, но долговременная устойчивость системы в целом при этом не нарушается.

Экономические факторы

Первая солнечная опреснительная установка, созданная *Вильсоном*, начала действовать в Чили в 1883 г., а через год *Бернье* и *Мушо* предложили конструкцию парового двигателя с использованием солнечной энергии. И только спустя почти столетие широкое распространение получили простейшие солнечные

водонагревательные устройства. Другие системы, основанные на использовании солнечной энергии, до сих пор находятся в стадии экспериментальных исследований. Причины столь затянувшегося процесса изучения вопросов, связанных с применением солнечной энергии, нетрудно установить. Отмеченный период ознаменовался интенсивной разработкой и эксплуатацией ископаемых видов топлива, что в большинстве случаев оказывалось экономически выгодным. Теперь же начинают появляться многочисленные сообщения, свидетельствующие о конкурентоспособности солнечных энергетических систем.

Мы уже познакомились с методами оценки эффективности различных систем. Все они экспериментально хорошо проверены, поэтому приведенные оценки их качества достаточно надежны. Более того, аргументы против использования преобразователей солнечной энергии вследствие низкого к. п. д последних никогда нельзя было считать убедительными. Некоторые из рассмотренных нами устройств до последнего времени невозможно было создать, тогда как простые тепловые машины с плоскими коллекторами могли бы использоваться в течение всего почти столетнего периода со времени появления первой солнечной установки. Во всяком случае, по к. п. д. они почти не уступали бы тепловым машинам, работающим на других источниках энергии (хотя их к. п. д. был бы, безусловно, низким). В табл. 5 приведены значения к. п. д. различных типов систем с использованием солнечной энергии, которые вполне достижимы в настоящее время.

Столь значительное различие в к. п. д. систем совсем не означает, что какой-то определенной системе можно отдать предпочтение перед другими. Поскольку сама по себе солнечная энергия ничего не стоит, то основным критерием при выборе той или иной системы оказывается стоимость ее конструкции, которая для перечисленных систем изменяется в широких пределах. Здесь невозможно провести точное сопоставление этих систем, поскольку показатели каждой из них зависят от целого ряда факторов, а также условий эксплуатации системы и ее предполагаемого местоположения. Стоимость единицы производимой энергии

Таблица 5

К. п. д. различных преобразователей солнечной энергии в механическую и электрическую

Тип преобразователя	К. п. д., %
Тепловые машины с плоскими коллекторами	3—5
Тепловые машины с концентраторами	15—25
Термоионные генераторы с концентраторами	20—30
Термоэлектрические генераторы с плоскими коллекторами	0,5—1
Термоэлектрические генераторы с концентраторами	3—5
Фотоэлектрические генераторы	3—16
Фотобиологические системы на основе растений	1—2
Фотобиологические системы на основе микроорганизмов	2—3

для каждой из систем также широко варьируется, поэтому относительная стоимость этих устройств будет зависеть от спроса на энергию.

Повышение к. п. д. преобразователей солнечной энергии в большинстве случаев связано с применением концентрирующих зеркал и соответствующих систем слежения за кажущимся движением солнца. Стоимость зеркал и приспособлений для управления ими может достигать $^3/_4$ общей стоимости установки. Эффективная система с использованием зеркал для крупномасштабного производства энергии должна стоить не менее 200 долл. в пересчете на квадратный метр поверхности коллектора диаметром до нескольких метров. С увеличением диаметра коллектора вдвое его стоимость, приведенная к единице поверхности, возрастает на 30%.

Эти особенности систем с концентраторами значительно ухудшают их экономические показатели, поскольку стоимость плоского коллектора независимо от его размеров составляет лишь десятую часть от стоимости концентратора. Разница в стоимости обусловлена особыми требованиями в отношении точности геометрической формы концентратора, точности управления его положением и его устойчивости против ветра. В результате при использовании концентраторов стоимость устройств возрастает быстрее, чем их

к. п. д. Поэтому производство энергии с помощью устройства с плоским коллектором обходится дешевле. Таким образом, стоимость системы тепловая машина — плоский коллектор оказывается наименьшей из всех перечисленных систем. Однако и производительность ее тоже чрезвычайно низка. Стоимость единицы мощности (основной экономический показатель энергосистем) для системы с плоским коллектором составляет около 1000 долл. на 1 кВт.

Оценить сколько-нибудь надежно стоимости термоионной, термоэлектрической и фотоэлектрической систем пока еще невозможно. Объем затрат на создание фотоэлектрической установки для космических аппаратов составляет 100—400 тыс. долл. на 1 кВт мощности. Эта цифра едва ли показательна для крупномасштабного производства энергии, где требования к параметрам системы, безусловно, значительно ниже. Более того, разработка тонкопленочных и поликристаллических фотоэлементов может привести к снижению стоимости фотоэлектрических систем в сотни раз. Устройства на основе термоэлектрических генераторов с плоскими коллекторами также представляются довольно перспективными. С созданием низкотемпературных термоэлектрических элементов, лишь немного превосходящих по своим характеристикам ныне существующие, эти устройства могут оказаться вполне конкурентоспособными. Многие полагают, что в обозримом будущем такие системы, вероятно, будут наиболее подходящими для крупномасштабного использования солнечной энергии.

Среднюю стоимость систем преобразования солнечной энергии можно оценить лишь в результате их исчерпывающего экономического анализа, что выходит за рамки нашей книги. Однако некоторые факторы, определяющие стоимость, мы все же рассмотрим. В качестве критерия оценки различных методов производства энергии обычно выбирается отношение стоимости производства энергии для исследуемой системы к аналогичному показателю для некоторой считающейся наиболее эффективной системы. Трудность состоит в том, что в различных странах наиболее дешевыми могут оказаться разные системы. В одной —

это генератор электроэнергии, приводимый в действие дизелем, в другой — турбогенератор, работающий за счет пара, получаемого при сжигании угля, в третьей — гидрогенератор. Более того, стоимость солнечной энергосистемы изменяется в широких пределах от района к району в зависимости от стоимости материалов, затрат труда и т. д.

Мы уже говорили, что материальные затраты на создание системы тепловая машина — плоский коллектор оцениваются величиной 1000 долл. на 1 кВт мощности. Изготовление такого рода установок не представляет большой технической сложности. На всем земном шаре почти нет таких мест, где нельзя было бы их сделать, но вряд ли где-нибудь они окажутся дешевле. На первый взгляд может показаться, что из-за высокой стоимости энергии такие системы будут неконкурентоспособными по сравнению с тепловыми или гидроэлектростанциями, для которых этот показатель составляет около 100 долл. на 1 кВт мощности. Даже мелкие дизельные электроустановки не требуют больших затрат. Однако если учесть стоимость топлива, то приведенное сравнение будет не столь разительным. Не исключено, что низкотемпературные солнечные энергоустановки как по стоимости технического обслуживания, так и по сроку службы окажутся вне конкуренции. По этим показателям провести сопоставление еще труднее. Подсчитано, что с помощью небольших низкотемпературных солнечных установок можно было бы получать электроэнергию стоимостью порядка 0,05—0,1 долл. за 1 кВт·ч. Аналогичная цифра для коллектора типа солнечный бассейн составляет около 0,02 долл. за 1 кВт·ч. Для некоторых фотобиологических систем эта величина имеет тот же порядок. При крупномасштабном производстве электроэнергии в высокоразвитых странах стоимость 1 кВт·ч энергии в 2—10 раз ниже. Но вследствие больших затрат на передачу электроэнергии она возрастает в месте потребления по крайней мере в три раза. В менее развитых странах электроэнергия обходится значительно дороже, особенно в районах, где отсутствуют месторождения ископаемых видов топлива. Например, Пакистан вынужден почти полностью импортировать каменный уголь из-за

границы. В порту стоимость тонны угля составляет 15 долл., а при транспортировке во внутренние районы страны она достигает 100 долл. и выше. При сжигании этого топлива с целью производства электроэнергии с к. п. д. 25% стоимость последней только из-за транспортировки угля возрастает на 0,03 долл. за 1 кВт·ч. Подобная ситуация наблюдается во многих странах.

Поэтому прежде чем рекомендовать применение энергосистемы того или иного типа, необходимо тщательно исследовать все их возможности с учетом местных условий. Многочисленные исследования последних лет свидетельствуют о том, что солнечные энергосистемы сейчас вполне могут составить конкуренцию другим системам в различных частях земного шара.

Другие типы солнечных установок (отличные от преобразователей солнечной энергии в электрическую) находятся в более благоприятном положении. К их числу относятся, например, солнечные водонагреватели, получившие очень широкое распространение в Японии и Израиле, не имеющих собственных месторождений топлива, а также в некоторых районах США и СССР. На обширных территориях Азии, Южной Америки и Африки они еще не используются, хотя здесь их возможности трудно переоценить. Себестоимость простейшего солнечного водонагревателя, включая необходимые резервуары для хранения тепловой энергии, составляет около 15 долл. на 1 м^2 поверхности коллектора. На юге США стоимость несколько более совершенного и эффективного водонагревателя достигает 50 долл. на 1 м^2 поверхности. В большинстве районов мира простые солнечные системы, способные обеспечить основные бытовые нужды, оказываются не дороже 200 долл. Почти повсюду на земном шаре в полосе между сороковыми широтами можно было бы обеспечить горячее водоснабжение вдвое дешевле, чем при нагревании воды с помощью электричества, газа или твердого топлива. Благодаря экономии природного топлива стоимость солнечного водонагревателя окупается примерно через 5 лет.

В обозримом будущем широкое применение должны найти солнечные установки для сушки рыбы, фрук-

тов и овощей, особенно в местах их выращивания. Стоимость их сначала составляла 10—15 долл. на 1 м² поверхности коллектора и окупалась при сушке урожая абрикосов или кофе уже через 2—3 года. Стоимость системы для опреснения воды в настоящее время составляет примерно столько же, в дальнейшем с применением пластмассовых пленочных покрытий она, по-видимому, существенно снизится. В настоящее время 1 т питьевой воды, полученной таким способом, стоит около 0,5 долл. Это более чем в 10 раз превышает цену на воду в различных странах с влажным климатом (например, в Англии, где вода дешевая), тем не менее для многих других стран такая стоимость вполне приемлема. К достоинствам опреснительных и сушильных солнечных установок следует отнести то, что их можно изготавливать из самых обычных материалов, любых размеров и там, где они требуются. Существенным преимуществом этих установок является также отсутствие каких-либо специальных требований к их совместной работе, возможность централизованного управления и перераспределения нагрузки между ними.

Во многих странах проводились различные работы по оценке производительности солнечных кухонь при минимальных затратах. Установлено, что подходящее для семьи устройство с максимальной мощностью порядка $0{,}25 \div 0{,}5$ кВт в настоящее время не может быть дешевле 10 долл. По-видимому, это небольшая цена для устройства с десятилетним сроком службы, однако попытки расширить область применения солнечных кухонь заметного успеха не имели.

Рассмотренные здесь примеры практического применения солнечной энергии являются одним из направлений исследований в гелиотехнике. В последнее время неосторожные (порой слишком смелые) высказывания сторонников широкого использования солнечной энергии уступили место обоснованному технико-экономическому анализу этой проблемы. Это свидетельствует о том, что солнечным энергосистемам уже сейчас отводится определенное место в экономике стран и намечаются пути их дальнейшего совершенствования.

Место солнечных энергосистем в общем энергетическом балансе

Мы видели, что солнечные энергоустановки не могут конкурировать с современными системами для крупномасштабного производства электроэнергии. Однако в гл. 1 мы отмечали, что создание сверхмощных энергосистем не ставит перед человечеством серьезных проблем, кроме дороговизны энергии. Гораздо большее внимание следует уделить удовлетворению относительно небольших энергетических потребностей в удаленных и разобщенных областях земного шара. Именно в таких районах солнечные энергосистемы могли бы оказать решающее влияние на развитие экономики. В предыдущем разделе мы видели, что с помощью низкотемпературных солнечных энергосистем можно относительно недорого получать электроэнергию в небольших количествах. Основной их недостаток связан с высокими капитальными затратами, которые составляют до 1000 долл. на 1 кВт мощности. Это обусловлено очень низкой интенсивностью солнечной радиации и недостаточно совершенной конструкцией систем. Однако это не означает, что такие системы не могут найти применения. В сельских местностях могут широко использоваться такие устройства, как ветряные насосы и генераторы, которые по своим характеристикам не уступают солнечным энергоустановкам, просты в обслуживании и не требуют затрат топлива. Такие установки, вероятно, уже сейчас могут найти применение в США, СССР, на юге Европы, в Южной Африке, Японии, Австралии и Новой Зеландии. Конечно, спрос на подобные системы в этих областях различен, однако на юге Европы и в Австралии с ними связывают определенные перспективы развития местной промышленности. Еще более широкие перспективы открываются с применением таких устройств, как солнечные водонагреватели, опреснители, сушилки и т. п. Их внедрение могло бы принести большую пользу не только в уже упомянутых странах, но и в Южной Америке, странах бассейна Карибского моря, в Африке, Индии и Юго-Восточной Азии. Можно ожидать, что существующий здесь спрос на них будет постоянно расширяться. Это

позволило бы повысить производительность труда в названных странах и способствовало бы их экономическому развитию.

Одной из важнейших задач развития человечества является обеспечение стабильности сельского населения в развивающихся странах. Во многих районах с чрезвычайно большими энергетическими потребностями капиталовложения могли бы оказаться наиболее эффективными, но именно там население испытывает огромные трудности. Крестьяне, которым едва хватает на пропитание, не станут тратить на энергоустановку по 1000 долл. на 1 кВт·ч, даже если через какое-то время ее эксплуатация окажется дешевле, чем использование труда животных. Контингент людей, чей годовой доход не превышает 100 долл., составляет около миллиарда человек. И они не могут позволить себе ничего лишнего. Более того, они не пойдут на то, чтобы даже немного отступить от привычного для них жизненного уклада, который формировался их предками на протяжении столетий. Они, возможно, пошли бы на это, если им убедительно показать, что такие действия экономически оправданы, что капиталовложения не только не пропадут, но и окупятся. Однако в этих странах все направлено на сохранение существующего уклада жизни: и порядок землевладения, и правила наследования, и множество обычаев социального и религиозного характера. Таким образом, данная проблема перестает быть чисто технической и экономической, она становится социальной.

Попытка ее решения, вероятно, должна учитывать и наши рекомендации. Использование солнечной энергии предлагает по крайней мере разумный путь реализации финансовой и технической помощи, оказываемой слаборазвитым странам, и является предметом пристального внимания. По-видимому, этим странам целесообразнее развивать местные отрасли солнечной энергетики. Это позволило бы обеспечить заказами государственные промышленные предприятия и помочь освоению установок в отдаленных районах. Некоторые разновидности таких установок могут быть сборными. В качестве первого шага можно рекомендовать введение обязательного использования преобразователей солнечной энергии, солнечных

водонагревателей, кондиционеров и т. п. в больницах, школах, фабриках, государственных учреждениях, а в более развитых районах — во всех зданиях.

Разумеется, без дальнейшего исследования возможностей применения солнечной энергии высказанные здесь мысли останутся не больше чем размышлениями. Настоящая работа может послужить основой для технической оценки простых преобразователей солнечной энергии, которая должна стать существенной частью исследований. Благодаря этому можно добиться прогресса, в котором заинтересованы все — ведь солнце светит для всех одинаково.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора 5
Рекомендуемая литература 14
1. Энергия в жизни человека 15
2. Солнце и Земля 39
3. Основные понятия и определения 64
4. Собирание солнечной энергии 83
5. Преобразование солнечной энергии в тепловую 110
6. Преобразование солнечной энергии в работу 141
7. Преобразование солнечной энергии в электрическую 174
8. Фотоэлектричество 212
9. Фотохимия и фотобиология 236
10. Перспективы получения солнечной энергии 264

Б Дж Бринкворт
СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА

Редактор А. Кондрашова
Художник Ф. Инфанте
Художественный редактор Ю. Урманчеев
Технический редактор Н. Борисова

Сдано в набор 22/X 1975. Подписано к печати 26/III 1976
Бумага тип. № 2 $24\times108^{1}/_{32}$ — 4,5 бум. л. 15,12 усл. печ. л. Уч.-изд л 14,04
Изд. № 12/8450. Зак. 920. Цена 66 коп.

Издательство «Мир», Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.