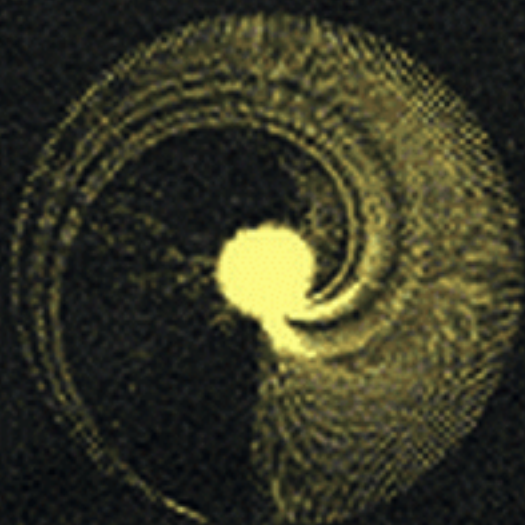




Д. Мак-Вейг

ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

ЭНЕРГОИЗДАТ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВВЕДЕНИЕ И ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Еще тысячелетия назад человек понял, что жизнь и энергию дает Солнце. Считается, что первым, кто сформулировал некоторые основные положения, которыми следует руководствоваться при использовании солнечной энергии применительно к зданиям, был философ Сократ (470—399 гг. до н. э.). В «Записках Ксенофонта» об этом говорится следующее: «... В домах, ориентированных на юг, зимой лучи солнца проникают в портик, но летом, когда солнце находится прямо над нашими головами и крышами, там тень. Поэтому, если считать такое расположение самым лучшим, то следует строить южную часть здания выше, чтобы ловить зимнее солнце, а северную — ниже, чтобы препятствовать холодным ветрам...».

Другим примером использования энергии солнца в древности считается атака Архимеда на флот римлян в Сиракузах в 214 г. до н. э. Предполагают, что он изготовил большое число хорошо отполированных фокусирующих металлических зеркал и установил их вдоль берега таким образом, что отраженные лучи солнца концентрировались на корпусах и снастях римских судов, находившихся в гавани или у берега. Некоторые из судов загорелись и римский флот обратился в бегство. Практика применения солнечной энергии в древности в основном связана с использованием различных фокусирующих устройств, таких как зеркала или линзы. Среди трудов Антемуса де Тралля, выдающегося архитектора VI в., имеются четыре трактата о воспламеняющих зеркалах. Один из трактатов называется «Как создать аппарат, способный с помощью солнечных лучей воспламенить предмет на расстоянии». Английский монах и философ Роджер Бэкон также работал над воспламеняющимися зеркалами в конце XIII в. Первый действующий солнечный насос был изобретен и описан в 1615 г.

французским инженером Соломоном де Коси (1576—1626). Французский философ Бюффон в 1747 г. провел ряд экспериментов для демонстрации достоверности атаки у Сиракуз. Он построил большую раму, на которой укрепил посеребренные стекла, отражавшие лучи в одну точку. Затем он изменил число зеркал и положения фокуса, пока ему не удалось при помощи 154 зеркал поджечь расположенные на расстоянии 77 м щепки, покрытые древесным углем и серой. Затем он сконструировал параболическое зеркало диаметром 1,17 м, однако все его опыты рассматривались современниками, в лучшем случае, как научные курьезы. Одно из первых упоминаний о солнечной кухне принадлежит шведскому философу де Союру (1740—1799), писавшему о ней в своих письмах Бюффону и в «Парижской журнал». В этих письмах рассказывается, что из ряда концентрических зеркальных камер он построил кухню и в центре ее приготавливал суп. Почти одновременно подобное изобре-

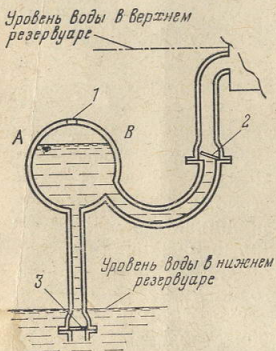


Рис. 1.1. Солнечный насос Белидора.

1 — заправочный клапан; 2, 3 — обратные клапаны.

тение было сделано одним французским физиком. Бернар Фор Белидор (1697—1761) изобрел показанный на рис. 1.1 солнечный насос или непрерывно действующий фонтан. Перед пуском насоса сферическую емкость заполняют до уровня АВ. В дневные часы емкость нагревается за счет солнечной радиации, воздух расширяется и выталкивает воду, которая через обратный клапан 2 попадает в верхний резервуар. При охлаждении, искусственным или в ночные часы, внутреннее давление воздуха падает ниже атмосферного, в результате чего вода из нижнего резервуара всасывается внутрь насоса через обратный клапан 3.

Эксперименты, ставившие целью определение интенсивности солнечной радиации — солнечной постоянной, были впервые проведены в начале XIX в. сэром Джо-

ном Гершелем, который изобрел актинометр — прибор для измерения количества солнечной энергии, созданный также совершенно независимо французским ученым Пуье. Оба использовали один и тот же принцип — подвергали воздействию солнечной радиации известное количество воды и измеряли повышение температуры за заданный промежуток времени. Актинометр Гершеля представлял собой стационарный открытый сосуд, в то время как прибор Пуье был выполнен в виде закрытого подвижного сосуда — пиргелиометра. Расчеты включали поправки на атмосферное поглощение и рассеяние. Джон Эриксон [1] подверг прибор Пуье и его экспериментальные методы резкой критике, утверждая, что расчеты, базирующиеся на широте местности, дате и точном времени, слишком сложны и утомительны для исследований, когда непрерывно изменяется главная компонента — расстояние, которое солнечные лучи проходят в атмосфере. Эриксон более известен своими работами по тепловому двигателю и высокотемпературному воздушному циклу, и, кроме того, он был превосходным кораблестроителем, прежде чем занялся исследованиями в области использования солнечной энергии. Солнечный калориметр его конструкции был закреплен «внутри вращающейся камеры для наблюдений на подвижном столе, который установлен на горизонтальных осях, имеет угловое движение и снабжен градуированной шкалой». В 1871 г. Эриксон установил, что «динамическая энергия, приходящаяся на один квадратный фут поверхности у границы атмосферы, равна 7,11 БТЕ в минуту». Это эквивалентно 1332 Вт/м^2 — удивительный результат, поскольку он в пределах допустимых отклонений согласуется со значением солнечной постоянной, принятой в соответствии с самыми последними оценками.

Первое упоминание о патентах, связанных с использованием солнечной энергии, относится к 1854 г. [2]. В последующие несколько лет в Великобритании выдавались различные патенты, однако очень сомнительно, что изобретения, на которые подавались заявки, были когда-либо реализованы. В 1860 г. французский профессор Огюст Мушо сконструировал параболическое фокусирующее зеркало, которое он использовал для приведения в действие небольшого парового двигателя, за что в 1861 г. получил патент от французского правительст-

ва. Затем в 1866 г. он демонстрировал в Париже «солнечную насосную установку», а также экспериментировал с солнечными кухнями. Ему принадлежит первая книга, посвященная использованию солнечной энергии, вышедшая в свет в 1869 г. [3], а 29 сентября 1878 г. на парижской выставке он успешно продемонстрировал солнечный холодильник, получив при этом брикет льда.

Хотя Эриксон заявил в 1868 г., что он создал первые солнечные двигатели, все же, пожалуй, Мушо опередил его на несколько лет. Безусловно, Эриксон первым изобрел солнечный двигатель с воздушным циклом, который, как сообщается, работал в 1872 г. в Нью-Йорке «при устойчивой скорости 420 об/мин, когда небо было чистым, а солнце — в зените».

Неудивительно, что Эриксон с его значительными познаниями в области солнечной энергии и опытом в кораблестроении и машиностроении еще в 1876 г. предвидел энергетический кризис. Он предсказывал, что угольные запасы будут постепенно истощаться и это повлечет за собой значительные изменения международных связей в пользу стран, располагающих в изобилии солнечной энергией.

Причины экономического характера привели к созданию первой, и в течение многих лет крупнейшей в мире, солнечной опреснительной установки в Лас Салинасе, расположенном на расстоянии около 110 км в глубь континента от побережья Чили. Местная вода, содержащая около 14% солей, была совершенно непригодной для использования в паровых котлах, а кроме того, стояла проблема обеспечения большого количества питьевой воды. Полное описание системы, спроектированной в 1872 г. Чарльзом Уилсоном, было дано Хардингом [4]. Установка состояла из 64 рам длиной 60,96 м и шириной 1,22 м каждая, с общей площадью остекленной поверхности 4756 м². Особенность установки заключалась в том, что она обеспечивала собственные энергетические нужды, поскольку закачка соленой воды, подаваемой из местных колодцев в накопительный бак, расположенный в верхней точке установки, осуществлялась с помощью ветродвигателя. Вначале можно было производить ежедневно около 19 000 л свежей воды, стоимость которой составляла около 1/4 стоимости воды, получаемой в обычных испарительных установках, работающих на угле, но после про-

кладки железнодорожной линии потребность в воде уменьшилась и вся система была демонтирована.

В США первый патент, касающийся создания фокусирующего устройства, был выдан священнику Чарльзу Поупу в 1875 г. Поуп был настолько поражен широкими возможностями использования солнечной энергии, открывавшимися в то время, что написал первую книгу на английском языке, посвященную этому вопросу [2]. Первый патент, связанный с использованием солнечной энергии, был выдан в США 20 марта 1877 г. Джону С. Хиттелу и Джорджу У. Дейтцлеру из Сан-Франциско. В их патенте описывается вогнутое зеркало, при помощи которого они направляли сфокусированный поток энергии на массу металла или какого-либо другого подходящего материала, служащего для накопления тепла. Холодный воздух прогонялся вдоль этой массы, нагревался солнцем, а затем использовался в обычных машинах, работающих на горячем воздухе (цикл Эриксона). Второй патент Дейтцлер получил 19 мая 1882 г. за рефлектор, а в 1883 г. он основал в Калифорнии Комиссию по использованию солнечной энергии и стал ее директором.

В Индии подобные работы также проводились с давних пор. У. Адамс изобрел солнечную кухню, представляющую собой деревянный конический рефлектор диаметром 0,711 м, выложенный обычным посеребренным стеклом. «Обед для семи солдат, состоящий из мяса и овощей, был полностью готов через 2 часа, причем в январе — самом холодном месяце года в Бомбее» [5].

Во Франции работы Мушо продолжил Абель Пифр, который 6 августа 1882 г., используя зеркало диаметром 3,5 м, обеспечил энергией небольшой вертикальный паровой двигатель, приводивший в действие печатный пресс в Париже. В тот день было довольно облачно, но тем не менее в период с 13 до 17 ч был отпечатан специально подготовленный к этому событию номер журнала «Солнце» со средней скоростью 500 экз. в час.

Профессор Е. С. Моурс из Салима (штат Массачусетс) одним из первых предложил применить солнечное отопление помещений [6]. Спроектированное им устройство состояло из пластин черного шифера, помещенных под стеклом и установленных на солнечной стороне здания, и каналов в стене, размещенных таким образом, чтобы холодный воздух из комнаты поступал к нижней

части пластин, нагревался между пластинами и стеклом, поднимался вверх и вытеснялся в комнату холодным воздухом. Таким способом в ясную погоду обогревался дом самого профессора Моурса. Приблизительно к этому же времени относится первое сообщение об использовании плоского коллектора [7], но применительно к системе перекачки воды.

В последующие 30 лет наблюдалось значительное увеличение размеров солнечных двигателей. В Бостоне группа инженеров разработала несколько двигателей, самый удачный из которых был описан в 1901 г. [8, 9]. Двигатель был установлен на ферме по разведению страусов в Южной Пасадене (штат Калифорния) и состоял из конического рефлектора диаметром 10,2 м сверху и 4,57 м внизу, с внутренней поверхностью, набранной из 1788 зеркал размерами приблизительно 90×600 мм, сфокусированных на подвешенном котле. Ось вращения рефлектора была установлена в направлении север — юг под углом к экватору, равным широте местности, а слежение за солнцем осуществлялось с помощью часового механизма. Имеются некоторые сомнения относительно его реальных характеристик. Речь шла о мощности в 10 кВт, однако реальная средняя дневная мощность при перекачке воды достигала лишь 3 кВт. Испытаниями крупномасштабных двигателей занимались в то время также фирмы «Шуман Энджин Синдикат Лимитед» и «Сан Пауэр Компани Лимитед». Их разработки были очень подробно описаны одним из консультантов этих фирм Аккерманом в 1914 г. [10]. Установка Шумана, созданная в 1907 г., состояла из ряда параллельных горизонтальных черных трубок с эфиром, помещенных в неглубокую коробку размерами $6 \times 18 \times 0,45$ м, закрытую сверху стеклом, в которой находилась вода со слоем парафина над ней. Эфир закипал, и образующийся пар создавал давление, необходимое для приведения в действие небольшого вертикального поршневого двигателя. Отработанный эфир конденсировался и вновь использовался. Второй двигатель, построенный в Тэconi (штат Филадельфия) в 1910 г., основан на совершенно ином принципе с использованием только воды. Плоский котел состоял из двух тонких медных пластин длиной 1,83 м и шириной 0,76 м каждая, с узким зазором между ними для потока воды. Холодная вода подавалась в нижнюю часть

котла, а трубка для отвода пара прикреплялась к верхней части. Котел помещался в изолированный деревянный ящик с двойным остеклением, ось которого устанавливалась в направлении восток — запад. Слежение за солнцем отсутствовало, однако наклон ящика ежедневно регулировался, так чтобы остекленная поверхность всегда была перпендикулярна солнечным лучам в полдень. Система успешно вырабатывала пар. В следующем году была построена большая установка с площадью коллектора $965,5 \text{ м}^2$, при этом использовались обычные стеклянные зеркала, позволявшие получить степень концентрации 2:1. Действительная мощность установок не определялась, поскольку не было удовлетворительного метода для ее измерения, однако при расчетах, основанных на результатах предыдущих испытаний с учетом условий выработки пара, было получено максимальное значение 20 кВт.

Впоследствии к участию в работах этой группы был приглашен проф. Бойз. Результатом такого сотрудничества явилось создание лучшего солнечного двигателя того времени — солнечного теплоприемника Шумана — Бойза в Миди, Египет. Профессор Бойз усовершенствовал конструкцию Тэconi за счет введения автоматической системы слежения за солнцем.

Теплоприемник состоял из пяти больших параболических зеркальных секций длиной 62,5 м и шириной 4,1 м каждая, с суммарной приемной площадью 1277 м^2 . Каждое зеркало набиралось из плоских стекол различного размера, покрытых шеллаком. Они устанавливались на легкой раме из окрашенной стали, и каждая секция приводилась в движение системой валов, обеспечивающих поворот зеркал. Главные оси устанавливались в направлении север — юг. Каждое утро зеркала оказывались повернутыми к востоку, а затем, автоматически следуя за солнцем, медленно поворачивались к западу.

Из многочисленных опытов, проведенных в 1913 г., получено значение максимальной мощности при перекачке воды, равное всего 13 кВт. Аккерман считал, что такой плохой результат связан с характеристиками насоса и двигателя установки. Расчеты, основанные на характеристиках другого парового двигателя, испытанного им в Англии, показали, что мощность установки в Миди могла бы достигнуть 40 кВт.

Несмотря на очень ограниченный инженерный опыт, к этому моменту были ясны основные принципы методов практического использования солнечной энергии и требовалась их тщательная техническая проверка. Однако в последующие два десятилетия наблюдался сравнительно небольшой интерес к использованию солнечной энергии, предпочтение отдавалось вначале нефти, а затем газу. К счастью, некоторые энтузиасты, например Аббот в США, продолжали развивать свои исследования; но только в начале 40-х годов по-настоящему возродился интерес к использованию солнечной энергии. Этому способствовало завешание Годфри Л. Кэбота в пользу Массачусетского технологического института для развития исследований в области использования солнечной энергии, а именно этот момент можно считать началом широкого развития исследовательских работ не только в различных районах США, но и во всем мире. Первый большой симпозиум по использованию энергии ветра и солнца состоялся в Нью-Дели в октябре 1954 г. [11]. Потребность в установлении более тесных связей между различными странами привела к образованию Ассоциации по применению солнечной энергии, ныне Международное общество по использованию солнечной энергии (ИСЭС). В задачи этого общества входит содействие фундаментальным и прикладным исследованиям в области использования солнечной энергии, оказание помощи в научных и технологических работах, связанных с использованием солнечной энергии, сбор и распространение информации, относящейся ко всем аспектам этой проблемы. После симпозиума в Нью-Дели в ноябре 1955 г. состоялись две конференции в Аризоне: конференция в Аризонском университете [12], посвященная фундаментальным исследованиям, и Всемирный симпозиум в Фениксе [13], на котором было представлено различное оборудование, включая приборы для измерения солнечной радиации, водо- и воздушонагреватели, солнечные кухни, модели различных солнечных домов, высокотемпературные печи, опреснители, фотоэлектрические преобразователи, несколько различных типов двигателей максимальной мощностью до 1,8 кВт.

В последующие 15 лет состоялось еще несколько конференций. В 1961 г. ООН организовала в Риме симпозиум по новым источникам энергии [14], а в Греции состоялся международный семинар [15]. Конференция

ИСЭС, проходившая в Мельбурне в 1970 г., была последней в период, предшествующий энергетическому кризису.

Вскоре после конференции ЮНЕСКО «Солнце на службе человечества», состоявшейся в июле 1973 г., в Париже, были опубликованы два основных доклада, присланные из США [16] и Австралии [17]. В обоих докладах главное внимание уделялось вопросу о том, какую пользу принесет их странам использование солнечной энергии. Совсем недавно Ирландия [18] и Великобритания [19] опубликовали свои собственные доклады по использованию солнечной энергии. В июле 1975 г. в Калифорнийском университете состоялась самая представительная конференция по солнечной энергии из всех собиравшихся ранее, на которую было представлено 265 докладов, более 60 различных промышленных экспонатов, а общее число делегатов превысило 1700 чел. По числу докладов на конференции доминировали США, представившие 179 докладов, однако по содержанию 20 австралийских докладов были гораздо значительнее.

С тех пор интерес к исследованиям в области солнечной энергии продолжал неуклонно возрастать. Был опубликован ряд обзоров [20—22], дающих представление о направлениях развития работ в различных странах, включающих как экономические, так и теоретические исследования. Из этих работ совершенно ясно видно, что практически все программы по размаху проводимых исследований являются недостаточными для того, чтобы внести существенный вклад в развитие этой области энергетики. Самая обширная программа была начата в Нью-Йорке в 1971 г. с весьма скромными средствами в 1,2 млн. долл. Однако к 1977 г. объем правительственных субсидий достиг 300 млн. долл.

Запасов традиционного органического топлива хватит максимум еще на 100 лет, а использование ядерной энергии имеет ряд ограничений, обусловленных техническими причинами и проблемой охраны окружающей среды. Уже сейчас почти в любой стране целесообразно с экономической точки зрения использовать для некоторых целей неисчерпаемый источник солнечной энергии, не загрязняющей окружающую среду. В некоторых из стран приняты решения о вкладывании средств в развитие исследований, разработок и демонстрационных

программ по использованию солнечной энергии. Тем, кто в состоянии склонить национальную энергетическую политику к более широкому использованию солнечной энергии, следует проникнуться идеей — время не ждет.

ГЛАВА ВТОРАЯ

СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Распределение энергии в солнечном спектре весьма близко к распределению энергии излучения «черного тела» или идеального излучателя при температуре 6000 К. Излучение распространяется со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с и достигает земной атмосферы примерно за восемь минут. Значение солнечной постоянной, которая представляет собой плотность потока энергии солнечного излучения за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от земли до солнца в плоскости, перпендикулярной солнечным лучам, равно $1,353 \text{ кВт/м}^2$. В течение года солнечная постоянная может изменяться на $\pm 3,4\%$, что обусловлено изменением расстояния от земли до солнца.

Земля вращается вокруг солнца по эллиптической орбите, затрачивая год на каждый цикл. Угол наклона земной оси к плоскости вращения земли постоянен и равен $23^\circ 27'$. Видимое дневное движение солнца по небосводу, наблюдаемое в любой точке земной поверхности, циклически изменяется в течение года и определяется солнечным склонением. Склонение солнца измеряется углом между вектором, параллельным в полдень солнечным лучам и проходящим через центр земли, и проекцией этого вектора на плоскость земного экватора. Склонение солнца изменяется от $+23^\circ 27'$ до $-23^\circ 27'$. Это вызывает сезонные изменения продолжительности дня, связанные с различием углов падения солнечных лучей на поверхность земли. На экваторе день от восхода солнца до заката длится точно 12 ч, тогда как на более высоких широтах продолжительность дня существенно изменяется в течение года. Например, на Британских островах в середине зимы день длится менее 8 ч, в середине лета — 16 ч. Это означает, что летом на Британских островах суммарный приход солнечного излучения на горизонтальную поверх-

ность может быть больше, чем в экваториальных районах.

Четыре дня в году имеют особое значение. Они соответствуют двум точкам земной орбиты, в которых склонение солнца принимается по абсолютной величине максимальное значение (солнцестояния), и двум точкам, в которых склонение солнца равно нулю (равноденствия). В северном полушарии в день летнего солнцестояния, наступающего 22 июня, солнце в Арктике не заходит за горизонт. Аналогично в южном полушарии день в Антарктике продолжается непрерывно в зимнее солнцестояние (22 декабря). На северном тропике в день летнего солнцестояния и на южном тропике в день зимнего солнцестояния солнце в полдень проходит через зенит. На экваторе в дни весеннего и осеннего равноденствия (21 марта и 23 сентября) солнце в полдень также находится в зените. В эти дни в любой точке земной поверхности день и ночь продолжаются точно по 12 ч. В астрономических таблицах и картах обычно используется солнечное время, т. е. время относительно полдня, когда солнце находится строго в южном направлении в северном полушарии (или строго в северном направлении в южном полушарии). Солнечное время часто несколько отличается от местного поясного времени, поскольку часовой пояс имеет ширину в несколько градусов долготы, а каждый градус долготы эквивалентен по времени четырем мин.

СУММАРНАЯ, ПРЯМАЯ И ДИФFUЗНАЯ РАДИАЦИЯ

Поступление солнечной энергии в любую точку земного шара может быть изучено двумя методами. Первый включает измерения, осуществляемые сетью метеостанций, а второй основан на использовании физических формул и констант. Прямая солнечная радиация I представляет собой поток излучения, поступающего непосредственно от солнечного диска (который можно рассматривать как точечный источник) и измеряемого в плоскости, перпендикулярной направлению на солнце. Диффузная радиация D поступает на землю от остальной части небесной полусферы, претерпевая рассеяние при прохождении через атмосферу. Суммарная солнечная радиация G включает оба вида излучения, падающего на горизонтальную плоскость — прямое и диффуз-

ное. Распределение диффузной радиации по небесной полусфере неравномерно; более интенсивно она поступает из зоны вокруг солнца с радиусом примерно 5° . Эта радиация известна под названием околосолнечной диффузионной радиации. Радиация может также отражаться от земли на любую наклонную поверхность. Однако этот поток весьма трудно поддается оценке. Соотношение между прямой радиацией I , диффузной радиацией D и суммарной радиацией имеет вид:

$$G = D + I \sin \gamma, \quad (2.1)$$

где γ — высота солнца над горизонтом.

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Спектральное распределение прямой солнечной радиации изменяется при прохождении через атмосферу вследствие поглощения и рассеяния. Количество поглощенной энергии зависит от длины пути излучения в атмосфере. Обычный метод описания связи между уровнями энергии основан на понятии массы атмосферы, которая представляет собой

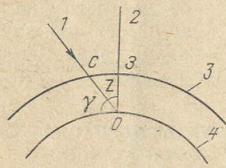


Рис. 2.1. К расчету массы атмосферы.

1 — солнце; 2 — зенит; 3 — граница атмосферы; 4 — поверхность земли.

отношение фактической длины пути излучения в атмосфере к длине пути, когда солнце находится в зените. Путь по вертикали $3O$ (рис. 2.1) соответствует единичной массе атмосферы, угол $3OC$ между вертикалью и направлением на солнце называется зенитным углом z и масса атмосферы определяется выражением $m = CO/3O = \sec z$, если пренебречь влиянием кривизны земной поверхности. Вплоть до 70° второе соотношение дает значения, весьма близкие к точным, учитывающим кривизну. Кроме того, необходимо учитывать изменения атмосферной рефракции и уменьшение плотности с высотой [1].

На рис. 2.2 показаны кривые спектрального распределения для четырех различных случаев. Кривые a и b представляют теоретическое распределение излучения черного тела: a — при 6000 К , b — при $5630,7\text{ К}$. По-

следнее значение — температура, при которой полная мощность излучения солнца, рассматриваемого как черное тело, соответствует солнечной постоянной [2]. Кривая b характеризует спектр солнечного излучения за пределами атмосферы [2] и кривая g представляет распределение прямой солнечной радиации в полдень, рассчитанное для сравнительно чистой атмосферы и зенитного угла 30° применительно к условиям типичного без-

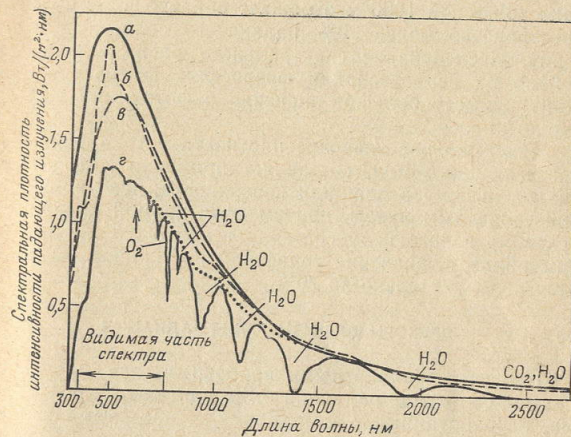


Рис. 2.2. Кривые спектрального распределения. a — черное тело при 6000 К ; b — спектр внеземного солнечного излучения Текерара (1971 г.); g — черное тело при $5630,7\text{ К}$; g — прямая солнечная радиация при относительно чистой атмосфере.

облачного летнего дня в сельской местности Англии [3]. Рассеяние излучения аэрозолями (пылью) рассчитывалось на основе распределения частиц по размерам, характерного на континенте, а рэлеевское рассеяние и поглощение озоном оценивалось в соответствии с моделью Эльтермана [4]. Нижняя кривая показывает также, что солнечное излучение ограничено длинами волн от $0,3\text{ мкм}$ (ближняя ультрафиолетовая область спектра) до $2,5\text{ мкм}$ (средняя инфракрасная область). Поглощение газами и водяным паром или туманом происходит только в определенных узких полосах спектра. Поглощение

излучения облаками на удивление мало, по-видимому менее 10% при облачности толщиной 1000 м [5], а основные потери обусловлены рассеянием. Поглощение аэрозолями также имеет место. Рассеяние излучения туманом и аэрозолями зависит от длины волны и размера частиц. При малой концентрации частиц рассеяние становится основным фактором, приводя к относительно интенсивному белому диффузному излучению при подернутом дымкой небе или слабой облачности. Очень плотное облако толщиной 1000 м отражает обратно в космическое пространство более 90% падающего солнечного излучения. Исследование спектрального распределения основано на использовании физических формул и констант и имеет большое значение в фотохимии и фотобиологии.

Максимальное значение плотности потока радиации, достигающей земли, составляет примерно 1,0 кВт на квадратный метр площади поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, причем доля прямой радиации в условиях ясного неба составляет около 0,8 кВт/м². Таким образом, значение солнечной постоянной уменьшается приблизительно до 70%.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИИ

Первыми стандартными приборами для измерения прямой солнечной радиации были пиргелиометр Ангстрема, разработанный в Стокгольме, и проточный калориметр Аббота из СмитсонIANского института в Вашингтоне. В пиргелиометре Ангстрема приводятся в соответствие тепловые эффекты облучения приемника солнечной энергии и электронагрева затененного элемента. Для измерения уровня электронагрева используются обычные методы электрических измерений. Проточный калориметр Аббота имеет полость, которая поглощает солнечное излучение, а повышение температуры циркуляционной охлаждающей воды пропорционально интенсивности падающего излучения. Пиргелиометр Аббота с серебряным диском является еще одним стандартным прибором, в котором скорость изменения температуры диска приближенно пропорциональна интенсивности падающего излучения. В течение многих лет отмечалось, что американские и европейские измерения радиации не согласуются между собой и, как указывали

различные исследователи во многих странах, расхождение составляло от 2,5 до 6% [6]. В сентябре 1956 г. была установлена новая Международная пиргелиометрическая шкала 1956, которая внесла поправки +1,5% к шкале Ангстрема и -2,0% к смитсонIANской шкале Аббота. Впоследствии все приборы калибровались в соответствии с Международной пиргелиометрической шкалой 1956.

Принцип действия большинства пиранометров, которые используются для измерения суммарной радиации, а при затенении от прямых лучей и диффузной радиации, основан на измерении разности температур черных (поглощающих излучение) и белых (отражающих излучение) поверхностей с помощью термоэлементов. Последние дают сигнал в милливольтках, который можно легко контролировать с помощью целого ряда стандартных самопишущих систем. Характерным примером такого типа приборов является пиранометр Эппли. Другой, хорошо известный тип пиранометра — пиранометр Робича — основан на различном расширении биметаллического элемента, тогда как с помощью дистилляционного пиранометра Беллани, в котором спирт конденсируется в калиброванном конденсаторе, измеряется суммарная солнечная радиация за данный промежуток времени. Значительно более простые измерения, которые проводятся во многих местах, связаны с определением продолжительности солнечного сияния, т. е. времени, когда диск Солнца не закрыт облаками или дымкой. Она измеряется с помощью самопишущего прибора Кэмпбелла — Стокса, в котором используется сферическая линза, фокусирующая солнечное излучение на термочувствительной бумаге. При наличии прямой солнечной радиации на бумаге появляется след в виде прожога. Продолжительность солнечного сияния можно связать с суммарной радиацией с помощью уравнения регрессии

$$G = G_1 \left(a + \frac{bn}{N} \right),$$

где G — среднее значение суммарной радиации на горизонтальной поверхности; G_1 — эталонное (условное) значение суммарной радиации; n — средняя продолжительность солнечного сияния; N — средняя продолжительность дня (или максимально возможная дневная

продолжительность солнечного сияния); a и b — постоянные. Период осреднения параметров в этой формуле обычно составляет один месяц.

Хорошим примером использования этого уравнения является анализ уровня радиации в Ирландии, проведенный Коннотоном [7], в котором данные 23 станций, регистрирующих продолжительность солнечного сияния, были обработаны вместе с данными для Валентии за период с сентября 1954 г. по август 1965 г. В итоге были получены значения $a=0,25$ и $b=0,58$ и подготовлен ряд карт с расчетными средними значениями суммарной солнечной радиации для каждого месяца. Аналогичная работа была проведена Деем [8] для всей территории Британских островов. Работа Дея представляет более детальное исследование, поскольку в ней показано, что постоянные a и b существенно изменяются от одной станции к другой. Обработка данных одной и той же станции за разные периоды времени также может привести к изменению постоянных. Так, значения a и b , полученные Деем, для Валентии за период с 1954 по 1959 г. составляют соответственно 0,22 и 0,65.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИАЦИИ СЕТЕЮ МЕТЕОСТАНЦИЙ

Получение надежных данных по солнечной радиации представляет трудную задачу. Даже опытные метеонаблюдатели считают, что при непрерывных долгосрочных наблюдениях трудно достигнуть точности выше $\pm 5\%$. Источником наиболее надежных данных являются основные метеостанции, но часто они сильно разбросаны и удалены от мест, для которых такие данные необходимы.

На Британских островах более половины падающей солнечной радиации составляет диффузная радиация и это ограничивает использование солнечной энергии с помощью фокусирующих систем. На рис. 2.3 показаны средние за 6 лет (1965—1970) значения суммарной солнечной радиации и ее составляющих, прямой и диффузной радиации, для Кью (Лондон). В зимний период наблюдается сравнительно низкий уровень суммарной радиации в сочетании с повышенной долей диффузной составляющей, что значительно снижает эффективность многих систем солнечного отопления и горячего водоснабжения.

При архитектурных разработках и строительстве часто требуется знание общего количества радиации, поступающей на наклонную произвольно ориентированную поверхность, между тем как имеющиеся данные относятся только к общему количеству суммарной радиации на горизонтальной поверхности в этом месте или на небольшом расстоянии от него. Очень мало метеостанций

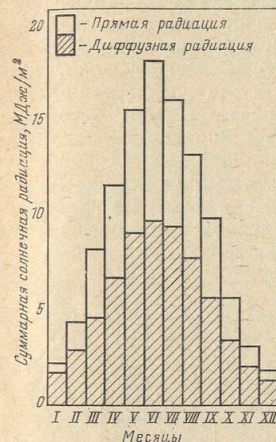


Рис. 2.3. Средний дневной приход прямой и диффузной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Кью и Лондоне.

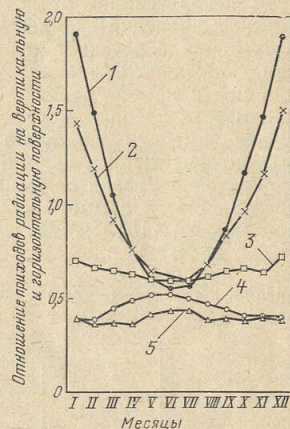


Рис. 2.4. Влияние ориентации на отношение приходов солнечной радиации на вертикальную и горизонтальную поверхности. 1 — юг; 2 — юго-восток; 3 — юго-запад; 4 — восток, запад; 5 — северо-восток; северо-запад; 5 — север.

измеряют облучение вертикальных поверхностей, однако оно может быть рассчитано. На рис. 2.4, где представлены данные Кэша [11] для Дублина, показано влияние ориентации на отношение прихода солнечной радиации на вертикальную и горизонтальную поверхности.

В Великобритании первой работой по определению прихода радиации на наклонную, произвольно ориентированную поверхность была работа Хейвуда [12—14], который предложил заменить календарные месячные

данные по радиации системой, основанной на конкретных значениях угла склонения, численно равных по величине и противоположных по знаку. Преимущество этой системы, как утверждается в работе, состоит в том, что, разделив год симметрично относительно летнего солнцестояния, можно считать, что условия прихода солнечной радиации одинаковы в дни с равным значением угла склонения в весенний и осенний периоды. При этом использование относительно малого числа стандартных значений склонения уменьшает количество вычислений и обеспечивается лучшая основа для сравнения данных по радиации. Хотя эта логическая концепция почти не обоснована, Хейвуд решил установить параметры, которые могут быть определены из соотношения измеренных потоков радиации, и построил кривые, показывающие, как они могут быть применены для определения уровня радиации, падающей на наклонную поверхность, к суммарной радиации на горизонтальной поверхности [15]. Эти кривые основаны на измерениях,

Таблица 2.1

Дневной приход суммарной солнечной радиации на поверхность, ориентированную на юг, в условиях ясной погоды

Угол наклона поверхности к горизонту	Суммарная радиация, МДж/(м²·сут)			
	16 октября—26 февраля	27 февраля—12 апреля; 31 августа—15 октября	13 апреля—30 августа	Среднегодовое значение
0°	5,60	15,84	28,73	17,03
20	9,43	20,01	30,32	20,08
40	12,21	23,13	29,28	21,49
60	13,48	22,78	26,16	20,67
90	12,38	18,57	16,69	15,56

непрерывно проводившихся в течение трех лет в политехническом институте в Вулдидже (51°30' с. ш.). Данные табл. 2.1 и 2.2, составленные на основе этих результатов, применимы для всей территории Великобритании при условии, что уровень суммарной радиации на горизонтальной поверхности корректируется с учетом конкретного местоположения. Условия ясной погоды, используемые Хейвудом, предполагают, что окрестность солнца свободна от облаков, покрывающих не более 1/3 неба.

Таблица 2.2

Дневной приход суммарной солнечной радиации на поверхность, ориентированную на юг, в средних условиях

Угол наклона поверхности к горизонту	Суммарная радиация, МДж/(м²·сут)			
	16 октября—26 февраля	27 февраля—12 апреля и 31 августа—15 октября	13 апреля—30 августа	Среднегодовое значение
0°	2,49	7,47	14,51	8,35
20	3,28	8,52	14,96	9,09
40	3,79	8,99	14,50	9,20
60	3,81	8,52	12,51	8,32
90	3,52	6,47	8,57	6,19

Таблица 2.3

Месячные и годовые приходы солнечной радиации на наклонные поверхности, МДж/м² (рассчитаны по средним значениям солнечной радиации в Кью за период 1959—1968 гг.)

Месяц	Радиация, МДж/м²							
	прямая				диффузная*			
	при наклоне поверхности, град.							
	30°	45°	60°	90°	30°	45°	60°	90°
Январь	50	65	70	70	40	40	35	30
Февраль	70	80	85	80	65	65	55	45
Март	165	180	180	145	130	130	115	95
Апрель	170	170	160	105	190	175	165	130
Май	230	215	190	105	250	240	225	180
Июнь	250	225	190	90	265	250	235	190
Июль	200	185	155	75	275	265	245	190
Август	210	205	185	115	225	215	195	160
Сентябрь	195	205	200	150	155	145	135	115
Октябрь	135	155	160	140	100	95	85	75
Ноябрь	70	85	90	90	50	45	45	35
Декабрь	50	60	70	70	35	35	30	25
Всего за год	1795	1830	1735	1235	1780	1700	1565	1265

* С учетом радиации, отраженной поверхностью земли.

В табл. 2.3 представлены месячные и годовые приходы солнечной радиации на 1 м² поверхности при различных углах наклона к горизонту, полученные фирмой «Билдинг Ресеч Эстаблишмент» по данным метеостанции в Кью за период 1959—1968 гг. [16].

Можно видеть, что в течение всего года изменение расчетных сумм радиации в диапазоне углов от 30 до 60° не превышает нескольких процентов и что в летние месяцы меньшему углу наклона соответствует больший приход радиации. Этот теоретический анализ подтверждается данными табл. 2.2.

Другой подход к расчету часовых сумм солнечной радиации, падающей на любую наклонную поверхность, был предложен Буглером [17]. Он использовал математическую модель солнечной радиации, диффузная составляющая которой рассчитывалась по суммарной радиации на горизонтальной поверхности с помощью трех различных соотношений. Подходящее уравнение выбиралось в соответствии с отношением измеренной часовой суммарной радиации к часовой суммарной радиации, рассчитанной для условий безоблачного неба. Проверка этого метода по данным для Мельбурна за период 1966—1970 гг. дала весьма хорошие результаты; считают, что данный метод должен найти широкое применение.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАГРЕВА ВОДЫ И ВОЗДУХА

Солнечная энергия может быть легко преобразована в тепловую и во многих странах может обеспечить значительную долю нагрузки горячего водоснабжения и отопления помещений. Одним из препятствий для использования солнечной энергии в странах, расположенных на высоких широтах, например в Великобритании, является большое число дней в зимние месяцы, когда приход солнечной радиации слишком мал.

Наиболее широко известным и освоенным способом преобразования солнечной энергии в тепловую является применение плоского коллектора для нагрева воздуха, воды, или других жидкостей. Термин «плоский» является несколько условным и относится как к различным коллекторам, поглощающая поверхность которых представляет сочетание плоских, желобообразных и гофрированных элементов, так и к различным способам переноса поглощенного солнечного излучения от поверхности коллектора к нагреваемой жидкости.

В последние пятьдесят лет ряд исследователей неза-

висимо создали и испытали коллекторы различного типа; первые работы были выполнены в США [1, 2], Великобритании [3], Австралии [4], ЮАР [5] и Израиле [6]. Испытания проводились в районах с различным приходом солнечной радиации при использовании различных методик испытаний. Главная цель этих испытаний заключалась в том, чтобы преобразовать в тепло как можно большую часть солнечного излучения при наибольшей достижимой температуре и наименьших затратах на материалы и изготовление [7].

В Англии важное исследование в этой области было выполнено Хейвудом, который начал работу в 1947 г. с проведения экспериментов по определению характеристик плоского коллектора [3]. Первые опыты Хейвуд провел на небольшом коллекторе квадратной формы площадью 0,093 м². Собираемое тепло отводилось водой, протекающей в каналах, припаянных с обратной стороны к зачерненной медной пластине; количество тепла, поглощенного в единицу времени, определялось при различном числе прозрачных покрытий и различных температурах поглощающей пластины. Несколько упрощенный теоретический анализ, выполненный Хейвудом в то время, все еще используется при проектировании плоских коллекторов для бытовых целей.

Наряду с этими исследованиями принципов сбора тепла Хейвуд разработал солнечный коллектор площадью около 1 м², который в течение многих лет удовлетворительно работал в его доме, примерно в 15 км к юго-востоку от Лондона. Коллектор был изготовлен из двух листов рифленной оцинкованной стали и установлен в системе обычного типа, работающей по принципу термосифона. Водяная емкость коллектора равнялась 22,5 л, вместимость бака-аккумулятора была примерно такой же, так что общее количество воды в системе составляло около 45 л на 1 м² поверхности коллектора. Данное соотношение между площадью коллектора и количеством воды в системе отчетливо прослеживалось и в последующих экспериментах, выполненных во многих странах. Основные выводы Хейвуда, которые до сих пор сохранили свое значение, формулируются следующим образом:

простота конструкции должна быть неотъемлемой характерной чертой установок для нагрева воды или отопления помещений;

в Великобритании теплопроизводительность солнечных установок существенно изменяется изо дня в день;

удовлетворительная эффективность работы солнечного коллектора имеет место только при продолжительной и интенсивной прямой радиации. В периоды облачности происходит сильное снижение эффективности работы солнечного коллектора; хотя диффузная радиация может быть частично эффективной, она значительно меньше прямой.

Хейвуд также отметил, что измерение падающей солнечной радиации, которая редко бывает одинаковой даже в течение двух или трех дней подряд, превращает эксперимент в изнурительную работу.

В Южной Флориде, США, в конце 30-х годов обеспечение горячей водой коттеджей и многоквартирных домов, а также небольших производственных помещений осуществлялось в основном за счет солнечной энергии. Обзор, выполненный Скоттом в 1974 г. [8], показал, что почти все системы работают на принципе термосифона (см. гл. 8), а солнечные коллекторы состоят из медных труб, припаянных к медным листам, которые покрыты черной матовой краской и помещены в корпус из оцинкованной стали. Информация поставщиков и потребителей подтвердила, что непосредственно сами коллекторы оказались весьма долговечными, а некоторые бесперебойно проработали свыше 30 лет. Даже отрицательная температура воздуха, изредка наблюдавшаяся в районе Майами, не приводила к выходу из строя коллекторов, сделанных из мягкой меди. Отказ потребителей от дальнейшего использования своих солнечных установок был обусловлен главным образом нарушением работы, связанным с утечкой воды из основных баков-аккумуляторов, недостаточно высокой температурой воды и значительными затратами, требуемыми при замене баков-аккумуляторов.

Проблема герметичности баков появилась в связи с коррозией, вызванной сочетанием в установке медных труб коллекторов и стальных баков-аккумуляторов. Увеличение потребления горячей воды в быту, связанное с неуклонно растущим применением стиральных и посудомоечных машин, привело к тому, что многие системы перестали обеспечивать потребность в горячей воде. Этот опыт оказался весьма полезным для после-

дующих разработок конструкции коллектора и системы в целом.

Большой практический опыт был накоплен в 50-е годы в Австралии [4]. Впоследствии Австралийская научно-техническая организация по промышленным и исследовательским работам (CSIRO) опубликовала руководство по основам проектирования и конструирования солнечных водонагревательных установок [9]. Отмечалось, что в то время промышленное производство солнечных водонагревателей получило в стране широкое развитие, поскольку это был практически приемлемый способ удовлетворения бытовых потребностей в горячей воде при умеренных затратах. Несложные детали оборудования, разработанного CSIRO и другими организациями, были стандартизованы и могли быть куплены у поставщиков по всей Австралии. Стоимость этих установок была выше стоимости традиционных установок, но эксплуатационные и ремонтные издержки были значительно меньше. Исследования в Австралии также показали, что автономная солнечная установка может обеспечить потребности средней семьи в горячей воде в течение всего года, хотя более удобно, а в некоторых районах и более экономично комбинировать такие установки с традиционными источниками тепла. В то время многие коммерческие фирмы начали изготавливать и поставлять солнечные водонагреватели, но большинство из фирм не уцелело, в основном из-за малого спроса на некомплектное солнечное оборудование. Выжили те немногие фирмы, которые поставляли полностью укомплектованные системы, и к середине 70-х годов они захватили лидерство в этой области, создав новые системы на основе многолетнего практического опыта.

ПЛОСКИЙ КОЛЛЕКТОР

Большинство плоских коллекторов состоит из пяти основных элементов (рис. 3.1). К ним относятся:

1. Прозрачное покрытие из одного или более слоев стекла или пластмассовой пленки.

2. Трубы или каналы, которые изготовлены как одно целое вместе с поглощающей пластиной или присоединены к ней и по которым протекает вода, воздух или другой теплоноситель.

3. Поглощающая пластина, обычно металлическая, с черной поверхностью, хотя можно использовать мно-

жество других материалов, особенно для воздушонагревателей.

4. Изоляция, которую необходимо предусматривать на теневой и боковых сторонах коллектора, чтобы свети к минимуму тепловые потери.

5. Оболочка или корпус, который заключает все другие элементы и защищает их от атмосферных воздействий.

Элементы 1 и 4 можно исключить из устройств, предназначенных для небольшого повышения температуры, как, например, при нагреве воды в плавательных бассейнах. Некоторые конструкции солнечных водо- и

Рис. 3.1. Конструкция плоского солнечного коллектора.

1 — корпус; 2 — прозрачное покрытие; 3 — труба коллектора; 4 — поглощающая пластина; 5 — изоляция.

воздушонагревателей продемонстрированы на рис. 3.2. Гофрированный оцинкованный стальной лист широко используется во всем мире; на рис. 3.2, а и б показаны два способа его применения. Один из примеров простейшего практического использования обычных стандартных панельных радиаторов [5, 10] показан на рис. 3.2, в (см. гл. 8). Способы присоединения и крепления труб к плоскому или гофрированному листу показаны на рис. 3.2, г и д, тогда как на рис. 3.2, е изображена конструкция «труба в листе», представляющая собой прокатно-сварную панель, в которой трубы «образованы» в листе, обеспечивая хороший тепловой контакт между листом и трубой. Эффективный недорогой коллектор, показанный на рис. 3.2, ж, работает по принципу обычного охлаждающего теплообменника. Два различных типа поверхности солнечного воздушонагревателя показаны на рис. 3.2, з и и.

Основные области применения плоских коллекторов можно разделить на следующие три группы:

нагрев воды в плавательных бассейнах, где требуется весьма небольшое повышение температуры. В этом случае коллектор не нуждается в прозрачной изоляции или тепловой изоляции дна и боковых стенок [11]. Высокий расход теплоносителя обусловлен необходимостью ограничить повышение температуры двумя градусами;

нагрев для бытовых и других целей, где требуемая температура не превышает 60°C . В этом случае необходимы теплоизоляция дна и по крайней мере одно прозрачное покрытие;

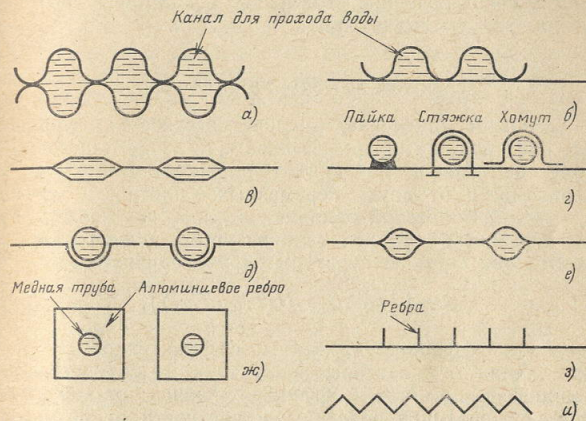


Рис. 3.2. Поперечные сечения поглощающих пластин коллекторов.

процессы, требующие подвода тепла при температурах значительно выше 60°C , в том числе для получения механической энергии. В данном случае необходимы более тонкие конструктивные решения, чтобы снизить тепловые потери коллектора в окружающую среду.

Многообразие плоских коллекторов, показанных на рис. 3.2, свидетельствует о том, что плоский коллектор является сравнительно простым элементом оборудования. В идеальном коллекторе все падающее на него излучение должно преобразовываться в тепло. На практике полезное тепло Q всегда меньше падающей солнечной радиации G_k . Это обусловлено различными факторами и подробный анализ тепловых характеристик плоского коллектора очень сложен. Например, потери тепла излучением возрастают в четвертой степени при увеличении абсолютной температуры и становятся все более существенными по мере того, как температура на-

греваемой жидкости превышает температуру окружающей среды более чем на 25° С. Первый подробный анализ этих факторов был выполнен Хоттелем и Вёрцем в 1942 г. [2]. Однако сравнительно простой анализ дает весьма полезные результаты и показывает, как связаны между собой основные переменные и как они влияют на режим работы коллектора.

УРАВНЕНИЕ ХОТТЕЛЯ—УИЛЛЕРА—БЛИСА

Основное уравнение, хорошо известное как уравнение Хоттеля—Уиллера—Блиса [12—17], определяет полезное тепло Q на единицу площади коллектора в зависимости от двух переменных — плотности потока суммарной солнечной радиации в плоскости коллектора G_K и разности средней температуры теплоносителя в коллекторе T_{cp} и температуры окружающей среды $T_{окр}$

$$Q = F[(\tau\alpha)G_K - U(T_{cp} - T_{окр})], \quad (3.1)$$

где F — коэффициент, связанный с эффективностью переноса тепла от пластины коллектора к жидкости, отводящей тепло. Этот коэффициент зависит от конструкций поглощающей пластины, в частности от размеров каналов с нагреваемой жидкостью, толщины пластины и свойств жидкости. Кроме того, он зависит от расхода жидкости через коллектор.

Приведенная поглощательная способность $(\tau\alpha)$ учитывает результирующее влияние оптических свойств материалов коллектора в диапазоне длин волн солнечного спектра [17]. Фактически эта величина примерно на 5% больше произведения пропускательной способности прозрачных покрытий τ и поглощательной способности пластины коллектора α , поскольку некоторое количество излучения, первоначально отраженного от поглощающей пластины, отражается покрытиями обратно к пластине.

Коэффициент тепловых потерь U сильно возрастает с ростом скорости ветра, если нет прозрачных покрытий, однако, если имеется хотя бы одно покрытие, U возрастает в меньшей степени. Число прозрачных покрытий, расстояния между ними, а также условия в воздушном промежутке коллектора могут оказывать большое влияние на тепловые потери, например вакуумирование кол-

лектора сильно снижает их. Оптические свойства поглощающей пластины и прозрачных покрытий в длинноволновом диапазоне также влияют на коэффициент тепловых потерь.

Эти три параметра F , $\tau\alpha$ и U , зависящие от конструкции коллектора, определяют тепловой режим работы, и полная эффективность коллектора $\eta = Q/G_K$ может быть представлена в зависимости от разности температур $(T_{cp} - T_{окр})$ и плотности потока падающей солнечной радиации G_K как

$$\eta = \frac{Q}{G_K} = F \left[(\tau\alpha) - \frac{U}{G_K} (T_{cp} - T_{окр}) \right]. \quad (3.2)$$

Температуру T_{cp} практически невозможно измерить, но, поскольку в любом отдельном коллекторе большинства систем имеет место сравнительно небольшое повышение температуры, ее можно заменить температурой жидкости на входе $T_{вх}$. Типичные значения F составляют примерно 0,88—0,90, $\tau\alpha$ — около 0,7 при $\alpha = 0,9$ и двойном остеклении из трехмиллиметрового оконного стекла, а коэффициент тепловых потерь U того же коллектора примерно равен 3,6. Для незастекленного и неизолированного коллектора значение $\tau\alpha$ будет близко к единице, а значение U по крайней мере вдвое больше, чем для застекленного коллектора. Методы экспериментального определения F , $\tau\alpha$ и U были предложены Смитом и Вайсом [17].

КОНСТРУКТИВНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛЕКТОРА

Каждый из трех рассмотренных выше коэффициентов зависит от конструктивно-физических характеристик коллектора, основными из которых являются тип и число прозрачных покрытий, а также свойства поверхности коллектора.

Примерно 98% энергии в спектре внеземного солнечного излучения приходится на длины волн менее 3 мкм. Когда это излучение достигает стеклянного покрытия, до 90% излучения непосредственно пропускается, а остальная часть отражается или поглощается стеклом. Поглощенная энергия повышает температуру стекла, которое, в свою очередь, переизлучает энергию с обеих поверхностей — внутренней и наружной. Когда температу-

ра пластины коллектора повышается, она также излучает, но в диапазоне длин волн более 3 мкм, за исключением незначительной части энергии, обычно менее 1%, как для абсолютной черной поверхности при 100°C. Длинноволновое излучение, испускаемое пластиной коллектора, не может непосредственно пройти через стекло, поскольку его пропускательная способность практически равна нулю в диапазоне длин волн 3—50 мкм. Это яв-

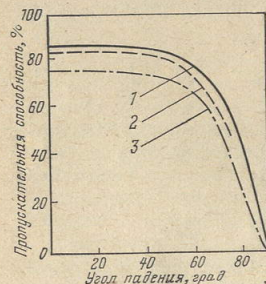


Рис. 3.3. Зависимость пропускательной способности от угла падения излучения.

1 — одинарное остекление; 2 — стекловолокнистая пластмасса; 3 — двойное остекление.

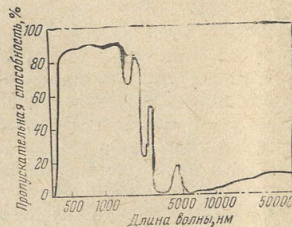


Рис. 3.4. Спектральная пропускательная способность стеклопластикового листа фирмы «Кэллолл».

ление хорошо известно как «парниковый эффект», и применение одного или нескольких прозрачных покрытий в значительной мере снижает тепловые потери коллектора. Прозрачные пластмассовые материалы также хорошо пропускают коротковолновое излучение, но обычно имеют заметную пропускательную способность в длинноволновой части спектра. Для прямого излучения пропускательная способность зависит от угла падения, как показано на рис. 3.3, где пропускательная способность одинарного и двойного остекления из особо прочного прозрачного оконного стекла [18, 19] сравнивается с пропускательной способностью стеклопластика [20]. Стеклопластик имеет исключительно хорошие свойства в длинноволновой области спектра, как показано на рис. 3.4. Каждое прозрачное покрытие снижает как тепловые потери с фронтальной стороны коллектора, так и долю падающей солнечной радиации, которая может

достигнуть поверхности поглощающей пластины. С учетом поглощения энергии в каждом покрытии потери на пропускание при углах падения до 35° составляют для одинарного, двойного и тройного остекления соответственно 10, 18 и 25% [19]. Комбинированная изоляция, состоящая из внешнего стеклянного покрытия и внутреннего покрытия из более дешевой прозрачной пластмассовой пленки, может иметь преимущество, поскольку пластмасса может обладать более высокой пропускательной способностью, чем стекло, а наружное остекление обеспечивает в определенной степени защиту от атмосферных воздействий [21]. Расстояние между покрытиями или между внутренним покрытием и поглощающей пластиной не является существенным параметром [16]. Согласно [22] оптимальный зазор составляет от 10 до 13 мм, однако он может быть увеличен до 25 мм. Характеристики коллектора могут быть улучшены путем нанесения такого прозрачного покрытия на внутреннюю поверхность стекла, которое пропускает практически всю падающую солнечную радиацию, но отражает обратно любое длинноволновое излучение, испускаемое поверхностью пластины коллектора. Обычно используются окись индия и окись олова, а также покрытие, напыляемое в вакууме [23] и имеющее пропускательную способность, равную 0,85 в видимой части спектра (0,55 мкм), и отражательную способность около 0,97 в инфракрасной части спектра (4,0 мкм) [24].

• СЕЛЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Длинноволновое излучение, испускаемое поверхностью поглощающей пластины, может быть значительно уменьшено в результате обработки этой пластины с целью снижения ее степени черноты в длинноволновой части спектра без существенного уменьшения поглощательной способности в коротковолновом диапазоне. Рисунок 3.5 характеризует свойства идеальной селективной поверхности. Монохроматическая отражательная способность очень низка при длине волны $\lambda > 3$ мкм, которая называется пороговой или критической и, наоборот, очень велика при $\lambda < 3$ мкм. Для подавляющего большинства плоских коллекторов температура поверхности достаточно мала и практически вся энергия излучается при длинах волн, больших 3 мкм. Различие между идеальной

поверхностью и некоторыми реальными поверхностями показано на рис. 3.6, где представлены данные из работы Макдональда [25]. Реальные селективные поверхности не обнаруживают резкого увеличения отражательной способности при определенной пороговой длине волны, и их свойства постепенно изменяются с длиной волны. Интегрирование спектральных характеристик та-

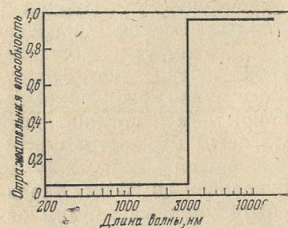


Рис. 3.5. Спектральная отражательная способность идеальной поверхности.

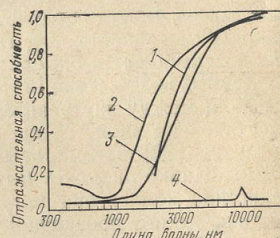


Рис. 3.6. Спектральная отражательная способность цинкового гальванического покрытия.

1 — электроосажденный цинк; 2 — черный никель; 3 — черный хром; 4 — черная краска «некстелл».

кой поверхности по спектру собственного излучения позволяет оценить степень ее черноты в длинноволновом диапазоне, а интегрирование в солнечном спектре — поглощательную способность по отношению к солнечному излучению.

Влияние на характеристики коллектора увеличения числа покрытий и применения селективной поверхности иллюстрируется данными табл. 3.1, в которой приведены значения потерь в окружающую среду через прозрачную изоляцию при средней скорости ветра 5 м/с и температуре наружного воздуха 10°C. Пластина коллектора рассматривается при температурах 40 и 80°C; первое значение типично для летних климатических условий на Британских островах, а второе характерно для многих процессов использования тепла. Потери через днище и боковые стенки коллектора не учитываются. Приведенные цифры основаны на данных Даффи и Бекмана [16].

Уменьшение потерь энергии в результате применения селективной поверхности становится все более существенным по мере повышения температуры поглощающей

пластины. Любое снижение потерь энергии повышает эффективность работы коллектора, и суммарное годовое увеличение полезной энергии, полученное за счет использования селективных покрытий, зависит от числа часов в году, когда плотность потока падающей солнечной радиации достаточно велика, чтобы коллектор мог достигнуть температур, при которых эффект применения селективных поверхностей становится существенным. Со-

Таблица 3.1

Потери через прозрачную изоляцию				
Температура пластины	Степень черноты в длинноволновом диапазоне	Потери, Вт/м²		
		одно покрытие	два покрытия	три покрытия
40°	0,95	189	78	63
	0,1	93	57	45
80°	0,95	525	280	182
	0,1	263	168	119

гласно оценкам [26] суммарная годовая полезная энергия в условиях Великобритании может быть увеличена на 20%.

Второе покрытие оказывает почти такое же влияние на потери через прозрачную изоляцию, как и хорошая селективная поверхность в том же интервале температур, однако второе покрытие одновременно уменьшает количество солнечной радиации, достигающей поверхности поглощающей пластины. Поэтому при сравнительно небольших разностях температур поглощающей пластины и окружающей среды коллектор с одиначным остеклением обычно является более эффективным. Применение селективной поверхности с двумя покрытиями дает относительно небольшой выигрыш по сравнению с вариантом селективной поверхности и одного покрытия.

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ

Существует несколько различных способов изготовления селективных поверхностей, в основе которых лежат те или иные физические законы. Тейбор [27] осу-

ществлял нанесение тонкодисперсных слоев металлов на полированные металлические подложки; другой способ состоит в нанесении тонких полупроводящих слоев, которые поглощают коротковолновое, но пропускают длинноволновое излучение, в результате чего металлическая подложка определяет низкую степень черноты в длинноволновом диапазоне. Создание на поверхности микрошероховатости увеличит только поглощательную способность в коротковолновом диапазоне. Поверхности с V-образными канавками больших размеров (относительно всех длин волн излучения) могут быть расположены таким образом, что излучение, падающее в направлениях, близких к направлению нормали ко всей поверхности, будет несколько раз отражаться внутри канавок. Предполагается [16], что можно получить значение a/ϵ , равное 9, при $a=0,9$, где ϵ —степень черноты поглощающей поверхности.

Метод промышленного получения селективных поверхностей и покрытий на медной поверхности описан Клоузом [30]. Медная пластина погружается в раствор, состоящий из одной части хлорноватокислого натрия NaClO_2 , двух частей гидроокиси натрия NaOH и двадцати частей воды по массе. Пластина должна находиться в растворе в течение десяти минут при температуре около 62°C . Как обычно, рекомендуется перед погружением очистить и обезжирить пластину. Было установлено, что КПД коллектора с одинарным остеклением и селективной поверхностью, полученной указанным выше способом, примерно на 10% выше КПД обычного коллектора с неселективной поглощающей поверхностью и двойным остеклением.

Некоторые известные в литературе покрытия, наносимые химическим способом, представляют собой совокупность слоев цинка и никеля (черный никель) [27], окись меди на меди [27, 28] и окись меди на алюминии [29]. Технология нанесения черного хрома фирмы «Харшоу Хромоникс» признавалась в 1975 г. одной из лучших, имеющих промышленное значение [25, 31, 32]. Это модификация хорошо известного метода нанесения обычного декоративного черного хрома гальваническим способом. Сравнение нескольких покрытий типа черный хром с другими селективными покрытиями, используемыми в гелиотехнике, дано в табл. 3.2.

Селективная поверхность с высоким отношением по-

глощательной способности к степени черноты ($a/\epsilon=20$) и $a\sim 1$ была получена при нанесении черного золота [33, 34] на отражающую подложку, например, медь. Относительно недорогой электрохимический способ нанесения покрытий на основе окиси хрома, известный в промышленности под названием «Соларокс», был разработан в Австралии [35]. Типичные значения a/ϵ составляют 18 при 25°C и уменьшаются до 7,5 при 300°C .

Таблица 3.2

Характеристики селективных покрытий

Покрытие	Поглощательная способность a	Степень черноты ϵ	Отношение поглощательной способности к степени черноты a/ϵ
Черный никель на оцинкованном железе (эксперимент) [27]	0,89	0,12	7,42
То же [27]	0,89	0,16—0,18	5,56—4,94
Гидроокись натрия, хлорноватокислый натрий на меди [30]	0,87	0,13	6,69
Черный хром на матовом никеле [31]*	0,923	0,085	10,86
Черный хром на полированном никеле [31]*	0,868	0,088	9,86
Черный никель [31]*	0,867—0,877	0,066—0,109	7,95—13,29
Черная краска Nextel [31]*	0,967	0,967	1

* Данные по поглощательной способности относятся к спектральному распределению при массе атмосферы, равной 2, а по степени черноты—к температуре абсолютного черного тела 121°C .

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ

Все элементы и материалы, используемые в солнечном энергетическом коллекторе, должны удовлетворительно работать в наихудших условиях, которые могут иметь место в любой конкретной установке. Эти материалы должны выдерживать как высокие температуры, которые могут достигаться в периоды максимальной солнечной радиации при остановке циркуляции жидкости через коллектор, так и низкие температуры, которые возможны в течение зимы. Проблемы, которые могут возникнуть в связи с циклическими изменениями температуры или большими перепадами температур в коллекторе,

также должны учитываться при выборе материалов и конструкции. Расчетный срок службы любого элемента коллектора важен для определения фактической стоимости энергии, отдаваемой потребителю, и коррозия может быть наиболее серьезным фактором, ограничивающим срок службы.

В большинстве систем солнечного нагрева теплоноситель, обычно вода, находится в контакте с разнородными металлами. Трубопроводы могут быть выполнены из меди или нержавеющей стали, а поглощающая пластина коллектора из меди, алюминия, нержавеющей или малоуглеродистой стали. Наличие разнородных металлов в системе является одним из наиболее важных факторов, которые могут приводить к усилению коррозии. Другой причиной появления коррозии является присутствие в теплоносителе растворенного кислорода [36]. В простейшей солнечной водонагревательной установке вода из холодного бака проходит через солнечный коллектор и подогревает воду, направляемую к потребителю. Достаточное количество кислорода в такой системе и неправильный выбор материалов для трубопроводов и коллектора могут привести к появлению течи через весьма короткий период работы. Например, алюминиевая панель коллектора, которая испытывалась при постоянном расходе обычной водопроводной воды, содержащей растворенную медь, вышла из строя менее чем за два месяца [37]. Кроме того, существуют проблемы, связанные в районах с жесткой водой с образованием накипи и возможными повреждениями при замораживании коллектора в зимнее время.

В замкнутых системах теплообменник расположен в баке-аккумуляторе горячей воды и вода циркулирует через коллектор и теплообменник. В качестве теплообменника может быть использована стандартная медная труба. На рис. 3.7 показана экспериментальная секция, испытанная в политехническом институте в Брайтоне. Обычно в таких системах после начала коррозии содержание кислорода в воде снижается до приемлемого уровня. В контурах с принудительной циркуляцией при неправильном расположении насоса вода может подаваться через расширительный бак и обогащаться кислородом. В идеальном случае расширительный бак должен быть герметизирован. Может стать проблемой и деятельность микробов, поскольку растворы некоторых

фризов при нагревании обеспечивают идеальные условия для роста грибов, особенно в том случае, когда водопроводная вода, используемая для заполнения системы, содержит растворенные соли. Пестициды могут снизить эту активность, а растворенные соли могут быть исключены в результате применения обессоленной или дистиллированной воды. Системы из разнородных металлов позволяют максимально использовать менее дорогие материалы, например малоуглеродистую сталь, не имеющую

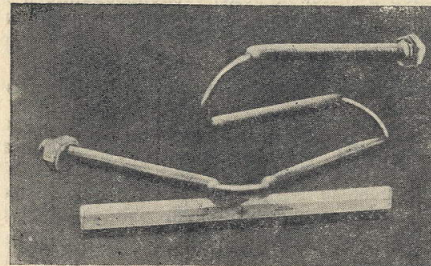


Рис. 3.7. Секция теплообменника.

покрытия, однако такие материалы будут надежно работать только в замкнутом контуре с добавкой соответствующего ингибитора, подавляющего растворяющую способность меди. Если для защиты от замерзания в рабочей жидкости добавляется гликоль, то жидкость должна обладать соответствующими пассивирующими свойствами.

Ресурс работы селективной поверхности трудно оценить, и начальные значения α и ϵ могут ухудшаться в процессе эксплуатации. Испытания некоторых селективных поверхностей показали, что при длительной эксплуатации ϵ увеличивается [38]. Рассматриваются две возможные причины: воздействие ультрафиолетового излучения и влияние атмосферной влаги и загрязнений. Тепловая изоляция любого коллектора должна иметь низкую теплопроводность и быть термически стойкой при максимальной возможной температуре. Различные материалы, используемые в коллекторе, влияют на его тепловые характеристики, однако это влияние достаточно сложно и

должно оцениваться в каждом конкретном случае. Уровень рабочих температур коллектора является особенно важным; например, применение селективных покрытий может быть экономически выгодно в одном случае и невыгодно в другом.

Исчерпывающий обзор проблем, связанных с применением алюминия и меди, был сделан Попплевеллом [39]. В этом обзоре обсуждаются вопросы конструкции системы с точки зрения борьбы с коррозией и представлены данные по коррозии различных медных сплавов в пресной воде. Использование в качестве теплоносителя органической жидкости, не вызывающей коррозию, рассматривалось как допустимый вариант.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КОЛЛЕКТОРА

Существует много различных подходов к конструированию солнечного коллектора. Поэтому представляется возможным рассмотреть подробно только некоторые, наиболее интересные тенденции. Повышение эффективности, особенно при значительной разности температур нагреваемой жидкости и окружающей среды, редко может быть достигнуто без усложнения конструкции коллектора и увеличения его стоимости. При создании коллекторов, обеспечивающих небольшое повышение температуры, особое внимание уделяется конструкциям, обуславливающим весьма непродолжительный период возврата капитала.

КОЛЛЕКТОРЫ ДЛЯ НЕБОЛЬШОГО ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В настоящее время такие коллекторы в основном применяются для нагрева воды в плавательных бассейнах, но есть много других возможных областей применения, например, в тепличном хозяйстве и рыбоводстве. Наиболее дешевым, простым и непосредственным способом нагрева любого открытого плавательного бассейна является прямое поглощение солнечной радиации, падающей на поверхность бассейна. Если не используются покрытия или любые другие средства, препятствующие потерям тепла с поверхности бассейна, то в летние месяцы температура воды в бассейне в умеренном климате, как, например, на Британских островах обычно близка к средней температуре воздуха. Тем не менее летний плавательный сезон может быть начат раньше и закон-

чен позднее на один или два месяца в результате оснащения бассейна системой солнечного водонагрева дополнительно к прямому нагреву в результате поглощения солнечного излучения. Другой важной задачей является уменьшение тепловых потерь бассейна. Наиболее значительные тепловые потери дает испарение [40], но, к счастью, эти потери могут быть почти полностью устранены благодаря применению однослойного тонкого покрытия поверхности. Эксперименты в Австралии [41] и университете штата Флорида [42, 43] показали, что использование плавающего прозрачного пластмассового покрытия может повысить среднюю температуру воды в бассейне более чем на 5°C по сравнению с аналогичным необогреваемым бассейном. В условиях Великобритании повышение температуры не столь значительно отчасти из-за худших радиационных и климатических условий, а отчасти из-за большого количества осадков, вызывающих частичное затопление покрытия и снижение эффективности его применения. Значительное количество тепла теряется также в результате конвекции и излучения. Вода в бассейнах, стены которых расположены выше уровня земли, как правило, холоднее, чем в обычных бассейнах. Потерями теплопроводностью в обычном бассейне можно пренебречь, поскольку практически все тепло, уходящее в землю, возвращается обратно в бассейн, когда температура воды в нем падает [42].

В тех случаях, когда необходимо повышение температуры всего на несколько градусов, вполне можно использовать простой незастекленный неизолированный коллектор, при этом во многих конструкциях применяется черный гофрированный лист, по желобкам которого стекает вода, подаваемая из перфорированной трубы. Известные под названием «струйных», такие коллекторы широко использовались в США Томасом, и в гл. 4 рассмотрены некоторые области их применения. Над гофрированным листом могут быть расположены черные покрытия различного типа или одинарный оцинкованный лист, окрашенный в черный цвет и обернутый прозрачной пластмассой, при этом вода течет как по лицевой, так и по обратной стороне листа [44]. Для достижения высокой эффективности желательно получить равномерную тонкую пленку воды. Способ ее получения описан в гл. 8. В этом случае черный лист помещается над листом из полиэтиленового набивочного материала,

представляющим собой однородную матрицу с равномерно распределенными пузырьками воздуха цилиндрической формы. Вода течет между двумя листами. Для получения более высокой температуры на выходе необходимо прозрачное покрытие. На рис. 3.8 показан экспериментальный коллектор с покрытием из прозрачной пластмассы. Некоторые изготовители в настоящее время

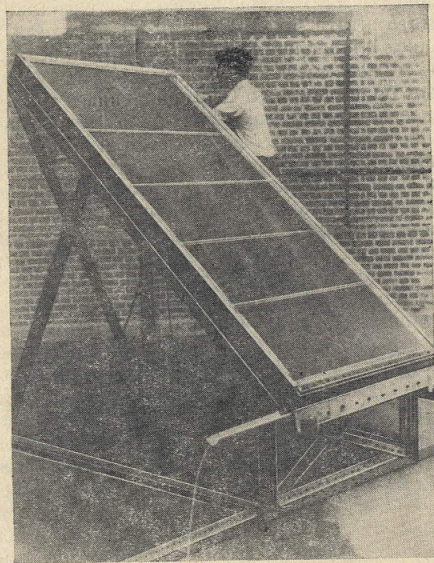


Рис. 3.8. Экспериментальный солнечный коллектор с пластмассовой прозрачной изоляцией.

используют эти покрытия в качестве стандартных элементов для коллекторов, обеспечивающих небольшое повышение температуры.

ПЛОСКИЕ КОЛЛЕКТОРЫ

Коллектор с тепловой ловушкой. Эта система впервые была предложена Коблом [45] и разработана в уни-

верситете штата Нью-Мексико [46]. В ней используется прозрачное твердое тело (метилметакрилат), прилегающее к обычной плоской поглощающей пластине, как показано на рис. 3.9. Метилметакрилат обладает высокой пропускательной способностью в видимой и ближней инфракрасной областях спектра в сочетании с весьма низкой пропускательной способностью в диапазоне более длинноволнового излучения и малой теплопроводностью. Сравнительные испытания, проведенные в университете штата Нью-Мексико, показали, что такой коллектор имеет лучшие характеристики, чем обычный плоский коллектор и коллектор струйного типа. Все три коллектора испытывались при рабочих температурах от 38 до 80°C. В этом диапазоне коллектор с тепловой ловушкой имеет более высокий КПД и может больше времени полезно работать в течение дня, в меньшей степени реагирует на прерывистость поступления солнечной радиации, поскольку обладает относительно высокой инерционностью и, по-видимому, является весьма перспективным для использования в качестве высокотемпературного коллектора.

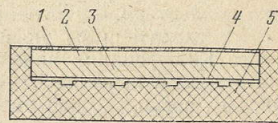


Рис. 3.9. Солнечный коллектор с тепловой ловушкой.

1 — остекление; 2 — воздушный зазор; 3 — метилметакрилат; 4 — пластина коллектора; 5 — изоляция.

Системы с сотовой структурой. Применение ячеистых материалов, размещенных между прозрачным покрытием и поглощающей пластиной, является эффективным способом улучшения характеристик коллектора благодаря подавлению естественной конвекции и сильному уменьшению потерь излучением в инфракрасной части спектра. Ячеистый материал должен иметь низкую теплопроводность, чтобы уменьшить кондуктивные потери тепла от поглощающей пластины к наружному покрытию. Теоретические исследования [47] показали, что тонкий слой прозрачного пластмассового ячеистого материала может повысить КПД коллектора по меньшей мере до 60% при средней температуре коллектора 365 К по сравнению с измеренным значением 43% у обычного коллектора с двойным остеклением и неселективной поверхностью. Полагают, что это может быть дос-

тигнуто без увеличения стоимости коллектора, так как при наличии сотовой структуры требуется только одно прозрачное покрытие. Испытания коллектора с сотовой структурой из полистилена, представляющей собой множество ячеек со стороны квадрата 25,4 мм и глубиной 76,2 мм [48], показали, что такая структура эффективно подавляет естественную конвекцию, когда коллектор занимает наклонное положение. Ранее работа ограничивалась испытаниями горизонтально расположенного коллектора.

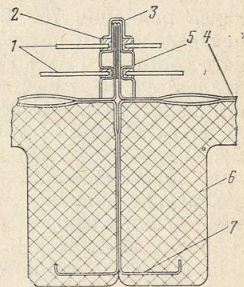
Исследователи из университета в Лос-Анджелесе (штат Калифорния) являются сторонниками применения стекла в качестве материала с сотовой структурой [49, 50], поскольку оно имеет низкую теплопроводность, недорого и легко доступно. Оптические свойства стекла превосходны, поскольку оно обладает очень низкой поглощательной способностью в солнечном спектре, а для прошедшего и отраженного потоков прямого солнечного излучения оно является зеркальным, в результате чего излучение сохраняет направление к поглощающей пластине. Для сотовой структуры, состоящей из круглых труб, основными конструктивными параметрами являются внутренний диаметр, который должен быть меньше 150 мм, и длина, которая не должна превышать учетверенного диаметра. Другие рассматриваемые ячейчатые материалы имеют отражающие поверхности, но если они металлизированы, то покрытие должно быть очень тонким, чтобы уменьшить потери тепла теплопроводностью.

Коллектор как элемент строительной конструкции. При сооружении любого нового объекта или замене крыши существующего здания можно получить значительный экономический эффект, если солнечный коллектор использовать одновременно в качестве строительного элемента кровли. Критерии конструирования таких коллекторов, разработанные Лос-Аламосской научной лабораторией [51], включают хорошие тепловые характеристики, экономичность в условиях промышленного производства, применение дешевых, легко доступных материалов, большой срок службы и возможность простого монтажа и ремонта местными строительными рабочими. Основные особенности конструкции коллектора показаны на рис. 3.10. Поглощающая пластина состоит из тонких стальных листов, соединенных роликовым сварным швом по периметру и точечной сваркой в центре.

После сварки эти листы раздувались под давлением с целью образования каналов для потока теплоносителя. Нижний удлиненный лист пластины имеет три изгиба, образующих опорную конструкцию. Верхний лист согнут под прямым углом к поглощающей пластине, в результате чего соседние модули могут быть легко соединены между собой с помощью U-образных наконечников. Два стеклянных покрытия вставлены в профильную раму и поддерживаются по краям опорами из неопрена или силиката. Каждый модуль имеет около 0,6 м в ширину

Рис. 3.10. Солнечный коллектор как элемент строительной конструкции.

1 — остекление; 2 — опоры из неопрена или силиката; поддерживающие стеклянные покрытия; 3 — наконечник; 4 — поверхность коллектора; 5 — профильная рама; 6 — вспененная или стекловолоконная теплоизоляция; 7 — опорный элемент конструкции.



и от 2,4 до 6,1 м в длину. Применение наконечников, создающих сжатие и уплотнение стыков, экономит время, которое в противном случае затрачивалось бы на работы по уплотнению, выполняемые вручную на строительной площадке. Вспененная тепловая изоляция увеличивает жесткость панели. Прозрачная изоляция выполняется из стекла. Одна из причин применения стекла, а не пластмассы связана с проблемами уплотнения коллектора и компенсации расширения, которые могут возникнуть в связи с относительно более высокими коэффициентами теплового расширения пластмассовых материалов. Исчерпывающие опытные данные, включая влияние атмосферной и внутренней коррозии, а также устойчивости материалов, были представлены на конгрессе в Лос-Анджелесе в 1975 г. [52].

Коллекторы с распределенным потоком. Конструкция коллектора, в которой удалось устранить избыточное внутреннее давление в каналах с водой, была разработана в университете штата Айова [53]. Конструкцией предусматривается движение потока жидкости

между двумя параллельными пластинами, одна из которых или обе имеют рифления или углубления какой-либо иной формы или между которыми размещается пористая прокладка, например проволоочная сетка. Хотя поток теплоносителя через коллектор направлен вниз, вся нижняя поверхность поглощающей пластины соприкасается с нагреваемой водой. Было показано, что характеристики данного коллектора значительно лучше, чем у некоторых, имеющих в продаже обычных коллекторов. При расчетной разности температур $52,5^{\circ}\text{C}$ относительно температуры наружного воздуха и падающей радиации 750 Вт/м^2 полный КПД коллектора с распределенным потоком при давлении ниже атмосферного составил 44% по сравнению с 38,4% для обычного коллектора. В качестве материала поглощающей пластины такого коллектора можно использовать медный лист толщиной 1,27 мм, прочность которого, по-видимому, достаточна, чтобы противостоять сжимающему усилию, обусловленному разностью атмосферного давления и давления жидкости. Применение такого тонкого листа меди значительно снижает сметную стоимость материалов этих коллекторов в производстве по сравнению с обычными коллекторами.

НЕКОТОРЫЕ ОТРАЖАЮЩИЕ И КОНЦЕНТРИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ БЕЗ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ

Составной параболический концентратор. В большинстве применяемых на практике солнечных энергетических установок степень концентрации солнечного излучения* должна составлять около 10 или более, чтобы достигнуть высоких температур. Это можно сделать с помощью различных следящих систем, но было бы значительно выгоднее, если бы требуемая степень концентрации достигалась неподвижным коллектором. Интересная разновидность концентратора, первоначально названного идеальным цилиндрическим световым коллектором, была предложена в 1974 г. Уинстоном [54]. Эта разработка основывалась на наблюдениях излучения Черенкова в экспериментах в области физики частиц высоких энергий, проводившихся в США [55] и СССР

* Степень концентрации или концентрация солнечного излучения есть отношение плотности лучистого потока на поверхности приемника к плотности потока прямой солнечной радиации. (Прим. ред.)

[56]. На рис. 3.11 показано поперечное сечение конструкции, известной под названием составного параболического концентратора. Степень концентрации вплоть до 10 может быть достигнута без суточного слежения, если же допустимы меньшие значения степени концентрации, примерно 3, то может не потребоваться даже сезонная корректировка. Как показано на рис. 3.11, фокус правой параболы лежит на основании левой параболы и наоборот. Ось каждой параболы наклонена к вертикальной оптической оси. Собираение тепла может осуществляться с помощью цилиндрических коллекторов, обладающих свойствами абсолютно черного тела и расположенных на основании параболической конструкции*.

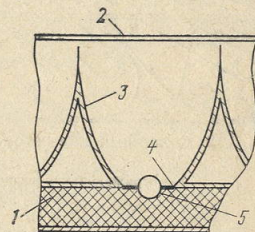


Рис. 3.11. Концентрирующий параболический коллектор.

1 — изоляция; 2 — стеклянное покрытие; 3 — парабола; 4 — фокус параболы; 5 — труба коллектора.

Спиральный или «ракушечный» коллектор. Преобразование составного параболического концентратора в односторонний параболический профиль, заканчивающийся круговым отражателем, было описано Раблом [57]. Как показано на рис. 3.12, спиральный коллектор состоит из изогнутых по спирали профилей. Попадая в спираль, прямая радиация не может выйти за ее пределы, а продолжает отражаться в глубь спирали, пока не достигнет поглощающего элемента, изображенного на рис. 3.12 в виде круглой трубы. Для солнечных термоэлектрогенераторов Смит предложил создать параболический входной участок, переходящий в спираль, и вакуумированный промежуток вокруг коллектора [58]. Заявка на изобретение отражателя, профиль которого рассчитан таким образом, что все излучение, диффузное или зеркальное, которое попадает в устройство через входное сечение, должно в конце концов попасть на поглощающий элемент конструкции и не может быть отражено наружу, было зарегистрировано в

* Устройства, аналогичные конструкции, показанной на рис. 3.11 в терминологии, которая применяется в СССР, называются фоклинами. Если же такой концентратор представляет собой поверхность вращения, то он называется фоконом. (Прим. ред.)

Австралии [59], а один из участников конкурса по солнечному отоплению, проводившегося в 1975 г. Ассоциацией развития медной промышленности в Великобритании, разработал логарифмическую или равноугольную спиральную систему [60].

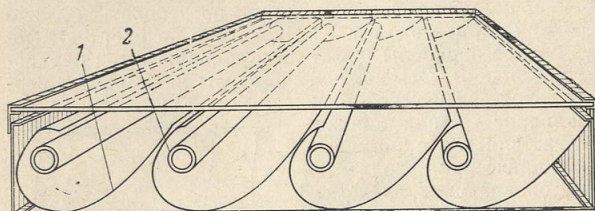


Рис. 3.12. Солнечный коллектор с отражателем, изогнутым по спирали.

1 — отражающая поверхность; 2 — труба коллектора.

Трапециевидный коллектор с небольшой степенью концентрации. Небольшая степень концентрации солнечной энергии может быть достигнута за счет того, что излучение, падающее на некоторую поверхность, отражается от нее на площадь меньших размеров. Поскольку фокусирование не требуется, то можно использовать как прямую, так и диффузную радиацию. Простой, легкий в

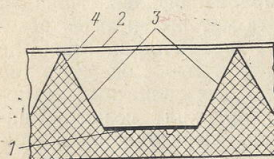


Рис. 3.13. Трапециевидный солнечный коллектор.

1 — поглощающая пластина коллектора; 2 — прозрачное покрытие; 3 — отражающая поверхность; 4 — изоляция.

изготовлении коллектор этого типа состоит из ряда параллельных трапециевидных неподвижных желобов, как показано на рис. 3.13. Боковые стенки желобов имеют высокую отражательную способность, а их основания являются поглощающей поверхностью коллектора. Поскольку площадь поглощающей поверхности меньше общей площади коллектора, то потери тепла уменьшаются. Для описания этого эффекта можно использовать понятие «направленной селективности», что было продемонстрировано Холландсом для желобков

У-образной конфигурации [61]. Результаты, представленные в 1975 г. Бэнеротом и Хауэллом [62, 63], были использованы для разработки расчетных номограмм применительно к различной геометрии коллекторов и доказательства того, что этот тип коллектора мог бы иметь широкие перспективы для применения в установках абсорбционного охлаждения, поскольку возможность получения полезной энергии с помощью плоских коллекторов ограничена температурой 100—150 °С.

КОЛЛЕКТОР С НЕПОДВИЖНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ И СЛЕДЯЩИМ ПРИЕМНИКОМ (SRTA)

Коллектор, который показан на рис. 3.14, представляет собой сферический отражатель, расположенный неподвижно и обращенный к солнцу. Он имеет линейный приемник, который может следовать за положением солнца благодаря простому вращательному движению вокруг центра кривизны отражателя [64, 65]. Опыт работы головных образцов показал, что применение подобных установок мощностью от 10 до 100 МВт в промышленном масштабе позволило бы вырабатывать более де-

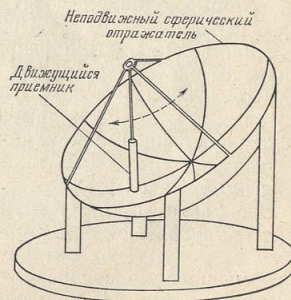


Рис. 3.14. Солнечный коллектор с неподвижным отражателем и следящим приемником.

шевую электроэнергию, чем на АЭС. К достоинствам применения SRTA в быту относится то, что такая система может быть использована как для получения электроэнергии, так и для горячего водоснабжения. Кроме того, рабочая жидкость может быть нагрета до высокой температуры, что позволяет уменьшить объем аккумулирующей системы. Наконец, отсутствует опасность раз-

рушения больших застекленных поверхностей. Основным недостатком установки является то, что она может использовать только прямую радиацию. В странах с высокой долей прямой радиации SRTA может широко применяться для энергообеспеченности различных мелких потребителей.

ВАКУУМИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Возможным подходом к проблеме снижения тепловых потерь при высоких температурах ($80-150^{\circ}\text{C}$) является применение вакуумированного коллектора. Использование в условиях Далласа (штат Техас) коллектора с умеренным вакуумом (133 Па) в сочетании с обычными селективными поглощающими поверхностями продемонстрировало возможность работы при температуре 150°C с дневным КПД выше 40% [66, 67]. Было установлено, что расстояние между поглощающей поверхностью и стеклянным покрытием решающим образом влияет на подавление потерь путем естественной конвекции и теплопроводности. Практическое использование этой системы связано с различными трудностями, которые, однако, носят не принципиальный характер. Первоначальные испытания выявили дефекты уплотнений, однако была разработана технология применения высокотемпературных кремнийорганических герметиков. Акриловые покрытия, которые использовались в первых опытах, были заменены закаленным или химически упрочненными стеклянными покрытиями. На основе этой системы в 1975 г. был создан опытно-промышленный образец [68].

Несколько торговых групп разработали вакуумированные трубчатые коллекторы [24, 69, 70]. На рис. 3.15 показан модуль коллектора фирмы «Оуэнс-Иллинойс», впервые продемонстрированный в 1975 г. Каждый модуль состоит из 24 труб диаметром 50 мм и длиной 1,12 м. В 1975 г. было установлено несколько крупных промышленных систем, включая систему площадью 46,5 м² в Лос-Анджелесе и систему площадью 93 м² на административном здании в Детройте. Поперечное сечение трубы изображено на рис. 3.16, где для сравнения показана также труба коллектора фирмы «Филиппс». Давление в трубе коллектора фирмы «Оуэнс-Иллинойс» составляет менее 10^{-2} Па, а пропускательная способность на

ружной трубы — 0,92. Селективное покрытие нанесено на внешнюю поверхность поглощающей трубы ($\tau=0,86$ и $\epsilon=0,07$). Свободный конец поглощающей трубы поддерживается пружинным зажимом, компенсирующим различие в тепловом расширении, а другой конец герме-

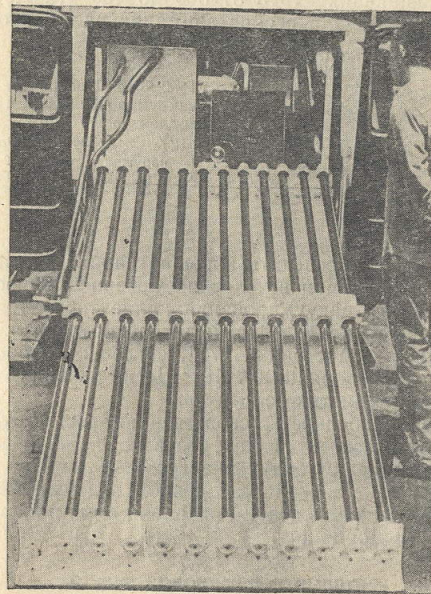


Рис. 3.15. Вакуумированный трубчатый коллектор фирмы «Оуэнс-Иллинойс».

точно припаян к наружной трубе. Теплоноситель подается через подводящую внутреннюю трубу. Было показано, что недорогая диффузно отражающая поверхность, расположенная сзади труб, почти удваивает количество энергии, падающей на трубу [69]. В коллекторе «Филиппс» предусмотрена система из двух поглощающих труб. На верхней половине его наружной оболочки име-

ется внутреннее прозрачное селективное покрытие, а на нижней половине — зеркально отражающая поверхность. Прозрачное селективное покрытие из окиси индия In_2O_3 имеет пропускательную способность $\tau=0,85$ и отражательную способность $\beta \approx 0,9$ по отношению к инфракрасному излучению, соответствующему температурам поглощающих труб от 300 до 400 К. Компания «Филипс» обращала особое внимание на то, чтобы эта

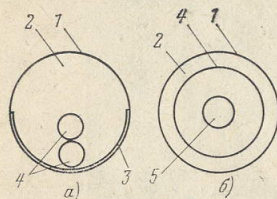


Рис. 3.16. Поперечное сечение вакуумированных трубчатых коллекторов фирм «Филипс» (а) и «Оуэнс-Иллинойс» (б).
1 — наружная труба; 2 — вакуум; 3 — отражатель; 4 — поглощающие трубы; 5 — подводящая труба.

система могла обеспечить хорошие характеристики при диффузной радиации в условиях Северной Европы. Целесообразность вакуумирования коллектора этого типа до давления ниже 10^{-2} Па была рассмотрена в работе, выполненной в Австралии [71], согласно которой уменьшенный вакуум порядка $0,6 \cdot 10^{-2}$ Па не приводит к улучшению характеристик коллектора.

Важная особенность, свойственная всем трубчатым коллекторам, состоит в том, что потери при отражении прямого излучения будут значительно меньше, чем в коллекторах с плоской остекленной поверхностью. Это позволяет увеличить использование прямой радиации ранним утром и в конце дня.

КОЛЛЕКТОР С ТЕПЛОЙ ТРУБОЙ

Основные элементы тепловой трубы показаны на рис. 3.17. Небольшое количество жидкости, которая находится в равновесии со своим насыщенным паром, запертая внутри трубы. При подведении тепла к одному из концов тепловой трубы жидкость испаряется, а избыток пара конденсируется на другом, необогреваемом конце трубы. Конденсат возвращается к обогреваемому концу трубы под действием капиллярных сил. В некоторых солнечных нагревательных установках возврат конденсата может осуществляться под действием гравитационных сил. Поскольку процесс испарения и конденсации проис-

ходит при постоянном давлении и соответственно при постоянной рабочей температуре, то тепловая труба способна передавать тепло при очень малых разностях температур внутри трубы. Существует неизбежное снижение эффективности при переносе тепла от тепловой трубы к вторичному контуру. Важная программа исследований режимов работы коллектора с тепловой трубой



Рис. 3.17. Коллектор, работающий на принципе тепловой трубы.

1 — капиллярная структура.

выполнялась в США с 1974 г. [72]. В Нидерландах в 1975 г. была проведена работа, представленная Фрэнкином [73], который особое внимание уделил изучению скорости изменения тепловых характеристик при изменении солнечной радиации. Другое преимущество тепловой трубы состоит в том, что она может содержать жидкость с более низкой, чем у воды, температурой замерзания. Коллектор с тепловой трубой был также представлен на конкурс Ассоциации развития медной промышленности в Великобритании [60]. Предварительные рабочие характеристики, указанные заводом-изготовителем [74], были весьма разочаровывающими; так, например, общий КПД оказался несколько хуже, чем у одностекольного неселективного плоского коллектора, испытанного Хейвудом [3] в 50-х годах.

НАГРЕВАТЕЛЬ С ПЛАВАЮЩИМ ПЕРЕКРЫТИЕМ

Идея этой разработки [75] заключалась в том, что вследствие диффузного характера солнечной радиации целесообразно, даже в ущерб повышению эффективности, создать простой, дешевый и удобный в монтаже коллектор. Однако эксперименты показали, что его эффективность сравнима с эффективностью других горизонтальных плоских коллекторов. Основные элементы конструкции показаны на рис. 3.18. Плавающее перекрытие

представляет собой слой изоляции, предпочтительно из пеностекла, расположенный на поверхности аккумулятора горячей воды. Солнечная энергия поглощается водой, которая в виде тонкой пленки протекает сверху по изоляции. Сжимающая пластина, которая может быть выполнена из прозрачного или черного стекла, пластмассы или металла, лежит непосредственно на поверх-

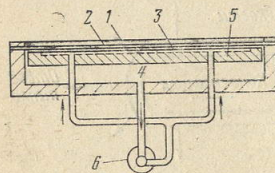


Рис. 3.18. Нагреватель с плавающим перекрытием.

1 — прозрачная изоляция; 2 — металлическая пластина; 3 — сжатая водяная пленка между пластиной и перекрытием; 4 — аккумулятор горячей воды; 5 — плавающее перекрытие; 6 — насос.

ности водяной пленки. После предварительных испытаний нагревателя квадратной формы площадью $0,836 \text{ м}^2$ был успешно разработан промышленный вариант установки площадью $46,5 \text{ м}^2$. На небольших широтах эта установка может использоваться в качестве источника тепла при достаточно низкой температуре, а на более высоких широтах в комбинации с долговременным аккумулирующим устройством.

ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОЛЛЕКТОР — АККУМУЛЯТОР

Автономный цилиндрический солнечный коллектор, совмещенный с баком-аккумулятором, был разработан в Новой Зеландии Винкзом [76, 77]. Принцип работы

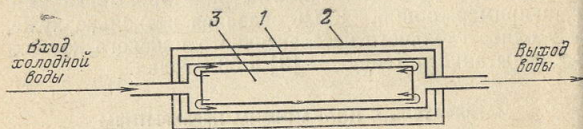


Рис. 3.19. Цилиндрический солнечный коллектор, совмещенный с баком-аккумулятором.

1 — внутреннее прозрачное покрытие; 2 — наружное прозрачное покрытие; 3 — цилиндрический аккумулятор.

показан на рис. 3.19. Когда солнечное излучение достигает черной поверхности коллектора, вода в узком кольцевом зазоре поднимается, а более холодная вода внутри аккумулятора опускается, т. е. отвод тепла осуществ-

ляется путем естественной циркуляции. Последние результаты испытаний [77] показали, что по сравнению с плоским коллектором данная система имеет лучшие характеристики, если их определять по фактической площади наружного цилиндра. Если же принять во внимание площадь, необходимую для размещения цилиндра на расстоянии друг от друга, то эффективность работы плоского и цилиндрического коллекторов будет практически одинакова.

ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛИ

Количество научных исследований и конструкторских работ по солнечным воздушонагревателям [7, 78] значительно меньше, чем по системам водонагрева, хотя есть много областей применения, где более целесообразно использовать воздух в качестве теплоносителя, например для сушки сельскохозяйственных продуктов на небольших широтах или для отопления помещений на более высоких широтах. Воздухонагреватели имеют три преимуществ, заслуживающих особого внимания:

воздух не замерзает;

последствия утечки воздуха значительно менее серьезные, чем последствия утечки воды;

проблема коррозии в системах из разнородных металлов и аккумуляторах практически отсутствует.

Однако физические свойства воздуха в данном случае менее благоприятны, чем воды. Его плотность и теплоемкость крайне низки, а сечения каналов в воздушных системах гораздо больше, чем у водяных трубопроводов.

В простых воздушонагревателях можно использовать почти любую поверхность нагрева, которая может быть окрашена в черный цвет. На рис. 3.20 показаны три основных типа такого нагревателя с одинарной прозрачной изоляцией. В коллекторе на рис. 3.20,а воздух движется в промежутке между прозрачным покрытием и поглощающей пластиной. В нагревателе на рис. 3.20,б воздушный зазор между прозрачным покрытием и поглощающей пластиной герметизирован для уменьшения конвективного теплообмена, а канал находится за поглощающей пластиной. В нагревателе на рис. 3.20,в потоки воздуха либо разделены, либо с целью предварительного подогрева воздух подается в наружный канал,

а затем проходит по внутреннему каналу. Прекрасным примером солнечного воздухонагревателя, сделанного из простых материалов, является установка в Гуджарате с площадью коллектора более 500 м² [79], где воздух проходит через окрашенную в черный цвет мелкую металлическую стружку, представляющую собой отходы металлорежущего производства. Коллектор с двойным остеклением имеет расчетный КПД около 45% при температуре, на 65°C превышающей температуру окружающей среды. В ранней работе Лёфа [80] исследовался

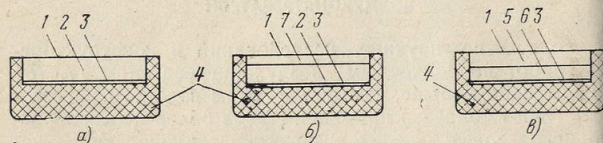


Рис. 3.20. Воздухонагреватели.

1 — наружное покрытие; 2 — воздушный канал; 3 — пластина коллектора; 4 — теплоизоляция; 5 — наружный воздушный канал; 6 — внутренний воздушный канал; 7 — изолированный воздушный слой.

коллектор с перекрывающимися друг друга черными стеклянными пластинами, накрытыми сверху одним, двумя или тремя слоями прозрачной изоляции. Впоследствии такие коллекторы были установлены на крыше солнечного дома в Колорадо и его энергетические показатели за отопительный сезон 1959—1960 гг. были опубликованы в печати [81]. После 16-летнего периода практической безаварийной работы эта система была исследована вновь в 1976—1977 гг. [82]. Важные научно-исследовательские работы по солнечным воздухонагревателям проводились также в Австралии [61, 83], где в начале 60-х годов впервые были применены селективные поверхности с V-образной конфигурацией канавок (см. рис. 3.2, и).

Наряду с применением селективных поверхностей повышение эффективности может быть достигнуто путем регулирования скорости воздуха и использования двухходовой схемы отвода тепла [84], предусматривающей движение воздуха между двумя стеклянными покрытиями обычного в других отношениях двухстекольного коллектора. КПД данной двухходовой системы оказался на 17% больше по сравнению с обычной схемой отвода тепла. В других системах [85] для улучше-

ния теплопередачи используются ребристые поверхности различного типа (см. рис. 3.2, з). В работе [86] рассмотрена попытка применения сотовых структур в сочетании с пористой подложкой. Принципиальная схема включения воздушного коллектора в систему отопления и охлаждения, заимствованная из работы Лёфа [78], показана на рис. 3.21. В данном случае используется аккумулятор галечного типа с насадкой из обычной,

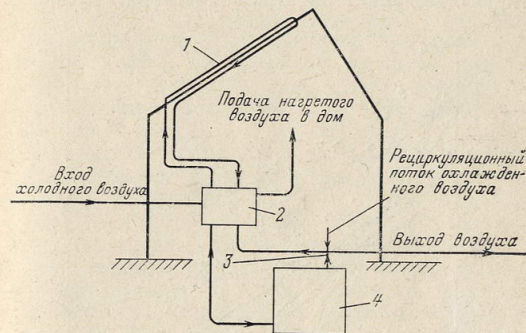


Рис. 3.21. Принципиальная схема воздушного солнечного отопления. 1 — солнечный коллектор; 2 — вентилятор и блок управления; 3 — вентиль на направлении потока; 4 — аккумулятор.

тщательно отобранной гальки. С помощью вентилятора и блока управления можно реализовать любой из следующих режимов работы:

- обогрев дома непосредственно от коллектора;
- обогрев дома от аккумулятора;
- аккумуляторирование тепла из коллектора;
- охлаждение аккумулятора холодным наружным воздухом;
- охлаждение дома от аккумулятора.

Двойное применение аккумулятора как для охлаждения летом, так и для обогрева зимой является дополнительным положительным фактором. Заметим, что на схеме не показан вспомогательный источник энергии.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛЕКТОРОВ

Соотношение (3.2), полученное из уравнения Хотелла — Уиллера — Блиса, определяет общую тепловую эффективность коллектора и может быть использовано

для сравнения характеристик коллекторов различного типа. Зависимость КПД коллектора от параметра $(T_{\text{ср}} - T_{\text{окр}}) G_k^{-1}$ для четырнадцати различных типов коллектора по данным, опубликованным в 1976 г., показана на рис. 3.22. Вероятно, что такая форма представления данных будет иметь все большее значение, поскольку во всех странах вводятся национальные стандарты, регламентирующие характеристики коллектора.

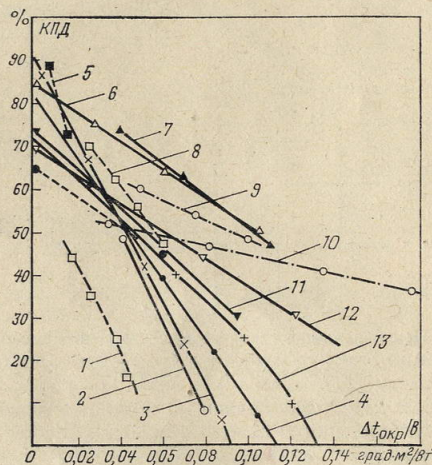


Рис. 3.22. КПД солнечных коллекторов различного типа.

1 — струйный коллектор; 2 — коллектор с тепловой трубой; 3 и 4 — коллекторы Хейвуда с одинарным и двойным остеклением соответственно; 5 — коллектор, обеспечивающий небольшое повышение температуры; 6 — коллектор фирмы «Ханиуэлл» (два просветляющих покрытия, селективный); 7 — коллектор с тепловой ловушкой; 8 — воздушонагреватели конструкции Лефа и Хейвуда; 9 — вакуумированный трубчатый коллектор фирмы «Филипс»; 10 — вакуумированный трубчатый коллектор фирмы «Оуэнс-Иллинойс»; 11 — коллектор фирмы «Ханиуэлл» с двойным остеклением; 12 — коллектор фирмы «Ханиуэлл» с двойным остеклением и селективной поглощающей поверхностью; 13 — коллектор типа PPG с двойным остеклением и селективным покрытием.

Характеристики всех типов коллектора, кроме двух простейших — коллектора для небольшого повышения температуры [40] и струйного [46, 87], — проходят через прямоугольник, ограниченный значениями КПД от 50 до 70% и значениями параметра $(T_{\text{ср}} - T_{\text{окр}}) G_k^{-1}$ от 58

0,03 до 0,05. Следовательно, при интенсивности падающей радиации более 500 Вт/м² все эти нагреватели будут иметь почти одинаковую производительность при нагреве рабочей жидкости до температуры, на 15–30 °С превышающей температуру окружающей среды. Указанный диапазон температур наиболее характерен для установок в коммунально-бытовой сфере. Коллектор струйного типа и коллектор для небольшого повышения температуры не приемлемы в качестве источника тепла при высокой температуре, поскольку максимально возможное повышение температуры, по-видимому, составляет около 60 °С. Обладая хорошими эксплуатационными качествами промышленный коллектор плоского типа фирмы «Ханиуэлл» с двумя просветляющими стеклянными покрытиями и селективной поверхностью поглощающей пластины [88] и более простой по конструкции коллектор с тепловой ловушкой [46] имеют практически одинаковый КПД, хотя характеристики последнего следовало бы оценить в условиях эксплуатации. Судя по первым опубликованным результатам, к концу 70-х годов можно ожидать значительного улучшения характеристик составного параболического концентратора [89] и коллектора с тепловой трубой [74]. Оба эти коллектора интенсивно разрабатываются в рамках научно-исследовательских программ США. Вакуумированные трубчатые коллекторы [24, 69] не только прекрасно работают в условиях хорошей радиации, обеспечивая высокие перепады температур, но и при плохой радиации имеют хорошие характеристики. Результаты работы Хейвуда [3] по определению характеристик коллектора с двойным и одинарным остеклением могут быть использованы в качестве эталонных для всех простых плоских коллекторов, тогда как коллектор PPG [90] принадлежит к числу более совершенных, выпускаемых промышленностью устройств. Простые воздушонагреватели [3, 81] имеют относительно хорошие характеристики по сравнению с обычными водонагревателями.

Хотя кривые на рис. 3.22 основаны на уравнении со многими упрощающими допущениями, такая форма представления данных позволяет объективно сравнивать между собой коллекторы, испытанные в разных районах при весьма различных уровнях падающего солнечного излучения. Однако она не дает возможности оценить

или сравнить экономические показатели, и коллекторы с весьма близкими тепловыми характеристиками могут по меньшей мере вдвое отличаться по стоимости. Кроме того, данный анализ не позволяет определить еще один важный с практической точки зрения параметр — расчетный срок службы коллектора.

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

С увеличением числа новых солнечных нагревателей, появившихся в конце 70-х годов, очень важно было принять в международном масштабе стандартный метод их испытаний. Первой страной, установившей национальный стандарт в 1966 г., был Израиль [91]. Этому шагу предшествовали эксперименты, выполненные в национальной физической лаборатории [92]. В недавней работе Тейбора [93] приводится методика испытаний, основанная на уравнении, которое по существу представляет собой уравнение (3.2), то есть модифицированное уравнение Хоттеля — Уиллера — Блиса. Предложенный Тейбором метод испытаний требует последовательного соединения на четыре коллектора одной серии. В любой момент времени интенсивность солнечной радиации и расход теплоносителя одинаковы для всех коллекторов, так что в результате одного опыта можно получить несколько точек характеристики, аналогичной любой из кривых рис. 3.22. Данный метод предусматривает проведение испытаний в ясную, почти безветренную погоду. Расчет обычного плоского коллектора показывает, что повышение скорости ветра от 0 до 4,7 м/с обуславливает снижение его КПД на 0,5% при $T_{ср} - T_{окр} = 4,5^\circ\text{C}$, на 6,5% при $T_{ср} - T_{окр} = 26,7^\circ\text{C}$ и на 19,5% при $T_{ср} - T_{окр} = 48,9^\circ\text{C}$. В Австралии была предложена нелинейная математическая модель, учитывающая влияние скорости ветра [94].

Проект стандартизации испытаний как солнечных коллекторов [95], так и теплоаккумулирующих устройств [96] был разработан в США. Он также основан на уравнении (3.2) и детально определяет методы измерений различных параметров, а именно температуры, давления, расхода и интенсивности солнечной радиации. Для построения характеристики любого коллектора рекомендуется иметь по крайней мере четыре экспериментальных точки при значениях $T_{ср} - T_{окр}$, равных 10, 30,

50 и 70°C . Применение солнечного имитатора или искусственного солнца позволяет проводить испытания коллектора при стандартных значениях температуры окружающей среды, скорости ветра и интенсивности падающего излучения. Результаты определения КПД коллектора в опытах с имитатором, проводившихся в США [97, 98], хорошо согласуются с результатами натуральных испытаний. Применение солнечного имитатора входит в программу исследований Кардиффского университета Великобритании. В странах, где приход солнечной радиации резко колеблется в течение дня, имитаторы могут играть важную роль в технике испытаний.

АККУМУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Аккумуляция тепловой энергии необходима как при нагреве воды для бытовых нужд и отоплении помещений, так и для обеспечения высокотемпературных режимов работы теплосилового оборудования. Имеются и другие области применения аккумулярующих устройств, как, например, растениеводство или технологические процессы в различных отраслях промышленности. В некоторых областях применения, в частности при охлаждении помещений в летние месяцы, было бы полезно, если бы аккумулятор мог также накапливать холод. Выбор аккумулярующего материала зависит от конкретного назначения установки, и для применения в быту были разработаны водяные и галечные аккумулярующие системы. Солнечный воздухонагреватель в сочетании с аккумулятором галечного типа показан на рис. 3.23. Эта установка впервые была описана в 1974 г. [99] и представляет собой передвижное А-образное теплоизолированное устройство, содержащее промышленную речную гальку. Воздухонагреватель расположен на обращенной к югу наклонной стене с навешенной на нее откидной отражающей поверхностью, которую можно использовать для закрытия коллектора ночью с целью уменьшения тепловых потерь. Исследования работы аккумуляторов со слоевой галечной насадкой проводились в течение нескольких лет в Австралии [100, 101, 102], а преимуществами замены гальки хорошо адсорбирующим материалом, например силикагелем или активированным глиноземом, были рассмотрены Клоузом и Прайером [103].

Вода и камни являются типичными примерами мате-

риалов, которые аккумулируют энергию за счет теплоемкости, но их применение ограничено из-за ее сравнительно низких значений. Эффект теплоты плавления (скрытой теплоты), которая поглощается материалом при его переходе из твердого состояния в жидкое, соз-

Таблица 3.3

Параметры материалов для аккумулирования 1 ГДж при повышении температуры на 20 °С

Материал	Параметры материалов для аккумулирования 1 ГДж						
	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Теплота плавления, кДж/кг	Плотность, кг/м³	Масса, кг	Относительная масса	Объем, м³	Относительный объем
Камень	0,837	—	2242	59 737	16,4	26,6	11,69
Вода	4,187	—	1000	11 941	3,27	11,941	5,25
Материал, претерпевающий плавление	2,09	232,6	1602	3644	1	2,274	1

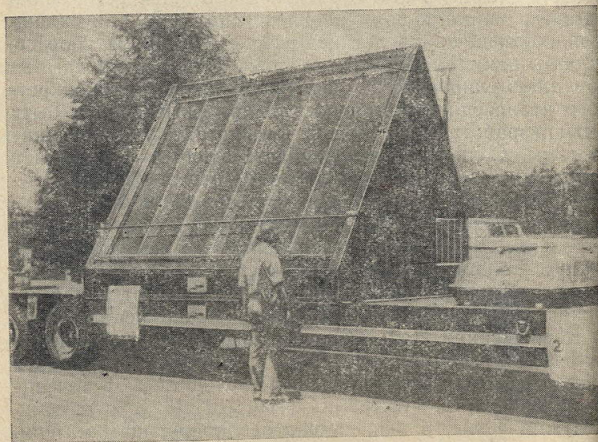


Рис. 3.23. Передвижной солнечный воздушнонагреватель с галечным аккумулятором.

дает благоприятную возможность аккумулирования данного количества тепла в пределах значительно меньшего объема. Это иллюстрируется данными табл. 3.3. Таблица основана на данных, заимствованных из работы Теллес [104], где рассмотрены свойства широкого класса гидратов солей, которые могут быть использованы

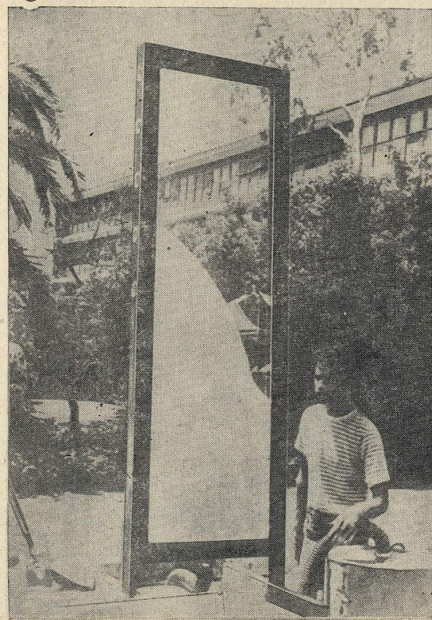


Рис. 3.24. Шариковая стена (без наполнителя).

для аккумулирования тепла. Наименее дорогим и наиболее доступным материалом является десятиводный сернокислый натрий $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ или глауберова соль с добавкой от 3 до 4% буры в качестве образующего агента для достижения полной кристаллизации. Эти процессы происходят при температуре около 30 °С. Для

аккумуляции при высоких температурах (от 200 до 300 °C) рассматривались другие соли [105, 106], а также гидратация неорганических окисей, в основном MgO и CaO [107]. Было также проведено аналитическое исследование теплового взаимодействия между подземной аккумуляющей системой и окружающей почвой [108].

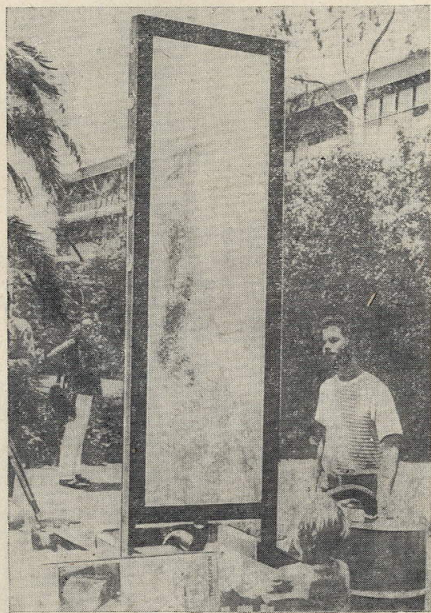


Рис. 3.25. Шариковая стена (с наполнителем).

Использование обогреваемого дома в качестве аккумулятора энергии хорошо известно, но первоначальная идея сохранения тепла внутри дома, предложенная Зонувёком под названием шариковой стены, была разработана Беером [109]. Такая стена показана на рис. 3.24 (без наполнения) и на рис. 3.25 (с наполнителем). Ша-

рки из пенополистирола вдуваются в промежуток между двумя оконными стеклами, чтобы предотвратить потери тепла в ночное время зимой, или они могут быть использованы с целью воспрепятствовать нежелательному притоку тепла в помещение летом. Эта система имеет преимущество по сравнению с откидными дверями или ставнями.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ

За последние 40 лет была неоднократно продемонстрирована возможность по крайней мере частичного отопления зданий за счет солнечной энергии. Критерии, положенные в основу решения проблемы собирания, аккумуляции и распределения солнечной энергии, впервые предложенные в 1949 г. Теллесом [1], несколько изменились с тех пор, поскольку с ростом числа установок накапливался практический опыт. Вначале особое значение придавалось собиранию солнечной энергии в зимний период. В дальнейшем усилия были направлены на то, чтобы как можно более эффективно использовать диффузное излучение.

Целью инженерной практики всегда являлся надежный, экономичный и простой коллектор, но анализ большого числа солнечных установок показывает, что очень немногие из них могут удовлетворить всем трем критериям.

Огромные усилия в научно-исследовательской работе были направлены на решение проблемы аккумуляции солнечной энергии, получаемой в летнее время, для использования ее в последующий зимний период. Принцип применения очень большого, хорошо изолированного бака-аккумулятора, расположенного под зданием, был описан Хоттемом и Вертцем в 1942 г. [2], однако их замечание о том, что устройство оказалось в высшей степени неэкономичным, в значительной степени повлияло на направление работ по исследованию аккумуляющих систем на протяжении следующих двух десятилетий. В настоящее время более полно изучено влияние широты и радиационных климатических характеристик местности. Первоначально считалось,

что с экономической точки зрения оправданно делать запас энергии только на несколько дней, так что полученную во время ясных зимних дней солнечную энергию можно было использовать в последующий период облачной погоды; во всяком случае в районах с значительным приходом солнечной радиации в зимнее время это возможно. Однако в нескольких солнечных домах были достигнуты более длительные, вплоть до нескольких месяцев, периоды хранения энергии, причём благодаря химическим методам аккумулярования, впервые предложенным Телкес, можно существенно уменьшить общий объём аккумулятора. Кроме того, Телкес обратила внимание на то, что нужна управляемая терморегулятором распределительная система, простая в эксплуатации и не создающая жителям дополнительных трудностей, а также на то, что нельзя допускать перегрева здания, особенно в условиях быстрого меняющейся погоды в весенне-осенние периоды и необходимо, чтобы система солнечного отопления в коем случае не обогревала помещение летом; при этом требуется, чтобы температура в хорошо изолированном аккумуляторе для межсезонного хранения энергии достигала максимально высокого уровня, возможного при использовании водяного или каменного аккумулятора.

Термин «солнечный дом» впервые стал хорошо известен в США в 30-е годы, когда начали применять большие обращенные к югу окна, чтобы косые лучи никого зимнего солнца могли проникать внутрь комнат [3]. Было отмечено, что при этом удавалось экономить топливо в течение дня, однако запастись солнечную энергию было невозможно, а в ночное время и в периоды облачной погоды тепловые потери были настолько велики, что экономия топлива в продолжение всего отопительного сезона оказывалась относительно малой. Чтобы получить количественные данные по экономии топлива за счет использования солнечной энергии, в Лафаетском университете под руководством профессора Хатчинсона были построены два одинаковых дома [4, 5, 6]. Оба дома имели герметичное двойное остекление оконных проемов, но обычный дом имел окна стандартных размеров, в то время как южная сторона солнечного дома представляла собой застекленную поверхность большой площади. Оба дома обогревались с помощью электричества и температурный режим в них

был идентичным. Самым удивительным и неожиданным результатом, полученным в этих опытах, явилось то, что солнечному дому в течение испытательного периода декабрь — январь, потребовалось примерно на 16% больше тепла, чем традиционному. Очевидно, что солнечные окна большей площади способствовали потере большего количества тепла в ночное время и в периоды облачной погоды. Если бы дома были заселены, то, вероятно, наличие тяжелых штор, задерживающихся на ночь, могло заметно изменить результаты.

С этого момента исследования по применению солнечного отопления непрерывно развивались. Работы, начатые Кэботом в Массачусетском технологическом институте (МТИ), привели в 1940 г. к строительству солнечного дома I, а в дальнейшем к созданию серии различных солнечных домов. Профессор Лёф из Колорадского университета был первым экспериментатором, применившим солнечные воздушонагреватели с суммарной площадью коллектора, равной приблизительно одной трети площади крыши, нагретый воздух из которых направлялся либо непосредственно в комнаты, либо в теплоаккумулирующий бункер, заполненный галькой. Емкость этого аккумулятора соответствовала количеству энергии, необходимой для отопления дома в течение одних суток; в результате в течение первого сезона в 1946 г. было сэкономлено приблизительно 20% топлива, необходимого для обогрева дома [7, 8]. Спустя 30 лет, к началу 1976 г., число зданий с солнечным отоплением, которые были построены после 1940 г. или находились в процессе строительства, превысило 200. Отчет Шарклифа, выпущенный в марте 1975 г. [9], содержал подробное описание более 100 таких зданий в США и около 20 в других странах. К 1976 г. в Великобритании благодаря увеличивающейся поддержке официальных правительственных учреждений было построено около двадцати зданий с солнечным отоплением.

Различные жилые дома и другие здания, описание которых приведено в следующих разделах, выбраны так, чтобы показать историю развития солнечного отопления. Описание начинается с разработок, выполненных в США, где эти работы начались раньше, чем в других странах, далее даются примеры, относящиеся к нескольким другим странам.

Солнечный дом I (МТИ). Построен в 1939 г., состоял из двух помещений — служебного и лабораторного общей полезной площадью $46,5 \text{ м}^2$ [2, 9, 10, 11]. Большая часть крыши, наклоненной под углом 30° к югу, представляла собой коллектор с тройным остеклением общей площадью $37,9 \text{ м}^2$ и площадью теплоприемной поверхности $33,45 \text{ м}^2$. Поглощающая поверхность была выполнена из зачерненного медного листа с припаянными параллельными медными трубами. В подвале размещался большой бак-аккумулятор горячей воды емкостью $65,86 \text{ м}^3$ со средней толщиной изоляции 665 мм . В отношении тепловых характеристик здание было спроектировано так, чтобы соответствовать шестикомнатному дому с умеренной изоляцией. Это было первое здание, полностью обогреваемое за счет солнечной энергии, поскольку тепло, накапливаемое в летний период, могло быть использовано зимой, однако такой способ признали неэкономичным и разрушили здание в 1941 г.

Солнечный дом II (МТИ). В 1947 г. было построено одноэтажное лабораторное здание с размерами приблизительно $4,26 \times 13,4 \text{ м}$ и высотой $2,44 \text{ м}$; солнечный коллектор, состоящий из семи отдельных панелей, площадью 10 м^2 каждая, располагался на южной стене под углом к вертикали [9, 10, 12]. Были исследованы различные типы аккумулирующей системы, а в период 1947—1949 гг. на базе этого дома был создан дом III.

Солнечный дом III (МТИ). На крыше дома, равно-го по площади дому II, был смонтирован коллектор с двойным остеклением и поглощающей системой, выполненной, как в доме I [9, 10, 11]; его площадь составляла $37,2 \text{ м}^2$ при наклоне коллектора 57° к горизонту. Аккумулятором служил цилиндрический бак емкостью $4,5 \text{ м}^3$, установленный на чердаке. В период четырех зимних месяцев система обеспечивала 85% энергии на отопление помещений, а впоследствии 90% . В 1955 г. дом сгорел.

Солнечный дом IV (МТИ). Построенный в 1959 г. дом [9—11], который показан на рис. 4.1, считался уникальным [14], поскольку он проектировался именно как солнечный дом, т. е. так, чтобы в нем по возможности наиболее полно использовалась поглощаемая энергия,

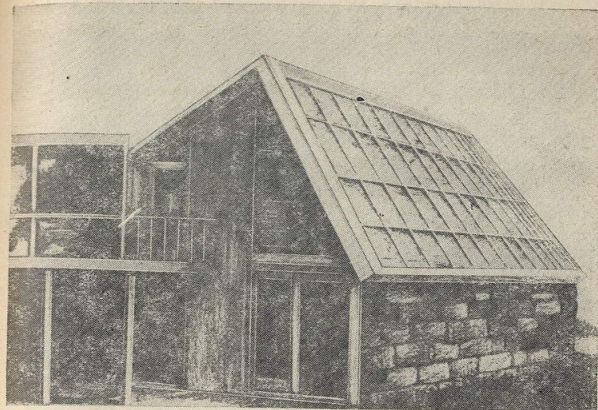


Рис. 4.1. Солнечный дом IV (МТИ).

были сведены до минимума энергетические потери, чтобы он по комфорту отвечал требованиям, предъявляемым к современному жилищу. Дом представлял собой двухэтажную постройку полезной жилой площадью $134,7 \text{ м}^2$. Часть южной стены дома представляла собой солнечный коллектор площадью $59,5 \text{ м}^2$, расположенный под углом 60° к горизонту. Коллектор с двойным остеклением был переделан: к зачерненному алюминиевому листу, суммарная поглощательная способность которого составляла согласно измерениям $0,97$, были механически прижаты медные трубки. Хорошо изолированный водяной бак-аккумулятор имел емкость $5,7 \text{ м}^3$. В период эксплуатации обитатели дома старались не изменять своих привычек и образа жизни, не приспособлялись к солнечному отоплению, так что хозяйка занималась мытьем посуды и стиркой тогда, когда это было ей удобно, а не только тогда, когда сияло солнце. В течение зимнего сезона, с 30 сентября 1959 г. по 30 марта 1960 г., 44% нагрузки на отопление помещений и 57% нагрузки на горячее водоснабжение для бытовых нужд удовлетворялось за счет системы сол-

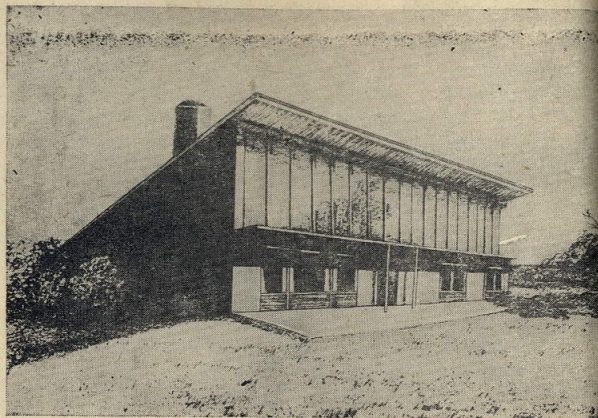


Рис. 4.2. Солнечный дом в Доувере.

нечного энергоснабжения. Это было значительно меньше расчетных эксплуатационных характеристик, что объяснялось суровыми погодными условиями, которыми в том году характеризовался зимний период. Через два года эксплуатационные трудности заставили отказаться от этой системы, хотя при ее использовании в течение двух зим 48% суммарной нагрузки обеспечивалось за счет солнечной энергии.

Солнечный дом в Доувере. Система солнечного отопления первого дома, который должен был полностью обогреваться за счет солнечной энергии, разработана Теллес [3, 9, 10], являвшейся в то время соискателем при МТИ. Проект дома, показанного на рис. 4.2, выполнен бостонским архитектором Э. Раймонд. Строительство осуществлено в рамках частного проекта на средства А. Пибоди в Доувере (штат Массачусетс); впервые дом был заселен в сочельник 1949 г. Вертикально расположенный воздушный коллектор с двойным остеклением площадью 66,89 м² занял целиком южный фасад двухэтажного здания на уровне второго этажа. Каждая панель коллектора содержала два оконных стекла раз-

мерами 3,28×1,22 м, разделенных воздушным зазором шириной 19 мм. Поглощающая поверхность была выполнена из стандартных листов оцинкованной стали, окрашенных обычной черной матовой краской. Позади каждого листа имелся воздушный промежуток шириной 76 мм, по которому мог циркулировать воздух по направлению к трем теплоаккумулирующим бункерам. В этих бункерах общим объемом около 13,3 м³ находились сосуды с глауберовой солью — декагидратом сернокислого натрия $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Теллес ясно понимала, что если принять для аккумулялирования тепла на продолжительные периоды воду или камни, то основная трудность будет состоять в том, чтобы найти достаточно большое пространство для размещения аккумулятора, и предложила использовать скрытую теплоту плавления или растворения химических соединений, например глауберовой соли с температурой плавления около 32° С; запас тепла был при этом приблизительно в шесть или семь раз больше, чем в водяном аккумуляторе того же объема. Обогревался только нижний этаж площадью 135,3 м², причем тепло из аккумулятора подавалось в комнаты с помощью небольших вентиляторов, которые управлялись индивидуальными терморегуляторами. Исходная энергоемкость аккумулятора была рассчитана на покрытие тепловой нагрузки в продолжение 12 дней в зимний период. В течение первого года эксплуатации система солнечного отопления полностью обеспечивала тепловую нагрузку, затем, однако, характеристики ухудшались вследствие расслоения фаз, необратимости теплового эффекта при плавлении и переохлаждения соли, так что через некоторое время потребовался источник дополнительного тепла. Через четыре года, когда дом был расширен, солнечную отопительную систему ликвидировали, но к тому времени были установлены некоторые очень важные особенности этой схемы:

эффективность применения солнечного воздушного коллектора, имеющего простую конструкцию и являющегося одновременно тепловым коллектором и стеной. Такое использование коллектора в качестве стены или части крыши было характерной чертой большинства последующих конструкций солнечных домов;

преимущество наличия регулируемых температурных зон в различных частях дома. Это обстоятельство

не учитывалось во многих более поздних проектах, но впоследствии снова была подтверждена его важность для экономии энергии;

большая энергоемкость теплового аккумулятора большого объема, которая обеспечивалась за счет скрытой теплоты плавления солей. Проблему расслоения фаз при повторении циклов еще предстояло решить, и это оказалось одной из наиболее трудных проблем в практике применения солнечной энергии для отопления.

Бунгало «Блосс-Хауз». Имевшееся в Амадо (штат Аризона) одноэтажное бунгало полезной площадью 62,43 м² было в 1954—1955 гг. реконструировано и снабжено солнечной воздушной отопительной системой с каменным аккумулятором [15]. Коллектор с одинарным остеклением состоял из четырех слоев черной хлопчатобумажной ткани с зазором между слоями шириной 12,5 мм. Он имел площадь 29,26 м² и был установлен вплотную к бунгало под углом 53° к горизонтали. Аккумулирующая система из каменной диаметром 100 мм, общей массой 65 т и объемом приблизительно 36,8 м³ была расположена также вблизи бунгало в изолированной подземной камере. В процессе эксплуатации при соответствующем уровне радиации воздух подавался вентилятором из коллектора в аккумулятор. По мере необходимости второй вентилятор снабжал дом воздухом либо прямо из коллектора, либо из аккумулирующей системы. Система полностью обеспечивала отопительную нагрузку бунгало в зимний период, и было объявлено, что это — первый дом в США, отопление которого на 100% обеспечивается за счет солнечной энергии. Для охлаждения в летний период воздух в ночные часы прогонялся сквозь отдельную горизонтальную насадку, покрытую черной тканью. Таким образом воздух дополнительно охлаждался — примерно на 1°С, затем направлялся в аккумулирующую систему. В течение дня охлажденный воздух можно было направлять в бунгало. Систему демонтировали после успешной эксплуатации в течение немногим более года.

Интересной особенностью проекта было то, что емкость аккумулятора соответствовала десятидневному запасу тепла. Этого было вполне достаточно, поскольку в зимний период солнце в течение одного дня обеспечивало более чем двухдневную потребность в тепле. В более северных широтах необходима значительно большая ем-

кость аккумулятора, чтобы компенсировать существенно более низкий уровень солнечного излучения в зимний период. Экономические показатели в то время были неблагоприятными, поскольку капитальные затраты оказались в пять раз больше, чем для обычных отопительных систем, так что было невозможно возместить капитальные затраты и проценты на капитал количеством сэкономленного топлива — отношение капитальных затрат к стоимости сэкономленного топлива составляло 50:1. Невыгодность этого проекта являлась очевидной.

Административное здание в Альбукерке конструкции Бриджеса и Пэксона. Первое в мире административное здание, обогреваемое за счет солнечной энергии, было построено в Альбукерке (штат Нью-Мексико) и введено в эксплуатацию в августе 1956 г. [16, 17]. Полезная площадь здания составляла примерно 400 м², и оно было снабжено обращенными к югу плоскими коллекторами, наклоненными к горизонтали под углом 60°, как показано на рис. 4.3. Эффективная площадь коллектора с одинарным остеклением равнялась примерно 70 м², а емкость подземного изолированного бака-аккумулятора составляла 22,7 м³. Все элементы оборудования были стандартными, за исключением коллекторов, которые состояли из алюминиевых листов толщиной 0,476 мм, окрашенных неселективной черной краской, и медных труб с наружным диаметром 38 мм, припаянных к обратной стороне листов на расстоянии 150 мм друг от друга и образующих непрерывный контур, содержащий нагреваемую воду. В здание тепло подавалось с тепловой водой, поступающей из бака-аккумулятора при температуре около 40°С и проходящей по трубам, расположенным в напольных и потолочных панелях. Когда температура воды в аккумуляторе оказывалась недостаточно высокой, чтобы можно было удовлетворить потребности здания в тепле, использовался тепловой насос.

Преимущества использования теплового насоса с солнечным коллектором были ясно изложены в первом сообщении о характеристиках здания [16]. В летний период тепловой насос может служить для охлаждения здания, причем такое его использование для двух целей является выгодным. В холодную и облачную погоду можно допустить, чтобы температура коллектора и аккумулятора сильно понизилась, и получить в результате повышение эффективности работы коллектора и

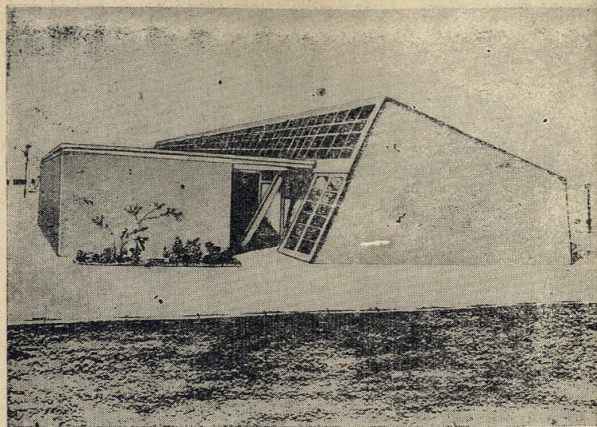


Рис. 4.3. Административное здание в Альбукерке конструкции Бриджеса и Пэксона.

увеличение энергоемкости аккумулятора. Использование теплового насоса позволяет также устанавливать коллектор и бак-аккумулятор меньших размеров. В первый сезон эксплуатации прямое солнечное отопление удовлетворяло 62,7% суммарной отопительной нагрузки, а оставшиеся 37,3% обеспечивались тепловым насосом. Следует подчеркнуть, что даже при работе теплового насоса главным источником тепла оставались солнечные коллекторы. Количество энергии, расходуемой тепловым насосом на собственные нужды, составляло только 8,2% суммарной отопительной нагрузки. Интересно отметить, что при существовавших в то время (1956—1957 гг.) ценах на топливо экономия средств на отопление не возмещала необходимых начальных издержек на солнечные отопительные системы в большинстве районов США. Но всегда можно найти такие районы, в которых высокие цены на топливо обуславливают экономическую целесообразность использования солнечных отопительных систем. Система в своем первоначальном виде работала около шести лет с отдельными случайными неисправностями, такими как, например, повреждение, вызван-

ное неполным дренированием системы во время мороза. Повреждались также гибкие резиновые трубчатые соединения.

Система солнечного отопления была восстановлена в рамках проекта ЭРДА* в 1974 г. [17]. Принципиальное изменение состояло в том, что для устранения проблемы замерзания самодренирующаяся система была заменена системой, содержащей водоэтиленгликолевой теплообменник, насос и сеть трубопроводов; кроме того, были добавлены пять небольших компактных водовоздушных тепловых насосов, которые должны использовать энергию теплой воды, циркулирующей в здании, и нагнетать нагретый воздух в комнаты. Главной целью проекта является получение обобщенных данных для проектирования солнечных энергетических систем с тепловыми насосами, необходимых архитекторам и инженерам-консультантам.

Дом Мэтью, Кус-Бей (штат Орегон). Этот дом был спроектирован и построен владельцем Мэтью в 1966—1967 гг. и является лучшим для того времени примером солнечного дома, построенного частным образом [18—20]. Многие важные конструктивные особенности, присущие этому дому, могут быть использованы при создании солнечной отопительной системы любого дома. Он также обладает классической простотой первых солнечных домов; так, жилые комнаты и кухня расположены на южной стороне, чтобы использовать солнце в зимний период, а в летний период эти помещения затеняются длинным навесом. На рис. 4.4 показаны системы солнечного отопления этого дома. Коллектор высотой 1,5 м и длиной 24,4 м, подробно описанный в гл. 8, расположен на крыше и для увеличения эффективности работы снабжен рефлектором, выполненным из обычной алюминиевой фольги, приклеенной кровельным компаундом. Вода из главного бака-аккумулятора прокачивается по трубопроводам насосом мощностью 184 Вт, который включается в работу с помощью терморегулятора, установленного на крыше. Из трубопроводов вода сливается в 170-литровый расширительный бак, а затем в бак-аккумулятор, если насос не работает. Бак-аккумулятор имеет изоляцию только со стороны

* Управление по исследованиям и разработкам в области энергетики США. Существовало по 1978 г., затем его функции были переданы созданному Министерству энергетики США. (Прим. ред.)

расположенного над ним подвала и не изолирован от почвы, прилегающей к боковым стенкам и днищу. Таким образом, в некоторые периоды года в почве может аккумулироваться или теряться значительное количество тепла. Так, в сезон 1974—1975 гг. было отмечено аккумулирование тепла в осенний период. На крупных

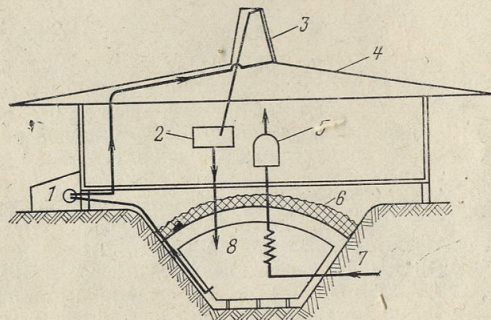


Рис. 4.4. Система солнечного отопления дома Мэтью.

1 — насос; 2 — расширительный бак; 3 — солнечный коллектор; 4 — отражающая поверхность; 5 — нагреватель воды для бытовых нужд; 6 — изоляция из стекловолны; 7 — подпитка нагревателя воды для бытовых нужд; 8 — бак-аккумулятор.

тепловых магистралях, соединяющих отсек бака-аккумулятора с жилым помещением, расположены изолированные заслонки, которые управляются терморегуляторами, так что летом отопление можно полностью отключить. Вентиляторы для принудительной циркуляции воздуха отсутствуют. Стоимость материалов, включая стальной бак-аккумулятор емкостью 30 м³ и коллектор, составляла в 1967 г. менее 1000 долл. Сооружение бака, с которого Мэтью начал строительство, заняло пять недель, на остальную систему потребовалось восемь недель. В январе 1974 г. к системе был присоединен отдельно стоящий коллектор площадью 30 м², смонтированный приблизительно на расстоянии 20 м от дома.

Следует обратить внимание на ряд особенностей солнечного дома Мэтью:

дом был построен из стандартных деталей без специальной изоляции, хотя солнечное отопление предусматривалось с самого начала;

дом расположен сравнительно далеко на севере (42°5 с. ш.) в районе, известном сплошной облачностью в зимний период;

сочетание почти вертикального солнечного коллектора (82° к горизонтالي) с почти горизонтальной отражающей поверхностью (8° к горизонтالي);

относительно большая (30 м³) емкость бака-аккумулятора;

сочетание установленного на крыше и отдельно стоящего коллекторов с большими размещенными перед ними отражающими поверхностями.

Опубликованы подробные результаты, полученные в период 1974—1975 гг. [18], из которых следует, что 85% суммарных потребностей в тепле на отопление удовлетворялось за счет аккумулированной солнечной энергии. Семья Мэтью допускала, чтобы температура внутри помещения падала ниже проектного значения 21°С, поскольку поступления тепла из коллектора и бака-аккумулятора уменьшались в течение зимы.

Дома Томасона. Первый дом, спроектированный Томасоном, был одноэтажной постройкой с подвалом и аккумулятором, установленным под покатой крышей [21—24]. Построенный в 1959 г. в Вашингтоне (округ Колумбия) дом имел коллектор площадью 28 м² при общей жилой площади 139 м². Томасон одним из первых конструкторов применил простую и относительно недорогую коллекторную систему струйного типа, в которой вода из бака-аккумулятора направляется в горизонтальную распределительную трубу в верхней части коллектора. В первом варианте системы в качестве поглощающей поверхности использовался черный гофрированный алюминий и коллектор имел два слоя прозрачной изоляции — один из стекла, а другой — из прозрачной полиэфирной пленки. Вода, вытекающая через отверстия в распределительной трубе, попадала непосредственно в расположенные против них канавки в гофрированном листе. Нагретая вода собиралась в открытом желобе, расположенном в основании коллектора, и возвращалась в бак-аккумулятор. Аккумулятор представлял собой водяной бак емкостью 6,1 м³, вокруг которого размещалось 50 т гальки диаметром 100 мм. Система нагрева воды для бытовых нужд включала 1000-литровый подогреватель. Энергоемкость аккумулятора в системе обеспечивала примерно пятидневный

запас тепла на отопление, и утверждалось, что система солнечного отопления удовлетворяла 95% отопительной нагрузки. Для охлаждения в летний период вода в ночные часы направлялась по неостекленным, обращенным к северу каналам, расположенным на крыше, и охлаждалась за счет испарения, конвекции и излучения.

Второй дом, также сооруженный в Вашингтоне (округ Колумбия) в 1961 г., имел коллектор площадью 52 м² и отапливаемое жилое помещение площадью 63 м². Полностью похожий по замыслу на первый дом, он получал большее количество тепла за счет горизонтальной алюминиевой отражающей поверхности площадью 31 м², находившейся у основания обращенного к югу коллектора. В третьем доме Томасона, построенном в 1963 г., бак-аккумулятор использовался одновременно в качестве закрытого обогреваемого плавательного бассейна, а система коллекторов была полностью смонтирована на крыше таким образом, что солнечное излучение в зимний период непосредственно попадало через окна в жилую комнату и плавательный бассейн, расположенный на южной стороне. Четвертый дом никогда полностью не испытывался. Дома с пятого по седьмой были описаны в 1973 г. [23], но только шестой, частично отапливаемый роскошный дом в Мехико-Сити был полностью построен.

Проект седьмого дома включал расположенный на крыше мелководный водоем-коллектор с отражателем. Каждую ночь нагретая вода могла стекать в теплоаккумулирующую емкость в подвале и нагревать пол и жилое помещение. По утрам маломощный насос подавал воду на крышу. В летний период система могла работать на охлаждение помещения, однако в каждом конкретном случае применения такой системы требуются детальные проектные проработки.

Два других дома были построены в графстве Принца Георга, в нескольких километрах от Вашингтона. В одном из этих домов [24] были внесены некоторые изменения в аккумуляторную и коллекторную системы, испытанные в предыдущих домах. Главное изменение состоит в том, что камни, окружающие горизонтальный цилиндрический водяной бак-аккумулятор емкостью 16,1 м³, в зимний период также могут нагреваться через систему медных труб нагревателем, работающим

на жидком топливе. Кроме того, через каменный аккумулятор проходят две вытяжные трубы из парового котла, по которым в зимний период отводятся отработанные газы.

Конструкции домов Томасона широко изучаются, и во многих новых проектах солнечных домов реализуются идеи, заимствованные из этих систем.

Солнечный дом «Солар-1» (проект Делаверского университета, США). «Солар-1» был построен в 1973 г. и представлял собой первый дом, в котором сочета-

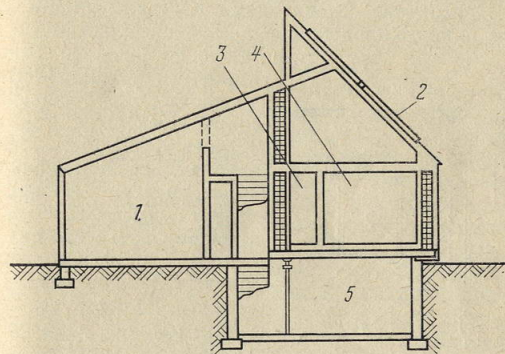


Рис. 4.5. Солнечный дом «Солар-1».

1 — гараж; 2 — солнечные коллекторы, обращенные к югу; 3 — холл; 4 — спальня; 5 — подвал.

лось тепловое и фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии в одной и той же коллекторной системе [25, 26]. Другой яркой отличительной чертой дома является попытка широкого использования теплоты плавления для теплового аккумулирования. Для передачи тепла из коллекторов используется воздух, а между «холодной» и «горячей» аккумулирующими системами имеется тепловой насос. Основные идеи такого подхода изложены в отчете [26], в котором отмечается, что для применения в быту требуется энергия различного качества — низкопотенциальная тепловая энергия

для отопления или кондиционирования воздуха, высокопотенциальная тепловая энергия для горячего водоснабжения, приготовления пищи и питания холодильников, а также электрическая энергия для освещения и питания бытовых электроприборов. Превращение одного вида энергии в другой всегда связано с потерями энергии, поэтому желательно обеспечить возможно большее разнообразие видов энергии при преобразовании солнечной энергии. Поскольку в начале 70-х годов не было данных, необходимых для оптимизации подобных систем, дом был спроектирован таким образом, чтобы максимально обеспечить возможность эксперимента. Поперечное сечение дома показано на рис. 4.5. Главное одноэтажное жилое помещение состоит из

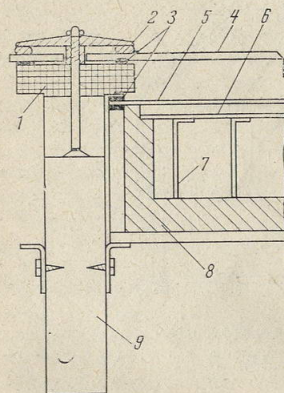


Рис. 4.6. Коллектор дома «Солар-1».

1 — бутылкачук; 2 — эластичная замазка; 3 — уплотнения; 4 — плексиглас с покрытием «сabayon»; 5 — стекло; 6 — алюминий; 7 — раба; 8 — пенополиуретан; 9 — стропила крыши.

западу от южного направления. Три коллектора были заполнены солнечными элементами из сульфата кадмия — сульфида меди $\text{CdS/Cu}_2\text{S}$, изготовленными в период с 1968 г. по 1970 г. компанией «Клевит-Голд

Корп». Сто четыре элемента соединялись последовательно в батарею и в каждый коллектор устанавливались по три такие батареи. Электрическая мощность могла составить примерно 30 Вт/м^2 при максимальной интенсивности солнечного излучения (КПД около 3%). В пространстве под солнечными элементами циркулировал воздух. Для улучшения теплоотдачи к воздуху использовались ребра. Естественная вентиляция в летние месяцы оказалась почти достаточной для поддержания температуры солнечных элементов ниже максимально допустимого значения рабочей температуры (65°C). При температуре солнечных элементов $49\text{--}65^\circ \text{C}$ и температуре окружающей среды от -18 до $+10^\circ \text{C}$ тепловая эффективность работы коллектора составляла 50—70%. Поперечное сечение коллектора показано на рис. 4.6. К июню 1975 г. было испытано 16 коллекторов различных типов. Все они имели одинаковое остекление и корпус, но отличались типом селективной поверхности, расположением и геометрией ребер. Следующим шагом в моделировании было использование дополнительного источника энергии, эквивалентного по мощности тепловому и электрическому коллектору, занимающему целиком всю крышу, эффективная площадь которой составляет $57,6 \text{ м}^2$. Исследовались также шесть вертикальных обращенных к югу тепловых воздушных коллекторов, каждый размерами $1,2 \times 1,83 \text{ м}$, теплоприемные поверхности которых предполагалось первоначально выполнить из простых алюминиевых листов с черным селективным покрытием.

Двадцать четыре коллектора, каждый размерами $1,2 \times 2,43 \text{ м}$, были установлены на крыше, наклоненной под углом 45° к горизонту и обращенной на $4,5^\circ$ к

западу от южного направления. Три коллектора были заполнены солнечными элементами из сульфата кадмия — сульфида меди $\text{CdS/Cu}_2\text{S}$, изготовленными в период с 1968 г. по 1970 г. компанией «Клевит-Голд Корп». Сто четыре элемента соединялись последовательно в батарею и в каждый коллектор устанавливались по три такие батареи. Электрическая мощность могла составить примерно 30 Вт/м^2 при максимальной интенсивности солнечного излучения (КПД около 3%). В пространстве под солнечными элементами циркулировал воздух. Для улучшения теплоотдачи к воздуху использовались ребра. Естественная вентиляция в летние месяцы оказалась почти достаточной для поддержания температуры солнечных элементов ниже максимально допустимого значения рабочей температуры (65°C). При температуре солнечных элементов $49\text{--}65^\circ \text{C}$ и температуре окружающей среды от -18 до $+10^\circ \text{C}$ тепловая эффективность работы коллектора составляла 50—70%. Поперечное сечение коллектора показано на рис. 4.6. К июню 1975 г. было испытано 16 коллекторов различных типов. Все они имели одинаковое остекление и корпус, но отличались типом селективной поверхности, расположением и геометрией ребер. Следующим шагом в моделировании было использование дополнительного источника энергии, эквивалентного по мощности тепловому и электрическому коллектору, занимающему целиком всю крышу, эффективная площадь которой составляет $57,6 \text{ м}^2$. Исследовались также шесть вертикальных обращенных к югу тепловых воздушных коллекторов, каждый размерами $1,2 \times 1,83 \text{ м}$, теплоприемные поверхности которых предполагалось первоначально выполнить из простых алюминиевых листов с черным селективным покрытием.

Теплоаккумулирующая система занимает относительно небольшой объем, приблизительно $6,12 \text{ м}^3$, и состоит из двух внешних вертикальных контейнеров из пластика, в которых находится пентагидрат тиосульфата натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, имеющий температуру фазового перехода, равную 49°C . В центральный контейнер помещается эвтектика солей, главным образом декагидрат сульфата натрия $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ с температурой фазового перехода $12,8^\circ \text{C}$, уложенный в трубы диаметром $31,75 \text{ мм}$ и длиной $1,83 \text{ м}$. Внешняя система является «горячим» аккумулятором, в то время как центральная труба является «холодным» аккумулятором. В обеих системах циклы сменяются совершенно независимо от системы солнечного отопления. Емкость этих аккумуляторов достаточна, чтобы покрыть трехдневную отопи-

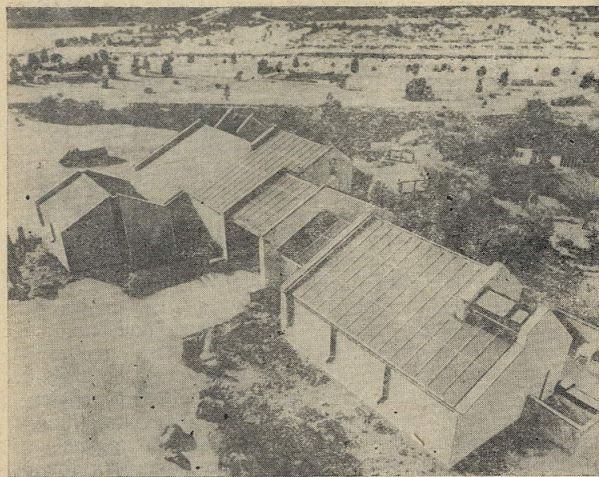


Рис. 4.7. Солнечный дом в Туксоне.

тельную нагрузку в зимний период или однодневную нагрузку на охлаждение в летний период.

Солнечный дом в Туксоне. Этот дом был построен в 1975 г. на основе проекта Ассоциации медной промышленности [27]. Ассоциация объявила, что в противоположность чисто экспериментальным зданиям он является первым «реальным» домом и согласно оценкам в нем за счет использования солнечного излучения удовлетворяется 100% отопительной нагрузки и до 75% нагрузки на охлаждение. Дом, почти целиком обеспечивающий себя необходимой энергией, был построен с целью продемонстрировать, что все основные детали и материалы, необходимые для его сооружения, имеются по конкурентоспособным ценам. Кроме того, особенность такого дома заключается в том, что его строительство может быть осуществлено любым компетентным местным строительным подрядчиком. На рис. 4.7 показан этот дом с встроенным в крышу медным солнечным коллектором, имеющим двойное остекление.

Панель коллектора состоит из уложенных в корпус из фанеры медных листов размерами $1,2 \times 2,44$ м, с прикрепленными к ним прямоугольными медными трубами, по которым вода поступает в изолированный бак-аккумулятор емкостью $11,4 \text{ м}^3$. Детальный экономический анализ еще не опубликован, но Ассоциация заявила, что за счет экономии топлива встроенная в крышу система солнечных коллекторов окупится примерно за 10 лет.

Охлаждение обеспечивается двумя стандартными бромистолитиевыми абсорбционными агрегатами, переделанными так, чтобы использовать в качестве теплового источника нагретую солнцем воду. Абсорбционные установки такого типа для кондиционирования воздуха существуют уже в течение нескольких лет, но только недавно стало экономически выгодным их применение в жилых домах, поскольку они всегда обеспечивают безаварийную работу в течение требуемого длительного периода эксплуатации. В крышу также встроены кремниевые фотоэлектрические элементы для удовлетворения различных незначительных энергетических потребностей, например таких, как низковольтное питание небольшого телевизора или кухонных часов. Кроме того, солнечные элементы обеспечивают питание всей системы безопасности дома в случае отказа электрической сети.

Крыша пристроенного флигеля, которая наклонена под углом 40° к горизонтали, обеспечивает солнечный подогрев воды в плавательном бассейне в весенний и осенний периоды. В летний период она используется в качестве простой охлаждающей системы, поскольку в ночные часы вода из бассейна может, стекая по крыше, излучать тепло в воздух, и за счет этого в дневные часы в бассейне поддерживается удовлетворительная температура. Крыша главного дома наклонена под углом 27° к горизонтали, чтобы условия восприятия солнечной радиации в летний период были оптимальными и обеспечивали относительно большое количество энергии, необходимое для работы абсорбционной охлаждающей системы. Кроме того, защита от нежелательного поступления тепла в летний период осуществляется с помощью двух слоев специальных солнцезащитных стекол бронзового оттенка, вставленных в окна, расположенные на стороне дома, обращенной к плавательному бассейну.

Солнечный дом Куртиса. Показанный на рис. 4.8 первый солнечный дом в Великобритании был спроектирован архитектором Куртисом и построен в Рикмансуорте, близ Лондона, в 1956 г. [28, 29]. Тогда же Куртис поселился в нем и, вероятно, он может утверждать,

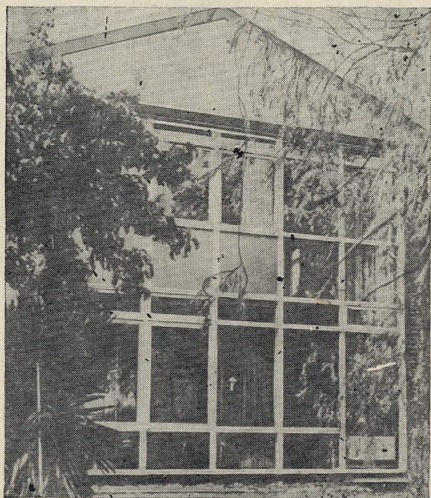


Рис. 4.8. Солнечный дом Куртиса.

что он дольше, чем кто-либо другой, прожил в собственном солнечном доме. Этот дом явился результатом проведенных Куртисом в течение предыдущих лет исследований в области проектирования жилых зданий и регулирования условий в них, начиная от простых отопительных устройств и кончая полным кондиционированием воздуха. На стадии проектирования в качестве основного положения было принято, что регулирование условий внутри помещения должно осуществляться си-

стемой, использующей солнечную энергию и содержащей также тепловой насос и за счет этого обеспечивающей отопление и охлаждение, а также горячее водоснабжение. Так же, как и другие исследователи, пытавшиеся применить идею солнечного отопления помещений в Великобритании, Куртис пришел к выводу, что без очень большой, хорошо изолированной теплоаккумулирующей системы можно за счет солнечной энергии покрыть только определенную долю суммарной отопительной нагрузки. Общая цель разработки состояла в обеспечении внутри помещения требуемой температуры в течение всего года независимо от температурных условий снаружи. При этом необходимо было учитывать требования эстетического характера.

Участок, расположенный на вершине холма, возвышающегося над долиной, был выбран так, чтобы обеспечить требуемую ориентацию дома и отсутствие затенения. Основные помещения были расположены на южной и западной сторонах, а на восточной стороне располагались прихожая, лестничная площадка и две спальни. Конструктивно дом был выполнен следующим образом: между кирпичными торцами боковых стен закреплялась специальная застекленная панель с деревянными переплетами. Чтобы лучше использовать поступающую солнечную энергию, было решено обеспечить максимальную площадь стеклянной поверхности на фасаде, обращенном к югу, поэтому вся южная сторона за исключением состоит из стеклопакетов, содержащих два слоя прозрачного материала «плейгласс», закрепленного в деревянных рамах. Панели, обращенные к западу и северу, также имеют двойное остекление. Кондиционирование воздуха круглый год обеспечивается тепловым насосом, для которого в качестве низкотемпературного теплового источника сначала использовался воздух, а после реконструкции системы — вода. Куртис сообщает, что в течение первого года эксплуатации составлялся график продолжительности периодов солнечного сияния и было отмечено, что в течение ноября и января наблюдались продолжительные периоды поступления прямой солнечной радиации, что способствовало постепенному прогреву помещения и обычно приводило к увеличению эффективности работы системы в этот период. Распределительная система воздушного

потока дорабатывалась в течение следующих двух лет, и отопление первого этажа было отрегулировано исходя из максимальной эффективности, что потребовало значительно большего количества распределяемого воздуха по сравнению с прежним уровнем. Средняя температура колебалась между $20,6^{\circ}\text{C}$ в дневные часы и $22,0^{\circ}\text{C}$ в вечерние. Оказалось, что обогрев помещения происходил очень быстро, и если погода была не очень холодной, то тепловой насос отключался приблизительно в 23.00. Благодаря хорошей теплоизоляции удавалось сохранять достаточное количество тепла приблизительно до 5.00, когда установка начинала работать, и к 7.00 на уровне пола обеспечивалась температура около 19°C . Основной вывод, который следует из этой работы, состоит в том, что в Великобритании использование больших остекленных поверхностей для обеспечения максимального прихода солнечного излучения во внутренние помещения дома может существенно снизить нагрузку на отопительные приборы, включая тепловой насос, но, с другой стороны, наличие таких больших остекленных поверхностей способствует появлению высоких тепловых потерь в холодные пасмурные дни или вечерние часы, а также в ночные часы в зимний период. Следует установить и эффективно использовать какие-либо средства, регулирующие площадь остекленной поверхности с тем, чтобы сохранить полученное от солнца тепло даже ценой резкого ограничения проникновения в помещение дневного света. В доме Куртиса можно $\frac{4}{5}$ площади остекленной поверхности закрыть плотными порттьерами, при этом оставшаяся часть обеспечит достаточное освещение интерьера в дневные часы. В общем отопительная (охлаждающая) солнечная система работает удовлетворительно с 1956 г., причем полные годовые текущие затраты составляют одну треть от затрат в обычных домах, расположенных по соседству.

Солнечный дом в Уоллеси. Самое известное солнечное здание в Европе, пристройка к школе Св. Георгия в Уоллеси, было спроектировано Морганом и построено в 1962 г. [30—32]. Оно включало большую «солнечную» стену и за счет этого удавалось поддерживать хорошие тепловые условия в течение зимних месяцев без применения обычного центрального отопления, что привлекло внимание большого числа разработчиков. Ведомство по охране окружающей среды возглавило изучение эксплу-

атационных и тепловых характеристик пристройки, которое было проведено под руководством Дэвиса из Ливерпульского университета.

Главная солнечная стена целиком занимает обращенный к югу фасад здания и имеет длину 70 м и высоту 8,2 м. Из расчета общего теплового баланса было принято среднее значение U , равное $3,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Большая часть стены имеет двойное остекление с промежутком между стеклами шириной 600 мм. Однако каждый класс обеспечен двумя или тремя открывающимися окнами с одинарным остеклением. Ширина здания в направлении с севера на юг составляет приблизительно 11,5 м. Пол нижнего этажа состоит из 100-миллиметровых брусьев, уложенных на подушку из бетона толщиной 150 мм. Промежуточное междуэтажное перекрытие выполнено из бетона толщиной приблизительно 230 мм, а крыша представляет собой бетонную плиту толщиной примерно 180 мм, над которой расположен слой вспененного полистирола толщиной 126 мм, соответствующим образом защищенный. Оштукатуренные перегородки имеют толщину 230 мм. На северной стороне наружные стены на уровне первого этажа выполнены из кирпича толщиной 230 мм с нанесенным снаружи слоем полистирола толщиной 125 мм. Среднее значение U здесь составляет $0,24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. На уровне пола наружная стена является частично глухой, а частично представляет собой солнечную стену, подобную стене на южной стороне. Общее значение U для здания составляет $1,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Единственными источниками тепла в классе пристройки являются обычно обитатели, электрическое освещение и солнечная радиация.

В старых школьных зданиях насчитывается такое же число школьников, что и в пристройке (около 300 чел.), так что обе группы помещений можно сравнивать между собой.

В результате эксплуатационных испытаний установлено, что солнечное отопление обеспечивает экономии около 30% топлива, расходуемого на отопление школьных зданий обычного типа.

Дом в Милтон-Кейнсе. В 1973 г. Управление по охране окружающей среды выдало субсидию на создание экспериментальной солнечной отопительной установки в новом районе Милтон-Кейнса под руководством Зоко-лея, ранее работавшего в отделе архитектуры при Поли-

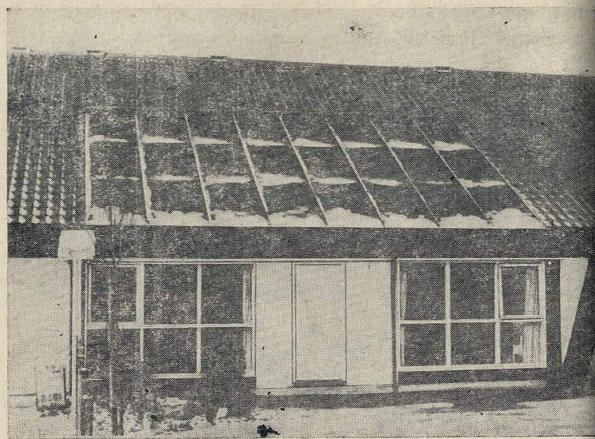


Рис. 4.9. Солнечный дом в Милтон-Кейнсе.

техническом институте [33, 34]. Целью проекта было проверить и доказать возможность применения солнечного отопления в Великобритании. Один из сотни уже построенных стандартных, расположенных террасой домов в Милтон-Кейнсе является в тепловом отношении весьма неэффективным зданием с умеренной изоляцией и фактически не обладает никакой тепловой инерцией. Совершенно ясно, что в будущих проектах солнечных домов в Великобритании следует предусматривать более массивную конструкцию с существенно улучшенной теплоизоляцией, но даже при этих условиях эксплуатационные характеристики такого дома вряд ли будут сравнимы с характеристиками аналогичного дома, но без солнечной установки. Показанный на рис. 4.9 солнечный дом, принятый в эксплуатацию в марте 1975 г., полностью оборудован для продолжительных испытаний.

Особенность его проектирования заключалась в том, что на различных этапах работы для моделирования почасовой передачи тепла для каждого дня в году широко использовалась ЭВМ. Хорошо известно приме-

нение моделирования с помощью ЭВМ для многих разработок в США, однако в Великобритании этот пример, по-видимому, был первым в инженерной практике. Таким образом, можно было определить количество энергии, поступающей из коллектора в бак и из бака на отопление, а также при необходимости вклад источника дополнительной энергии. Разработанная программа была впоследствии усложнена путем введения некоторых дополнительных факторов, например температурной стратификации в баке-аккумуляторе. Предварительные расчеты показали, что в период с апреля по сентябрь отопительная нагрузка должна обеспечиваться полностью, а в декабре и январе менее чем на 30%. Расход энергии на горячее водоснабжение для бытовых нужд удовлетворялся с апреля по сентябрь на 70—85%, а в зимние месяцы это значение, естественно, значительно снижалось. В период продолжительного и очень жаркого лета 1975 г. возникла проблема перегрева в спальнях. Сначала считали, что перегрев вызван тем, что непосредственно к спальням примыкали баки-аккумуляторы, температура которых достигала 70°С. Однако впоследствии было установлено, что чрезмерное повышение температуры наблюдалось и в соседних обычных домах, так что эта проблема, вероятно, связана с конструктивными особенностями этих домов. В окончательном проекте приведены следующие данные: наклон крыши — 30° (при моделировании на ЭВМ получено значение 34°), площадь солнечного коллектора — 37 м² (в первоначальном проекте — 40 м²). Общая полезная площадь пола — 90 м². Емкость бака-аккумулятора — 4,5 м³ (первоначально в проекте указана емкость 3,2 м³), изоляция толщиной 100 мм выполнена из стекловолокна.

Солнечные дома в Хайр-Бемингтоне. Появившееся в феврале 1975 г. сообщение о проекте строительства девяти обогреваемых солнцем домов в Хайр-Бемингтоне близ Ливерпуля вызвало большой интерес, поскольку разрешение на разработку получил городской совет округа Виррэл, который ранее успешно принимал участие в создании пристройки к школе Св. Георгия. Проект является результатом совместной работы стекольной фирмы «Братья Пилкinton» и Технологического Университета Лоуборо и будет финансироваться Управлением по охране окружающей среды.

Дома будут построены из кирпича высокой плотности с двойным остеклением одной из наружных стен. Эта стена будет поглощать солнечное излучение и переизлучать его внутрь дома. Эксплуатационные характеристики девяти таких домов, обогреваемых за счет солнечной энергии, будут сравниваться с характеристиками пяти обычных домов, построенных на том же участке. По предварительным расчетам экономия энергии должна составить от 30 до 60%. Предусмотрено регулирование поступления тепла от стены внутрь жилого помещения. Каждый из девяти домов будет иметь независимую систему охлаждения с вентилятором для улучшения естественной вентиляции и снижения влияния избыточного поступления солнечной радиации в летний период. Дома должны быть хорошо изолированы и оборудованы герметичными двухслойными стеклопакетами в каждом окне. На одном из солнечных помещений из традиционных домов будет установлен также плоский солнечный коллектор для снабжения горячей водой.

Проект Кембриджского солнечного дома. Целью проекта, предложенного Пайком из отделения архитектуры Кембриджского университета в 1971 г., являлось достижение полного самообеспечения или удовлетворения собственных энергетических нужд [35, 36]. Исходя из предположения, что на протяжении следующих десяти лет цены на нефть, газ, электричество и продовольствие могут возрасти в четыре раза, что площадь частных земельных участков может увеличиться до 0,4 гектара в расчете на одну семью и что трехдневная рабочая неделя может стать нормой, он решил, что в семьях может возникнуть стремление самообеспечиваться энергией, водой и продовольствием. Исследования, выполненные с помощью ЭВМ отделом технических исследований под руководством Пайка, показали, что существование такого дома теоретически возможно. В расчетной модели учитывался генератор с приводом от ветродвигателя, а также занимающий всю поверхность обращенной к югу крыши солнечный коллектор, из которого вода поступала в расположенный в подвале бак-аккумулятор емкостью 40 м³. Главной отличительной чертой проекта является возврат к идее «викторианской оранжереи», поскольку примерно половина всего объема под застекленной крышей образует закры-

тую веранду, простирающуюся над всей обращенной к югу частью дома. В холодный период это пространство может быть отделено от жилых и спальных помещений изолированными ставнями.

Расчеты, основанные на имеющихся данных по солнечной радиации и скорости ветра, показали, что 25% солнечной радиации, падающей на крышу, может быть использовано для отопления внутренних помещений. Эта цифра значительно ниже, чем можно было ожидать, но при моделировании на ЭВМ предполагалось, что вода, проходящая через солнечные коллекторы, используется только в тех случаях, когда ее температура на выходе из коллектора превышает температуру воды в баке-аккумуляторе. Воду в бак-аккумуляторе можно подогревать также за счет электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, в тех случаях, когда она не используется для удовлетворения других бытовых энергетических нужд, и в основном при моделировании рабочих режимов в зимний период принималось, что большая часть отопительной нагрузки обеспечивалась тепловым насосом с приводом от ветрогенератора. В работе выполнено подробное моделирование большого числа рабочих режимов предварительного проектного варианта системы, но отсутствие к концу 1976 г. контракта с какой-либо фирмой помешало перейти к уточнению схемы.

Солнечный дом в Гранаде. В январе 1976 г. Гранада-ская телевизионная компания продемонстрировала серию передач о переоборудовании старого дома в обогреваемый за счет солнечной энергии дом с четырьмя спальнями. Были рассмотрены также многие вопросы экономии энергии, в которых нашли отражение наиболее сложные результаты научных исследований в области строительства солнечных домов, такие как использование тепла отработанной горячей воды и вентиляционной системы. Испробованы различные типы изоляции, включая мат из стекловолокна толщиной 50 мм, плиту из пенополистирола толщиной 50 мм, обычное стекловолокно толщиной 100 мм или полужесткую плиту различных размеров [37] из минеральной ваты толщиной 100 мм, обшитую деревянными рейками и облицованную досками. Согласно Строительным правилам Великобритании (1975 г.) максимальный годовой расход энергии на отопление дома должен составлять

45 230 кВт·ч, но если позаботиться о двойном остеклении и внимательно относиться к вентиляции, а также к изоляции, то его можно снизить до 21 910 кВт·ч. На рис. 4.10 графически представлен теоретический годовой энергетический баланс дома для средних погодных условий. Заштрихованный участок обозначает долю расхода энергии на отопление, обеспечиваемой от дополнительного источника, и составляет 3680 кВт·ч при

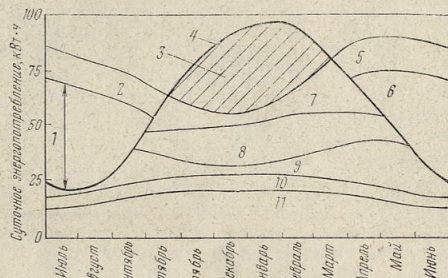


Рис. 4.10. Годовой энергетический баланс дома для средних погодных условий.

1 — излишки тепла, получаемого от солнечной крыши, вентиляционной системы и при непосредственном поступлении солнечной энергии в здание; 2 — горячее водоснабжение, обеспечиваемое за счет солнечного тепла (2800 кВт·ч/год); 3 — отопление, обеспечиваемое за счет источника дополнительной энергии (3680 кВт·ч/год); 4 — суммарная отопительная нагрузка (21 910 кВт·ч/год); 5 — горячее водоснабжение, обеспечиваемое за счет солнечного тепла; 6 — отопление, обеспечиваемое солнечной крышей (2210 кВт·ч/год); 7 — отопление, обеспечиваемое солнечной крышей (3660 кВт·ч/год); 8 — утилизация тепла вентиляционной системы (3560 кВт·ч/год); 9 — непосредственное поступление солнечной радиации в здание (3560 кВт·ч/год); 10 — использование тепла отработанной горячей воды (2230 кВт·ч/год); 11 — случайные поступления тепла (6350 кВт·ч/год).

температуре внутри жилого помещения 19,5°С и общим КПД коллектора 30%. Доля различных источников тепла в обеспечении суммарной годовой отопительной нагрузки показана в табл. 4.1.

На рис. 4.11 показаны солнечная крыша в момент проведения на ней работ (юго-запад) и северо-западная сторона дома с пристройкой, крытой черепицей, в которой размещены бак-аккумулятор емкостью 3000 л с нагретой солнцем водой и бак-отстойник емкостью 200 л. Северо-западная сторона дома имеет только одно окно, в то время как на длинной северо-восточной стороне (рис. 4.12) расположены три окна. Обе эти фотографии



Рис. 4.11. Северо-западная сторона солнечного дома в Гранаде.

сделаны во время установки солнечной крыши. Крыша площадью около 45 м², сконструированная в соответствии с идеями Томасона, выполнена из стандартного рифленого алюминия, окрашенного черной матовой акриловой краской, и закрыта одним слоем стекла толщиной 4 мм. Из горизонтальной перфорированной тру-

Таблица 4-1

Доля источников тепла в обеспечении отопительной нагрузки солнечного дома в Гранаде

Источник тепла	Энергия, кВт·ч
Отопление за счет солнечной крыши	2210
Использование тепла от вентиляционной системы	3660
Непосредственное поступление солнечной радиации в здание	3560
Использование тепла отработанной горячей воды	2250
Случайные поступления тепла (приготовление пищи, освещение и т. д.)	6550
Всего	18 230

бы, уложенной под коньком крыши, вода стекает струйками вниз по каналам.

Характерной чертой дома является большая оранжерея, размещенная на уровне первого этажа на юго-западной стороне. По воздуховодам, проходящим под окнами спальни второго этажа, нагретый воздух из этой оранжереи может поступать непосредственно в

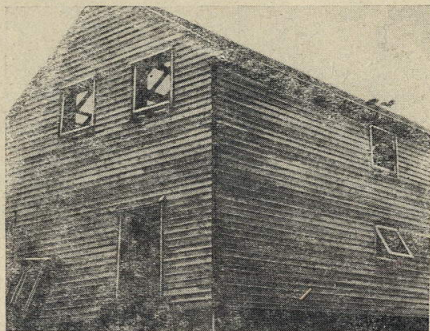


Рис. 4.12. Северо-восточная сторона солнечного дома в Гранаде.

помещения верхнего этажа дома. Поскольку для отопления этого дома требовалось обеспечивать дополнительно всего 20% общей отопительной нагрузки, можно рассматривать его как дом, на 80% обеспеченный энергией за счет использования энергии солнца. Более подробное описание струйного коллектора приведено в гл. 8.

Солнечные дома Бюро строительных исследований (БСИ). В Бартфорде были разработаны три экспериментальных дома [38] для изучения трех основных методов снижения энергетических затрат, а именно: использование солнечной энергии, применение теплового насоса и регенерация отработанного тепла. В отличие от концепции фирмы «Филипс», которая описана ниже, здесь выбор можно сделать при одновременном изучении трех различных вариантов, причем БСИ полагает, что не существует единственного лучшего универ-

сального решения. Характеристики домов будут регистрироваться при регулировании условий и имитации заселения. За основу при создании солнечного дома (и дома, использующего регенерированное отработанное тепло) будет принят двухэтажный дом с деревянным каркасом на пять человек типа «Бреттон» [47], подробно изученный БСИ в рамках проекта районного отопления в Бреттоне, Питерборо. Деревянный каркас

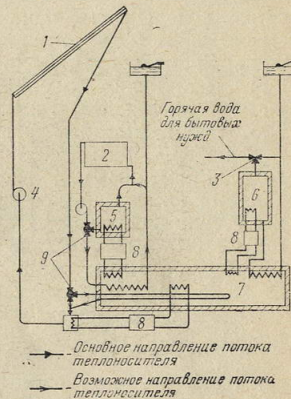


Рис. 4.13. Система энергоснабжения солнечного дома БСИ.

1 — солнечная крыша; 2 — система радиаторов; 3 — смеситель; 4 — насос с переменным расходом; 5 — бак емкостью 1 м³; 6 — бак емкостью 0,3 м³; 7 — бак емкостью 35 м³; 8 — тепловой насос; 9 — взаимозаменяемые клапаны. Воздушные и дренажные клапаны не показаны.

этих домов изготавливается на заводе, а наружные стены выполняются из кирпича и облицованы досками. Изоляция крыши и наружных стенных панелей имеет толщину 92 мм и обеспечивает значение суммарного коэффициента потерь U приблизительно 0,29 Вт/(м²·К). Крыша солнечного дома наклонена под углом 42° к горизонтали с целью получить более высокий среднегодовой КПД коллектора по сравнению с КПД, достигаемыми в обычных домах типа «Бреттон» [47], у которых наклон крыши составляет 22,5°. Схема системы энергоснабжения солнечного дома показана на рис. 4.13. К концу 1975 г. было опубликовано предварительное описание деталей проекта. Схема включала солнечную крышу площадью 22 м² и хорошо изолированный бак, размещенный за пределами дома под землей. Отопление осуществляется с помощью радиаторов, однако применяются радиаторы больших, чем обычно, размеров.

так что можно использовать воду при более низкой температуре. Различные режимы работы выбираются в зависимости от того, какие условия являются преобладающими. Когда бак-аккумулятор емкостью 35 м³ находится при достаточно высокой температуре, радиаторы получают тепло от него. В других случаях они получают тепло от изолированного бака емкостью 1 м³, который, в свою очередь, нагревается с помощью небольшого электрического теплового насоса, включаемого в сеть в ночное время и использующего бак-аккумулятор емкостью 35 м³ в качестве низкотемпературного источника. Система горячего водоснабжения для бытовых нужд питается от бака-аккумулятора, емкость которого 0,3 м³ является достаточной для 24 ч нормальной работы системы. Этот бак нагревается либо с помощью теплообменника, находящегося внутри бака-аккумулятора, либо с помощью небольшого теплового насоса, включаемого в сеть в ночное время. Особенность этой системы с солнечным коллектором состоит в том, что энергия может быть передана в бак-аккумулятор емкостью 35 м³ даже тогда, когда температура воды на выходе из коллектора ниже, чем температура воды в баке-аккумуляторе. Это достигается благодаря использованию второго теплового насоса.

В табл. 4.2 сравнивается годовое потребление энергии тремя рассматриваемыми домами с обычным домом

Таблица 4.2

Баланс энергопотребления для домов различного типа

Тип здания	Потребление за год, ГДж		
	Полезная энергия*	Суммарная полезная энергия	Первичная энергия
Типа «Бреттон» [47]	54,0 12,0 27,0	66,0	151,8
Типа «Бреттон» [47] (коэффициент потерь 0,29)	12,0 21,0	39,0	89,7
Дом, использующий отработанное тепло	5,0 9,0	26,0	54,4
Дом с тепловым насосом	5,0	14,0	50,1
Солнечный дом	13,5	13,5	50,0

* В числителе—потребление энергии для нагрева помещения, в знаменателе—для нагрева воды.

типа «Бреттон» [47] и домом со специальной изоляцией.

Количество первичной энергии получено умножением указанных выше значений потребляемой энергии на коэффициент эффективности использования электроэнергии, газа и нефти. Относительно высокие значения первичной энергии, полученные для дома с тепловым насосом и для солнечного дома, являются следствием того, что в этих домах полезная энергия обеспечивается почти исключительно за счет электричества.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ДРУГИХ СТРАНАХ

Франция. Французская программа исследований в области строительства солнечных домов начала осуществляться в 1956 г. [39—41], когда была запатентована система, использующая принцип «стены Тромба». Интересно отметить сходство между этой системой и системой, описанной профессором Моурзом 100 лет назад [42]. Основная идея заключается в том, что массивные обращенные к югу стены обычно выполненные из бетона, окрашиваются в черный или какой-либо другой цвет, обеспечивающий сравнительно высокую поглощательную способность, например в красный, темно-зеленый или темно-синий, и покрываются снаружи стеклом таким образом, чтобы между стеклом и стеной оставался воздушный зазор. Стена является одновременно коллектором и аккумулятором тепла. Солнечная радиация проникает сквозь стекло, поглощается покрытием и нагревает стену. Поскольку длинноволновое излучение при отражении от стены задерживается стеклом, воздух между стеклом и стеной нагревается. Проходы в верхней и нижней частях стены дают возможность нагретому воздуху поступать в комнату на уровне потолка, а холодному воздуху уходить из помещения на уровне пола, как это показано на рис. 4.14. Охлаждение в летний период осуществляется с помощью клапанов, расположенных в верхней части стены, через которые нагретый воздух выбрасывается в атмосферу, и клапана, находящегося в задней части здания и обеспечивающего поступление холодного воздуха. Толщина стен составляет обычно от 300 до 400 мм. Внутри стен можно разместить другие аккумулирующие системы, такие как водяные баки или химические аккумуляторы, действующие

ющие на основе фазовых превращений. Прототипы этих домов, построенные в Одейо, внешне выглядели достаточно непривлекательно, поскольку из-за плохой изоляции имели на южном фасаде очень маленькие окна. В более поздних проектах отношение площади коллектора к объему дома составля-

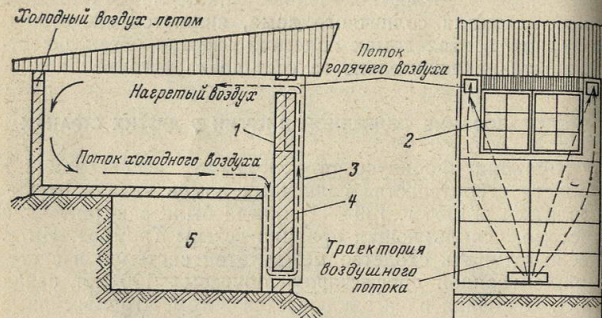


Рис. 4.14. Жилой дом со «стеной» Тромба.

1 — солнечная стена; 2 — окно; 3 — наружное остекление; 4 — поглощающая черная поверхность; 5 — подвал.

ет $0,1 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а в современных постройках трудно по внешнему виду отличить солнечные коллекторы от окон. Согласно описанию самый последний солнечный дом имеет в целом внешний вид обычного здания.

Французы подсчитали, что такая система может обеспечить от 60 до 70% отопительной нагрузки в средиземноморском климате, таком как в Одейо, и от 35 до 50% в менее благоприятном климате. Основные преимущества данной системы состоят в следующем:

- отсутствует проблема гидравлического сопротивления потоку, существующая в обычных водонагревателях, установленных на крыше;

- отсутствуют проблемы утечек;

- отсутствуют проблемы, связанные с замерзанием теплоносителя.

ФРГ. Анализ энергопотребления в ФРГ показал, что около половины энергии расходуется в виде низкотемпературного тепла, т. е. тепла на уровне температур ниже 100°C . Основная часть этого низкотемпе-

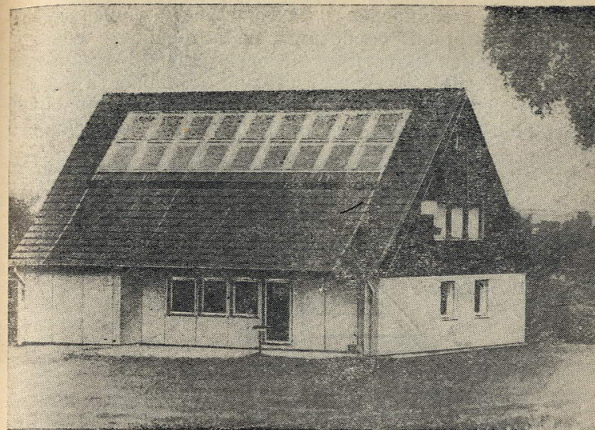


Рис. 4.15. Солнечный дом фирмы «Филипс».

ратурного тепла, как и во многих странах Европы, используется в частном секторе для отопления зданий и обеспечения горячего водоснабжения. Программа научных исследований фирмы «Филипс» относится именно к этой области и содержит ряд мероприятий, которые должны обеспечить снижение потребления энергии от традиционных источников. К ним относятся:

- снижение тепловых потерь через пол, потолки, стены и окна;

- использование отработанного тепла от различных систем бытового водоснабжения и воздуха, выбрасываемого из вентиляционной системы;

- использование нетрадиционных источников энергии, которые не оказывают воздействия на окружающую среду, т. е. энергии земли и солнца;

- разработка оптимизированных объединенных энергетических систем.

Экспериментальный дом, показанный на рис. 4.15, был построен в Аахене на территории научно-исследовательской лаборатории фирмы «Филипс» [43, 44]. Раз-

меры дома, мебелировка и хозяйственные приспособления были выбраны с расчетом на потребности средней немецкой семьи из четырех человек. Две ЭВМ «Филипп П855» моделируют энергетические потребности семьи, а также регулирование различных систем и обработку всех данных. Основные конструктивные особенности

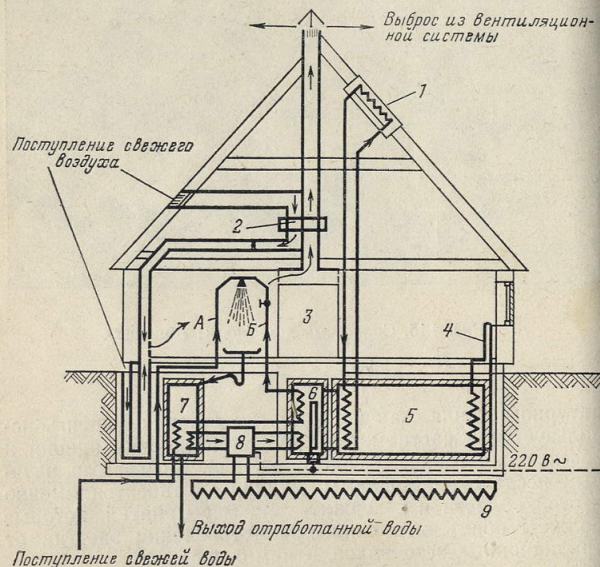


Рис. 4.16. Энергетическая система дома фирмы «Филипп».

1 — солнечные коллекторы; 2 — воздушный теплообменник; 3 — холл; 4 — радиаторы для отопления дома; 5 — бак-аккумулятор емкостью 42 м³; 6 — бак горячей воды для бытовых нужд емкостью 4 м³; 7 — бак отработанной горячей воды емкостью 1 м³; 8 — тепловой насос; 9 — теплообменник. Воздушные и дренажные клапаны, насосы и вентиляторы не показаны.

дома показаны на рис. 4.16. Особое внимание было уделено гибкости схемы, и поэтому можно осуществить множество различных комбинаций режимов работы солнечного отопления и аккумулирования при различных температурных режимах, а также сочетать работу системы и теплового насоса, использующего в качестве холодного источника отработанную воду или тепло почвы.

В табл. 4.3 приведены некоторые основные параметры оборудования дома с жилой площадью 116 м², площадью подвала 150 м², площадью окон 23,5 м² и общим объемом жилого помещения 290 м³.

Таблица 4.3

Основные параметры оборудования солнечного дома в Аахене

Оборудование	Объем, м ³	Толщина изоляции (вермикулит), мм	Температурный диапазон, °C
Блок длительного хранения тепла	42	250	5—95
Блок хранения горячей воды для бытовых нужд	4	250	45—55
Бак отработанной воды	1	100	—

Присоединенная нагрузка электрического теплового насоса составляет 1,2 кВт, а коэффициент трансформации тепла в температурном диапазоне 15—50°C находится в пределах от 3,5 до 4.

Таблица 4.4

Потери тепла в домах с различной теплоизоляцией

Потери тепла	Дом со стандартной изоляцией		Дом с улучшенной изоляцией		Экспериментальный дом	
	Коэффициент потерь Вт/(м ² ·K)	Годовые потери кВт·ч/год	Коэффициент потерь Вт/(м ² ·K)	Годовые потери кВт·ч/год	Коэффициент потерь Вт/(м ² ·K)	Годовые потери кВт·ч/год
Через стены, полы, потолок	1,23	32 630	0,48	12 600	0,14	3630
Через окна	5,80	9970	3,3	5700	1,5	2570
При неконтролируемых утечках воздуха	—	7000	—	7000	—	700
За счет регулируемой вентиляции	—	—	—	—	—	1400
Всего	—	49 600	—	25 300	—	8300

Из табл. 4.4 видно, какое влияние оказывает улучшение изоляции стен, полов и потолков, снижение вентиляционных потерь и применение стекол со специальным покрытием для окон с двухслойной прозрачной изо-

лящей. По сравнению с обычным домом суммарные тепловые потери снижаются в шесть раз, а по сравнению с хорошо изолированным домом в три раза.

Для определения утечек тепла было принято, что воздух в доме полностью заменяется за один час, при этом для регулируемой вентиляции с 80% утилизацией тепла. Принималась следующая структура среднегодового потребления энергии для семьи из четырех чел.

Горячее водоснабжение. Посудомоечная машина и сушилка, стиральная машина	3980 кВт·ч
Морозильник, холодильник	1095 кВт·ч
Освещение, телевидение и другие электроприборы	1820 кВт·ч

Это дает в сумме 6895 кВт·ч, но при наличии в системе теплового насоса, использующего отработанное тепло, только небольшая часть расхода энергии на горячее водоснабжение, составляющей 3980 кВт·ч, удвоится за счет внешней электрической сети. Коэффициент трансформации тепла, равный примерно 3, является достаточным, чтобы сэкономить 3000 кВт·ч, и таким образом требуется обеспечить только 3895 кВт·ч.

Для отопления и охлаждения может быть использована энергия земли. В схеме отопления теплообменник, представляющий собой заполненную водой пластмассовую трубу длиной 120 м, был размещен под полом подвала, при этом с помощью теплового насоса мощностью 1,2 кВт можно было передавать тепло из почвы, которая имеет температуру около 7°C, в бак горячей воды при температуре 50°C. Охлаждение обеспечивается при умеренном расходе энергии, поскольку воздух прогоняется сквозь полую шлакокирпичную стену на уровне подвала. Солнечные коллекторы встроены в обращенную к югу крышу, как показано на рис. 4.15, наклонены под углом 48° к горизонту и занимают площадь 20 м². Корпус каждого из 18 коллекторов содержит 18 цилиндрических вакуумированных стеклянных трубок, которые были описаны в предыдущей главе. По предварительным расчетам, выполненным с помощью ЭВМ, коллектор площадью 10 м² может воспринимать ежегодно от 10 000 до 12 000 кВт·ч солнечной энергии, что превышает суммарное энергопотребление на отопление дома.

Дом фирмы «Филипс» является одним из нескольких отлично оборудованных экспериментальных солне-

ных домов, которые в настоящее время проходят проверку в Европе. Особенно интересно будет сравнить показатели этого дома с показателями значительно менее дорогого, но с архитектурной точки зрения более изящного солнечного дома в Гранаде.

СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ, УСТАНОВЛИВАЕМЫЕ НА КРЫШЕ

Стремление полностью обеспечить отопительную нагрузку любого здания приводит к необходимости иметь значительную площадь поверхности солнечного коллектора. Было сделано несколько различных попыток отказаться от использования обычных плоских коллекторов. В следующих разделах описаны системы, которые исследовались в США в 1976 г.

Неподвижный отражатель со следящей теплоприемной системой (НОСТ). Основной коллектор, который подробно описан в гл. 3, состоит из сегмента сферического зеркала, установленного неподвижно и обращенного к солнцу. Линейный теплоприемник следит за тра-

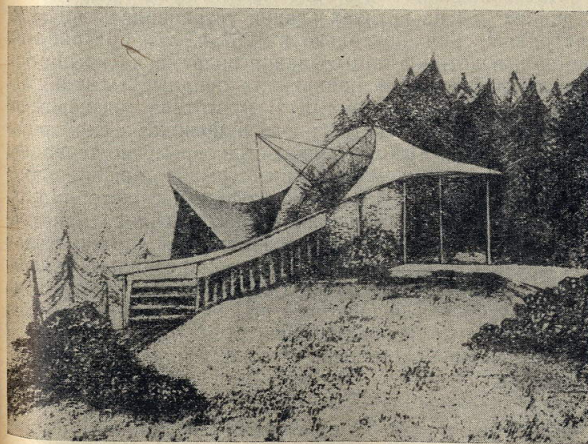


Рис. 4.17. Неподвижный отражатель со следящей теплоприемной системой.

екторией солнца путем простого вращательного движения около центра кривизны отражателя [45]. На рис. 4.17 показано, как установка НОСТ может повлиять на конструкцию дома в районах с значительным приходом солнечной радиации в зимний период. Отличительной особенностью системы является то, что вода может быть нагрета до высокой температуры, достаточной для производства электроэнергии, и, следовательно, появляется возможность создания самообеспечивающихся систем без использования энергии ветра или прямого преобразования солнечной энергии в электрическую. Подробные сообщения о каком-либо применении таких коллекторов отсутствуют, однако недавно в Колорадо был спроектирован и построен дом, включающий НОСТ.

В Великобритании дома с НОСТ едва ли получают распространение в связи с высокой долей диффузной составляющей и низким общим уровнем радиации в период зимнего солнцестояния, хотя в районах Средиземноморья имеются все возможности для их успешной эксплуатации.

Пассивная система с водоемом на крыше (дом Хей). С давних пор на крышах зданий устраивались водоемы для охлаждения, но только в 1967 г. Хей разработал систему, в которой для создания водоема на крыше использовались черные поливинилхлоридные мешки, заполненные водой [46—49]. В прототипе экспериментального здания, построенного в Фениксе, слой воды глубиной около 180 мм являлся одновременно тепловым коллектором и аккумулирующей средой. Мешки размещались на плоской металлической крыше, которая также выполняла две функции — теплообменника и потолка здания. Ночью для предотвращения потерь тепла над мешками устанавливались изолированные панели. В летний период процедура была обратной, так что за счет излучения в ночное небо водоем к утру охлаждался, а затем изолировался панелями, и таким образом обеспечивалось естественное охлаждение здания в течение дня.

Впоследствии система была проверена в рамках большой двухгодичной программы испытаний, выполненной Калифорнийским политехническим университетом на одноэтажном доме в Атаскадеро (штат Калифорния). Жилая площадь дома (около 106 м²) была нес-

колько больше, чем площадь водоема на крыше. Передвижные панели приводились в действие электрическим приводом, управляемым вручную или с помощью дифференциального терморегулятора. В сообщении об испытании здания [50] говорилось, что тепловой режим дома был очень хорошим. Во время испытательного периода нагрузка на отопление и охлаждение здания обеспечивалась на 100%. В течение этого времени система была способна поддерживать температуру внутри дома в пределах от 19 до 23,3°C за исключением периодов специальных испытаний. Даже в течение этих экстремальных условий температура никогда не была выше 26°C или ниже 17°C.

В июле испытания проводились при температуре до 38°C, а самая низкая температура — 3°C была зарегистрирована в феврале 1974 г., когда среднее за месяц значение дневной температуры наружного воздуха составляло 8,3°C. Благодаря использованию пластмассового покрытия, которое можно было натягивать и спускать, система могла работать как с однослойной прозрачной изоляцией, так и без нее. В летний период было необходимо спускать покрытие, чтобы температура в жилых помещениях не поднималась выше 27°C.

Хэггард [49] считает, что информацию, полученную при выполнении этой программы, можно использовать при исследовании архитектурных усовершенствований системы, которые позволят применять ее в других климатических условиях и для других обогреваемых объемов. Сюда относятся разработки конструкций многотажных зданий с изоляцией, передвигающейся по пазам на обращенных к югу стенах, и складными изоляционными панелями на плоских крышах.

СИСТЕМЫ С ТЕПЛОВОМ НАСОСОМ И ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Некоторую долю отопительной нагрузки можно обеспечить просто за счет установки на существующем неостекленном чердаке вентиляционной системы, управляемой с помощью дифференциального терморегулятора. В более сложных системах используют особенности традиционной наклонной крыши. При этом заменяют значительную площадь обращенной к югу кровли остеклением, обеспечивая, таким образом, проникновение радиации внутрь чердачного помещения. Недавно по-

явились две большие системы, в которых используется этот принцип. В одной из них тепло из чердачного помещения передается с помощью теплового насоса непосредственно в остальную часть дома, в другой применяется недорогая отражающая оптическая система.

Система с тепловым насосом. В солнечном доме, разработанном совместно Университетом штата Небраски (г. Линкольн) и компанией «Линкольн Электрик Систем» [51], тепло от обращенной к югу застекленной крыши направляется внутрь чердачного помещения, в

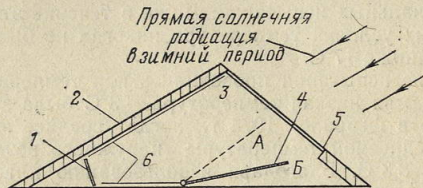


Рис. 4.18. Пирамидальная оптическая система.

1 — плоский коллектор; 2 — крыша; 3 — чердачное помещение; 4 — регулируемый отражатель (летом положение А, зимой — Б); 5 — стеклянное окно; 6 — неподвижные отражатели.

котором нагретый воздух за счет естественной циркуляции поднимается к коньку крыши. Стандартный устанавливаемый вне помещения тепловой насос, размещенный вблизи конька, снабжен регуляторами, которые позволяют извлекать тепло либо из наружного воздуха, либо из воздуха внутри чердачного помещения. Это тепло переносится к водяному баку-аккумулятору, в котором поддерживается температура не ниже 40°C, причем при необходимости используется дополнительное тепло. По вертикальному воздуховоду воздух с чердака может подаваться непосредственно в дом и нагревать его. Когда тепловой насос извлекает энергию из воздуха, заполняющего чердачное помещение, температура в этом помещении поддерживается приблизительно на уровне 10°C, таким образом достигается высокая эффективность сбора солнечной энергии без применения дорогостоящего двойного остекления. Аккумулированная горячая вода прокачивается сквозь обдуваемый вентилятором змеевик, выполняющий роль обычного радиатора воздушной отоп-

пительной системы. Для охлаждения в летний период тепловой насос переключается и накапливает холодную воду при температуре около 5°C. Использование обычного имеющегося в продаже оборудования и материалов является составной частью проекта, цель которого состоит в демонстрации экономической жизнеспособности разработки в типичных климатических условиях американского среднего запада, где в зимний период прямая радиация составляет примерно 60% всей радиации. Одна из экономических особенностей, обнаруженных при анализе, состоит в том, что относительно высокое потребление электроэнергии в процессе сбора солнечной энергии компенсируется более низкими сравнительно с существующими системами с плоскими коллекторами капитальными затратами на систему. Исследования этой системы, основанные на 800 ч работы, показали, что отопительный коэффициент теплового насоса должен составлять 2,72 вместо полученного для типичной стандартной системы, установленной в Линкольне, значения 1,7.

Отражающая оптическая система. В одной из описанных систем используются только плоские отражатели большой площади, отражающие приходящую радиацию на плоский коллектор, площадь которого составляет обычно около $\frac{1}{5}$ площади отражателя. На рис. 4.18 показаны основные элементы пирамидальной оптической системы [52].

Система состоит из неподвижных плоских отражающих поверхностей, которые образуют две грани пирамиды, и подвижной отражающей поверхности, которая юстируется в соответствии с периодическими изменениями траектории солнца — обычно сезонно. Особо отмечается, что система обеспечивает степень оптической концентрации в пределах от 1,6 до 4,8 и позволяет получать высокие температуры в обычных плоских коллекторах, что является существенным для применения ее в абсорбионных охлаждающих установках. Возможны различные варианты подвижного отражателя, включая систему, размещаемую снаружи, которая была использована в опытной установке в Стэнфорде (штат Коннектикут).

Главным преимуществом использования системы с полностью застекленной крышей является то, что, заменяя обычные конструктивные и технические приемы,

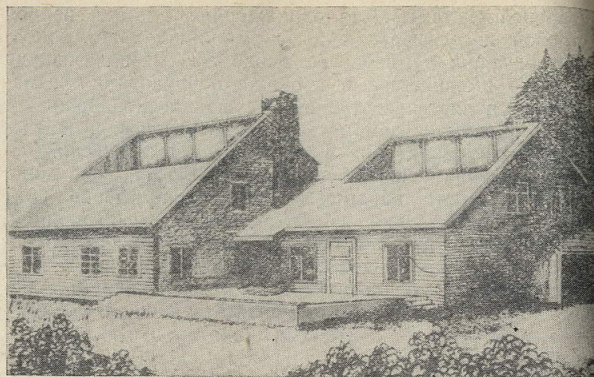


Рис. 4.19. Внешний вид системы чердачного отопления.

можно придать дому достаточно привлекательный внешний вид, например солнечный коллектор на чердаке может служить обыкновенным окном для спальни, как это показано на рис. 4.19.

АНАЛИЗ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ

В обзоре [53] работы Шерклиффа [9] имеется замечание о том, что множество описанных проектов понравится читателю и совершенно смутит того, кто серьезно занят поисками оптимальной системы. Одна из трудностей, возникающих при попытке провести любой анализ, состоит в том, что даже в домах с традиционной системой отопления затраты на отопление в одном и том же районе в почти одинаковых домах для, казалось бы, очень похожих семей будут изменяться в широких пределах. Было сделано предположение, которое представляется разумным, что все солнечные дома, включенные в анализ, заселены совсем одинаковыми семьями, которые будут стараться получить от использования солнечной энергии все, что может обеспечить их конкретная система. Вторая трудность возникает при попытке определить, что понимается под

«коэффициентом замещения»*. В тех случаях, когда имеются сведения о том, как ведут себя обитатели солнечного дома, например дома Мэтью [18], выясняется, что в основном их вполне удовлетворяет более низкая температура в помещении, чем та, которую можно было бы обеспечить за счет традиционного отопления. Это сильно затрудняет точное определение реальной потребности в тепле при традиционном отоплении.

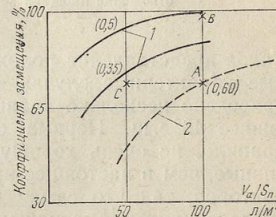
Основными факторами, которые должны быть приняты во внимание при анализе, являются следующие: отношение площади коллектора к площади пола; положение, угол наклона и тип солнечного коллектора;

отношение объема аккумулятора к площади пола; тип аккумулирующей системы; географическое местоположение здания; общие изоляционные характеристики; высота отапливаемых комнат.

Далее можно принять некоторые допущения. В качестве аккумулирующей системы можно рассматривать эквивалентный объем воды. Изменениями характеристик изоляции и высоты отапливаемых комнат

Рис. 4.20. Зависимость коэффициента замещения от конструктивных параметров системы солнечного отопления и эффективности работы ее элементов.

1 — расчетные характеристики, 1976 г.;
2 — характеристики первых систем.
В скобках указано отношение площади коллектора к площади пола.



следует пренебречь, поскольку отсутствует необходимая информация по этим параметрам. Это означает, что для любой конкретной широты могут быть построены серии кривых, показывающих зависимость «коэффициента замещения» от отношения объема аккумулятора (V_a) к площади пола (S_n) при различных значениях отношения площади коллектора к площади пола.

* Обычно под «коэффициентом замещения» понимают долю нагрузки, обеспечиваемую за счет солнечной энергии. (Прим. ред.)

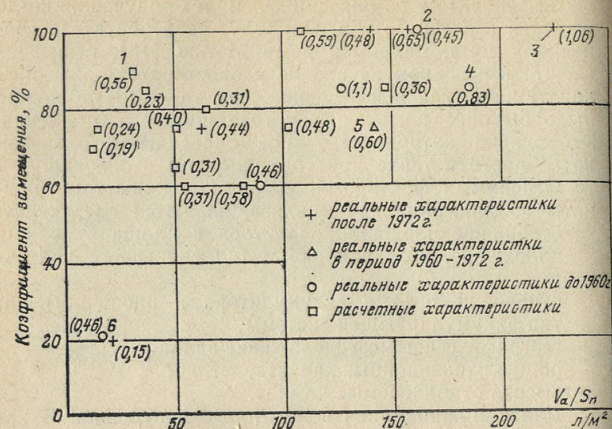


Рис. 4.21. Характеристики солнечных домов, расположенных южнее 40° с. ш.

1 — дом в Туксоне; 2 — бунгало «Блосс-Хауз»; 3 — дом Хей; 4 — дом Томасона I; 5 — дом Томасона III; 6 — дом Лефа в Колорадо. В скобках указано отношение площади коллектора к площади пола.

Такое представление положено в основу анализа. Главные характерные случаи показаны на рис. 4.20, где приведено несколько кривых, построенных для районов южнее 40° с. ш. Первые солнечные дома имели, как правило, не очень хорошую изоляцию и менее эффективные, чем в настоящее время, системы солнечных коллекторов, так что самая нижняя кривая на рис. 4.20, построенная для отношения площади коллектора к площади пола, равного 0,6, представляет собой характеристики, достигнутые в 50-е годы. Усовершенствование изоляции и коллекторных систем привело согласно расчетам к значительному изменению характеристик. Как это видно из двух верхних кривых, главная тенденция состоит в том, что относительно меньшие коллекторные и аккумулирующие системы могут обеспечить более высокое значение коэффициента замещения. Рассмотрим конкретный случай, когда характеристика первоначально представлена точкой А. В настоящее время значение коэффициента замещения, равное

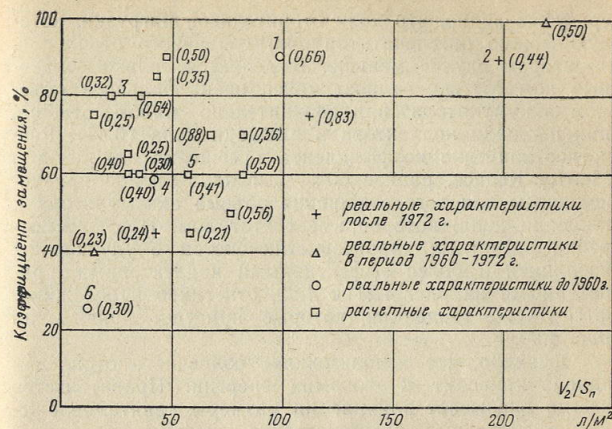


Рис. 4.22. Характеристики солнечных домов, расположенных севернее 40° с. ш.

1 — дом III МТИ; 2 — дом Мэтью; 3 — дом в Гранаде; 4 — дом IV МТИ; 5 — дом в Минтон-Кейсе; 6 — дом Лефа в Денвере. В скобках указано отношение площади коллектора к площади пола.

100%, можно получить при несколько меньшем отношении площади коллектора к площади пола, определяемом точкой В. Если требуется тот же уровень коэффициента замещения, то его можно обеспечить при уменьшении площади коллектора и объема аккумулятора вдвое, что соответствует точке С.

На рис. 4.21 показаны действительные и расчетные точки характеристик различных солнечных зданий, расположенных южнее 40° с. ш. Из представленных данных видно, что если отношение объема аккумулятора к площади коллектора больше 100, вполне возможно на 100% обеспечить отопительную нагрузку за счет солнечного отопления, и что очень высокие значения коэффициента замещения (90%) получаются по расчетам при достаточно низких значениях отношения объема аккумулятора и площади коллектора к площади пола.

Из сравнения рис. 4.21 с рис. 4.22, на котором нанесены точки, относящиеся к районам севернее 40° с. ш.,

сразу же видно, что доля отопительной нагрузки, которую можно обеспечить за счет солнечного отопления, во втором случае меньше. Выделяется только солнечный дом Мэтью, отличающийся очень большим объемом аккумулятора при сравнительно малом отношении площади коллектора к площади пола (0,44). Расчетное значение коэффициента замещения для дома в Милтон-Кейнсе, равное 60%, выглядит вполне правдоподобным для того отношения объема аккумулятора к площади пола, которое имеет этот дом. При рассмотрении расчетных характеристик систем с улучшенной изоляцией и более эффективными коллекторами, приведенными на рис. 4.21 и 4.22, отчетливо прослеживаются те же тенденции, которые присущи кривым на рис. 4.20.

Очевидно, что использование солнечного отопления зданий приводит к экономии энергии. Правительство всегда оказывает влияние на размеры капиталовложений в солнечные энергетические системы, поскольку цены на топливо повышаются или понижаются, но если принять, что с социальной точки зрения желательно иметь здания, отопления которых хотя бы частично обеспечивается за счет солнечной энергии, то правительство обязано видеть, что это привлекательно и с экономической точки зрения.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

СОЛНЕЧНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

Первый закон термодинамики чаще всего выражается следующим образом: в замкнутой системе изменение внутренней энергии равно разности суммарного количества тепла, поступающего в систему Q , и суммарного количества работы, произведенной системой W .

Если E_2 и E_1 представляют собой начальную и конечную внутреннюю энергию системы, то

$$Q - W = E_2 - E_1. \quad (5.1)$$

Для непрерывного получения полезной работы необходимо привести систему обратно в ее начальное со-

стояние, т. е. завершить цикл. В уравнении (5.1) общее количество тепла Q , переданное системе, состоит из двух частей. Q_1 представляет собой тепло, полученное системой при более высокой температуре, а Q_2 — тепло, отданное системой при более низкой температуре. Это является следствием второго закона термодинамики, утверждающего, что невозможно сконструировать тепловую машину, которая будет превращать теплоту в работу, если в цикле имеется только один тепловой резервуар. Резервуар с более высокой температурой часто называют источником, а с более низкой — стоком. Выраженный в другой форме второй закон термодинамики утверждает, что передача тепла может осуществляться только от более горячего тела к более холодному. КПД цикла представляет собой отношение суммарной полезной работы W к поглощенному теплу Q_1 :

$$\eta = \frac{W}{Q_1}. \quad (5.2)$$

Поскольку рассматривается цикл, то $W = Q_1 - Q_2$ и КПД может быть представлен как

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{или} \quad 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (5.3)$$

Если абсолютная температура источника равна T_1 , а стока — T_2 , то

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.4)$$

Это выражение, как известно, определяет КПД идеального цикла Карно, названного так в честь французского ученого Сади Карно, который первым сформулировал этот закон в 1824 г. Более детальное обсуждение этого вопроса в связи с использованием солнечной энергии излагается Бринквортом [1].

Никакая реальная тепловая машина не может иметь КПД больше, чем КПД цикла Карно. Это объясняется различными причинами, главными из которых являются наличие трения между движущимися частями машин, а также необходимость существования разности температур между источником и машиной и между машиной и стоком, обеспечивающей передачу теп-

ла. В практике удобно пользоваться понятием КПД цикла Карно для сравнительных оценок, имея в виду, что в лучшем случае КПД реальной машины будет составлять две трети КПД цикла Карно.

Из уравнения (5.4) следует, что чем выше температура горячего источника, тем больше КПД при постоянной температуре стока. Если применить такой подход к характеристикам солнечных коллекторов, показанных на рис. 3.22, то возникает противоречие, заключающееся в том, что некоторому увеличению температуры коллектора соответствует уменьшение сум-

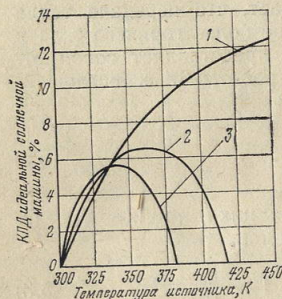


Рис. 5.1. Зависимость КПД идеальной солнечной машины от температуры.

1 — вакуумированный трубчатый коллектор фирмы «Оуэнс-Иллинойс»; 2 — коллектор с двойным остеклением и селективным поглощающим покрытием фирмы PPG; 3 — коллектор Хейвуда с одинарным остеклением.

марной эффективности его работы. Для некоторых заданных значений плотности потока прямой солнечной радиации и температуры стока можно построить кривую КПД идеальной солнечной машины, который является произведением суммарного КПД коллектора, приведенного на рис. 3.22, и КПД цикла Карно. Такие зависимости изображены на рис. 5.1 для трех различных типов коллекторов при плотности потока радиации 900 Вт/м² и температуре стока 300 К.

Из приведенных на рис. 5.1 данных видно, что до тех пор, пока разность температур источника и стока не превосходит 35°, КПД идеальной солнечной машины, основанной на применении всех трех типов коллекторов, примерно равны. Очевидно, что использование коллекторов простейших конструкций может обеспечить КПД солнечных тепловых машин лишь на уровне нескольких процентов, практически не более 2%. Для достижения КПД порядка 10% требуется значительное

усовершенствование конструкции коллекторов или применение фокусирующих систем.

Некоторые типы действующих машин. В обзоре работ, проведенных в период до 1960 г., Джордан [2] отмечает большое число предложенных и реализованных изобретений, касающихся солнечных энергетических установок, в которых энергия расширения, сжатия или испарения твердых, жидких или газообразных тел преобразуется в механическую энергию. Большая часть этих устройств использовалась для перекачки воды при обводнении пустынных засушливых районов, обычно характеризующихся высоким уровнем поступления солнечной радиации в течение всего года и остро нуждающихся в дешевых источниках энергии. Из более ранних работ в настоящее время в связи с разработкой высокоэффективных коллекторов вновь рассматривается возможность использования системы простого пароструйного инжектора в сочетании с плоским солнечным коллектором. Водяной пар пропускался через высокоскоростное сопло, в результате чего происходило всасывание перекачиваемой воды. Суммарный КПД системы был ниже 1%.

Университет штата Флорида является главным центром работ по преобразованию солнечной энергии в небольших масштабах, причем его разработки касаются в основном машин небольшой мощности [3]. Изучаются машины трех основных типов:

воздушные двигатели с замкнутым циклом, в которых ограниченный объем воздуха перемещается с помощью поршня между горячей и холодной поверхностями. Рабочий поршень приводится в действие за счет периодического повышения давления в цилиндре;

воздушные двигатели с разомкнутым циклом, в которых поступающий из атмосферы воздух сжимается и нагревается за счет солнечной энергии. Затем этот воздух, находящийся при высоком давлении и температуре, расширяется и цикл завершается выхлопом.

Паровые двигатели, которые используют плоские солнечные коллекторы в сочетании с обычным хладагентом R-11 (трихлормонофторметан).

Как в двигателях с горячим воздухом, в которых высокоэффективный нагрев обеспечивается благодаря использованию фокусирующих коллекторов, так и в

двигателях с замкнутым циклом получаемая мощность достигала 250 Вт при диаметре параболического зеркала 1,5 м, а суммарный КПД превышал 20%.

В солнечном паровом двухцилиндровом двигателе [4] использовалось тепло, полученное в трех плоских коллекторах площадью 2,8 м² каждый, средний КПД которых составлял более 50%. Максимальная выходная мощность достигала 150 Вт, что соответствует суммарному КПД около 3,5% и хорошо согласуется с результатами, приведенными в предыдущем разделе.

Во Флоридском университете разрабатывается также солнечный насос очень простой конструкции, не имеющий движущихся частей кроме двух обратных

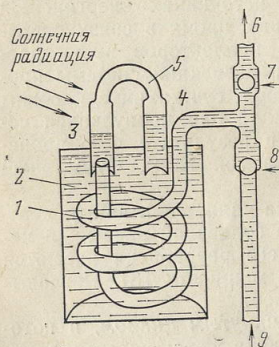


Рис. 5.2. Насос «Флюидин 3».

1 — змеевик; 2 — резервуар с водой; 3 — «горячее» колено; 4 — «холодное» колено; 5 — U-образная трубка с воздухом; 6 — выпускное отверстие; 7 — выпускной клапан; 8 — всасывающее отверстие; 9 — всасывающий клапан.

клапанов [5]. В этой конструкции бойлер при помощи U-образной трубки соединен с сосудом, имеющим обратные клапаны на входе и выходе. Всасывающее отверстие впускного клапана находится в контакте с перекачиваемой водой. Вода в бойлере нагревается, превращается в пар, который вытесняет воду из сосуда через выпускной клапан. Достигнув дна U-образной трубки, пар быстро проходит в сосуд и конденсируется, в результате чего создается вакуум и впускной клапан открывается. Описанная система является современной модификацией солнечного насоса Белидора (см. рис. 1.1). В другой, очень простой модификации этой конструкции, разработанной в Англии фирмой «АЕРЕ Харуэлл» [6], бойлер заменен цилиндром с го-

рячим воздухом, в котором осуществляется замкнутый цикл. Один из вариантов такой системы, насос «Флюидин 3», показан на рис. 5.2. Один конец U-образной трубки нагревается, и вода в выходной колонке начинает колебаться под действием создаваемой разности давлений, вызывающей выталкивание воды через выпускной клапан и всасывание новых порций через впускной клапан. Эта система будет работать до тех пор, пока поступает тепло, причем колебания будут происходить со своей собственной частотой. В конструкции солнечного насоса, разработанной в Индии [7], в качестве рабочего тела используется пентан, нагреваемый под давлением в плоском солнечном коллекторе. Изучены модификации насоса с водяным и воздушным охлаждением.

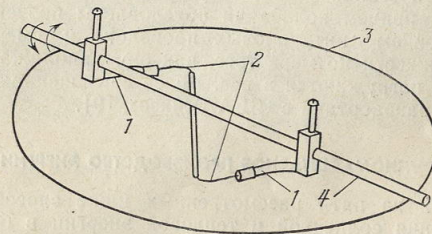


Рис. 5.3. Нитиноловый двигатель.

1 — листовые пружины; 2 — нитиноловая проволока; 3 — обод сосуда; 4 — ось.

Обычно в качестве рабочего тела в тепловых двигателях используется воздух или пар, однако существуют некоторые металлические сплавы, которые обладают таким свойством, что, будучи деформированы под действием внешней силы, они при нагреве возвращаются в прежнее состояние. Этим свойством обладает, например, сплав никеля с титаном «нитинол», у которого оно проявляется уже при температуре 65°C, легко достижимой в солнечных нагревателях. Изящной формы и простой водяной насос, действие которого основано на этом эффекте, был продемонстрирован в Лондоне Френком и Эшби [8], причем эта разработка явилась результатом их более ранних работ по свойствам стеклокерамик. Водяной насос представляет со-

бой не что иное, как многоковшовую раму, приводимую в действие основным двигателем, который изображен на рис. 5.3. Двигатель опирается на обод сосуда с водой и состоит из двух вертикальных стержней, жестко закрепленных на горизонтальной оси, причем эти стержни соединены с расположенным ниже горизонтальным жестким прутком с помощью изогнутых в противоположные стороны листовых пружин и нитиноловых проволок. Когда любая из нитиноловых проволок нагревается до 65°C , она стремится выпрямиться, смещая при этом центр тяжести к противоположной по отношению к оси стороне, в результате чего устройство поворачивается вокруг оси. Если, как показано на рис. 5.3, ось опирается на обод открытого сосуда, наполненного теплой водой, то устройство колеблется вокруг оси, причем колебания обусловлены поочередным выпрямлением нитиноловых проволок и смещением центра тяжести по мере того, как они приближаются к воде или погружаются в нее. Более совершенная система была разработана в США Бенксом [9].

КРУПНОМАСШТАБНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЭНЕРГИИ

Любой из пяти рассмотренных ниже способов использования солнечной и тепловой энергии в больших масштабах может быть реализован к 1990 г. На научно-исследовательские работы и разработку некоторых проектов были затрачены большие усилия, благодаря этому на стадии моделирования были проведены подробные конструкторские проработки некоторых элементов, например, при изучении поля гелиостатов.

Солнечная энергетическая станция башенного типа. Система с центральным коллектором состоит из большого числа управляемых зеркал-гелиостатов, которые отражают солнечную радиацию и направляют ее на центральный приемник, помещенный на высокой башне. При высокой степени концентрации солнечной радиации в приемнике может быть получен пар высокой температуры. Рассматриваются также возможности использования других теплоносителей. Опытная солнечная станция мощностью 50 кВт, построенная в Сант-Иларио-Нерви в Италии, может генерировать 150 кг/ч перегретого пара при температуре 500°C , причем поле гелиостатов этой станции состоит из 270 зер-

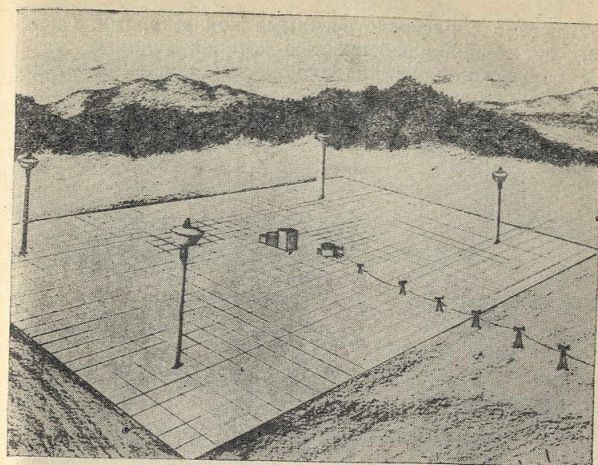


Рис. 5.4. Солнечная энергетическая станция башенного типа.

кал диаметром 1 м каждое [10]. В более поздних американских работах [11—13] рассматриваются отдельные солнечные станции мощностью 100 МВт с высотой башни от 300 до 450 м для обеспечения дополнительной и пиковой нагрузки. К 1981 г. запланировано строительство станции мощностью 2 МВт во Франции. На рис. 5.4 показана система, состоящая из поля гелиостатов, образующих четыре группы, каждая из которых имеет свою башню, и центральной станции в центре поля. Для реализации такой системы потребовались бы многие тысячи гелиостатов, а расстояние между отдельными башнями должно быть более 1 км. Экономические преимущества такой системы заключаются в том, что можно осуществлять массовое производство гелиостатов. В таких системах нежелательно применение относительно мелких зеркал, поскольку есть опасность их повреждения при сильном ветре. Стоимость 1 кВт, подсчитанная в 1975 г. для станции мощностью 300 МВт, состоящей из трех башен, составляла 930 долл.

Система с рассредоточенными коллекторами. Система, характерной особенностью которой является наличие большого числа индивидуальных коллекторов, называется «солнечной фермой». Для сбора энергии на центральной станции необходима разветвленная систе-

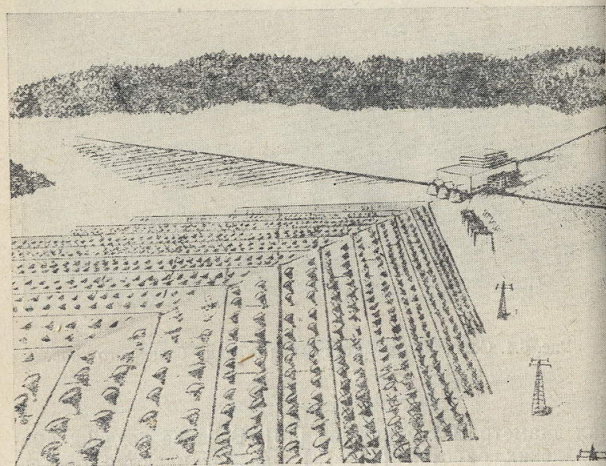


Рис. 5.5. Солнечная энергетическая станция с рассредоточенными коллекторами.

ма изолированных трубопроводов. В этой системе можно с успехом использовать коллектор типа НОСТ, рассмотренный в гл. 4. Общий вид системы с рассредоточенными индивидуальными коллекторами представлен на рис. 5.5. Вместо отдельных коллекторов в такой системе можно применять длинные параболоцилиндры. Обе системы должны размещаться в пустынных областях, и их использование ограничивается районами с высоким уровнем прямой солнечной радиации.

Машины, использующие тепловую энергию океана. Разработки тепловых машин, использующих разность между температурой поверхности океана и температурой более холодных глубоких слоев воды, начали про-

водиться в конце XIX в. Океаны — это естественные приемники солнечной энергии, которые не требуют специальных аккумулирующих устройств и коллекторов и благодаря своим огромным размерам являются потенциальными конкурентами других источников при производстве энергии. Первая энергетическая установка такого типа мощностью 22 кВт, расположенная у побережья Кубы, была разработана в конце 20-х годов Клодом [14]. Общий КПД системы составлял менее 1%; работа системы основывалась на открытом цикле Ренкина, причем морская вода с более высокой температурой пропускалась непосредственно в испаритель низкого давления, где получался пар для турбины. Эта установка в то время оказалась неэкономичной, так же как и более крупная установка, проект которой был разработан во Франции 20 лет спустя. Поэтому дальнейшая работа в этом направлении была прекращена.

В 60-е годы в США вновь возник интерес к этой проблеме в связи с предложением использовать замкнутый цикл Ренкина [15]. Эта работа послужила основой для широких теоретических исследований, которые были обобщены Мак Коном [16]. Пять исследовательских групп из промышленных организаций и университетов рассмотрели различные системы для различных районов. Мощность этих систем находится в пределах от 100 до 400 МВт в зависимости от перепада температуры в океане, который составляет 17,8°C в водах течения Гольфстрим у берегов Майами и 22,2°C в экваториальной зоне (до 22° с. ш. и ю. ш.). В качестве рабочего тела были предложены три различных вещества — фреон R-12/41, пропан и аммиак. Значения общего КПД всех пяти предлагаемых систем близки между собой и лежат в пределах от 2,1 до 2,4%. Проведены также исследования взаимодействия рассмотренных систем с окружающей средой, однако они в основном касаются вопроса о влиянии окружающей среды на энергоустановки, а не наоборот. Исследования в этом направлении необходимо продолжить в дальнейшем.

Основополагающей идеей в этих исследованиях является представление о возможности осуществления преобразования солнечной энергии с наибольшей эффективностью, причем предполагается, что к 1986 г.

термальные энергоустановки, использующие тепло океанов, займут в США господствующее положение*.

Солнечные энергетические установки на спутниках. Использование спутников, вращающихся вокруг Земли, для производства электроэнергии с передачей ее на Землю при помощи микроволновых генераторов впервые было предложено Глезером в 1968 г. [17]. Затем в США были проведены более детальные разработки этого проекта, основанные на использовании фотоэлектрического преобразования сконцентрированного солнечного излучения. Микроволновый генератор и его излучающая антенна расположены между двумя симметричными фотобатареями. Антенна направляет микроволновое излучение на приемную антенну, установленную на Земле. Вращаясь на синхронной орбите, спутник будет находиться в стационарном положении относительно любой выбранной точки Земли, и благодаря практически непрерывному поступлению радиации следует ожидать наиболее полного использования солнечной энергии. По количеству получаемой энергии возможности такой системы в 15 раз превышают возможности наземных установок, которые ограничены погодными условиями и сменой дня и ночи. Систему можно проектировать на мощность от 3 до 15 ГВт [18].

Гидроэлектрическое преобразование солнечной энергии. Идея гидроэлектрического способа преобразования солнечной энергии состоит в том, что солнечная энергия сначала превращается в гидравлическую энергию, а затем в электрическую. Если закрытый резервуар полностью изолирован от моря, то уровень воды в нем в результате испарения будет понижаться. Гидроэлектрогенератор может быть размещен на трубопроводе, соединяющем резервуар с морем. Падение уровня воды в резервуаре вызовет приток ее из моря. При этом потенциальную энергию, обусловленную разностью уровней воды, можно превращать в электрическую. При соответствующем подборе уровней и расхода воды можно добиться непрерывности процесса. Эта проблема исследовалась Кеттани (Саудовская Аравия), который измерял скорость испарения и сравни-

вал экспериментальные данные с теоретическими [19, 20]. Изучаются также возможности постройки дамбы через залив Бахрейн, чтобы реализовать подобный проект [21].

НЕКОТОРЫЕ ФОКУСИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Солнечные кухни. Приготовление пищи при помощи солнечной энергии привлекает внимание многих исследователей с тех пор, как в XVIII и XIX вв. были достигнуты определенные успехи в этом направлении. Солнечные кухни можно разделить на три группы. Самые первые варианты конструкции представляли собой так называемый «горячий ящик» или простую солнечную печь, т. е. хорошо изолированный прямоугольный приемник с зачерненной внутренней поверхностью, накрытый прозрачной изоляцией. Более поздние модификации имели зеркальную заднюю стенку. В таких устройствах при интенсивной радиации в течение нескольких часов может поддерживаться температура более 100°C. К второй группе относятся конструкции, в которых используются концентрирующие устройства. В 20-е годы Аббот применил систему с параболическим зеркалом, в которой в качестве теплоносителя использовалось масло, что позволяло готовить пищу также и в вечерние часы благодаря более высокой рабочей температуре и лучшей теплоаккумулирующей способности теплоносителя. В результате исследований, проведенных в Индии в Национальной физической лаборатории под руководством Гхайя [23], была сконструирована солнечная кухня с алюминиевым параболическим отражателем. Подробности технологии ее изготовления изложены в работе [24]. В некоторых типах солнечных кухонь, разработанных Висконсинским университетом, успешно использовалась металлизированная пленка [25], причем один из вариантов представляет собой складную переносную конструкцию, смонтированную на каркасе обычного зонта. В сообщениях Флоридского университета [5] освещены разработки солнечных кухонь типа «горячего ящика», а также устройств со сферическими и цилиндрическими зеркалами-концентраторами.

К третьей группе относятся солнечные паровые кухни, основными элементами которых являются плоский коллектор и теплоизолированная камера, представляю-

* Несмотря на некоторые успехи в разработке подобных систем, вряд ли можно разделять этот оптимизм. (Прим. ред.)

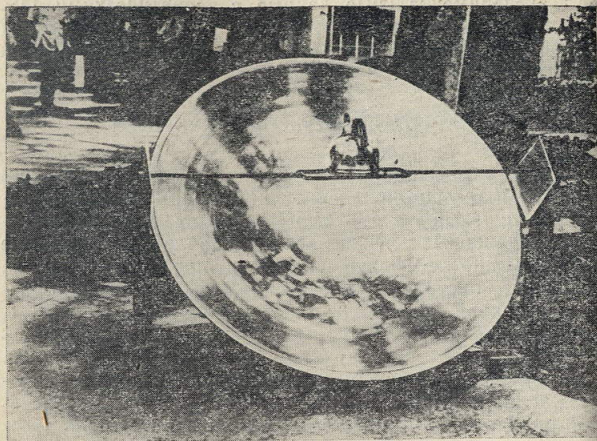


Рис. 5.6. Солнечная кухня.

щая собой в сущности паровую баню, в которую помещается емкость для приготовления пищи. Коллектор состоит из металлического листа с припаянными к нему продольными трубками и двух или трех слоев прозрачной изоляции. Трубки непосредственно соединены в верхней части коллектора с рабочей камерой. В Гаити разработан плоский коллектор размерами $0,8 \times 1,55$ м, соединенный с камерой, в которую помещена цилиндрическая алюминиевая емкость диаметром 200 мм и высотой 125 мм для приготовления пищи [26]. Образец такого же коллектора меньшего размера разработан Брейсовским исследовательским институтом [27]. В продаже имеются солнечные кухни с алюминиевым параболическим отражателем, одна из которых, изображенная на рис. 5.6, была продемонстрирована на Мировом конгрессе по использованию солнечной энергии в Лос-Анджелесе в 1975 г. В процессе дальнейших разработок будет рассмотрен вопрос об использовании тепловых труб для передачи тепла от коллектора к аккумулирующим устройствам длительного действия, чтобы можно было готовить пищу в утренние и вечерние часы.

Солнечные печи. Параболический концентратор является наиболее эффективной оптической системой для солнечной печи. Обеспечение слежения за солнцем для больших параболических зеркал вызывает значительные практические трудности. Поэтому существует другой способ их применения, при котором параболическое зеркало устанавливается неподвижно и ориентируется на север (в северном полушарии). Напротив него размещается гелиостат с системой слежения. Этот метод был использован Тромбом [28] в лаборатории по использованию солнечной энергии для первой большой солнечной печи с диаметром зеркала около 10,7 м, построенной в Мон-Луи в Пиренеях в 1950 г. В Одейо Французским Национальным центром научных исследований была построена печь мощностью 1000 кВт [29], являющаяся, несомненно, самой выдающейся из всех известных солнечных печей, существовавших в 70-е годы. Параболическое зеркало размерами $39,6 \times 53,3$ м состоит из 9500 отдельных зеркал суммарной площадью отражающей поверхности 2839 м^2 . Исследования солнечных печей проводятся также в СССР [30], в США и в Японии.

Экспериментальные работы показали, что с помощью солнечных печей можно получать тугоплавкие окислы при температуре более 3000°C . Солнечные печи используются для получения химических соединений, таких как бориды вольфрама и молибдена, методом осаждения из парообразного состояния [31], а также для проведения исследований процессов фазовых переходов при высокой температуре [32, 33]. Поскольку в солнечных печах можно обеспечить очень быстрый подъем температуры, их используют при испытаниях различных материалов на тепловой удар.

Для большинства процессов в химической промышленности требуется нагрев, который обеспечивается за счет органического топлива, и было бы весьма ценно, если бы благодаря исследованию солнечных печей удалось заменить это топливо сконцентрированной солнечной радиацией. Однако нет никаких оснований считать, что где-нибудь налажено производство солнечных печей, хотя в Одейо было продемонстрировано, что солнечная печь является важным инструментом для изучения свойств материалов при высоких температурах. Возможно, что в южных странах, где ощущается недостаток органического топлива, солнечные печи найдут промышлен-

ленное применение для относительно низкотемпературных процессов, например при обжиге кирпича.

Линзы Френеля. Степень концентрации линзы пропорциональна отношению ее диаметра к фокусному расстоянию, поэтому достижение высокой степени концентрации с помощью единичной линзы ограничивается трудностью точного изготовления обычных короткофокусных линз. В линзе Френеля в единичном модуле реализуются возможности многолинзовой системы, поскольку каждый сегмент построен таким образом, чтобы фокусировать падающую радиацию на центральный приемник. Другим преимуществом линз Френеля является их небольшая толщина в направлении, перпендикулярном потоку радиации. На рис. 5.7 дано поперечное сечение линейной линзы Френеля, которая может быть установлена в системе коллекторов со слежением за Солнцем в одном направлении [34]. Рабочие характеристики такой системы приведены в работах Нортрупа [35] и Нельсона [36], где показано, что линзы Френеля лучше всего применять в сочетании с вакуумным трубчатым коллектором, если требуемая температура не превышает 250°С. Долгосрочные экономические прогнозы показывают, что системы с линзами Френеля смогут конкурировать с органическим топливом и будут давать энергию в 3 раза более дешевую, чем электрическая, в ценах 1975 г. [35]. Считается, что круглые линзы Френеля пригодны для небольшой концентрации в системах с фотоэлектрическими батареями [37].

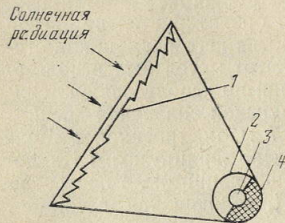


Рис. 5.7. Концентрирующий коллектор с линзами Френеля. 1 — набор линз Френеля; 2 — прозрачное окно; 3 — труба коллектора; 4 — изоляция.

замораживание продуктов питания, предназначенных для длительного хранения, являются совершенно различными задачами.

Частично системы, использующие солнечную энергию для охлаждения зданий, могли бы быть использованы для выработки тепла во время, не совпадающее с жарким летним периодом. Теоретический анализ таких систем, проведенный Лефом и Тибо для восьми городов США [38], показал, что комбинированные системы оказались более экономичными для шести из этих восьми городов. Максимум нагрузки на охлаждение приходится на послеполуденный период, продолжительность которого зависит от ориентации и теплоемкости здания, поэтому в системах охлаждения энергоемкость аккумулятора должна обеспечивать охлаждение в течение нескольких часов, в то время как для отопительных систем требуется запастись тепло на значительно более продолжительный период.

В солнечных отопительных системах нагретый теплоноситель из коллектора часто можно непосредственно использовать для обогрева внутреннего объема здания, а в охлаждающих системах в большинстве случаев необходимо применять солнечные холодильные машины с замкнутым циклом. Использование солнечной энергии для охлаждения может быть реализовано с помощью следующих способов и устройств:

- компрессионный холодильный цикл, в котором охлаждение осуществляется солнечной холодильной машиной;
- абсорбционные системы;
- испарительное охлаждение;
- радиационное охлаждение.

Для наиболее простой реализации первого способа в компрессионном холодильнике, который является обычным бытовым прибором, электрический двигатель заменяется солнечным. Было испытано и предложено несколько сложных компрессионных холодильных систем, в частности проект четырехцилиндрового возвратно-поступательного двигателя, в котором два цилиндра с теплоносителем R-114, приводимые в действие за счет солнечной энергии, в свою очередь приводят в действие два цилиндра компрессора с теплоносителем R-22 [39]. Передвижная исследовательская лаборатория по использованию солнечной энергии была оснащена обычной испарительной холодильной установкой с рабочей жидкостью

ЗАМОРАЖИВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ

Главным преимуществом использования солнечной энергии для замораживания и охлаждения является то, что максимум ее поступления совпадает в этом случае с максимумом потребления. Охлаждение зданий и замо-

стью R-12, которая приводилась в действие высокоскоростной турбиной с рабочей жидкостью R-113, использующей солнечную энергию. Предварительные испытания показали, что при температуре на входе в турбину выше 100°C суммарный КПД составляет 50% [40]. Относительная стоимость системы должна уменьшаться с увеличением ее размеров, причем подсчитано, что 33-кратное увеличение размеров сопровождается 10-крат-

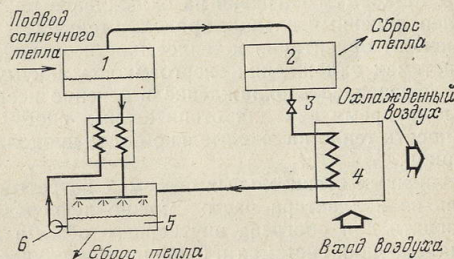


Рис. 5.8. Схема системы абсорбционного солнечного охлаждения. 1 — генератор; 2 — конденсатор; 3 — редукционный клапан; 4 — испаритель; 5 — абсорбер; 6 — насос.

ным увеличением стоимости. Применение концентрирующего коллектора также увеличило бы общую эффективность системы, поскольку увеличилась бы температура на входе в турбину.

На рис. 5.8 схематически изображены основные узлы абсорбционной холодильной системы. Рабочая жидкость представляет собой раствор хладагента и абсорбента. Когда солнечное тепло поступает в генератор, некоторая часть хладагента испаряется, в результате чего раствор обедняется, т. е. становится менее концентрированным. Пары хладагента конденсируются при отводе тепла. Жидкий хладагент проходит через клапан, понижающий давление, и испаряется, охлаждая внешний теплоноситель, например воздух для систем кондиционирования. Цикл завершается в абсорбере, где хладагент соединяется с обедненным раствором и перекачивается обратно в генератор. В Университетах штата Флорида [5, 41] и

Вест-Индии [42] успешно разрабатываются водоаммиачные системы. Поскольку в этих системах требуется сравнительно низкая температура, они являются самыми подходящими для сочетания с обычными плоскими коллекторами. В 1974 и 1975 гг. были рассмотрены различные модификации абсорбционных систем, в частности с рабочим телом бромид лития — вода [43—45]. Совершенно другой метод применяется в испарительной системе кондиционирования воздуха, которая была введена в действие в 1975 г. недалеко от Лос-Анджелеса [46].

В испарительных системах охлаждение осуществляется за счет испарения воды. Простой метод, использованный Томасом [47], состоит в том, что воду из аккумулятора горячего бака пускают в виде тонких струй по нестекленному северному скату крыши дома. В Австралии хорошие результаты получены при использовании метода, состоящего в том, что в выведенном из здания воздухе испаряют воду, а затем этот отработанный воздух охлаждает камни в рекуператоре с каменной насадкой, где каждые десять минут происходит переключение потоков воздуха, так что свежие порции поступающего в здание воздуха предварительно охлаждаются, проходя через рекуператор [48, 49].

Радиационное охлаждение или охлаждение за счет излучения целесообразно производить ночью при ясной погоде. Янигимахи [50] и Блисс [51] использовали этот способ и производили охлаждение прокачиванием воды через коллекторы, размещенные на крыше. Хэй [52] также рассматривал этот метод. В Институте экспериментальной физики университета Неаполя показано, что радиационное охлаждение происходит также в дневные часы при отсутствии прямой солнечной радиации [53]. В этом случае используется селективная поверхность с оптическими свойствами, подобранными в соответствии с атмосферным излучением. Это излучение имеет минимум интенсивности в интервале от 8 до 13 мкм, образуя «атмосферное окно». Теоретически показано, что таким образом можно получить температуру на 10—15°C ниже температуры окружающей среды. При испытаниях на небольшой экспериментальной модели результаты получились несколько хуже, однако теоретические положения были в целом подтверждены.

Принцип действия теплового насоса был разработан еще 100 лет назад. Снабжая энергией тепловой насос, можно добиться передачи тепла с более низкого уровня температуры на более высокий. Впервые этот принцип был применен в холодильнике, где продукты питания находятся при более низкой температуре, чем температура окружающей среды, и при этом тепло из холодильника в окружающую среду сбрасывается при помощи наружного теплообменника. Тепловой коэффициент теплового насоса (ТКН) определяется как отношение выработанной энергии к подведенной. Выработанная энергия представляет собой полезное тепло при более высокой температуре, чем температура окружающей среды, а подведенной является энергия, полученная от электросети или при непосредственном использовании органического топлива. Суммарная энергия, подведенная к системе, включает тепло из окружающей среды, поэтому у большинства установок с тепловыми насосами ТКН больше 1,0. Другими словами, система обеспечивает больше полезной энергии на уровне более высокой температуры, чем она получает от электросети или топливных источников. Теоретически значения ТКН могут достигать 20, однако на практике их можно получить в пределах от 2 до 3 [53], хотя имеются сообщения о более высоких значениях ТКН [54]. На Британских островах для отопления зданий часто требуется тепло при температуре, значительно более высокой, чем температура окружающей среды, при этом можно экономить энергию, если вместо обычных отопительных систем использовать системы с тепловым насосом. За последние 25 лет несколько экспериментальных установок, которые использовали в качестве низкопотенциального источника тепло почвы, воды или воздуха, находились в действии в течение длительного периода, и результаты этих исследований отражены в работе [55]. Использование солнечной энергии вместе с этими низкотемпературными источниками оказывается выгодным, поскольку, чем выше температура на входе в систему с тепловым насосом, тем меньше количество энергии, подводимой от электросети или за счет сжигания топлива при том же суммарном количестве вырабатываемой энергии. При изучении возможности использования системы с тепловым насосом для солнечного

водонагрева в демонстрационном павильоне в Ноттингемшире [37], было показано, что старый водяной бак, размещенный в оранжерее под землей, можно снова использовать в качестве теплоаккумулирующей системы.

В солнечном доме университета штата Небраска вместо обычного солнечного коллектора используется южный скат крыши, покрытый одним слоем стекла, которое пропускает солнечную энергию прямо в мансарду. Тепловой насос отбирает тепло из этого «объемного коллектора» и передает полученную энергию через теплообменник водяному аккумулятору. Отопление осуществляется за счет циркуляции нагретой воды через теплообменник системы воздушного отопления дома. Главным преимуществом такой системы является снижение капитальных затрат на коллекторы и увеличение эффективности поглощения энергии за счет сравнительно более низкой температуры в коллекторном пространстве. Другая особенность состоит в том, что для обычной системы с тепловым насосом в непрерывном рабочем цикле период максимальной потребности в энергии совпадает с периодом наименьшей эффективности преобразования, осуществляемого при низкой температуре окружающей среды. При наличии аккумулялирования установка может быть меньше и обладать способностью запасать достаточное количество энергии во время светового дня для использования ее в ночные часы. Расчетное значение ТКН для такой системы равно 2,72, в то время как для обычной системы с тепловым насосом, установленной в том же районе, оно составляет всего лишь 1,7. В работе [59] отмечаются также экономические преимущества использования теплового насоса с комбинированными системами отопления и охлаждения.

СОЛНЕЧНЫЕ ПРУДЫ

В ряде стран, где сезонные колебания в поступлении солнечной радиации незначительны, в течение ряда лет наблюдается интерес к солнечным прудам. В естественных водоемах, когда солнечная радиация нагревает слой, лежащий на некоторой глубине, нагретая вода под действием конвективных потоков поднимается на поверхность и в пруду обычно устанавливается температура, равная средней температуре окружающей среды.

Вода солнечных прудов содержит растворенную соль, концентрация которой возрастает с увеличением глубины, и за счет этого плотность воды увеличивается по направлению к дну пруда, обычно зачерпнутому. Солнечное излучение проникает на дно, нагревает воду нижних слоев, а любые конвективные потери подавляются благодаря наличию градиента плотности. Тепловые потери с поверхности пруда меньше, чем в естественном водоеме, и температура воды вблизи дна повышается. Несмотря на наличие суточных колебаний температуры как в окружающей среде, так и в верхних слоях воды, температура нижних слоев остается постоянной даже при отборе тепла [61]. Солнечный пруд представляет собой одновременно коллектор и аккумулятор тепла, причем по сравнению с обычными коллекторами и аккумуляторами он является более дешевой системой: Теоретический анализ режимов работы солнечных прудов довольно сложен, однако основные уравнения уже определены [62].

Область возможного применения солнечных прудов продолжает расширяться, особенно при использовании прозрачных мембран, которые размещают вблизи поверхности пруда, чтобы в его верхней части создать слой соленой воды, в котором отсутствует конвекция, и отделить его от расположенной под ним зоны перемешивания, что облегчает аккумулярование и извлечение тепла. Отопление [63] и технологический нагрев [64] представляют собой две особенно перспективные области применения прудов. В работе [65] рассматривается возможность получения электроэнергии при мощности порядка мегаватта в случае использования мелкого, глубиной 50 мм, солнечного пруда с прозрачным пластиковым покрытием, из которого на ночь воду можно переливать в в подземный закрытый резервуар-аккумулятор. Хотя суммарный КПД таких систем не превышает 25%, они оказываются конкурентоспособными при сравнении с концентрирующими или фотоэлектрическими системами.

ОПРЕСНЕНИЕ ВОДЫ

Одной из главных проблем во многих странах мира является нехватка пресной воды, поэтому разработка крупных дешевых солнечных опреснителей, удобных для эксплуатации и транспортировки, приобретает для этих

стран большое значение. Солнечное опреснение является одним из направлений использования солнечной энергии, разработка которого была начата еще в XIX в., и простейшие образцы современных опреснителей в основном мало отличаются от ранних конструкций, состоявших из неглубоких лотков, заполненных соленой или солоноватой водой и покрытых наклонной стеклянной пластиной. Солнечное излучение нагревает воду в лотке и она испаряется. Когда пары воды соприкасаются с холодной внутренней поверхностью стекла, они конденсируются, образуя пресная вода стекает вниз по внутренней поверхности стекла в виде капель и собирается у нижнего края лотка. При высоком уровне солнечной радиации производительность установки по опреснению воды может составить 4 кг/м^2 в день. В 1970 г. было опубликовано два превосходных обзора работ по солнечному опреснению, один из которых посвящен истории вопроса, теории, проблемам практического применения и экономике [66], а во втором — рассматриваются потенциальные возможности применения солнечного опреснения в развивающихся странах [67].

Одной из стран, где накоплен многолетний практический опыт в этой области, является Австралия. В 1965 г. было выпущено руководство по проектированию, строительству и монтажу солнечных опреснителей [68], разработанное Научно-исследовательской и промышленной организацией Британского содружества, а дальнейшие усовершенствования в этой области были освещены девять лет спустя Купером и Ридом [69]. Крупная установка с площадью поверхности испарения 8667 м^2 была пущена в действие в 1967 г. на о-ве Патмос в Греции [70]. Средняя дневная производительность установки составила $3,0 \text{ кг/м}^2$, а максимальная производительность полученная в середине лета, равнялась $6,2 \text{ кг/м}^2$. Первой крупной установкой, спроектированной и построенной в Великобритании в 1970 г., была установка площадью 185 м^2 , предназначенная для о-ва Альдбра в Индийском океане [71]. Известно, что по крайней мере одна небольшая фирма в Великобритании, начиная с 50-х годов, производит солнечные опреснители для бытовых нужд [72], а среди научно-исследовательских работ, проводимых в широком масштабе в университетах, выделяются работы Калифорнийского университета в Беркли, где этим вопросом занимаются более 20 лет. Этой проб-

леме посвящен обзор Хоу и Тлеймата [73], в котором описан проект опреснительной установки производительностью 37,85 м³, генерирующей пар при температуре 65,5°C. Фундаментальные исследования продолжаются и в других странах, например в Индии [74].

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Технологический нагрев. Увеличение температуры на выходе из плоского солнечного коллектора всегда понижает его суммарный КПД и экономичность любой системы солнечного теплоснабжения. Потенциальные возможности применения солнечной энергии в широких масштабах для промышленных целей в большой мере зависят от рабочей температуры процесса. В Австралии, где существуют давние традиции в области изучения и применения солнечной энергии, исследование технологических процессов на обычном заводе по переработке пищевых продуктов показало, что применение солнечных нагревательных систем в существующих процессах технически вполне осуществимо. Более 50% годовой потребности в тепле можно обеспечить с помощью солнечных коллекторов при использовании известных методов, поскольку свыше 70% тепла требуется при температуре ниже 100°C, и практически не существует процессов, в которых требуется температура выше 150°C. В пищевой промышленности тепло обычно вырабатывается в центральной котельной при температуре, более высокой, чем требуется для любого из производственных процессов, и затем в виде воды с температурой 99°C или пара низкого давления с температурой 120—170°C распределяется между отдельными технологическими потребителями, большая часть которых работает при гораздо более низких температурах. Для успешного сочетания солнечной установки с такой системой необходимо, чтобы солнечные коллекторы работали при самой низкой допустимой температуре и чтобы коллекторы с присоединенными к ним, когда это необходимо, аккумуляторами непосредственно использовались индивидуальными технологическими потребителями. Необходимо, чтобы промышленные системы солнечного теплоснабжения во всех случаях обеспечивали производственные процессы теплом, поэтому они должны обладать достаточной аккумулирующей

и поглощающей способностью, чтобы обеспечивать производство в самых тяжелых условиях. В противном случае на период времени с низкой радиацией требуется источник дополнительной энергии. Пока не будет разработана система межсезонного аккумулирования, едва ли удастся создать выгодную с экономической точки зрения систему солнечного теплоснабжения без вспомогательного нагревателя. В 1975 г. в продаже имелись бытовые солнечные нагревательные установки, средняя рабочая температура которых обычно составляла 30—40°C при среднегодовом КПД порядка 40%. Когда эти цифры были использованы при расчетах, выполненных для обычного завода, то получилось, что за счет солнечной энергии можно обеспечить 82% годовой потребности в тепле, при этом отношение ежегодной экономии топлива к капитальным затратам составило 0,05.

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что если бы только 25% энергии, необходимой для всей пищевой промышленности Австралии в 1975 г., обеспечивалось за счет солнечной энергии, то австралийской промышленности, выпускающей солнечные коллекторы, потребовалось бы 12 лет, чтобы удовлетворить потребности в коллекторах.

Транспорт. Солнечный электрический автомобиль Флоридского университета [5] был первым солнечным автомобилем, который работал в обычных условиях уличного движения. Этот автомобиль приводится в движение электрическим двигателем мощностью 27 л. с., берущим энергию от кадмиево-никелевых и свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Батареи могут заряжаться от фотоэлементов или от системы с солнечным генератором. Максимальная скорость автомобиля около 100 км/ч на горизонтальном участке дороги длиной 160 км. Целью далекого будущего является установка солнечных зарядных станций, на которых разрядившиеся батареи могли бы вновь подзаряжаться, обеспечивая энергетически автономную и не загрязняющую окружающую среду транспортную систему.

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ, БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ И ФОТОХИМИЯ

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Изучение прямого преобразования солнечной энергии в электрическую началось с конца XIX в. Первые работы относились к термоэлементам, составленным из пар разных сплавов, причем КПД их был очень низким, обычно менее 1%. Обзор этих работ был выполнен Теллес в статье, написанной в 1953 г. [1]*. К этому времени сложилось мнение, что возможности для достижения более высокой эффективности прямого преобразования энергии весьма ограничены и поэтому такой метод получения электричества не является перспективным. Таким же пессимистическим было отношение к этому вопросу в Великобритании [2]. Однако в 1954 г. в США в лабораториях фирмы «Белл телефон» было обнаружено, что, если вместо обычных светочувствительных материалов, которые использовались для изготовления первых фотоэлементов, применять тонкие пластины из кремния с ничтожно малыми количествами соответствующих примесей, то можно повысить эффективность преобразования солнечного излучения в электричество более чем в десять раз. С этого момента начался период постоянных успехов в этой области, и появились сообщения о значительно более высоких значениях КПД преобразования, полученных в лабораторных условиях — до 16% для кремниевых элементов и выше 20% для некоторых новых типов элементов из арсенида галлия. Широко известно использование солнечных элементов в космических условиях, ускоряются темпы развития их наземного применения, так что предполагалось, что в ближайшие годы, с помощью солнечных эле-

* Строго говоря, термоэлектрические устройства, о которых идет речь, не являются устройствами прямого преобразования солнечной энергии в электрическую в отличие от фотоэлементов, так как в термоэлектрических генераторах солнечное излучение преобразуется вначале в тепло, а затем уже в электроэнергию. Заметим также, что обзор, выполненный Теллес в 1953 г., устарел. Современные солнечные термоэлектрические генераторы на основе полупроводниковых термоэлементов могут иметь КПД 5—8%. (Прим. ред.)

ментов будет обеспечиваться заметная часть мирового энергопотребления.

Современные солнечные элементы имеют следующие преимущества: в них отсутствуют движущиеся изнашивающиеся части, они имеют неограниченный срок службы, требуют минимального обслуживания (или вообще не требуют такового), не загрязняют окружающую среду [3]. В отличие от электрогенераторов других типов они могут применяться в широких пределах мощности — от одного ватта и менее до нескольких тысяч мегаватт. Однако согласно проведенным в Японии оценочным расчетам для создания солнечной станции мощностью 10 МВт при технологическом уровне, достигнутом к 1974 г., потребовалось бы израсходовать целиком все количество кремния, производимого в мире, — около 1 тыс. т [4]. Солнечные энергетические установки на фотоэлементах, введенные в эксплуатацию в Японии в 1974 г., мощность которых оценивалась всего лишь в 20 кВт, были, по-видимому, самыми большими в мире. Японский проект «Солнечный свет», осуществление которого было начато в 1974 г., включает проекты строительства солнечных фотоэлектрических установок мощностью 1 МВт к 1980 г.*, мощностью 10 МВт к 1986 г., мощностью 100 МВт к 1991 г. и еще более мощных установок к 2000 г. По оценкам национального научного фонда в США [5] пиковая мощность выпускаемых ежегодно солнечных батарей будет составлять 5000 МВт к 1990 г. и 20 000 МВт к 2000 г., что обеспечит покрытие около 2% предполагаемой суммарной потребности в электроэнергии.

Типы солнечных элементов. Если в полупроводниковый материал высокой чистоты вносить ничтожно малые количества соответствующих примесей, то можно изменять его электрические свойства и получать полупроводниковые материалы с электропроводностью двух основных типов: *p*-типа со связанными носителями отрицательного заряда и свободными носителями положительного заряда и *n*-типа со связанными положительно заряженными и свободными отрицательно заряженными носителями. Если в одном кристалле полупроводника создать слои двух указанных типов и осветить по-

* В 1980 г. фотоэлектростанция мощностью 1 МВт не была сооружена, сомнительно также, чтобы мощность 10 МВт была достигнута к 1986 г. (Прим. ред.)

верхность кристалла солнечными лучами, то носители будут диффундировать через *p-n* переход навстречу друг другу, вызывая во внешней цепи электрический ток, как это показано на рис. 6.1. Первые солнечные элементы изготавливались из кремния. Для получения одного из

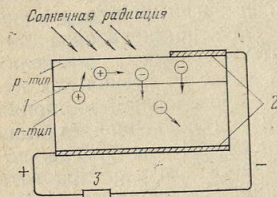


Рис. 6.1. Кремниевый солнечный элемент.

1 — спай; 2 — металлическая контактная пленка; 3 — сопротивление нагрузки.

ментов является сложным, он включает стадию выращивания кристалла из расплава, где требуется контроль температуры с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ на уровне 1420°C [6]. Поэтому такие фотоэлементы дороги, и в 1976 году стоимость одного ватта пиковой мощности составляла около двадцати фунтов стерлингов.

Основную конкуренцию кремниевым фотоэлементам для наземного применения составляют солнечные элементы из сульфида кадмия, поскольку считается, что технология массового производства дешевых солнечных батарей из сульфида кадмия уже разработана [7]. В Институте преобразования энергии при Делаверском университете производятся элементы из сульфида кадмия/ сульфида меди с КПД более 7%, и, как показывают проводимые там работы, КПД их может быть увеличен до 15%. По результатам ускоренных ресурсных испытаний ожидается, что срок их службы превысит 20 лет [8]. Совершенно одинаковыми качествами обладают элементы из арсенида галлия и фосфида индия. Согласно сообщениям компании «Плесси» (Великобритания) и ассоциации «Вариан» (США) элементы из арсенида галлия способны выдерживать тысяче-

кратную концентрацию потока солнечных лучей. Проводятся также работы [9] по исследованию органических полупроводников и барьеров Шоттки (граница металл — полупроводник).

Применение. Дорогостоящие солнечные элементы, выпускаемые в настоящее время, нецелесообразно использовать при наличии традиционного источника энергии. Однако уже сейчас в ряде случаев применение таких устройств является экономически выгодным. Быстрое развитие получили разработки по обеспечению энергией автоматических морских бакенов. Солнечные элементы находят все более широкое применение для энергоснабжения сигнальных огней на буйках, в маяках и на морских нефтяных вышках, особенно в Мексиканском заливе и на Японских островах [10]. В Великобритании кремниевые фотобатареи были применены впервые в 1968 г. в установке для снабжения энергией навигационных огней на Темзе у Кросснисса [11]. В первых опытах проблема «агрессивности» морской атмосферы была основной, причем оказалось, что соль, имеющаяся в атмосфере, разрушает некоторые смолы и пластмассовые материалы, скрепляющие внешнюю оболочку элементов.

В настоящее время считается, что подходящими потребителями солнечных энергоисточников являются автоматические метеостанции и другие удаленные и труднодоступные приборы. На первый взгляд может показаться, что эксплуатационные расходы при использовании обычных видов топлива достаточно низки, однако стоимость топлива составляет лишь небольшую часть затрат, связанных с эксплуатацией установок и доставкой топлива. В США одним из первых применений фотоэлементов было их использование для питания удаленных радиопередатчиков Службы леса США, расположенных на вершинах гор. В Нигерии школьные телевизионные программы предназначаются для школ, расположенных в районах, не обеспеченных энергоснабжением, и с 1968 г. для энергоснабжения телевизионных приемников используются солнечные батареи [12]. Потребляемая от источника постоянного тока мощность составляет около 32 Вт при напряжении от 30 до 36 В. Стоимость солнечных элементов составляет 3100 долл., а химических батарей 976 долл., однако солнечные батареи, срок службы которых оценивается

примерно в 10 лет, обеспечили бы свыше 25 000 ч работы, в то время как химические батареи работают 2000 ч. Может также найти применение легкий переносный компактный энергоисточник, изображенный на рис. 6.2, представляющий собой батарею «Ферранти», которая использовалась во время недавнего восхождения британской экспедиции на Эверест. Солнечные батареи можно применять для зарядки аккумуляторов на прогулочных яхтах и спасательных лодках.

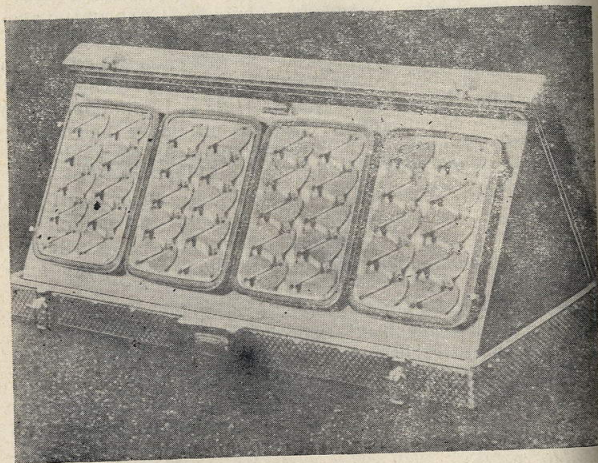


Рис. 6.2. Портативная солнечная батарея «Ферранти».

Торговая фирма «Митр корпорейшн» в США установила солнечную батарею пиковой мощностью 1 кВт, которая являлась самой крупной наземной фотоэлектрической установкой, пущенной в действие к 1975 г. [13]. Система аккумуляирования энергии в этой установке состояла из аккумуляторной батареи для кратковременного и пикового потребления в комбинации с топливной батареей на электролизном водороде для покрытия базовой нагрузки и для работы в ночное время. Сообщается о других применениях солнечных батарей.

в том числе для энергоснабжения первой в мире дорожной системы связи в Калифорнии, миниатюрных радиопередатчиков, закрепленных на теле диких животных, отдаленных снего- и дождемеров, сигнальных противопожарных устройств и сейсмографов [10].

Аккумуляирование электроэнергии. Совершенствование аккумуляторных батарей происходит сравнительно медленно, так что традиционные свинцовые кислотные батареи очень громоздки и имеют низкое отношение мощности к массе. В будущем альтернативой могут явиться сернистонатриевые батареи [14]. Существенное улучшение отношения мощности к массе можно получить на установках с инерционным маховиком. Была предложена идея использовать для аккумуляирования энергии до 70 кДж (около 20 000 кВт·ч) маховик диаметром 5 м из прочного и легкого материала, например из плавленого кварца [15]. Аккумуляирование энергии в большом масштабе можно осуществить также, запасая высокотемпературное тепло с помощью эвтектических смесей фторидов металлов, например NaF/MgF_2 . Высокотемпературный аккумулятор может быть затем использован как источник тепла в обычной термогенерирующей системе, однако общая эффективность при этом будет сравнительно низкой. Процесс получения небольшого количества водорода при электролизе воды, упомянутый выше, содержит большие возможности для существенного увеличения масштабов производства водорода, однако существует еще много технических трудностей, которые необходимо преодолеть [16].

Перспективы развития. Совершенно новая технология производства кремниевых элементов в настоящее время разрабатывается в США [17]. Благодаря тому, что кристаллы кремния выращиваются непосредственно в виде лент, удается исключить из технологии дорогостоящий процесс нарезки тонких кремниевых пластин из большого монокристалла цилиндрической формы. Технология, известная как выращивание пленок с определенными границами, была применена для получения лент из кремния в 1971 г., причем первой задачей являлось выращивание кремниевых лент, подходящих для использования в солнечных элементах. Вторая задача состояла в получении кремниевой ленты высокого качества, обеспечивающей КПД солнечных элементов, равный примерно 10%, а третья задача заключалась в том, чтобы

выращивать непрерывную длинную ленту и доказать принципиальную возможность применения этой технологии для производства достаточно длинных лент. Эти задачи были решены, и в 1974 г. началось производство лент длиной около 2 м. Конечной целью является увеличение длины лент до 30 м и более при сохранении КПД на уровне 10%, а затем непрерывное выращивание большого числа лент одновременно в одном производственном агрегате. Производство этих дешевых и эффективных элементов в широких масштабах предвидится не раньше, чем в 1985 г. Одна из основных трудностей получения солнечных элементов состоит в том, что для их производства требуются большие затраты энергии, особенно когда речь идет о кремниевых элементах. Эту трудность можно преодолеть, используя солнечную печь для получения кремния из исходного сырья [18].

Дальнейшее развитие наземного использования солнечных элементов в тех районах, где их можно применять для выработки электроэнергии в широких масштабах, связано с существенным уменьшением их стоимости. Разговоры о снижении стоимости в 100 раз и более звучат слишком оптимистически, однако в настоящее время широко используются устройства, стоимость которых в 1950 г. была в 100 раз выше, чем сейчас. Прекрасным примером в этом отношении являются шариковые ручки и транзисторы [3]. Пока имеются средства для выполнения необходимых исследований и разработок, нет оснований сомневаться, что проектируемая на 80-е годы стоимость около 2 фунт. ст. и на 2000 г. около 0,1 фунт. ст. за 1 Вт пиковой мощности может быть достигнута [3, 5] *.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Все растения используют солнечную энергию для синтеза органических соединений из неорганического сырья. Происходит процесс фотосинтеза. В этом процессе углекислый газ из воздуха соединяется с водой в

* К 1980 г. стоимость кремниевых фотоэлементов, выпускаемых некоторыми фирмами США, составляла 6—8 долл. за 1 Вт пиковой мощности. (Прим. ред.)

хлоропласте растений, и образуются углеводороды и кислород. Хлоропласт содержит хлорофилл, который придает растениям зеленую окраску. Углеводороды могут существовать в виде сахаров $C_{12}H_{22}O_{11}$, как, например, в сахарном тростнике или свекле, или в виде более сложных крахмалов или целлюлозы ($C_6H_{10}O_5$). При обращении этой реакции все растения, животные и бактерии вырабатывают энергию в удобной для использования форме. Фотосинтез является очень важным практическим способом собирания и аккумуляирования солнечной энергии, которому обязаны своим существованием все современные формы жизни. Историю развития человека можно непосредственно проследить по биологическим системам преобразования энергии, начиная от обеспечения пищей и кончая получением кормов для животных, а также строительных материалов, энергии для приготовления пищи и обогрева. Особенностью биологических систем преобразования энергии является то, что солнечная энергия в этом случае превращается непосредственно в топливо (водоросли, древесина и т. д.), которое удобно хранить, в то время как при других методах ее использования требуются специальные аккумулярующие устройства. Углеводороды можно превратить в такие удобные виды топлива, как спирт, водород или метан, причем этот процесс может быть применен также непосредственно к органическим отходам, получающимся при производстве пищи или древесины. Эффективность биологического преобразования энергии по сравнению с другими методами очень низка, однако этот метод является потенциально гораздо более дешевым.

Эффективность процесса фотосинтеза. Теоретически максимальная эффективность процесса фотосинтеза составляет около 27%, однако в сельскохозяйственной практике ее значения обычно не превышают 1%. Зарегистрирована эффективность преобразования энергии в пределах 2—5%, полученная в сельском хозяйстве в очень благоприятных условиях. Например, в 1965 г. в Австралии при строгой дозировке удобрений урожай проса был выращен за 14 дней, эффективность преобразования энергии при этом составила 4,2%. Известны также примеры выращивания урожая в предельно короткие сроки в условиях мягкого климата, например сахарной свеклы в Великобритании и кукурузы в штате Кен-

тулки, США, при эффективности преобразования энергии, достигающей соответственно 4,3 и 3,4%. При более длительных периодах созревания эффективность преобразования энергии существенно ниже. Ирландские луга или леса канадской ели могут давать более 16 тонн сухого материала с гектара, что соответствует эффективности преобразования энергии около 0,7%. Для кентукской кукурузы эффективность преобразования энергии, вычисленная по отношению к годовой сумме радиации, составляет всего 0,8%.

В анализе, проведенном Холлом [20] для Великобритании, где среднее потребление энергии эквивалентно мощности примерно в 5 кВт на человека, подчеркивается важность повышения эффективности преобразования энергии в процессе фотосинтеза при обеспечении энергией за счет выращивания растений. При среднем уровне солнечной радиации около 110 Вт/м² и эффективности ее преобразования 10% площадь, необходимая для обеспечения энергией одного человека, составила бы около 400 м². Следовательно, для полного удовлетворения потребностей в энергии населения Великобритании численностью 55 млн. чел. было бы достаточно всего 9% общей территории страны.

Получение энергии в процессе фотосинтеза. Химическую энергию, запасенную «энергетическими» культурами в процессе созревания, можно преобразовать в используемую энергию путем их сжигания или превращения в топливо, удобное для хранения. Эти растения должны иметь возможно более высокую эффективность преобразования энергии и быть непригодными в качестве пищи для животных или людей. Можно использовать целиком всю биомассу, включая листву, стебли и корни. При тщательном генетическом отборе и интенсивной обработке эффективность преобразования энергии может достигать в обычных условиях 3%. В Великобритании проведен интересный опыт по высеванию специального сорта дерна на заливных илистых речных отменях. Сообщается, что значение максимальной эффективности преобразования энергии примерно на 50% выше, чем для других пород [21].

В Ирландии [19] и Австралии [22] предлагается использовать в качестве «энергетических» культур деревья. Около 6% территории Ирландии занято болотами, причем менее чем с 1/5 части этой территории добывают

торф, который используется непосредственно как топливо в домах и для получения электроэнергии. В 1974 г. таким образом обеспечивалось 24% общего производства электроэнергии. До недавних пор болотистые почвы считались неплодородными, однако на них успешно произрастают трава, кустарник, деревья. Если на территории болот, занятой в настоящее время дерном, выращивать канадскую сосну, то сжигая ее, можно будет обеспечить половину необходимой стране электроэнергии даже при эффективности преобразования энергии, составляющей только 0,5%. Следовательно, на территории, примерно вдвое превосходящей площадь ирландских болот, можно выращивать урожай древесных пород, который был бы достаточным для полного удовлетворения потребностей страны в электроэнергии за счет непрерывно возобновляемого топлива.

При рассмотрении проблемы преобразования энергии растениями важным фактором является вопрос об энергетических затратах на уборку урожая и внесение удобрений для повышения урожайности. Показателен подробный анализ, проведенный для изолированной общины в Австралии, насчитывающей 6000 чел., поскольку в его основу заложен существующий уровень технологии. Отсутствует загрязнение окружающей среды, так как связываемый в процессе фотосинтеза СО₂ освобождается при сгорании. Исследованы две различные системы — прямое сжигание древесной стружки в энергетической установке с парогенератором и паровой турбиной и производство генераторного газа из древесной стружки с последующим его сжиганием в энергетической установке с поршневой газовой машиной. Обе системы были признаны осуществимыми с технологической точки зрения, причем основное количество минеральных удобрений, необходимых, чтобы непрерывно выращивать лес, можно обеспечить, возвращая в почву полученную при сгорании золу. Требуемая площадь составляет менее 6 км², включая дополнительную площадь, необходимую для покрытия энергетических затрат по уборке урожая. Довод в пользу деревьев как «энергетической» культуры был очень кратко сформулирован Ридом [23], который заявил: «Я бы охотнее прогулялся на акре земли, засаженной лесом, чем на акре земли, засаженной солнечными элементами».

При подходящем климате можно использовать солнечную энергию для сушки «энергетических» культур. Опыты с солнечными печами для сушки древесины нагретым воздухом были проведены в Австралии [24] на установках в Гриффитсе и Таунсвилле. Обе установки представляют собой переоборудованные изолированные печи с каменными аккумулялирующими устройствами. Было установлено, что сушка в солнечных печах продолжается почти вдвое дольше, чем в обычных паровых печах, однако только половина этого времени требуется для сушки воздуха. Имеются сообщения о многочисленных применениях солнечной энергии для сушки пищевых продуктов, таких как фрукты, овощи, зерно [25, 26].

В океане производство органических веществ с помощью фотосинтеза обычно ограничено из-за отсутствия сырья. Однако есть несколько районов, где природные течения поднимают сырье со дна океана на поверхность, так что фотосинтез может происходить. Проводились предварительные исследования по выращиванию гигантских водорослей, содержащих йод, *macrocystis pyrifera*, крупных морских водорослей коричневого цвета на площади примерно 600 000 км² у западного побережья США. По предварительным оценкам ожидаемый урожай составляет 0,5 т/га, что эквивалентно 2% выработки энергии в США в 1970 г. [25].

Новым направлением поисков в области фотобиологического превращения энергии является использование природных продуктов из фотосинтетических морских микроорганизмов [26]. Большинство этих организмов способно к фотосинтезу водорода и связыванию азота, но эффективность преобразования при этом чрезвычайно низка. Предлагаются некоторые методы ее повышения, однако требуется еще большой объем исследований.

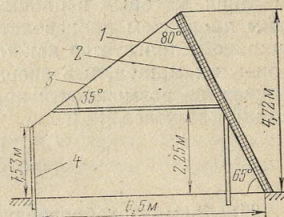
Машина для переработки травы и листьев в пригодный для пищи протеин разработана на сельскохозяйственной исследовательской станции «Ротаметед» [27]. С помощью этой машины можно путем разделения волокна и протеина получить из одной тонны листьев протеин в количестве, достаточном для удовлетворения дневной потребности в белке 300 чел. В съедобном протеине содержится в 6 раз больше белка, чем в эквивалентном количестве мяса. Другая британская разработка касается техники получения питательных пленок [28], при

которой растения выращиваются в пластмассовых желобах, закрытых сверху, за исключением тех мест, где всходят растения. На дне желоба имеется тонкая пленка воды, содержащей питательные вещества. Использование этого метода дает широкие возможности применения плоских коллекторов для подогрева воды и ветроэнергетических установок для подогрева и прокачки воды. Одно из преимуществ этого метода состоит в том, что отпадает необходимость в обработке и стерилизации почвы в теплицах.

Полное использование поступающей солнечной энергии предусмотрено в теплице, проект которой разработан Брейсовским исследовательским институтом для более холодных районов [29]. Продольная ось теплицы ориентирована в направлении восток—запад, а обшир-

Рис. 6.3. Поперечное сечение солнечной теплицы со специальной изоляцией.

1 — изолированная стена; 2 — отражающая поверхность; 3 — прозрачная крыша; 4 — прозрачная стена.



ная прозрачная крыша обращена к югу. Задняя сторона представляет собой наклонную повернутую на север стену, изоляция которой на внутренней стороне имеет отражающее покрытие. Сообщается, что по сравнению со стандартными теплицами, имеющими двухслойное пластмассовое покрытие, потребности в тепле снижены на 40% и получен более высокий урожай томатов и салата. Поперечное сечение этой теплицы представлено на рис. 6.3.

Превращение твердых органических веществ в топливо. Хорошо известно несколько процессов, подходящих для производства топлива из «энергетических» культур. Из веществ, содержащих простые крахмалы и сахар, можно получить этиловый спирт или этанол при аэробной ферментации. Необходима существенная доработка этого процесса, прежде чем будет достигнута конкурентоспособность по сравнению с традиционными топлива-

ми. Анаэробная ферментация, т. е. ферментация органических веществ в отсутствие кислорода, давно применяется для очистки бытовых сточных вод, и при этом вырабатывается значительное количество метана. Несколько крупных очистных станций используют для удовлетворения своих энергетических потребностей свой собственный метан. Представляется привлекательной возможность использования органических отходов, получающихся при выращивании урожая, обработке пищи, а также «энергетических» культур. Согласно оценкам, приведенным в опубликованной в 1972 г. статье [32], от 10 до 20% потребляемого в США газа можно обеспечить за счет органических отходов, подвергнутых анаэробной ферментации. В процессе пиролиза при нагревании органического вещества в отсутствие кислорода до температуры 500—900°С при обычном давлении получается метанол, который в прошлом столетии являлся побочным продуктом производства древесного угля. Метанол широко используется как топливо для высокоскоростных гоночных машин, и в энергетической лаборатории МТИ изучаются возможности применения его в качестве присадки в горючее [23].

ФОТОХИМИЯ

Проблема преобразования солнечной энергии в удобную для аккумуляирования свободную химическую энергию давно привлекает внимание исследователей. Обзор первых работ на эту тему был опубликован Аркчером [33], который также определил, какие фундаментальные исследования еще предстоит провести [34]. Примерно половина солнечной радиации, достигающей поверхности Земли, приходит в форме видимого света и может быть использована в различных фотохимических реакциях. Другая половина, поступающая в виде инфракрасного излучения, является бесполезной из-за слишком малой энергии квантов этого излучения. Однако общая эффективность любого процесса фотохимического превращения энергии не может превышать 30%, поскольку во время реакции часть высокопотенциальной энергии фотонов коротковолнового излучения выражается в теплоту. В основном фотохимические реакции являются экзотермическими, протекающими с выделением тепла, и поэтому не подходят для превращения солнечной энергии в

аккумулируемую химическую энергию. Известные эндотермические — накапливающие тепло реакции, протекающие на свету, теоретически можно использовать для производства ценного химического топлива, однако главная проблема здесь состоит в том, что эти реакции, как правило, слишком быстро обращаются и поглощенная энергия не сохраняется. К числу проблем относятся также такие, как наличие нежелательных побочных реакций и высокая стоимость сравнительно редких исходных веществ. Последнее не очень существенно, поскольку исходное вещество можно регенерировать при обращении реакции, когда запасенная энергия освобождается.

Особое внимание уже давно привлекает возможность осуществления процесса соединения углекислого газа и воды для получения различных углеводородов, например метана. Возможно также разложение воды на водород и кислород под воздействием света. Сообщается, что этот процесс уже осуществлен, хотя и с очень низкой эффективностью, благодаря применению металлических катионов, таких как церий и европий, и при использовании в качестве электродов двуокиси титана [35]. Можно проводить фотовосстановление некоторых органических веществ в воде также при очень низкой эффективности процесса.

Очень привлекательно представляется идея объединить фото- и электрохимические процессы в аккумуляторной батарее, которая могла бы заряжаться непосредственно от солнца. Некоторые такие системы хорошо известны, например железо — тионин, однако их КПД составляет порядка 0,1%. В этом процессе в массе раствора происходят фотохимические превращения, приводящие к изменениям в окислительно-восстановительной системе, которые в свою очередь вызывают появление разности потенциалов. Другой метод состоит в том, что один из электродов элемента покрывают красящим или неорганическим веществом, например двуокисью титана. При облучении электродов направление потока электронов меняется на противоположное.

С возможностью использования фотохимических методов преобразования энергии связываются большие надежды, поскольку в этом направлении существует широкий выбор вариантов и имеется солидная теоретическая основа.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

ВВЕДЕНИЕ

Источником энергии ветра является солнечная энергия. Небольшая часть всего солнечного излучения, достигающего земли, вызывает движение воздуха в атмосфере, которое мы воспринимаем на земной поверхности как ветер. Энергия ветра уже тысячами лет используется как на суше, так и на море. Первые сведения о древних египетских парусных судах уходят к третьему тысячелетию до н. э., а расцвет парусного мореходства приходится на середину прошлого века, когда в международную торговлю стали широко применяться быстроходные клипперы. Однако во второй половине XIX в. в практику мореплавания прочно вошли суда с паровыми двигателями, и хотя деревянные парусники в начале этого периода ни в чем не уступали парходам, парусный флот непрерывно уменьшался по мере совершенствования судов из металла с силовыми двигателями, так что к 30-м годам XX в. на плаву оставалось лишь несколько крупных парусников.

На суше ветряные двигатели впервые появились в Персии, где археологи обнаружили признаки того, что примерно в V в. за счет энергии ветра приводились в действие водяные насосы для полива земли. В этих первых персидских ветряных двигателях использовались полотняные паруса на вертикальной оси, причем вертикально расположенные лопасти с одной стороны колеса улавливали ветер, а на противоположной стороне как бы разрезали воздушный поток своей плоскостью. При вертикальной установке оси нетрудно изменить положение парусов или лопаток по отношению к ветру. В нескольких районах Европы к началу XIV столетия появились ветряные мельницы для размолота зерна, у которых ветровые колеса устанавливались на горизонтальной оси, поддерживаемой же не одним столбом, а высокой башней. Применение таких мельниц продолжало расширяться вплоть до середины прошлого столетия, когда их стали вытеснять более дешевые мельницы с паровыми двигателями. В сельских районах США в начале нынешнего столетия наблюдалась аналогичная ситуация. Тысячи фермерских хозяйств имели ветродвигатели, установленные на стальных башнях; в то время они использовались для подачи воды, а иногда и для получения электрической энергии, но в последующие 50 лет сельское хозяйство было в значительной степени электрифицировано и подавляющее большинство ветроустановок было заброшено. О масштабах использования ветроагрегатов говорит тот факт, что тогда было построено 50 тыс. ветроэлектрических установок, или аэрогенераторов [1, 2].

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

Дания. К концу прошлого века ветряные мельницы были основным источником энергии в сельскохозяйственных районах Дании. Их называли «рабочими лошадками» и часто устанавливали на крышах амбаров; согласно оценкам мощность этих установок вместе с промышленными общим числом более 30 тыс. составляла примерно

200 МВт [3]. В 1890 г. профессор Лякур начал работы по ветроэнергетике. Получив значительную поддержку датского правительства, он не только построил ветроагрегат в Асхове, но и создал лабораторию, полностью оснащенную научными приборами, и аэродинамическую трубу. В период с 1890 до 1908 г. проф. Лякур разработал более эффективный и быстроходный ветроагрегат с упрощенной системой регулирования частоты вращения и впервые начал производство с его помощью электрической энергии. Ветроколесо в Асхове диаметром 22,85 м имело четыре лопасти и было установлено на стальной мачте высотой 24,38 м. С помощью конической передачи крутящий момент передавался на вертикальный вал, соединенный с системой конических передач, расположенных в основании мачты; этот приводной механизм был соединен с двумя генераторами постоянного тока мощностью по 9 кВт каждый. Установка являлась первым достоверным примером преобразования энергии ветра в электрическую. К 1910 г. несколько сотен ветроагрегатов мощностью до 25 кВт обеспечивали электроэнергией сельские населенные пункты.

Использование ветроэнергетических установок продолжало расти и в период второй мировой войны. Пик был достигнут в январе 1944 г., когда 88 ветроагрегатов выработали 481 785 кВт·ч электроэнергии [4]. В число этих 88 установок входил агрегат Шмидта, построенный в Гелдере в 1942 г. Колесо диаметром 24,38 м имело три деревянные лопасти. Первоначально мощность агрегата, вырабатывавшего постоянный ток, составляла 70 кВт, а в 1955 г. он был реконструирован для получения переменного тока. В течение первых пяти лет эксплуатации агрегат выработал приблизительно 700 тыс. кВт·ч, или 2 тыс. кВт·ч в год в расчете на 1 кВт установленной мощности.

США. В 1922 г. Ежегодник электрификации и энергетики фермерского хозяйства перечислил 54 фирмы, занятые производством ветровых насосных и электрогенерирующих установок. К концу 20-х годов была образована одна из крупнейших фирм по производству ветроагрегатов — компания «Джэкобс винд электрик» (штат Миннесота) [5]. Фирма была основана Джэкобсом, который ввел в конструкции своих ветроагрегатов два важных усовершенствования: трехлопастный винт, который позволил практически устранить вибрации, возникающие у двухлопастных винтов вследствие колебаний суммарных усилий, воздействующих на лопасти при их перемещении из горизонтального в вертикальное положение, и центробежный шариковый регулятор угла поворота лопастей, обеспечивающий переход их во флюгерное положение при скорости ветра выше 8,05 м/с и поддерживающий постоянную частоту вращения привода генератора. Ветроколесо диаметром около 4,27 м было непосредственно соединено с генератором без зубчатой передачи. Возможно, наиболее известным явилось применение ветроагрегатов этой фирмы в Антарктике во время одной из научных экспедиций адмирала Бэрда в 30-х годах. Когда Бэрд в 1946 г. вернулся обратно в Антарктику, ветроагрегат продолжал работать. Компания Джэкобса перестала существовать в 1957 г. после проведения электрификации сельских районов.

В 30-х годах американский инженер Путнам разработал, а фирма «Смит энд Путнам» изготовила двухлопастный ветроагрегат с диаметром ветроколеса 53,34 м; агрегат был установлен в местечке Грандпаз-Ноб в центральном районе штата Вермонт в 1941 г.

Синхронный электрогенератор и лопасти ротора были смонтированы на башне высотой 33,54 м, а электроэнергия выдавалась непосредственно в сеть центрального района Вермонта. Ветроагрегат номинальной мощностью 1,25 МВт хорошо проработал около 18 мес. до поломки основного подшипника генератора, которая, очевидно, не связана с конструктивными особенностями ветровой установки. В последующие два года из-за военной обстановки замена подшипника оказалась невозможной. В течение этого времени лопасти оставались неподвижными и испытывали полную ветровую нагрузку. При первоначальной сборке лопастей и опорных лонжеронов, изготовленных в основном из нержавеющей стали, в них были пробиты заклепочные отверстия; в 1942 г. в металле вокруг этих отверстий были обнаружены трещины. Было решено провести ремонт не в заводских условиях, а на месте. 26 марта 1945 г. через месяц после замены подшипника трещины внезапно расширились, а один из лонжеронов сломался, в результате чего обрушилась лопасть. Проводившая работы фирмы «С. Морган Смит» решила, что дальнейшие затраты на ремонт ветроагрегата нецелесообразны, и сделала анализ рентабельности сооружения других ветроагрегатов в штате Вермонт. Экономические исследования показали, что удельные капитальные затраты на 1 кВт установленной мощности будут приблизительно на 60% выше, чем соответствующие затраты на традиционные энергоустановки.

Хотя скептики были склонны считать этот эксперимент дорогостоящей неудачей, в истории развития ветроэнергетики он имел огромное значение. Впервые была осуществлена выработка электроэнергии с помощью синхронного генератора и выдача ее в энергосистему. Обе механические аварии были вызваны недостаточными знаниями механических свойств материалов. С тех пор были глубоко изучены конструкции подшипников и проблемы усталостной прочности металлов, так что в современных ветроагрегатах возникновение таких аварий маловероятно. Программа исследований этих агрегатов включала систематические измерения в условиях эксплуатации, которые показали, что на данной площадке в Грандпаз-Ноб средняя скорость ветра составляла всего 70% первоначального расчетного значения и что желателен выбор каких-либо других площадок для размещения агрегата. На сегодняшний день в основном решены технические проблемы преобразования ветровой энергии в электрическую и доказана возможность развития ветроэнергетики как важного источника энергии в любой стране с подходящими ветровыми ресурсами.

СССР. В 1931 г. в СССР был построен первый ветроагрегат для получения электроэнергии, отдаваемой непосредственно в сеть переменного тока Ялты на побережье Черного моря [7]. Ветроагрегат использовался как дополнительный источник энергии и был включен в сеть тепловой электростанции Севастополя, расположенного на расстоянии около 30 км.

Трехлопастное ветроколесо диаметром 30,48 м с помощью зубчатой передачи приводило во вращение ротор асинхронного генератора мощностью 100 кВт. Мачта высотой 30,48 м была снабжена подкосом, передающим давление ветра от верхушки мачты на землю. Основание подкоса перемещалось по круговому рельсовому пути с помощью электродвигателя, управляемого крыльчаткой, чувствительной к направлению ветра и установленной наверху мачты. Облицованные металлом лопасти могли устанавливаться в нерабочее

положение с помощью автоматической системы регулирования в результате воздействия центробежной силы на компенсационные закрывки, так что агрегат и при сильном ветре мог работать примерно с постоянной скоростью. Сообщалось, что годовая выработка энергии достигала 279 тыс. кВт·ч при среднегодовой скорости ветра 6,7 м/с; однако удовлетворительное управление работой ветроагрегата было затруднительно. В течение следующих двух десятилетий развитие ветроэнергетики в СССР ограничивалось созданием агрегатов мощностью до 3 кВт [5].

Великобритания. К 20-м годам текущего столетия в стране появился интерес к ветроэлектрическим установкам небольшой мощности. Были опубликованы [8] результаты сравнительных испытаний семи различных ветроагрегатов серийного производства мощностью от 250 Вт до 10 кВт, а также практическое руководство для инженеров, желающих построить собственный ветроагрегат [9]. В 30-е годы фирмой «Лукас» был создан ветроагрегат «Фрилайт» [10], обеспечивающий работу шести электрических ламп — трех по 40 Вт и трех по 25 Вт при напряжении 25 В. Ветроколесо агрегата «Фрилайт» можно было вывести из-под сильного ветра с помощью специальной рукоятки, установленной у основания мачты.

Вскоре после войны были созданы две установки мощностью по 100 кВт. Первая из них была построена в Оркнейсе в 1950 г. фирмой «Джон Браун» [11]. Она имела трехлопастное ветроколесо диаметром 15,24 м, которое было установлено на мачте высотой 23,77 м и приводило во вращение асинхронный генератор переменного тока мощностью 100 кВт. Вторая установка была построена для фирмы «Энфилд кйблз» фирмами «Дэжавилланд пропеллерз» и «Рэдхоф айрон энд стил» и имела пневматическую передачу, предложенную французским инженером Андро [12]. Две полые лопасти ветроколеса диаметром 24,38 м имели на концах отверстия и при вращении действовали как центробежный насос. Создаваемый поток воздуха поступал в турбину у основания мачты; турбина была непосредственно связана с синхронным электрогенератором. Установка была построена в 1953 г. в Сент-Ольбансе, но из-за плохих ветровых условий ее не удалось испытать и в 1957 г. она была перенесена в Алжир, где эксплуатировалась компанией «Электристе э газ д'Алжир». Номинальная мощность 100 кВт была достигнута вскоре после сооружения ее на новой площадке. Были также проведены исследования с целью оценки работы установки, и в 1960 г. Ассоциация электротехнических исследований разработала графический метод определения параметров ветровых электрогенераторов [13]. Этот метод основан на результатах испытаний двух ветроагрегатов, один из которых мощностью 25 кВт построен на о. Мэн и имеет трехлопастное ветроколесо диаметром 12,19 м, а другой мощностью 7,5 кВт с диаметром трехлопастного ветроколеса 10 м — в Шотландии. В обоих случаях было получено прекрасное соответствие между расчетными и экспериментальными данными.

РЕСУРСЫ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

По годовому распределению энергии ветра имеются надежные статистические данные, однако исчерпывающий анализ ветроэнергетических ресурсов в каждом конкретном месте весьма сложен. Эти ресурсы зависят, например, от рельефа местности, высоты расположения ветроагрегата относительно поверхности земли и климатиче-

ских условий. Как это не удивительно, но ветроэнергетический кадастр Британских островов изучен более основательно, чем, пожалуй, любой другой страны мира [10, 14]. Западное побережье Ирландии наряду с некоторыми западными островами Шотландии отличаются наилучшим ветровым режимом. Средняя скорость ветра достигает здесь примерно 9 м/с.

Кинетическая энергия единицы массы воздушного потока равна $1/2 v^2$, а массовый расход потока через данное поперечное сечение площадью A составляет $\rho A v$. Теоретическая располагаемая мощность воздушного потока есть произведение этих двух величин:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3,$$

где v — скорость движения воздуха, а ρ — его плотность.

Если A является площадью круга, описываемого лопатками ветроколеса диаметром D , то $\frac{\pi}{4} D^2 = A$ и располагаемая мощность составляет:

$$P = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3.$$

Фактически располагаемую мощность удобно представить в виде

$$P = K_r D^2 v^3,$$

где K_r — коэффициент использования энергии ветра, учитывающий динамику ветра и эффективность роторной системы [14].

Максимальное количество энергии, которое может быть получено от движущегося воздушного потока, как впервые показал немецкий инженер Бец в 1927 г., составляет 0,59259 теоретически располагаемой энергии. Это количество

энергии может быть получено только при совершенной конструкции лопастей, причем скорость движения концов лопастей должна в шесть раз превышать скорость ветра. Любой аэрогенератор может работать только в определенном диапазоне скоростей ветра, начиная с минимальной (пусковой) скорости v_n и кончая номинальной рабочей скоростью $v_{ном}$. Обычно отношение $v_{ном}/v_n$ находится в пределах от 2 до 3. Если при скоростях ветра, превышающих $v_{ном}$, можно изменять угол установок лопастей, система может продолжать работу при номинальной ге-

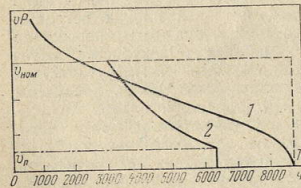


Рис. 7.1. Кривые обеспечения скорости ветра (1) и мощности регулируемого ветроагрегата (2) в годовом цикле.

нерируемой мощности, причем предельное значение скорости зависит только от конструкции. В некоторых системах во избежание поломки ветроколеса при больших скоростях ветра оно целиком выводится из-под ветра. На рис. 7.1 приведены в качестве примера интегральные кривые распределения скорости ветра и мощности регулируемого ветроагрегата в годовом цикле (так называемые кривые обеспе-

ченности). У многих современных ветроагрегатов КПД при передаче мощности с вала ветроколеса на выводы генератора достигает 75%.

Принимая во внимание, что при нормальном атмосферном давлении (1000 ГПа) и температуре 290 К плотность воздуха $\rho = 1,201$ кг/м³, и полагая, что КПД при передаче мощности с вала ветроколеса до выводов генератора составляет 75%, получаем:

$$K_r = \frac{\pi}{8} \frac{1,201 \cdot 0,593 \cdot 0,75}{1000} \approx 0,0002.$$

Влияние высоты мачты ветроагрегата на его характеристики может быть значительным; в работе [15] получены значения показателя степени в эмпирическом соотношении $v = H^a$, связывающем среднюю скорость ветра v с высотой H . В Великобритании для открытой местности на уровне земли $a = 0,17$; для небольших городов это значение следует увеличить до 0,25, а для крупных городов до 0,33. Идеальным местом установки ветроагрегата является длинный, пологий склон холма. Кэйтон [16] и Рэймент [17] рассмотрели методы определения вероятной средней скорости ветра и коэффициентов мощности.

Таблица 7.1

Располагаемая мощность на валу ротора для ветроколеса различного диаметра

Скорость ветра, м/с	Располагаемая мощность, кВт при диаметре ветроколеса, м				
	3,65	5,0	7,0	12,0	18,8
4,0	0,1	0,3	0,5	1,8	5,0
5,0	0,2	0,5	1,0	3,6	9,8
6,0	0,4	0,8	1,8	6,2	17,0
7,0	0,7	1,3	2,9	9,9	27,0
8,0	1,0	2,0	4,3	14,7	40,3
9,0	1,4	2,9	6,1	21,0	57,3
10,0	2,0	3,9	8,3	28,8	78,6
11,0	2,6	5,2	11,1	38,3	104,6
12,0	3,4	6,8	14,4	49,7	135,9
13,0	4,3	8,6	18,3	63,2	172,7
14,0	5,4	10,8	22,8	79,0	215,7

В табл. 7.1 приведены значения располагаемой мощности на валу ротора для различных скоростей ветра и диаметров ветроколеса, полученные по уравнению $0,0002 D^2 v^3$ с учетом поправочного коэффициента на высоту мачты. Фактически вырабатываемая механическая или электрическая энергия будет меньше из-за потерь, определяемых эффективностью преобразования энергии для каждой конкретной системы.

Годовое количество энергии, вырабатываемой ветроагрегатом, определяется уравнением

$$W_a = K_r D^2 v^3 K_s H,$$

где H — среднее число часов в год (8766); K_s — полуэмпирический коэффициент, учитывающий статистический характер выработки энергии ветроагрегатом.

Для описания ветрового режима любого конкретного пункта обычно используется средняя годовая скорость ветра, однако мощность ветроагрегата пропорциональна кубу скорости. Поскольку при кратковременном повышении скорости ветра мощность ветроагрегата увеличивается значительно сильнее, чем она уменьшается при арифметически эквивалентном снижении скорости ветра, в расчетах следует использовать среднее значение v^3 , которое всегда существенно больше куба средней годовой скорости ветра. В 1956 г. Юул [3] предложил использовать значение $K_s=1,20$. При этом он принимал среднюю расчетную скорость ветра равной 8 м/с и считал, что наиболее часто скорость ветра изменяется от 6 до 10 м/с через постоянные короткие промежутки времени, причем $8^3=512$, в то время как $1/2(6^3+10^3)=608$. Проведенный в 1975 г. Понтином [18] анализ с применением ЭВМ показал, что этот коэффициент можно принять равным 2,06, при этом $K_s K_a \approx 0,0004$, а $K_s K_a H=3,5064$. Это значение очень близко к цифре, полученной Рэйментом на основе данных [19], и хорошо согласуется с результатами исследования Кэйтона [16], в котором годовая выработка энергии, когда вал ветроколеса соединен с электрогенератором, определяется уравнением

$$W_a=3,2289D^2v_{50}^3,$$

где v_{50} представляет собой значение скорости ветра, превышаемое в течение 50% времени года и весьма близкое к средней годовой скорости ветра. Если принять цифру 3,5064, то для ветроколеса диаметром 18,3 м годовая выработка энергии составит:

Средняя скорость ветра, м/с	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Годовая выработка энергии, МВт·ч	75	146	253	402	601	856	1174	1562	202

НЕКОТОРЫЕ ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ

Ветроагрегат с вертикальной осью. Современный ветроагрегат с вертикальной осью представляет собой сочетание двух изобретенных ранее устройств: ветроагрегата Дарье [20], в котором тонкие изогнутые дугообразные лопасти своими концами крепятся к нижней и верхней точкам вертикальной оси вращения, перпендикулярной направлению ветра, и ветроколеса Савониуса [21, 22] или S-образного ротора, в котором две дуги разделены и перекрывают друг друга, образуя канал для прохода воздуха. Простейшие ветроколеса Савониуса изготавливались из двух половинок разрезанной пополам обычной бочки, которые сваривались друг с другом, образуя лопасти [23]. На рис. 7.2 показано ветроколесо из стекловолокна. Ветроагрегат Дарье является простым энергоустройством, но подобно другим системам с постоянным углом установки лопастей и высоким КПД он не может самостоятельно запускаться под нагрузкой. Ветроколесо приводится во вращение подъемной силой, действующей на профилированные участки лопастей, причем S-образный ротор используется в основном для разгона колеса Дарье. Коэффициент использования энергии ветра колеса Дарье приблизительно равен коэффициенту использования любой хорошей системы с горизонтальной осью вращения [24], но считается, что потенциальными преимуществами ветроколеса первого типа являются меньшие затраты на изгото-

вление и простота обслуживания [25]. Важные исследования этой системы проводятся лабораторией «Сандиа» [1].

Модель ветроагрегата мощностью 100 кВт (проект ЭРДА). Данный проект является основным в программе работ, проводимых США в области ветроэнергетики [2, 26–28]. Ветроагрегат имеет двухлопастный пропеллер диаметром 38,10 м с переменным углом поворота лопастей. Пропеллер приводит во вращение синхронный генератор переменного тока через редуктор, установленный на стальной башне высотой 30,48 м. Разработана программа испытаний

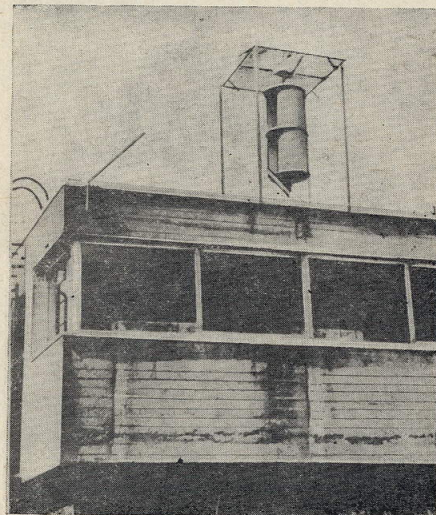


Рис. 7.2. Общий вид ветроколеса из стекловолокна.

с целью получения данных по изготовлению, эксплуатации, рабочим характеристикам и экономическим показателям ветроэнергетических систем винтового типа, предназначенных для выдачи электроэнергии в сеть. Ветроколесо расположено за башней, а вместо традиционного хвостового стабилизатора, использовавшегося в более ранних конструкциях для ориентации ветроколеса, применяется система управления с силовым приводом. Выработка энергии начинается при скорости ветра 3,58 м/с, а номинальная мощность 100 кВт достигается при скорости 8,05 м/с, т. е. $v_{ном}/v_n=2,25$. Максимальная скорость вращения ветроколеса составляет 40 об/мин и поддерживается

при более высоких скоростях ветра путем изменения угла поворота лопастей, осуществляемого с помощью сложной гидравлической системы управления.

Ветроустановка в Твинде (Дания). Крупнейший в мире строящейся установкой в 1976 г. [29] был ветроагрегат в Твинде неподалеку от западного побережья п-ва Ютландии. В декабре 1975 г.

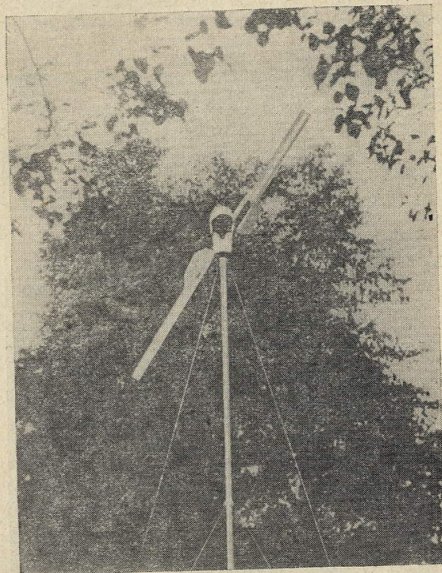


Рис. 7.3. Ветроколесо диаметром 5 м с масляной гидравлической системой передачи энергии потребителю.

было закончено сооружение железобетонной башни с расчетной высотой оси ветроколеса над уровнем земли 54 м. Двухлопастное колесо радиусом 27 м начинает вращаться при скорости ветра 3 м/с, тогда как номинальная скорость ветра составляет 14 м/с. При скоростях ветра от 14 до 20 м/с изменяется угол поворота лопастей, а при скоростях выше 20 м/с ветроколесо останавливается и лопасти фиксируются в нерабочем положении. Проект не финансируется датским правительством, а реализуется совместными усилиями жите-

лей институтского городка, которые проводят все работы и выделяют средства на проект стоимостью свыше 350 000 долл.

Новая ветроустановка Ветроэнергетической компании Великобритании. Новый подход к конструкции ветроагрегата принял Ветроэнергетической компанией, которая разработала простую и надежную конструкцию ветроколеса пропеллерного типа с автоматической системой регулирования частоты вращения; ветроколесо не нуждается в каких-либо дополнительных устройствах управления, может самозапускаться и защищено от превышения скорости. Поэтому оно не испытывает вибраций и надежно защищено от ураганных порывов ветра. В отличие от более ранних конструкций ветроагрегатов в данной конструкции нет электрогенератора в верхней части мачты. Вместо генератора установлена масляная гидравлическая система высокого давления, непосредственно соединенная с ветроколесом, энергия которого передается потребителю в виде энергии рабочей жидкости. На рис. 7.3 показана установка с ветроколесом диаметром 5 м. Модульная конструкция дает возможность использовать серийно выпускаемые узлы, обеспечивает высокую маневренность системы и позволяет приспосабливать ее к конкретным режимам путем соответствующего выбора и компоновки стандартных модулей. Возможности использования этой системы весьма широки — от непосредственной выдачи электроэнергии в национальную энергосистему до применения в сельском хозяйстве, тепличном садоводстве, системах центрального отопления, опреснительных установках, а также домашних системах отопления и освещения. Ветроагрегаты могут дополняться автоматическими системами аккумуляции энергии и резервными установками. Прототип модуля с ветроколесом диаметром 18,3 м должен быть пущен в эксплуатацию в конце 1976 г. Этот агрегат сооружается на юге Англии и предназначен для отопления крупной теплицы. Проведены также предварительные разработки модуля с ветроколесом диаметром 46 м.

Программы крупномасштабного использования энергии ветра. Кроме США и Дании в Швеции, Голландии, Канаде, Израиле, ФРГ и Японии также приняты планы создания ветроэлектрических генераторов, которые могли бы выдавать электроэнергию непосредственно в сеть. В марте 1976 г. английская Ассоциация электротехнических исследований сообщила Энергетическому комитету палаты общин, что крупные ветроагрегаты через 10 лет могут обеспечить до 10% всех потребностей Великобритании в электроэнергии, и рекомендовала создать примерно 1500 ветроагрегатов. Отличительной особенностью таких программ является то, что они опираются на существующую технологию и освоенную технику.

Комплексное использование энергии ветра и солнца. Рисунок 7.4, где представлено распределение приходов солнечной радиации [30] и ветровых ресурсов [17] на Британских островах, иллюстрирует взаимодополняемость этих энергоисточников. Видно, что хотя среднегодовые дневные приходы суммарной радиации в северных районах ниже, зато ресурсы ветровой энергии в них значительно выше. Установлено, что во многих странах повторяемость сильных ветров наиболее значительна в зимние месяцы, когда потребность в энергии достигает максимума. С другой стороны, в этот период приход солнечной радиации, которую можно использовать для отопления и нагрева воды, наиболее низок. Решение этой проблемы может заключаться в комплексном использовании энергии ветра и солнечной энергии для отопления с помощью применения туннельных, т. е.

снабженных диффузором, ветроколес. Теоретически туннельные колеса, которые могут свободно вращаться для ориентации в направлении ветра, способны вырабатывать значительно больше энергии, чем открытые ветроколеса того же диаметра. Например, Льюис [31] показал, что туннельное колесо диаметром 3,5 м вырабатывает на 46% больше энергии, чем обычное ветроколесо, а согласно работе Лилли и Рейнберда [32] это значение составляет 65%. Если туннельные колеса устанавливать не на башне, а монтировать в виде неподвижного комплекса, образующего «ветровую стену», ориенти-

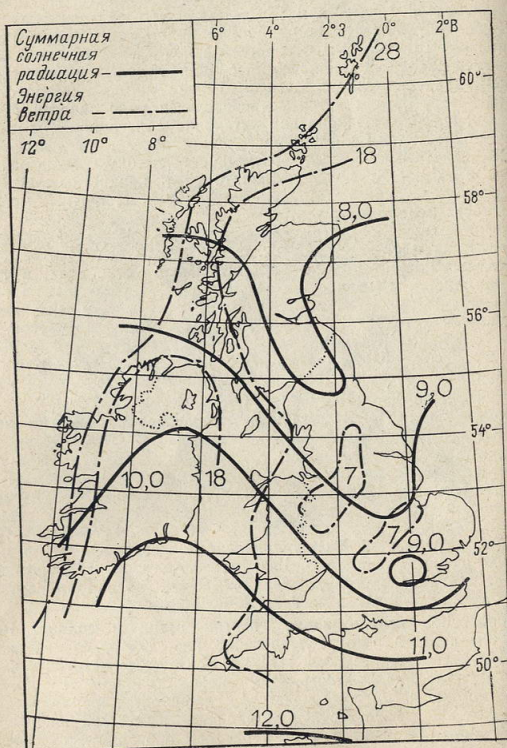


Рис. 7.4. Распределение по территории Британских островов среднегодовых дневных приходов суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность (МДж/м^2) и энергии ветра, поступающей в течение суток на ветроколесо (МДж/м^2).

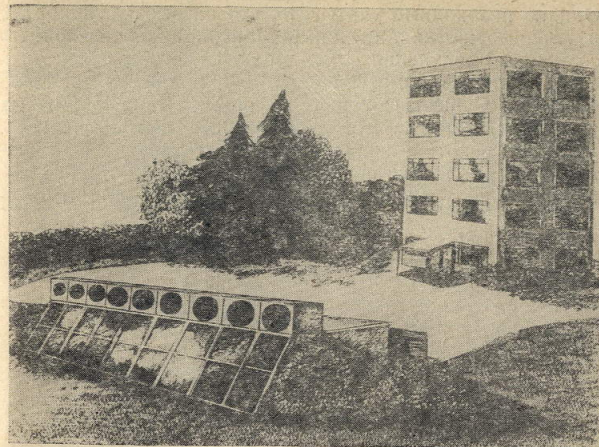


Рис. 7.5. Общий вид «ветровой» стены.

рованную в направлении преобладающих ветров, то получается удовлетворительная с эстетической точки зрения конструкция, которая не нарушает городской пейзаж так, как отдельно стоящий крупный ветроагрегат. Одна установка такого типа была предложена для жилого комплекса в Суссексе [33]; для долгосрочного аккумулирования тепловой энергии предполагалось использовать подземные водяные баки-аккумуляторы, а склоны выемок под баки для размещения солнечных коллекторов. Как показано на рис. 7.5, «ветровая стена» расположена наверху такого склона. Расчетный КПД туннельного колеса при фиксированном направлении и высоте расположения составляет 77% КПД обычного ветроагрегата такого же размера.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО НАГРЕВА

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих главах было показано, что во многих районах мира солнечную энергию можно использовать для частичного удовлетворения потребностей в тепле.

Однако необходимо учитывать, что на высоких широтах в течение многих дней зимнего периода интенсивность солнечного излучения слишком низка, чтобы обеспечить сколько-нибудь заметное участие в покрытии тепловой нагрузки. Существуют два основных типа солнечных установок, которые может изготовить любой человек, имеющий некоторый опыт плотницких работ, а еще лучше навыки монтажа обычных водопроводных труб. Проще всего изготовить солнечное устройство для неболь-

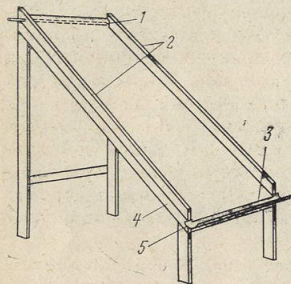


Рис. 8.1. Закрытый коллектор.

1 — перфорированная труба под листом из бутылки; 2 — прижимная планка; 3 — бутылочный лист, который может перекрывать желоб; 4 — опорная конструкция; 5 — желоб возврата воды в бассейн.

шого повышения температуры, например для нагрева воды плавательного бассейна. В этом случае требуется большой по площади и простой по конструкции коллектор без остекления и теплоизоляции. Установки такого типа, к которым относятся системы горячего водоснабжения, более сложны. Панели коллектора, площадь поверхности которых обычно составляет 4—6 м², должны быть остеклены и теплоизолированы; кроме того, необходимо учитывать еще несколько факторов, в том числе относительное расположение различных элементов системы и длину соединительных трубопроводов.

ПЛАВАТЕЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ И ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТРОЙСТВ

Закрытый коллектор. Хотя в странах, расположенных на высоких широтах, как, например, в Великобритании, простой, обеспечивающий небольшое повышение температуры, закрытый коллектор обычно может использоваться только в летние месяцы, он работает в этот пери-

од с высокой эффективностью и экономически весьма выгоден. Капитальные затраты на такие установки, включая трудозатраты, окупаются менее чем за три года, в чем можно убедиться, сопоставив эти затраты с ожидаемой экономией энергии от обычных энергоисточников. Конструкция закрытого коллектора, который испытывался более 8 лет, показана на рис. 8.1. Коллектор не нуждается в остеклении или других прозрачных покрытиях, поскольку повышение температуры в нем поддерживается на возможно более низком уровне. Если панели такого коллектора установлены в достаточно хорошо защищенном месте, то они будут работать по крайней мере не хуже остекленных панелей, потому что при прохождении через любое прозрачное покрытие всегда теряется около 10% падающей солнечной радиации. Не требуется также теплоизоляция дна и боковых стенок, поскольку температура панели обычно близка к температуре окружающего воздуха и тепловые потери пренебрежимо малы. Такие коллекторы называются закрытыми, так как нагреваемая вода течет под теплопоглощающим материалом и не испаряется.

Конструкция. Основным конструктивным элементом панели является опорный лист с плоской поверхностью, например лист фанеры, желательно водостойкой, стандартные размеры которого 2,44×1,22 м. Наиболее важной особенностью, свойственной всем низкотемпературным коллекторам, является наличие тонкой матово-черной тепловоспринимающей поверхности, которая способна поглощать почти всю падающую солнечную радиацию. Весьма подходящим для этой цели материалом оказался бутыл, который был применен автором в 1968 г. [1, 2] на первых низкотемпературных панелях и в 1978 г. не обнаружил признаков разрушения. Этот лист с черной поверхностью помещается над вторым, распределяющим поток воды листом, так что нагреваемая вода под действием силы тяжести может течь в виде тонкого слоя между двумя листами.

Существуют различные способы создания тонкой равномерно распределенной пленки воды на наклонной поверхности. Удачным оказалось изготовление второго листа из выпускаемого промышленностью полиэтиленового упаковочного материала, получившего название «эррэп». Он представляет собой однородную структуру, в которой равномерно распределены цилиндрические воздушные по-

лости. Главным недостатком этого материала является его плохая стойкость под действием ультрафиолетового излучения, вследствие чего срок его службы весьма невелик, если он не защищен от прямого воздействия солнечной радиации. Однако закрытый бутиловым листом этот материал также прослужил более восьми лет. В этой схеме вода поступает в верхнюю часть коллектора из перфорированной трубы малого диаметра. Наименьший диаметр трубы должен составлять 15 мм, а диаметр отверстий по крайней мере 2 мм при расстоянии между отверстиями 10—15 мм. Эти размеры являются ориентировочными; перед окончательной сборкой панели нетрудно испытать трубу и проверить, создает ли она равномерный поток воды. Последовательное соединение нескольких панелей может оказаться не вполне удовлетворительным, поскольку давления и расход в системе могут привести к тому, что в последующие панели будет поступать постепенно уменьшающееся количество воды. Этого можно избежать либо с помощью разветвленной системы, обеспечивающей подвод воды с обоих концов перфорированной трубы каждой панели, либо увеличением сечения потока в панелях с недостаточным количеством воды путем увеличения числа отверстий или их диаметра. Нагретая вода возвращается в бассейн под действием гравитационных сил; поэтому выход из панелей должен быть выше поверхности бассейна. Пластмассовые водосточные желоба прекрасно обеспечивают возврат воды в бассейн, а потери на испарение пренебрежимо малы. Легко также проверить, достаточен ли наклон сточных желобов от нижней части панелей к бассейну для пропуска потока.

Перечень материалов для изготовления коллектора: плоская опорная панель — для работы в атмосферных условиях достаточна толщина 9,52 мм (длина L , ширина W);

лист бутила;

лист упаковочного материала «эррэл»;

питающая труба — пригодна пластмассовая труба диаметром 15 мм, длина которой должна быть достаточна для соединения с трубами соседних панелей;

пластмассовый водосточный желоб для обратного стока воды в бассейн. Его длина должна быть достаточна для соединения с желобами соседних панелей и отвода воды в бассейн;

два опорных конструктивных элемента длиной L и три или четыре длиной W . Поперечное сечение этих элементов может быть практически любым, но достаточным для обеспечения жесткости конструкции;

прижимные планки длиной L в основном для уплотнения краев панели;

опорная конструкция для всей панели;

запорный клапан и соответствующие гибкие трубы для соединения с входными патрубками панелей.

В качестве длины L и ширины W можно выбрать номинальные размеры стандартного фанерного листа $2,44 \times 1,22$ м.

Краткое описание конструкции. Полиэтиленовый материал «эррэл» натягивается на фанеру, причем его цилиндрические полости располагаются в продольном направлении; отогнутые вниз концы листа закрепляются

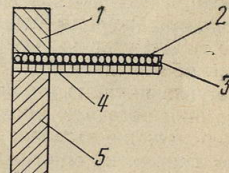


Рис. 8.2. Схема крепления панели по боковым сторонам.

1 — прижимная планка; 2 — лист бутила; 3 — лист материала «эррэл»; 4 — водонепроницаемый лист толщиной 9,52 мм; 5 — опорный конструктивный элемент.

несколькими кнопками. Сверху укладывается лист бутила, который прижимается планками к опорным элементам, как показано на рис. 8.2. После сборки основных элементов конструкции устанавливается перфорированная труба. На этом этапе монтажа полезно испытать трубу, прежде чем закрыть ее бутиловым листом. Труба должна равномерно распределять поток воды. Возвратный желоб устанавливается в последнюю очередь, после монтажа панели на месте, поскольку необходимо обеспечить небольшой его уклон в сторону бассейна.

Расход теплоносителя. Для снижения тепловых потерь повышение температуры в коллекторе должно быть возможно более низким. Один литр воды нагретой от 15 до 55°C, получает лишь 1/10 часть количества тепла, которое передается 400 л воды, нагретой с 15 до 16°C, хотя в первом случае легче убедиться, что вода нагрета. Поэтому расход должен составлять по меньшей мере 150 л/(м²·ч). Важно, чтобы панель коллектора не

была перекошена, а питающая труба была горизонтальна.

Если эти условия не выполнены, вода будет стекать по одной стороне панели, что значительно ухудшит общий КПД системы, поскольку поглощенное солнечное излучение может эффективно передаваться воде только в том случае, когда она непосредственно соприкасается с поверхностью бутылочного листа. Специальный насос обычно не нужен, поскольку коллекторы могут быть присоединены с помощью тройника к обратному трубопроводу существующей системы очистки.

Расположение и ориентация. Угол наклона и ориентация панели не имеют решающего значения. Для северного полушария идеальной является южная ориентация, но отклонение от этого направления на несколько градусов в ту или другую сторону окажет очень малое влияние. Непосредственно для летнего периода оптимальный наклон панели к горизонту составляет вероятно 40° или меньше. Можно осуществить полное математическое моделирование с целью определения оптимального угла наклона в различное время года; однако нередко более важную роль играют местные факторы, например наличие высоких деревьев или зданий, затеняющих коллектор. Во многих случаях предпочтительно устанавливать коллекторы на крышах существующих зданий; такое расположение, кроме того, является наиболее удачным в эстетическом отношении. Здравый смысл не позволит расположить коллекторы в неподходящих и, прежде всего, затененных местах; тем не менее целесообразно все площадки для установки коллекторов проверять с точки зрения затенения в течение всего дня в начале рабочего сезона.

Размеры, характеристики и экономические показатели. Сначала целесообразно рассмотреть отношение площади коллекторов к площади поверхности бассейна. Это отношение использовалось в работах [3, 4] для оценки вероятного повышения температуры в бассейне в течение дня при различных метеорологических условиях. Для повышения температуры примерно на 5°C в хороший летний день в умеренном климате отношение площади коллектора к площади бассейна предлагалось принимать равным приблизительно 1,5:1. Однако устойчивое повышение температуры воды в бассейне в течение нескольких недель в начале сезона может быть достиг-

нуто даже при таком низком отношении, как 0,25:1. Это связано с тем, что почва вокруг бассейна нагревается за счет теплопритока от воды, имеющей более высокую температуру, и это способствует поддержанию в бассейне благоприятной температуры в течение нескольких облачных дней подряд. Даже если площадь солнечного коллектора составляет всего 1/10 части площади поверхности бассейна, количество тепла, полученного за один хороший день, может быть достаточно для дополнительного повышения температуры воды примерно на 0,5°C. Испытания, проведенные в течение плавательного сезона 1975 г. в одной из школ графства Суссекс, где были установлены панели конструкции автора, показали весьма значительную экономию по сравнению с предыдущим сезоном. В 1974 г. при электрообогреве бассейна плавательный сезон продолжался с конца мая до начала сентября, причем было израсходовано 48 885 кВт·ч электроэнергии [5]. В 1975 г. при комбинированном использовании электрообогрева и солнечного тепла плавательный сезон продолжался с середины мая по октябрь, а потребление электроэнергии снизилось до 14 232 кВт·ч. Средняя температура воды в бассейне составляла 23—29°C. Эти цифры следовало бы сопоставить с приходом солнечного излучения за рассматриваемый период времени. Однако разумно предположить, что за сезон 1975 г. выработка тепла коллекторами составила около 500 кВт·ч/м², а остальное тепло подводилось за счет излучения, падающего непосредственно на поверхность бассейна.

Затраты на материалы, включая бутылочный лист, упаковочный материал «эррэл» и деревянную раму коллектора, составляют менее 10 фунт. ст. (по курсу 1976 г.) и могут окупиться в течение двух лет за счет снижения затрат на обогрев бассейна традиционными методами.

Открытая система. При обращенной на юг (в северном полушарии) рифленой кровле, например, из оцинкованного железа перфорированную трубу можно расположить вдоль конька крыши и подавать в нее насосом воду из бассейна, с тем чтобы она стекала вниз по желобкам. Поскольку в таких системах поток воды не изолирован от атмосферы, то неизбежны тепловые потери на испарение, в результате чего полная эффективность будет составлять, вероятно, всего лишь 2/3 эффек-

тивности закрытой системы. Отверстия в перфорированной трубе должны быть расположены напротив канавок рифленого листа, а их минимальный диаметр должен составлять примерно 5 мм при расстоянии между отверстиями по меньшей мере 75 мм. Расход воды, как и в случае закрытой системы, должен обеспечивать незначительное повышение температуры. Можно повысить эффективность такой системы, натянув над рифленой поверхностью прозрачный пластик, например пленку «тедлар» (фтористый поливинил) типа 400 BG 20 TR, выпускаемую фирмой «Дюпон»; в этом случае система превращается в коллектор типа Томасона. Можно использовать и обычные рифленые прозрачные пластмассовые листы, устанавливаемые на открытом воздухе.

В графстве Суссекс была успешно испытана другая система открытого типа, представляющая собой большую плоскую черную бетонную поверхность ступенчатой формы. Вода из бассейна подается насосом на верхнюю ступень, откуда медленно стекает по черным бетонным уступам в бассейн. Эта весьма простая конструкция, которую легко реализовать на практике, позволяет получить довольно высокое отношение площади коллектора к площади бассейна. Единственная трудность при сооружении системы связана с получением равномерной тонкой пленки воды по всей поверхности. Решению этой задачи способствует укладка на верхней ступени каскада длинной гибкой перфорированной трубы.

Регулирование. Для таких низкотемпературных систем по существу не нужны чувствительные двухпозиционные дифференциальные терморегуляторы. Практика показала, что вполне достаточно управлять системой вручную, подавая воду в панели примерно с 8 до 18 ч ежедневно, за исключением очень облачных или ненастных дней. Если используется дифференциальный терморегулятор, то должно предусматриваться некоторое запаздывание во времени, чтобы избежать постоянного включения и выключения системы в условиях переменной облачности.

Бассейны с плавающим покрытием. Прежде чем приступить к сооружению системы солнечного нагрева, значительно проще и гораздо более экономично закрыть бассейн сверху, чтобы снизить влияние основного источника тепловых потерь — испарения. Проще всего воспользоваться каким-либо плавающим покрытием. Эф-

фективной будет тонкая черная полиэтиленовая пленка. Ее нетрудно закрепить по краям бассейна и нужно лишь предусмотреть небольшие отверстия для стока дождевой воды, расположенные с интервалом около 0,3 м. Выпускаемые промышленностью плавающие покрытия бассейнов часто делают из двух синих поливинилхлоридных пленок, разделенных пенополиуретановыми планками. При накрывании бассейна вода в нем охлаждается за ночь примерно на 1°C, в то время как в открытых бассейнах температура падает более чем на 2°C. Разница в один градус кажется очень малой, но даже для небольшого бассейна объемом (90 м³) она эквивалентна более 100 кВт·ч электроэнергии.

СОЛНЕЧНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ ДЛЯ БЫТОВЫХ ЦЕЛЕЙ

Существуют, наверное, сотни различных конструкций солнечных водонагревателей; все они частично удовлетворяют потребности в горячей воде. Большая часть конструкций имеет некоторые общие для всех элементы, к которым относятся:

- пластина коллектора;
 - теплоизоляция днища и боковых стенок пластины;
 - одно или два покрытия из стекла или прозрачной пластмассы с фронтальной стороны коллектора;
 - корпус;
 - система аккумуляирования горячей воды, которая может представлять собой отдельный бак-аккумулятор.
- В Англии важные работы в этой области были проведены Хейвудом в период с 1947 по 1955 г.; разработанные им конструктивные решения легли в основу создания в последующие годы многочисленных типов систем солнечного нагрева [7, 8].

Корпус, покрытия и теплоизоляция. Корпус и стеклянные или пластмассовые покрытия защищают пластину коллектора от непогоды. Для размещения пластины коллектора и покрытий можно приспособить любую коробку, по форме похожую на обычный плоский ящик. Довольно часто корпус изготавливают из армированной стекловолокном пластмассы, но можно использовать дерево или листовой металл. Поперечные сечения корпусов различного типа показаны на рис. 8.3.

Одиарное остекление пропускает около 90% падающей солнечной радиации, но задерживает почти всю лучистую энергию, испускаемую поглощающей поверхно-

стью, поскольку стекло непрозрачно для длинноволнового излучения. Применение двойного остекления еще больше снижает количество радиации, достигающей поглощающей пластины, но если температура пластины более чем на 35°C превышает температуру окружающего воздуха, то второе покрытие повышает эффективность работы коллектора, поскольку снижает тепловые потери от наружного покрытия в окружающую среду. Кроме того, второй слой прозрачной изоляции защищает в зимнее время пластину от промерзания, когда температура ночью падает ниже нуля. В связи с ростом затрат и трудностей установки второго покрытия в простых коллекторных системах рекомендуется использовать оди-

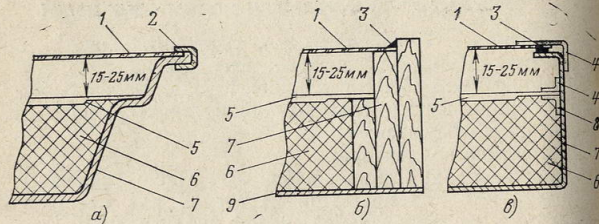


Рис. 8.3. Поперечное сечение коллекторов с корпусами из армированного стеклопластика (а), дерева (б) и с оцинкованным корпусом (в).

1 — стекло; 2 — уплотняющая лента; 3 — герметик; 4 — прижим; 5 — пластина коллектора; 6 — теплоизоляция; 7 — корпус; 8 — опора; 9 — основание из фанеры.

нарное остекление, тем более что в условиях Великобритании второе покрытие дает сравнительно небольшое улучшение работы коллектора.

Вместо стекла возможно использование и полупрозрачной пластмассы, если она подвергнута специальной обработке и способна выдерживать погодные воздействия. В США в некоторых серийно выпускаемых коллекторах применяется тедлар типа 400 BG 20 TR, который заменил устойчивый к атмосферным воздействиям майлар фирмы «Дюпон». Этот тонкий пленочный материал поддается тепловой сварке или склеивается. Как в Великобритании [9], так и в США [10] успешно применялись полупрозрачные пластмассовые листы, армированные стекловолокном. С таким материалом легче обра-

щаться, чем со стеклом, особенно при работе на открытой крыше, где нужно быть очень осторожным, чтобы не разбить стекло. Расстояние между двумя покрытиями или, при одинарном остеклении, между покрытием и поглощающей пластиной должно составлять 15—25 мм. Точное значение этой величины не имеет существенного значения [11]. С целью удешевления прозрачное покрытие можно изготавливать из несколько более худшего стекла толщиной 4 мм, которое применяется в тепличном садоводстве, хотя это и приводит к относительно небольшому уменьшению общей эффективности работы системы. Недостатком применения пластмассовых материалов, даже специально приспособленных к работе в атмосферных условиях, является их ограниченный срок службы. При установке покрытия в корпусе и герметизации стыков следует избегать таких решений, при которых по краям корпуса будет скапливаться вода. В некоторых конструкциях это не учитывалось, в результате чего у нижней кромки покрытия почти всегда застаивалась грязная вода. Для теплоизоляции дна и боковых стенок коллектора можно использовать различные выпускаемые промышленностью материалы, которые могут выдерживать максимальные температуры, превышающие 100°C — такие температуры весьма вероятны в неработающем коллекторе в жаркий солнечный день. Вполне удовлетворительной теплоизоляцией является стекловолокно или минеральная вата. Следует избегать применения полистирола, поскольку он плавится, находясь в контакте с горячей пластиной коллектора. Минимальную толщину теплоизоляции рекомендуется принимать равной 50 мм на теневой стороне и 25 мм на боковых стенках, хотя во втором случае теплоизоляция не столь важна и может не предусматриваться совсем.

КОНСТРУКЦИИ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ КОЛЛЕКТОРА

Общие замечания

Селективная поверхность. Получение селективной поверхности невозможно в условиях большинства домашних мастерских. Вероятно, проще всего изготовить селективное покрытие на меди, используя теплый раствор гидроксида натрия и хлорита натрия, температуру и концентрацию которого следует тщательно контролиро-

вать [12]. Даже в отношении промышленно изготовленных селективных покрытий имеются противоречивые мнения о том, как долго они будут эффективны. Из графиков эффективности, приведенных в гл. 3, видно, что селективные поверхности имеют преимущества только при относительно высоких температурах коллектора.

Защита от замерзания. Проблема замерзания коллектора в зимнее время может быть решена несколькими способами. Простейшим решением является отказ от использования системы солнечного нагрева в течение всего зимнего периода и слив воды из коллекторов. Количество тепла, которое не будет получено за время с середины октября до середины марта, соответствует 20% полной годовой выработки энергии. Если используется раствор антифриза, то система должна быть полностью автономна, а на ее эксплуатацию необходимо получить разрешение местной водохозяйственной инспекции. В таких системах предусматривается бак горячей воды с встроенным теплообменником, соединенным непосредственно с солнечными коллекторами; эти системы рассматриваются ниже.

Коррозия. Проблемы коррозии также были рассмотрены в гл. 3. Одной из причин возникновения коррозии может являться использование в системе разнородных металлов, например меди и алюминия, находящихся в непосредственном контакте во влажной среде, или же подача в алюминиевую панель коллектора обычной водопроводной воды, содержащей некоторые растворенные вещества. Этой проблеме придавалось большое значение на конгрессе Международного общества по солнечной энергии (ISES) в 1975 г. в Лос-Анджелесе, участники которого пришли почти к единодушному мнению [13], что вопросы, связанные с возможной коррозией и утечками в системах с алюминиевыми коллекторами, столь серьезны, что алюминий нельзя более считать подходящим материалом для изготовления коллекторов. Хотя в солнечной водонагревательной установке непосредственный контакт разнородных материалов может отсутствовать, коррозия может возникать в тех случаях, когда в системе имеются элементы, изготовленные из меди и простой или оцинкованной стали, особенно если в воде может растворяться медь. На ранней стадии эксплуатации медь пластины коллектора или соединительных трубопроводов может раствориться в воде и затем осесть

на поверхности оцинкованного бака-аккумулятора. Аналогично может произойти коррозия поглощающей пластины из оцинкованной стали, если она соединена с медным баком-аккумулятором.

С точки зрения коррозии столь же важным фактором является присутствие в системе растворенного кислорода, однако его влияние может быть полностью исключено в результате изготовления всей установки из меди. Медь, которая весьма широко используется в водопроводных системах, не корродирует в кислородсодержащей воде или в соответствующим образом обработанном растворе антифриза.

Трубопроводы. В обычных установках, работающих на принципе термосифона, для соединения коллектора с баком-аккумулятором рекомендуется использовать трубы диаметром 28 мм. Все соединительные трубопроводы следует монтировать в соответствии с обычными правилами сборки водопроводов, избегая установки прямоугольных колен, что особенно важно для термосифонных систем. Наиболее серьезной проблемой, вероятно, является образование в системе воздушных пробок. При нагревании обычной водопроводной воды из нее выделяется растворенный воздух, который, постепенно скапливаясь в какой-либо точке системы, образует воздушную пробку, вызывающую либо прекращение циркуляции, либо уменьшение расхода. Важно, чтобы трубопроводы, соединяющие коллектор с баком-аккумулятором, плавно поднимались в направлении потока. Целесообразно устанавливать солнечный коллектор с небольшим наклоном, так чтобы горизонтальные участки гидравлических коллекторов панели постепенно поднимались в направлении к выходу из коллектора. В системе должны быть предусмотрены воздушные краны. Трубопроводы, соединяющие различные элементы системы, должны быть возможно более короткими. Все трубопроводы горячей воды следует теплоизолировать.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ

Рифленая панель из оцинкованной стали. Первый солнечный коллектор Хейвуда для бытовых целей был установлен в его доме близ Лондона в 1948 г. и состоял из двух листов оцинкованной стали с рифлением, расположенными зеркально друг относительно дру-

га и образовавшими в продольном направлении восемь каналов для воды. Листы по краям были склепаны и спаяны, а вдоль верхней и нижней кромок были установлены гидравлические коллекторы квадратного поперечного сечения, соединенные с панелью. Верхняя поверхность панели площадью немного меньше 1 м^2 была покрыта черной матовой краской; панель установлена в деревянной раме, имеющей двойное остекление и теплоизоляцию дна. Несмотря на то что коллектор проработал в обычной термосифонной системе в течение ряда лет, Хейвуд отметил, что срок его службы оказался не велик [7].

Тем не менее Брейсовский научно-исследовательский институт успешно разработал модифицированный вариант первого коллектора Хейвуда [14]. Новый коллектор был сконструирован на основе дешевых материалов, которые нетрудно найти даже в сравнительно отдаленных районах мира; он состоит из двух оцинкованных стальных листов толщиной $0,795 \text{ мм}$, один из которых имеет рифления и образует поглощающую поверхность. Эти два листа соединяются при помощи заклепок и пайки; рифленая поверхность окрашивается черной краской и панель укладывается в простой ящик из оцинкованной стали на слой теплоизоляции, в качестве которой было предложено использовать кокосовое волокно. Ящик накрывается одним листом оконного стекла толщиной 3 мм ; при этом между стеклом и боковыми стенками ящика по всему периметру остается трехмиллиметровый зазор для компенсации теплового расширения стекла. Этот зазор уплотняется с помощью кремниевой замазки. В качестве бака-аккумулятора используется бочка из-под нефти емкостью $204,6 \text{ л}$. При минимальном техническом обслуживании коллектор может прослужить около 5 лет, но, как сообщалось, несколько коллекторов в Барбадосе удовлетворительно проработали более 7 лет.

Панель из труб, присоединенных к металлическому листу. Австралийская научно-техническая организация по промышленным и исследовательским работам в 1964 г. опубликовала руководство по основам проектирования, изготовления и монтажа солнечных водонагревателей [12], краткое содержание которого было изложено в 1967 г. в работе [15]. В этом руководстве описана конструкция поглощающей пластины, состоя-

щей из труб, имеющих тепловой контакт с металлическим листом. В качестве предпочтительного металла называется медь; каркас из медных труб диаметром 28 и 15 мм припаивается к медному листу толщиной около $0,45 \text{ мм}$. При этом вертикальные 15 -миллиметровые трубы припаиваются твердым припоем к 28 -миллиметровым горизонтальным трубам, представляющим собой гидравлические коллекторы. В руководстве рекомендуется изготавливать корпус коллектора из оцинкованной стали или асбоцемента. В Великобритании в настоящее время рекомендуется использовать несколько более толстые медные листы толщиной приблизительно $0,56$ и $0,91 \text{ мм}$. Типичный каркас из труб показан на рис. 8.4. Этот каркас может присоединяться к плоскому

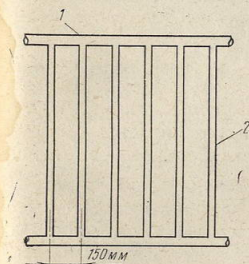


Рис. 8.4. Каркас из труб.
1 — гидравлические коллекторы диаметром 28 мм ; 2 — подъемные трубы диаметром 15 или 18 мм .

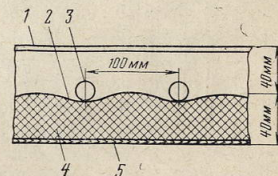


Рис. 8.5. Поперечное сечение коллектора Мэтью.

1 — обычное оконное стекло; 2 — гофрированный лист алюминия толщиной $0,4 \text{ мм}$; 3 — оцинкованная труба диаметром 18 мм ; 4 — теплоизоляция из стекловолокна; 5 — фанера (толщиной обычно 6 мм).

или рифленому листу. Расстояние между осями соседних труб рекомендуется принимать равным примерно 150 мм .

Хотя предпочтительным материалом является медь, можно использовать и оцинкованные стальные или алюминиевые трубы и листы. Любой способ соединения, не обеспечивающий хорошего теплового контакта, как в случае пайки медных элементов, будет менее эффективен. Наихудшим вариантом является простое крепление труб к листу проволочными стяжками, расположенными на большом расстоянии друг от друга. Однако коллектор Мэтью [16], показанный на рис. 8.5, имел хорошие характеристики, хотя теоретически его конструкция

считается плохой, поскольку расстояние между проводочными стяжками составляет около 750 мм. В этом коллекторе оцинкованные трубы расположены горизонтально, но расстояние между ними меньше рекомендованного значения 150 мм.

Более частая установка стяжек позволит улучшить тепловой контакт, а укладка труб в полужилиндрических выемках плоского листа дополнительно повысит КПД, особенно если зазоры между трубами и листом (при невозможности пайки) заполнить каким-либо связующим материалом или наполнителем.

Как показано на рис. 8.6, вместо многотрубной системы можно использовать змеевик. Такие змеевики применяются в некоторых серийно выпускаемых панелях, но их использование ограничивается системами с принудительной циркуляцией.

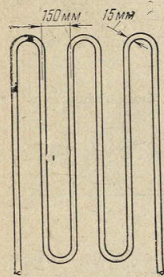


Рис. 8.6. Змеевик.

Промышленные стальные панельные радиаторы. Для использования в качестве поглощающей пластины солнечного коллектора легко приспособить стандартный серийно выпускаемый стальной панельный радиатор. Если возможно, панель следует получить до ее окончательной отделки, т.е. окрашивания в гляцевитый белый цвет, поскольку поглощающая поверхность должна быть покрыта обычной черной матовой краской. Подобная краска на поверхности панельного радиатора, накрытого одним прозрачным покрытием из майлара и впервые испытанного автором в 1968 г., не разрушилась за 8 лет эксплуатации [17]. Обратная сторона панели может быть оставлена белой. Обычно радиатор имеет четыре присоединительных патрубка, расположенных по углам панели. Входной патрубок холодной воды должен быть в нижней части панели, а нагретая солнечным теплом вода должна покидать панель через диагонально расположенный верхний патрубок, т.е. вода должна протекать от нижнего левого угла панели к верхнему правому или от нижнего правого к верхнему левому. Не следует подводить воду к обоим входным патрубкам панели или отбирать нагретую воду из обоих верхних выходных патрубков, поскольку это может привести к сниже-

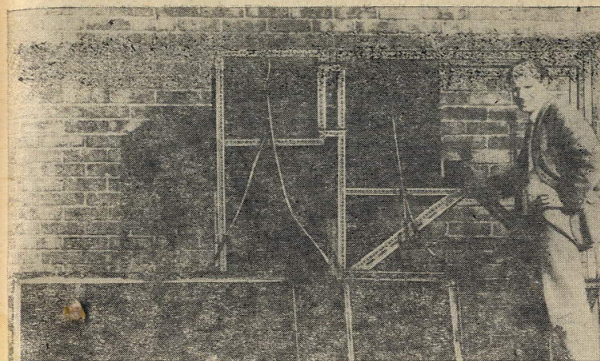


Рис. 8.7. Коллектор со стальным панельным радиатором.

нию общего КПД коллектора. Например, в панели, включенной в термосифонную систему и имеющей два входных и два выходных патрубка, может установиться режим внутренней циркуляции потока. Окрашенный радиатор с присоединенными патрубками нужно установить в корпусе, причем оребрение радиатора должно располагаться обычным образом, т.е. вертикально по отношению к горизонтальному гидравлическому коллектору, как показано на рис. 8.7. Панель будет работать и при повороте ее на 90°, но КПД при этом сильно уменьшится.

Простой лотковый коллектор-аккумулятор. Эффективный работающий коллектор можно изготовить из водонепроницаемого ящика с покатым днищем, как показано на рис. 8.8. Это устройство является одновременно солнечным коллектором и баком-аккумулятором. Его использование особенно целесообразно в тех местах, где осуществляется снабжение только холодной водой. Этот коллектор не годится при низком уровне радиации или температурах окружающей среды, при которых возможно замерзание. При открывании регулирующего вентиля поступающая холодная вода вытесняет нагретую воду к более мелкому участку устройства. Покатое днище ящика позволяет получить после кратковременного пе-

риода с высоким уровнем радиаций слой нагретой воды. В ящике коллектора под остеклением необходимо просверлить несколько небольших вентиляционных отверстий, чтобы свести к минимуму влияние запотевания стекла. Ящик рекомендуется изготавливать из армированной стекловолокном пластмассы, окрашенной черной матовой краской или накрытой листом бутила. В 1967 г.

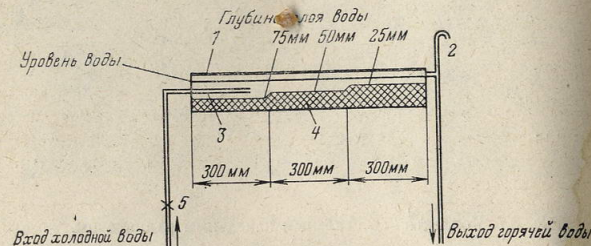


Рис. 8.8. Плоский лотковый коллектор-аккумулятор.

1 — одинарное остекление; 2 — вентиляционная трубка; 3 — перфорированная трубка; 4 — слой теплоизоляции; 5 — регулирующий вентиль.

Национальным научно-исследовательским строительным институтом в Претории был разработан и испытан упрощенный вариант коллектора с корпусом из оцинкованной стали, имеющим постоянную глубину и прямоугольное поперечное сечение [18].

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ КОЛЛЕКТОРА

Измерения, проведенные Хейвудом [19], показали, что в Великобритании на широте $51^{\circ}31'$ ориентированная на юг поверхность, установленная под углом 40° к горизонту, будет в среднем получать в день $9,2 \text{ МДж/м}^2$, или примерно $2,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ солнечной энергии. (Подробные данные для других углов наклона в разное время года приведены в гл. 2.) Изменение на несколько градусов наклона или ориентации коллектора оказывает очень малое влияние, и это значение может быть положено в основу оценок среднего количества полезного тепла, которое может быть получено системой нагрева воды для бытовых целей. Лабораторные испытания дают значения

КПД коллектора, намного превышающие 60% при умеренной разности температур; однако с учетом большей протяженности соединительных трубопроводов в практических установках, прерывистого характера поступления солнечной радиации в течение дня и графика потребления горячей воды реальными в условиях Великобритании являются значения в диапазоне от 30 до 40% . Это означает, что в целом за год на 1 м^2 коллектора может быть получено $280\text{—}376 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ энергии. Значение $280 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ было подтверждено серией опытов, проведенных с сентября 1973 г. по август 1974 г. [20], хотя эта цифра и была признана заниженной в связи с неблагоприятными погодными условиями и плохой теплоизоляцией бака-аккумулятора. Совершенно независимо научно-исследовательская строительная организация предложила принять значения 324 и $350 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ для установок с площадью коллекторов соответственно 6 и 4 м^2 [21, 22]. Имеется одна важная особенность, которую необходимо учитывать, принимая реальные значения общего КПД в диапазоне от 30 до 40% . Любое увеличение площади коллектора выше 6 м^2 не приведет к пропорциональному увеличению общего количества используемого тепла. Если бы такая пропорциональность имела место, то коллектор с площадью около 12 м^2 обеспечивал бы горячей водой среднюю семью на протяжении всего года. Но это невозможно из-за очень низкого уровня солнечного излучения в зимнее время. По данным Хейвуда средний дневной приход солнечной радиации в период с 16 октября по 26 февраля составляет $1,05 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$, а для большинства дней декабря и января эта величина в лучшем случае достигает половины указанного значения. Таким образом, чтобы попытаться удовлетворить в середине зимы среднесуточную потребность в энергии (около $10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$), необходим коллектор с площадью примерно 50 м^2 , но даже такая площадь будет, вероятно, недостаточна, поскольку на практике имеется еще один лимитирующий фактор. Он заключается в том, что для всех плоских коллекторов существует некоторый предельный уровень солнечной радиации, ниже которого они вообще не могут работать. Поэтому лучше всего принять значение между 280 и $375 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$, хотя конкретные установки в определенных районах страны могут иметь значительно более высокую теплопроизводительность. Приняв цифру в $324 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$, получим

значения годовой экономии для коллекторов площадью 4, 5 и 6 м², приведенные в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Годовая экономия затрат на топливо при использовании солнечных коллекторов

Стоимость 1 кВт·ч, пенс.	Годовая экономия, фунт. ст., при площади коллектора, м ²		
	4	5	6
2	25,92	32,40	38,88
3	38,88	48,60	58,32
4	51,84	64,80	77,76

Для практических установок затраты на материалы (в ценах 1976 г.) без учета трудозатрат не должны превышать 30 фунт. ст. на 1 м² площади коллектора; при этом период окупаемости составит около 5 лет за счет сэкономленной энергии при ее стоимости 0,02 фунт. ст. за 1 кВт·ч.

Исключением из правила, что площадь коллектора должна составлять 4—6 м², явилась установка с площадью 8 м², получившая приз на конкурсе Ассоциации развития медной промышленности в 1975 г. [23]. Впоследствии автор этой конструкции отметил, что, по его мнению, совершенно неправильно разрабатывать систему заниженной мощности [24].

Для абсолютного большинства солнечных водонагревательных установок бытового назначения емкость аккумулятора составляет приблизительно 50 л на каждый квадратный метр площади коллектора. Впервые это стандартное значение было предложено Хейвудом.

ВКЛЮЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ В СИСТЕМУ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДОМА

Термосифонная система. Основные элементы обычной системы горячего водоснабжения дома показаны на рис. 8.9. Простейшей системой с солнечными коллекторами является одноконтурная термосифонная система, показанная на рис. 8.10, с отдельным баком-аккумулятором горячей воды, нагретой в солнечной установке. При нагреве воды в коллекторе она поднимается вверх и поступает в верхнюю часть бака-аккумулятора, а более холодная вода из нижних слоев поступает в ниж-

нюю часть коллекторов. Поскольку течение обусловлено разностью плотностей горячей и холодной воды, должна существовать некоторая разность высот H между днищем бака-аккумулятора и верхним краем коллектора. При разности этих высот по меньшей мере 600 мм возникновение обратного потока в ночное время маловероятно, однако в трубопровод холодной воды может быть встроен и обратный клапан. Чиннери [25] указал, что снижение H ниже 600 мм приводит к уменьшению общей эффективности работы системы, как показано ниже:

Средний КПД, %

Расположение выходного патрубка коллектора:

на 600 мм ниже уровня днища бака-аккумулятора	54,6
на уровне днища бака-аккумулятора	46,4
на уровне около $\frac{2}{3}$ высоты бака-аккумулятора . .	43,8

Трубопровод горячей воды из коллекторов должен быть присоединен к верхней части бака-аккумулятора на уровне между $\frac{2}{3}$ и $\frac{3}{4}$ общей емкости бака. Чиннери также указывает, что эффективность работы системы падает, когда горячая вода подводится в более низкой точке. В таких странах, как Великобритания, применение отдельного бака-аккумулятора предпочтительно в связи с тем, что на протяжении большей части года температура, которая может быть достигнута в солнечных коллекторах, слишком низка для непосредственного использования нагретой воды в системе горячего водоснабжения.

Полезно предусмотреть возможность при хорошей радиации в летнее время подавать горячую воду, минуя колонку, и выключать обычную систему нагрева. Это особенно выгодно в том случае, когда в течение дня нет разбора горячей воды. Если бы не было обводной линии, то в этой ситуации горячая вода, полученная

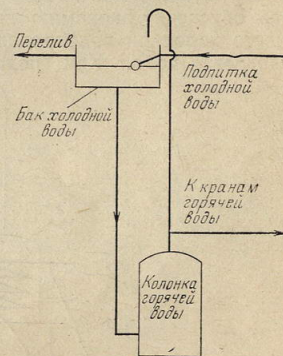


Рис. 8.9. Обычная система горячего водоснабжения дома.

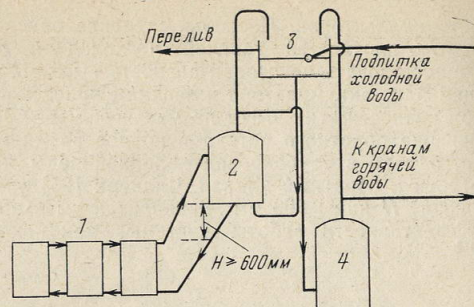


Рис. 8.10. Одноконтурная термосифонная система.

1 — плоские солнечные коллекторы; 2 — бак-аккумулятор воды, нагретой в солнечных коллекторах; 3 — бак холодной воды; 4 — колонка горячей воды. На схеме не показаны дренажные вентили.

в солнечных коллекторах, смешивалась бы вечером с холодной водой в колонке. При наличии отдельного бака-аккумулятора даже небольшое повышение температуры воды обеспечит экономию энергии, поскольку в колонку вместо холодной водопроводной воды будет подаваться подогретая вода. Как показано на рис. 8.11, термоси-

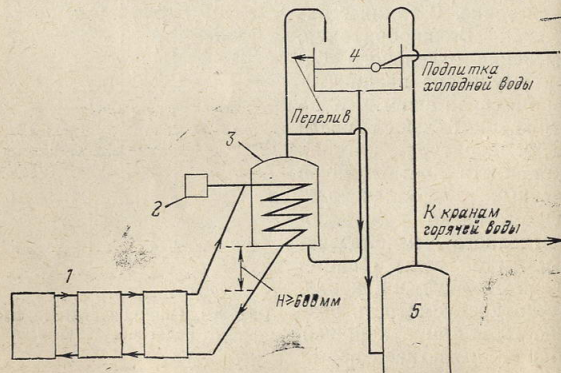


Рис. 8.11. Двухконтурная термосифонная система.

1 — плоские солнечные коллекторы; 2 — герметичный расширительный бак; 3 — бак-аккумулятор воды, нагретой в солнечных коллекторах; 4 — бак холодной воды; 5 — колонка горячей воды. На схеме не показаны дренажные и воздушные вентили.

фонная система может иметь промежуточный контур. В этом случае в баке-аккумуляторе устанавливается теплообменник и вода циркулирует по замкнутому контуру через коллекторы и теплообменник. Контур включает герметичный расширительный бак, который предотвращает попадание в систему свежего кислорода, что замедляет коррозию. Замкнутый контур может быть заполнен раствором антифриза, но в этом случае он должен быть полностью герметичен, чтобы исключить попадание антифриза в систему водоснабжения. Теплообмен-

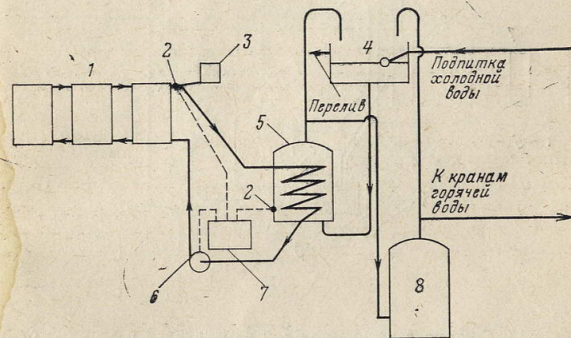


Рис. 8.12. Система с принудительной циркуляцией.

1 — плоские солнечные коллекторы; 2 — датчик температуры; 3 — герметичный расширительный бак; 4 — бак холодной воды; 5 — бак-аккумулятор воды, нагретой в солнечных коллекторах; 6 — циркуляционный насос; 7 — дифференциальный терморегулятор; 8 — колонка горячей воды. На схеме не показаны дренажные и воздушные вентили.

ник может представлять собой простой змеевик из медной трубки, и некоторые торговые фирмы рекомендуют в качестве бака-аккумулятора с теплообменником стандартную бытовую медную колонку небольшого размера. Однако эти колонки не рассчитаны на работу при более низких значениях разности температур и расходов, которые характерны для солнечных установок. Поэтому гораздо лучше устанавливать в 200-литровом баке-аккумуляторе оребренную медную трубку диаметром 28 мм и длиной около 1 м. В системе с промежуточным контуром трубопровод горячей воды от коллекторов следует

подключить к верхнему патрубку теплообменника. Система может работать и при подключении этого трубопровода к нижнему патрубку теплообменника, но при этом эффективность ее работы будет значительно меньше, поскольку существенно снизится расход воды.

Системы с принудительной циркуляцией. Как видно из рис. 8.12, система с принудительной циркуляцией является более сложной и управление циркуляционным насосом, в качестве которого можно использовать обыч-

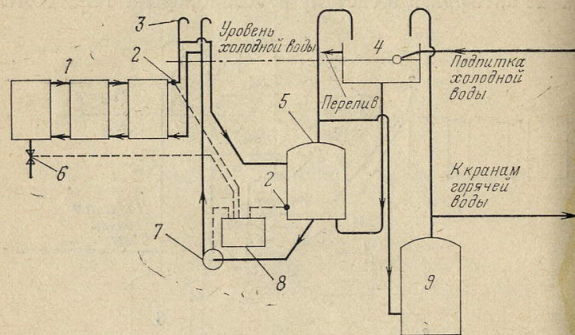


Рис. 8.13. Система с принудительной циркуляцией и защитой от заморозания.

1 — плоские солнечные коллекторы; 2 — датчик температуры; 3 — автоматический открывающийся воздушный вентиль; 4 — бак холодной воды; 5 — бак-аккумулятор воды, нагретой в солнечных коллекторах; 6 — электромагнитный дренажный вентиль; 7 — циркуляционный насос; 8 — дифференциальный терморегулятор; 9 — колонка горячей воды. На схеме не показаны некоторые дренажные и воздушные вентили.

ный небольшой насос системы центрального отопления, должно осуществляться с помощью дифференциального терморегулятора. Такие регуляторы поставляются различными изготовителями солнечных коллекторов или могут быть смонтированы из элементов электронных схем [25, 26]. Анализ работы дифференциального терморегулятора и проблем, связанных с его применением, был дан О'Коннелом [27], который предупреждает, что в дни со сравнительно низкой интенсивностью солнечной радиации и при переменной облачности система может постоянно включаться и выключаться, в результате чего может больше энергии потеряться, чем выработано.

Задаваемая разность температур, определяющая включение и выключение насоса, также важна, как и положение температурных датчиков, которые не должны быть размещены слишком высоко в баке-аккумуляторе.

Возможный способ защиты системы от поломок при замерзании воды показан на рис. 8.13. С помощью электромагнитного дренажного вентиля из коллекторов может быть слита вся вода. Эта система сложнее других и при ее реализации необходимо обратить внимание на

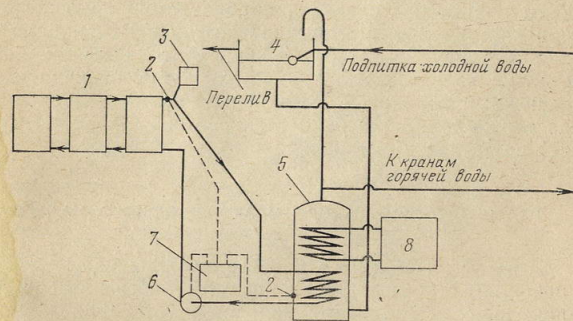


Рис. 8.14. Система с принудительной циркуляцией и колонкой в качестве бака-аккумулятора.

1 — плоские солнечные коллекторы; 2 — датчик температуры; 3 — герметичный расширительный бак; 4 — бак холодной воды; 5 — колонка, совмещенная с баком-аккумулятором; 6 — циркуляционный насос; 7 — дифференциальный терморегулятор; 8 — бойлер. На схеме не показаны дренажные и воздушные вентили.

высоту и расположение различных элементов, чтобы избежать опорожнения бака холодной воды при открывании дренажного вентиля.

На рис. 8.14 показана система, в которой отсутствует отдельный бак-аккумулятор воды, нагретой в солнечных коллекторах. В бытовую колонку, которая служит одновременно аккумулятором солнечного тепла, встроены два теплообменных змеевика, верхний из которых подключен непосредственно к обычному бойлеру. Преимуществом системы является то, что она занимает меньшее пространство и имеет меньшую длину трубопроводов, но даже при идеальных условиях КПД систе-

мы будет ниже, чем у системы с отдельным баком-аккумулятором.

Определенные трудности могут быть связаны с соединением трубопровода холодной воды к колонке горячей воды. Если холодная вода поступает в вертикальном направлении, она будет смешиваться с нагретой водой в верхней части колонки, быстро охлаждая ее. Этого можно избежать, располагая входной патрубок так, чтобы холодная вода подавалась горизонтально или с некоторым уклоном к днищу бака. Трубопровод холодной воды нельзя подсоединять к обратному трубопроводу одноконтурной термосифонной системы. В принципе такая система удовлетворительно работала бы днем, поскольку холодная вода нагревалась бы, проходя через солнечный коллектор, но в ночное время холодная вода также поступала бы в верхнюю часть колонки горячей воды, сразу смешиваясь с нагретой водой.

ПРАВИЛА СТРОИТЕЛЬНОГО И АРХИТЕКТУРНОГО НАДЗОРА

Системы солнечного нагрева должны удовлетворять правилам строительного и архитектурного надзора. Например, если солнечный коллектор устанавливается на крыше или стене дома, он должен быть закреплен так, чтобы его не сорвало сильным ветром. Возможно также, что некоторые органы архитектурного надзора станут возражать против монтажа солнечных коллекторов, если они существенно меняют внешний облик здания. Это в первую очередь относится к старым зданиям, представляющим исторический интерес. Многим может не понравиться довольно унылый вид солнечных нагревателей плавательных бассейнов и может оказаться необходимым размещение нагревателей за живыми изгородями или заборами, т. е. отнюдь не в идеальных условиях.

ПРОВЕРКА УТВЕРЖДЕНИЙ РЕКЛАМНЫХ ПРОСПЕКТОВ

В Великобритании до сих пор отсутствуют стандарты на системы солнечного нагрева и опубликовано много утверждений, которые вводят в заблуждение. Например: «солнечное тепло может бесплатно удовлетворить

почти всю вашу потребность в горячей воде, расходуемой в быту» и «солнечные панели нагреют всю воду, потребляемую средней семьей в летние месяцы, и 80% воды зимой». Такие утверждения не обязательно ошибочны. Они могли бы стать правомерными только в том случае, если бы люди сумели коренным образом изменить свой образ жизни, решили бы накапливать грязные тарелки, чашки, блюда, одежду и т. п. в течение многих недель зимой, дожидаясь нескольких солнечных дней. Но даже в летние месяцы облачная погода часто держится по нескольку дней подряд и в эти дни приход солнечной радиации, а следовательно, и теплопроизводительность водонагревательной установки будут крайне незначительны. Некоторые изготовители действительно публикуют полезные результаты собственных испытаний, по которым можно построить типичные графики КПД коллекторов с одинарным и двойным остеклением. Штрихпунктирная линия на рис. 8.15 соответствует результатам расчетов по данным, приведенным в недавно изданном проспекте английской фирмы «Сеньор Плэйт-коил». В нем сообщается, что Льюисовский центр NASA в Кливленде недавно завершил испытания солнечного коллектора. Испытания проводились при следующих условиях:

интенсивность подводимого теплового потока — 945,9 Вт/м²;
 скорость ветра — 3,13 м/с;
 остекление — два зеленых стекла толщиной 3,2 мм с пропускательной способностью 88%;
 расход воды — 48,8 л/(м²·ч);
 температура окружающего воздуха — 26,7°C.

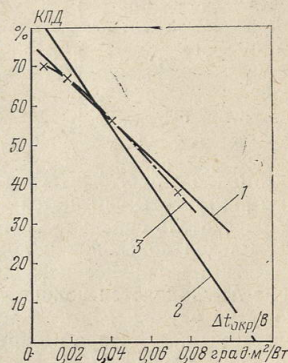


Рис. 8.15. Кривые КПД солнечных коллекторов.

1 — коллектор фирмы «Ханиуэлл» с двойным остеклением; 2 — коллектор Хейвуда с двойным остеклением; 3 — расчетная кривая, построенная на основе экспериментальных данных.

Полученные результаты, которые приведены в табл. 8.2, считаются хорошими.

Таблица 8.2
Результаты испытаний солнечного коллектора в NASA

Температура воды на входе, °C	КПД, %	Количество отводимого тепла, Вт/м²
26,7	70	663
37,8	67	634
60,0	56	530
93,3	38	359

Можно ли согласиться с утверждением, что полученные результаты считаются хорошими? Во-первых, следует рассчитать среднюю температуру пластины коллектора. Расход воды, как и количество отводимого тепла, известны, а среднее повышение температуры в коллекторе Δt_k равняется количеству отводимого тепла, деленному на расход воды. Средняя разность температур пластины коллектора и окружающего воздуха $\Delta t_{окр}$ равна $(T_{вх} - 26,7) + \Delta t_k / 2$. На последнем этапе расчетов нужно разделить среднюю разность температур $\Delta t_{окр}$ на плотность потока суммарной радиации ($b = 945,9 \text{ Вт/м}^2$), падающей на коллектор. Результаты приведены в табл. 8.3. Точки, соединенные штрихпун-

Таблица 8.3
Результаты испытания солнечного коллектора в NASA

Температура воды на входе, °C	КПД, %	Δt_k , °C	$\Delta t_{окр}$, °C	$\Delta t/b$, град·м²/Вт
26,7	70	11,70	5,83	0,0061
37,8	67	11,15	16,7	0,0176
60,0	56	9,33	38,0	0,0401
93,3	38	6,34	69,8	0,0738

ктирной линией на рис. 8.15, весьма близки к характеристике коллектора фирмы «Ханиуэлл» с двойным остеклением и лежат выше характеристики одного из первых коллекторов Хейвуда, так что утверждение изготовителей, что получены хорошие результаты, вполне оправ-

данно. Однако подобные испытания проводились изготовителями лишь для очень немногих коллекторов. Утверждения некоторых изготовителей, что в условиях Великобритании годовая экономия энергии в индивидуальных системах горячего водоснабжения близка к 1000 кВт·ч на 1 м² площади коллектора, никогда не подтверждались на практике.

ДРУГИЕ СПОСОБЫ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ

Хотя создание надежной теплоизоляции чердака и уменьшение сквозняков через щели окон и дверей не столь интересно и увлекательно, как сооружение системы солнечного отопления или горячего водоснабжения, эти простые мероприятия на сегодняшний день намного эффективнее с экономической точки зрения. Анализ, проведенный в 1974 г. в Великобритании [28], дал следующие значения капитальных затрат и экономии топлива за пятилетний период:

	Затраты, фунт. ст.	Расчетная стоимость сэкономленного за 5 лет топлива, фунт. ст.
Теплоизоляция основной крыши (толщина слоя 50 мм)	30	110
Предотвращение сквозняков	10	50

Эти цифры следует сопоставить с технико-экономическими показателями системы солнечного нагрева с площадью коллектора 6 м² (в ценах 1976 г.):

	Стоимость установки, фунт. ст.	Расчетная стоимость сэкономленного за 5 лет топлива (без учета инфляции), фунт. ст.
Установка собственного изготовления (без учета трудозатрат)	180	200
Серийно выпускаемая установка	Около 500	200

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К главе 1

- (1) Ericsson, J., Contributions to the Centennial Exhibition, John Ross & Co., New York, 1876.
- (2) Pope, C.H., Solar Heat - its practical applications, Boston, Massachusetts, 1903.
- (3) Mouchot, August, La Chaleur Solaire et Ses Applications Industrielles, Gauthier-Villars, Paris, 1869.
- (4) Harding, J., Apparatus for Solar Distillation, Paper No. 1933, Selected Papers, Institution of Civil Engineers 73 (1908).
- (5) Adams, W., Cooking by Solar Heat, Scientific American, June 19th 1878.
- (6) Scientific American, May 13th 1882.
- (7) The utilization of solar heat for the elevation of water, Scientific American, October 3rd 1885.
- (8) A solar motor, The Engineering Times 5, No. 4, 186-7 (April 1901).
- (9) Thurston, R.H., Utilizing the sun's energy, Cassiers Magazine, New York (August 1901).
- (10) Ackerman, A.S.E., The utilisation of solar energy, Trans. Soc. of Eng. 81-165 (1914).
- (11) Wind Power and Solar, Proc. New Delhi Symposium 1954, Paris, UNESCO, (1956).
- (12) Trans. Conf. on the Use of Solar Energy - the Scientific Basis, Tucson, Arizona, November 1955, University of Arizona Press (1958).
- (13) Proc. World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix, Arizona, November 1955, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, (1956).
- (14) U.N. Conf. on New Sources of Energy, Rome 1961. Proceedings, 4-6, New York, United Nations, (1964).
- (15) Spanides, A.G. and Hatzikakidis, A.D., eds, Solar and Aeolian Energy, Proc. Int. Seminar, Sounion, Greece, September 1961, Plenum Press, New York, 1964.
- (16) Solar Energy as a National Energy Resource, NSF/NASA Solar Energy Panel, December 1972.
- (17) Report of Committee on Solar Energy Research in Australia, Australian Academy of Science, July 1973.
- (18) Lalor, E., Solar Energy for Ireland, Report to the National Science Council, Dublin, February 1975.
- (19) Solar Energy: a U.K. assessment, U.K. Section, I.S.E.S., London, May 1976.

- (20) McVeigh J.C., Advances in Solar Energy, Heating and Ventilating News, 18 (9) (1975).
- (21) Solar energy utilisation in U.S.A., France, Italy and Australia. Proc. Conf. Brighton Polytechnic, U.K. Section, I.S.E.S., July 1974.
- (22) deWinter, F. and deWinter, J.W., eds, Description of the Solar Energy R & D programs in many nations, ERDA Division of Solar Energy, February 1976.
- (23) Eggers-Lura, A., ed, Flat plate solar collectors and their application to dwellings, Commission of the European Communities study contract No. 207-75-9 ECI DK, Copenhagen, February 1976.

К главе 2

- (1) Heywood, H., Solar energy for water and space heating, J.I. Inst. Fuel. 27, 334-352 (1954).
- (2) Thekaekara, M.P., Solar energy outside the Earth's atmosphere, Solar Energy 14, 109-127 (1973).
- (3) McCartney, H.A., Private communication.
- (4) Eiteman, L., Atmospheric attenuation model, 1964, in the ultraviolet, visible and infrared regions for altitudes to 50 km, Air Force Cambridge Research Laboratories, Environmental Research Papers No. 46, AFRCL-64-740.
- (5) Unsworth, M.W., Variations in the short wave radiation climate of the U.K., U.K. I.S.E.S. Conference on U.K. Meteorological Data and Solar Energy Applications, London, February 1975.
- (6) Drummond, A.J. and Greer, H.W., Fundamental Pyrheliometry, The Sun at Work 3, No. 2 (June 1958).
- (7) Connaughton, M.J., Global solar radiation, potential transeaporation and potential water deficit in Ireland, Technical Note No. 32, Department of Transport and Power-Meteorological Service, Dublin, 1967.
- (8) Day, G.J., Distribution of total solar radiation on a horizontal surface over the British Isles and adjacent areas, The Meteorological Magazine 90, 269-284 (October 1961).
- (9) Monteith, J.L., Contribution to discussion on (5).
- (10) Page, J.K., in Solar Energy. Memorandum by the U.K. Section, International Solar Energy Society. Select Committee on Science and Technology (Energy Resources Sub-Committee), Appendix 1, Part 1., House of Commons Paper 156-1, HMSO, January 1975.
- (11) Cash, J., Solar Energy and Buildings, Paper presented to Building Design Team, IIRS, Ireland, 5th December 1974.
- (12) Heywood, H., Standard date periods with declination limits, Solar Energy 9, No. 4, (1965).

- (13) Heywood, H., Solar radiation on inclined surfaces, Solar Energy 10, No. 1, (1966).
- (14) Heywood, H., A general equation for calculating total radiation on inclined surfaces, Paper 3/21, International Solar Energy Conference, Melbourne, Australia (1970).
- (15) Heywood, H., Operating experiences with solar water heating, JHVE 39, 63-69 (June 1971).
- (16) Courtney, R.G., An appraisal of solar water heating in the U.K., Building Research Establishment Current Paper CP 7/76 (1976).
- (17) Bugler, J.W., The determination of hourly solar radiation incident upon an inclined plane from hourly measured global horizontal insolation, CSIRO, SESReport 75/4 (1975).

К главе 3

- (1) Brooks, F.A., Solar energy and its uses for heating water in California, Bull. Calif. Agric. Exp. Sta., No. 602, 1936.
- (2) Hottel, H.C. and Woertz, B.B., The performance of flat plate solar heat collectors, Trans. ASME, 64, 91-104, 1942.
- (3) Heywood, H., Solar energy for water and space heating, J. Inst. Fuel 27, 334-347, July 1954.
- (4) Morse, R.N., Solar water heaters, Proc. World Symposium on Applied Solar Energy, Stanford Research Inst., University of Arizona, Phoenix, Arizona, 191-202, 1956.
- (5) Chinnery, D.N.W., Solar water heating in South Africa, National Building Research Institute, Bulletin 44, CSIR Research Report 248, Pretoria, South Africa, 1967.
- (6) Tabor, H., Solar energy collector design, Bull. Res. Coun., 5C, No. 1, Israel, 1955.
- (7) Yellott, J.I., Solar energy utilization for heating and cooling, originally published in ASHRAE Journal, December 1973, now in Chapter 59, ASHRAE Guide and Data Book series, 1974 edition.
- (8) Scott, J.E., User's experience with solar water heater collectors in Florida, Proc. Workshop on Solar Collectors for Heating and Cooling of Buildings, 21-23 November 1974, NSF-RANN-75-019, May 1975.
- (9) CSIRO Solar Water Heaters, Division of Mechanical Engineering Circular No. 2, Melbourne, 1964.
- (10) McVeigh, J.C., Some experiments with a flat plate solar water heater, UK Section, ISES, Conf. on Low Temperature Thermal Collection of Solar Energy, April 1974.
- (11) McVeigh, J.C., Low-cost solar water heater, Proc. Conf. on Appropriate Technology, University of Newcastle-upon-Tyne, 1976.
- (12) Whillier, A., Solar energy collection and its utilization for house heating, ScD. Thesis, MIT, 1953.

- (13) Whillier, A., Design factors influencing collector performance, Low Temperature Engineering Applications of Solar Energy, ASHRAE, New York, 1967.
- (14) Hottel, H.C. and Whillier, A., Evaluation of flat plate collector performance, Trans. Conf. on the Use of Solar Energy, 2 (1), 74, University of Arizona Press, 1958.
- (15) Bliss, R.W., The derivation of several plate efficiency factors, useful in the design of flat plate solar heat collectors, Solar Energy 3, (4), 55 (1959).
- (16) Duffie, J.A. and Beckman, W.A., Solar Energy Thermal Process, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- (17) Smith, C.T. and Weiss, T.A., Design applications of the Hottel-Whillier-Bliss equation, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 34/6, July 1975.
- (18) Mitalas, G.P. and Stephenson, D.G., Absorption and Transmission of Thermal Radiation by Single and Double Glazed Windows, Research paper 173, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Ottawa, 1962.
- (19) Zarem, A.M. and Erway, D.D., Introduction to the Utilization of Solar Energy, McGraw Hill, New York, 1963.
- (20) Scoville, A.E., An alternate cover material for solar collectors, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 30/11, July 1975.
- (21) Charters, W.W.S. and Macdonald, R.W.G., Heat transfer effects in solar air heaters, Paper E 37, Conf. The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973.
- (22) Lorsch, H.G., Performance of flat plate collectors, Proc. Solar Heating and Cooling for Buildings Workshop, 21-23 March 1973, NSF-RANN-73-004, July 1973.
- (23) Tani, T., Sawata, S., Tanaka, T. and Horigome, T., Characteristics of selective thin barriers and selective surfaces, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 30/4, July 1975.
- (24) Bruno, R., Herman, W., Horster, K., Kersten, R. and Mahdjuri, R., High efficiency solar collectors, Paper 34/10, Ibid.
- (25) McDonald G.E., Spectral reflectance properties of plated zinc for use as a solar selective coating, Paper 30/2, Ibid.
- (26) Solar Energy : a UK Assessment, UK Section, ISES, London, May 1976.
- (27) Selective Black Coatings, Proc. UN Conf. on New Sources of Energy, 4, 618, 1964.
- (28) Keller, A., Selective surfaces of copper foils, Paper E 43, Conf. The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973.
- (29) Keller, A., Selective surfaces of aluminium foils, Paper 7/16, International Solar Energy Society Conference, Melbourne, 1970.
- (30) Close, D.J., Flat plate solar absorbers. The production and testing of a selective surface for copper absorber plates. Report ED 7, CSIRO, Melbourne, June 1962.

- (31) McDonald, G.E., Refinement in Black Chrome for use as a solar selective coating NASA TM X-3136. 1975.
- (32) Pettit, R.B. and Sowell, R.R., Solar absorptance and emittance properties of several solar coatings, ISES Congress, Los Angeles Extended Abstracts, Paper 30/1 July 1975.
- (33) Harris, L., The optical properties of metal blacks and carbon blacks The Epley Foundation for Research Monograph Series No 1 1967
- (34) McKenzie, D.P., Harding, G.L. and Window, B., Metal blacks as selective surfaces, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts Paper 30/5 July 1975
- (35) Sabine, T.M., Gammon, R.B. and Riddiford C.L. "Solarox" as a selective absorber Paper 30/6 Ibid.
- (36) Stamford, M.S., Compatibility of solar systems, A question of solar heating, Copper Development Association Potters Bar, Hertfordshire, 1976.
- (37) Private communication, Department of Mechanical Engineering and Energy Studies, University of Cardiff. 1976.
- (38) Duffie, J.A. et al, Report of working group on materials and components for flat plate collectors, Proc. Workshop on Solar Collectors for Heating and Cooling of Buildings, 21-23 November, 1974, NSF-RANN-75-019, May 1975
- (39) Popplewell, J.M., Corrosion considerations in the use of aluminium and copper solar energy collectors, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 30/12 July 1975.
- (40) McVeigh, J.C., Some experiments in heating swimming pools by solar energy, JHVE 39, 53-55. June 1971
- (41) Czarnecki, J.T., Method of heating swimming pools by solar energy, Solar Energy 7 (1) 3-7 (1963).
- (42) Root, D.E., Practical aspects of swimming pool heating, Solar Energy 4 (1), 23-24 (1960).
- (43) Farber, E.A. and Triandafyllis, J., Solar swimming pool heating, Conf The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973
- (44) Farber, E.A., Solar energy research and development at the University of Florida, Building Systems Design, February/March, 1974.
- (45) Cobble, M.H., Irradiation into transparent solids and the thermal trap effect, J. Frank. Inst. 278 (6), 383-393 (1964).
- (46) San Martin, R.L. and Field, G.J., Experimental performance of three solar collectors, Solar Energy 17 (6), 345-349 (1975).
- (47) Marshall, K.N., Bell, G.A., Wedel, R.K. and Haslim, L.A., Thermal radiation characteristics of transparent plastic honeycombs for solar collector applications, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 32/1, July 1975.
- (48) Cane, R.L.D., Hollands, K.G.T., Raithby, G.D. and Unny, T.E., Convection suppression in inclined honeycombs, Paper 32/5, Ibid.
- (49) Buchberg, H., Edwards, D.K. and Mackenzie, J.D., Design considerations for solar collectors with glass cylindrical cellular covers, Paper 32/12, Ibid.
- (50) Baldwin, C.M., Dunn, B.S., Hilliard, W.G. and Mackenzie, J.D., Performance of transparent glass honeycombs in flat plate collectors, Paper 32/2, Ibid.
- (51) Moore, S.W., Balcomb, J.D. and Hedstrom, J.C., Design and testing of a structurally integrated steel solar collector unit based on expanded flat metal plates, Presented at US Section ISES Meeting, Ft. Collins, Colorado, 19-23 August, 1974.
- (52) Balcomb, J.D., Hedstrom, J.C. and Moore, S.W., The LASL structurally integrated solar collector unit - final results, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 34/1, July 1975.
- (53) Spencer, D.L., Smith, T.F. and Flindt, H.R., The design and performance of a distributed flow water-cooled solar collector, College of Engineering, University of Iowa, Iowa 52242, 1975.
- (54) Winston, R., Principles of solar concentrators of a novel design, Solar Energy 16 (2), 89-95 (1974).
- (55) Hinterberger, H. and Winston, R., Rev. Sci. Instr. 37, 1094 (1966).
- (56) Varanov, V.K. and Melnikov, G.K., Soviet Journal of Optical Technology 33, 408 (1966).
- (57) Rabi, A., Comparison of solar concentrators, Solar Energy 18 (2), 93-111 (1976).
- (58) Smith, R.H., A method of solar thermal generation of electricity, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 53/8, July 1975.
- (59) Ling, M., Solarhot Water Systems, 34 Flinders Road, Earlwood, Sydney, N.S.W. 2206.
- (60) Solar Heating Competition, Copper Development Association, Orchard House, Mutton Lane, Potters Bar, Hertfordshire EN6 3AP, UK (1975).
- (61) Hollands, K.G.T., Directional selectivity, emittance and absorptance properties of vee corrugated specular surfaces, Solar Energy 7 (3), 108-116 (1963).
- (62) Bannerot, R.B. and Howell, J.R., Moderately concentrating flat plate solar energy collectors. ASME paper 75-HT-54, presented at AIChE-ASME Heat Transfer Conference, San Francisco, California, 11-13 August 1975.
- (63) Bannerot, R.B. and Howell, J.R., The effect of non-direct insolation on the radiative performance of trapezoidal grooves used as solar energy collectors, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 52/5, July 1975.
- (64) Steward, W.G., A concentrating solar energy system employing a stationary spherical mirror and movable collector, Proc. Solar Heating and Cooling for Buildings Workshop, 21-23 March 1973, NSF-RANN-73-004, July 1973.

- (65) Kreider, G.F., The Stationary Reflector/Tracking Absorber Solar Collector, Presented at US Section ISES Meeting, Ft. Collins, Colorado 19-23 August 1974
- (66) Blum, H.A. and Estes, J.M., Design and feasibility of flat plate solar collectors to operate at 100 - 150°C, Paper E 18, Conf. The sun in the Service of Mankind, UNESCO Paris 1973
- (67) Eaton, C.B. and Blum, H.A., The use of moderate vacuum environments as a means of increasing the collection efficiencies and operating temperatures of flat plate solar collectors, Solar Energy 17 (3), 151-158 (1975)
- (68) Kittle, P.A. and Cope, S.L., Outside performance of moderate vacuum solar collectors, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 32/8, July 1975
- (69) Beekley, D.C. and Mather, J.R., Analysis and experimental tests of high performance tubular solar collectors, Paper 32/10, Ibid
- (70) Ortabasi, U. and Buehl, W.M., Analysis and performance of an evacuated tubular collector, Paper 32/11, Ibid.
- (71) Read, W.R. and Christie, E.A., Thermal characteristics of evacuated tubular solar collectors, Paper 32/9, Ibid.
- (72) Bienert, W.B., Heat pipes applied to flat plate solar collectors, Proc. Workshop on Solar Collectors for Heating and Cooling of Buildings, 21-23 November 1974, NSF-RANN-75-019, May 1975.
- (73) Francken, J.C., The heat pipe fin, a novel design of a planar collector, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 34/8, July 1975.
- (74) Redpoint Associates Ltd., Cheney Manor, Swindon SN2 2QN, Wiltshire, UK. (1976).
- (75) Davison, R.R., Harris, W.B. and Chan Ho Kai, Design and performance of the compressed-film floating deck solar water heater, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 34/9, July 1975.
- (76) Vincze, S.A., A high-speed cylindrical solar water heater, Solar Energy 13, 339-344 (1971).
- (77) Vincze, S.A., Comparative winter tests, cylindrical versus flat plate solar heat collectors, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 14/8, July 1975
- (78) Lof, G.O.G., Space heating with solar air collectors, Proc. Workshop on Solar Collectors for Heating and Cooling of Buildings, 21-23 November 1974, NSF-RANN-75-019, May 1975.
- (79) Chandran, T.C., Private Communication, Kaira District Co-operative Milk Producers' Union Ltd., Anand. 388001, Gujarat, India, 1976.
- (80) Lof, G.O.G. and Nevens, T.D., Heating of air by solar energy, Ohio Journal of Science 53 (5), 272-280 (1953).
- (81) Lof, G.O.G., El Wakil, M.M. and Chion, J.P., Design and performance of domestic heating system employing solar-heated air - the Colorado Solar House, Proc. UN Conf. New Sources of Energy, 185-197, 1964.
- (82) Ward, J.C., Long term (16 years) performance of an overlapped-glass plate solar-air heater, Proc. Workshop on Solar Collectors for Heating and Cooling of Buildings, 21-23 November 1974, NSF-RANN-75-019, May 1975.
- (83) Close, D.J., Solar air heaters for low and moderate temperature application, Solar Energy 7 (3), 117-124 (1963).
- (84) Satcunanathan, S. and Deonarine, S., A two-pass solar air heater, Solar Energy 15, 41-49 (1973).
- (85) Bevil, V.D. and Brandt, H., A solar energy collector for heating air, Solar Energy 12, 19-29 (1968).
- (86) Lalude, O.A. and Buchberg, H., Design and application of honeycomb porous-bed solar air heaters, Solar Energy 13, 223-242 (1971).
- (87) Brachi, P., Sun on the roof, New Scientist, 19 September 1974.
- (88) Ramsey, J.W. and Borzoni, J.T., Effects of selective coatings on flat plate solar collector performance, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 34/5, July 1975.
- (89) Boyd, D.A., Gajewski, R., Granetz, R.S. and Winston, R., A concentrating flat plate collector, American Science and Engineering Inc., Cambridge, Mass. and Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Paper-ASE-3739-B, October 1975.
- (90) PPG Industries, Baseline Solar Collector, One Gateway Center, Pittsburgh, Pa. 15222, USA. (1974).
- (91) Israeli Standard No. 609, Solar Water Heaters : Test Methods, Israeli Standards Institute, Tel Aviv, May 1966.
- (92) Doron, B., Testing of solar collectors, Solar Energy 9 (2), 103-4 (1965)
- (93) Tabor, H., The testing of solar collectors, The Scientific Research Foundation, Jerusalem, March 1975 and ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 33/8, July 1975.
- (94) Dunkle, R.V. and Cooper, P.I., A proposed method for the evaluation of performance parameters of flat plate solar collectors, Paper 33/2, Ibid.
- (95) Hill, J.E. and Kusada, T., Method of testing for rating solar collectors based on thermal performance, NBSIR 74-635, National Bureau of Standards, Washington DC, 20234, December 1974.
- (96) Kelly, G.E. and Hill, J.E., Method of testing for rating thermal storage devices based on thermal performance, NBSIR 74-634, National Bureau of Standards, Washington DC, 20234, May 1975.
- (97) Simon, F.F. and Harlament, P., Flat plate collector performance evaluation : the case for a solar simulator approach, NASA TM X-71427, October 1973.
- (98) Simon, F.F., Flat plate solar collector performance evaluation with a solar simulator as a basis for collector selection and performance prediction, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 33/4, July 1975.

- (99) Keyes, J.H., Project Sungazer: A vertical-vented flat plate collector with forced-air heat transfer, Proc. Workshop on Solar Collectors for Heating and Cooling of Buildings, 21-23 November 1974, NSF-RANN, 75-012, May 1975.
- (100) Close, D.J. et al. Design and performance of a thermal storage air conditioning system, Mechanical and Chemical Transactions of the Institute of Engineers, Australia, 4 (1), 1968.
- (101) Read, W.R., Choda, A. and Copper, P.L., A solar timber kiln, Solar Energy 15 (4), 309-316 (1974).
- (102) Dunkle, R.V., Design considerations and performance predictions for an integrated solar air heater and gravel bed thermal store in a dwelling, Australian and New Zealand section ISES, Melbourne, July 1975.
- (103) Close, D.J. and Pryor, T.L., The behaviour of adsorbent energy storage beds, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 31/2, July 1975.
- (104) Telkes, M., Solar energy storage, ASHRAE Journal, 38-44, September 1974.
- (105) Severson, A.M. and Smith, G.A., Salt thermal energy storage for solar systems, ISES Congress, Extended Abstracts, Paper 31/3, July 1975.
- (106) Kosaka, M. and Asakina, M., Discussions on heat storage material at low temperature level, Paper 31/3, Ibid.
- (107) Ervin, G., Solar heat storage based on inorganic chemical reactions, Paper 31/6, Ibid.
- (108) Shelton, J., Underground storage of heat in solar heating systems, Solar Energy 17 (2), 137-143 (1975).
- (109) Harrison, D., Beadwalls, Solar Energy 17 (5), 317-319 (1975).

К главе 4

- (1) Telkes, M., A review of solar house heating, Heating and Ventilating, 46, pp 68-74, September 1949.
- (2) Hottel, H.C. and Woertz, B.B., The performance of flat-plate solar-heat collectors, Trans ASME 64, pp 91-104 (1942).
- (3) Nemethy, A., Heated by the sun, American Artisan, Residential Air Conditioning Section, August 1949.
- (4) Hutchinson, F.W., The solar house, a full-scale experimental study, Heating and Ventilating 42, pp 96-7, September 1945.
- (5) Hutchinson, F.W., The solar house, a research progress report, Heating and Ventilating 43, pp 53-55, March 1946.
- (6) Hutchinson, F.W., The solar house, a second research progress report, Heating and Ventilating 44, pp 55-59, March 1947.

- (7) Löf, G.O.G., Solar energy utilization for house heating, Office of the Publication Board, PB 25375, 1946.
- (8) Solar house heater yields 20% fuel saving in University of Colorado Experimental Installation, Arch. Forum 86, p 121, February 1947.
- (9) Shurcliff, W.A., Solar heated buildings - a brief survey, 19 Appleton St., Cambridge, Mass. 02138, USA. 8th Edition, March 1975.
- (10) Steadman, P., Energy, environment and building. A report to the Academy of Natural Sciences, Philadelphia, CUP, 1975.
- (11) Hottel, H.C., Residential uses of solar energy, Proc. World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix, Arizona, 1955.
- (12) Dietz, A.G.H. and Czapek, E.L., Solar heating of houses by vertical wall storage panels, ASHVE J. Heating, Piping and Air Conditioning 22, p 118, March 1950.
- (13) Engebretson, C.D., Use of solar energy for space heating: MIT Solar House No. IV, Proceedings of UN Conference on New Sources of Energy, Rome, 1961, pub. United Nations, New York, 1964.
- (14) Engebretson, C.D. and Ashar, N.G., Progress in space heating with solar energy, Paper number 60-WA-88, Winter ASME Meeting, November 27 to December 2, 1960.
- (15) Hottel, H.C. et alia, Panel on solar house heating, Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix, Arizona, 1955.
- (16) Bridgers, F.H., Paxton, D.D. and Haines, R.W., Performance of a solar heated office building, Heating, Piping and Air Conditioning 27, pp 165-170, November 1957.
- (17) Gilman, S.F., Evaluation of a solar energy heat pump system, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 42/8, July 1975.
- (18) Reynolds, J.S., Larson, M.B., Baker, M.S., Mathew, H. and Gray, R.L., The Atypical Mathew solar house at Coos Bay, Oregon, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 42/13, July 1975.
- (19) McDaniels, D.K., Lowndes, D.H., Mathew, H., Reynolds, J.S. and Gray, R.L., Enhanced solar collection using reflector-solar therm collector combinations, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 34/11, July 1975.
- (20) Mathew, H., Private communication, 1975.
- (21) Thomason, H.E., Solar space heating and air conditioning in the Thomason house, Solar Energy 4 (4) pp 11-19 (1960).
- (22) Thomason, H.E., Solar-heated house uses 1/2 hp for air conditioning, ASHRAE J. 4 (11) pp 56-62 (1962).
- (23) Thomason, H.E., Experience with solar houses, Solar Energy 10 (1) pp 17-22 (1966).
- (24) Thomason, H.E. and Thomason, H.J.L., Solar houses - heating and cooling progress, Solar Energy 15 (1) pp 27-39 (1973).

- (25) Böer, K.W., The solar house and its portent, Chem Tech 3, pp 394-9, July 1973.
- (26) Böer, K.W., Higging, J.H. and O'Connor, J.K., Solar One, Two Years Experience, Institute of Energy Conversion, University of Delaware. (Presented as paper 42/3, ISES World Congress, Los Angeles 1976, jointly with Kuzay, T.M., Malik, M.A.S., Telkes, M. and Windawi, H.M.).
- (27) Copper Development Association, 405 Lexington Avenue, New York, Press release, July 1975.
- (28) Curtis, E.J.W. and Komedere, M., The heat pump, Architectural Design, June 1956.
- (29) Curtis, E.J.W., Solar energy applications in architecture, Department of Environmental Design, Polytechnic of North London, February 1974.
- (30) Davies, M.G., Model studies of St. George's School, Wallasey, JHVE 39, p 77, July 1971
- (31) Davies, M.G., Sturrock, N.S. and Benson, A.C., Some results of measurements in St. George's School, Wallasey, JHVE 39, p 80, July 1971.
- (32) Davies, M.G., The contribution of solar gain to space heating, Sun at Work in Britain 3, June 1976.
- (33) Szokolay, S.V., Design of an experimental solar heated house at Milton Keynes, UK ISES Conference on Low Temperature Collection of Solar Energy, April 1974.
- (34) Solar heated house in Milton Keynes, Milton Keynes Development Corp., Wavendon Tower, Wavendon, Milton Keynes MK17 8LX, UK.
- (35) Pike, A., The Cambridge Autonomous House, UK ISES Conference on Solar Energy in Architecture and Planning, April 1975.
- (36) Energy and Housing Symposium, Open University, Milton Keynes, Building Science, p 127, 31st October 1974.
- (37) McLaughlin, T.P., A House For The Future, Independent Television Books Ltd., London, 1976.
- (38) Seymour-Walker, K., Low energy experimental houses, BRE News 34, pp 12-13 (1975).
- (39) Climatisation des Habitations Bilan Schematic des Realisations 1956-1972, CNRS Groupe des Laboratoires d'Odeillon (Pyrenees Orientales).
- (40) Robert, J.F., Solar energy work in France, Conference on Solar Energy Utilization, UK ISES, July 1974.
- (41) Trombe, F., Robert, J.F., Cabanat, M. and Sesolic, B., Some performance characteristics of the CRNS solar houses, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 42/3, July 1975.
- (42) Scientific American, May 13th 1882.
- (43) Bruno, R., Hermann, W., Horster, H., Kersten, R. and Madhujari, The utilisation of solar energy and energy conservation in the Philips Experimental House, ISES Congress Los Angeles. Extended Abstracts. Paper 41/8. July 1975.
- (44) Philips Forschungslaboratorium, Aachen. The Experimental House 1975.
- (45) Kreider, J.F., The Stationary Reflector/Tracking Absorber Solar Concentrator US ISES Annual Meeting, Fort Collins Colorado 1974.
- (46) Hay, H.R. and Yellott, J.I., A naturally air-conditioned building, Mechanical Engineering 92, pp 19-25, January 1970.
- (47) Hay, H.R., Roof, ceiling and thermal ponds, ISES Congress Los Angeles Extended Abstracts, Paper 41/16, July 1975.
- (48) Niles, P.W.B., Thermal evaluation of a house using a movable-insulation heating and cooling system, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 42/1, July 1975.
- (49) Haggard, K.L., The architecture of a passive system of diurnal heating and cooling, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 47/5 July 1975.
- (50) California Polytechnic, Research evaluation of a system of natural air conditioning, HUD contract no. H 2026 R., January 1975.
- (51) Bourne, R.C., A volume collector-heat pump demonstration house, ISES Congress, Los Angeles Extended Abstracts, Paper 14/13, July 1975.
- (52) Wormser, E.M., Design, performance and architectural integration of a solar heating system using a reflective pyramid optical condenser, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 52/8, July 1975.
- (53) ISES News No 12, 7, June 1975.

К главе 5

- (1) Brinkworth, B.J., Solar Energy for Man, 115-146, Compton Press, Salisbury, Wiltshire, 1972.
- (2) Zarem, A.M. and Erway, D.D. (ed.), Introduction to the Utilisation of Solar Energy, 145, McGraw Hill, 1963.
- (3) Farber, E.A., The University of Florida solar energy laboratory, Conf. The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973.
- (4) Farber, E.A. and Prescott, F.L., A solar powered V-2 vapor engine, Ibid.
- (5) Farber, E.A., Solar energy conversion research and development at the University of Florida, Building Systems Design, February/March 1974.
- (6) West, C.D., The Fluidyne heat engine, Proc. Conf. Solar Energy Utilisation, UK Section, ISES, 54-59, July 1974.
- (7) Rao, D.P. and Rao, K.S., Solar water pump for lift irrigation, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 13/12, July 1975.

- (8) Frank, F.C. and Ashbee, K.H.G., Heat engine uses metal working substance, Spectrum 132, 2-4 (1975).
- (9) Banks, R., Nitinol heat engines, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 53/4, July 1975.
- (10) Francia, G., Pilot plants of solar steam generation stations, Solar Energy 12 (1), 51-64 (1968).
- (11) Sobin, A., Wagner, W. and Easton, C.R., Central collector solar energy receivers, Solar Energy 18 (1), 21-30 (1976).
- (12) Vant-Hull, L.L. and Hildebrandt, A.F., Solar thermal power system based on optical transmission, Solar Energy 18 (1), 31-39 (1976).
- (13) Blake, F.A., 100 MWe solar power plant design configuration and performance, NSF-RANN Grant No. AER-74-07570, Martin Marietta Aerospace, Denver, 1975.
- (14) Claude, G., Power from the tropical sea, Mechanical Engineering 52 (12), 1039-1044, December 1930.
- (15) Anderson, J.H. and Anderson, J.H. Jr., Large-scale sea thermal power, ASME Paper No. 65-WA/SOL-6, December 1965.
- (16) McGowan, J.G., Ocean thermal energy conversion - a significant solar resource, Solar Energy 18 (2), 81-92 (1976).
- (17) Glaser, P.E., Power from the sun - its future, Science 162, 857-861, November 1968.
- (18) Glaser, P.E., The case for solar energy, Conf. Energy and Humanity, Queen Mary College, London, September 1972.
- (19) Kettani, M.A. and Gonsalves, L.M., Heliohydroelectric Power Generation, Solar Energy 14 (1972).
- (20) Kettani, M.A., Climatological factors on heliohydroelectric power generation, Paper E38, Conf. The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973.
- (21) Kettani, M.A., Solar energy activity in Saudi Arabia, Description of the Solar Energy R. & D. programs in many nations, US-ERDA, Contract E(04-3)-1122, February 1976.
- (22) Abbot, C.G., The sun and the welfare of man, Smithsonian Institution, New York, 1929.
- (23) Ghai, M.L., Bansal, T.D. and Kaul, B.N., Design of reflector-type direct solar cookers, Journal of Scientific and Industrial Research 12A (4), 165-175 (1953).
- (24) Ghai, M.L., Pandher, B.S. and Harikishandass, Manufacture of reflector-type direct solar cooker, Journal of Scientific and Industrial Research 13A (5), 212-216 (1954).
- (25) Duffie, J.A., Lappala, R.P. and Lof, G.O.G., Plastics in solar stoves, Modern Plastics, November 1957.
- (26) Alward, R., Lewand, T.A. and Hopley, P., Description of a large scale solar steam cooker in Haiti, Paper E46, Conf. The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973.
- (27) Whillier, A., How to make a solar steam cooker, Brace Research Institute, McGill University, Do-it-yourself Leaflet L2, January 1965.
- (28) Trombe, F., Solar furnaces and their applications, Solar Energy 1, 9 (1957).
- (29) Trombe, F. and Le Chat Vinh, A., Thousand kW solar furnace built by the National Center of Scientific Research in Odeillo (France), Solar Energy 15 (2), 57-62 (1973).
- (30) Arifov, U.A., Development of solar engineering in the USSR, Geliotechnika 8 (6), 3 (1972).
- (31) Trombe, F., Gion, L., Royere, C. and Robert, J.F., First results obtained with the 1000 kW solar furnace, Solar Energy 15 (2), 63-66 (1973).
- (32) Nogucki, T., Mizuno, H. and Yamada, T., High temperature solar furnace studies, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 23/1, July 1975.
- (33) Mizuno, M., High temperature phase studies on the system $Al_2O_3-Ln_2O_3$ with a solar furnace, Paper 23/2, Ibid.
- (34) Spitzberg, L.A. and Williams, J.K., A linear solar concentrator system, Paper 51/8, Ibid.
- (35) Northrup, L.L. and O'Neill, M.J., A practical concentrating solar energy collector, Paper 51/7, Ibid.
- (36) Nelson, D.T., Evans, D.L. and Bansal, R.K., Linear Fresnel Lens Concentrators, Paper 51/5, Ibid.
- (37) Harmon, S., Solar optical analysis of a mass-produced plastic circular Fresnel Lens, Paper 51/11, Ibid.
- (38) Lof, G.O.G. and Tybout, R.A., The design and cost of optimized systems for residential heating and cooling by solar energy, Solar Energy 16 (1), 9-18 (1974).
- (39) Teagan, W.P. and Sargent, S.L., A solar-powered combined heating and cooling system, Paper EH-94, Conf. The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973.
- (40) Prigmore, D., and Barber, R., Cooling with the sun's heat, Solar Energy 17 (3), 185-192 (1975).
- (41) Farber, E.A., Morrison, C.A., Ingley, H.A., Clark, J.A. and Suarez, E., Solar operation of ammonia/water air conditioner, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 44/7, July 1975.
- (42) Satchunanathan, S. and Kochhar, G.S., Optimum operating conditions of ammonia-water absorption systems for flat plate solar collector temperatures, Paper 44/4, Ibid.

- (43) Swartman, R.K., Vinh Ha and Newton, A.J., Review of solar-powered refrigeration, Paper 73-WA-SOL-6, ASME, 1974.
- (44) Swartman, R.K., A combined solar heating/cooling system, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 44/8, July 1975.
- (45) Wilbur, P.J. and Mitchell, C.E., Solar absorption air conditioning alternatives, Solar Energy 17 (3), 193-199 (1975).
- (46) Rush, W., Wurn, J., Wright, L. and Ashworth, R.A., A description of the Solar-MEC field test installation, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 44/9, July 1975.
- (47) Thomson, H.E. and Thomson, H.J.L., Solar houses/heating and cooling progress report, Solar Energy 15 (1), 27-40 (1973).
- (48) Hogg, F.C., A switched bed regenerative cooling system, Proc. XIIIth Int. Conf. on Refrig., Washington, 4, 1971.
- (49) Reed, W.R. et al, Use of RBR Systems in South Australian Schools, Aus. Refrig., Air Cond. and Heating 26 (12), 20-27 (1972).
- (50) Yanagimachi, M., Report on two and a half year's experimental living in Yanagimachi Solar House II, Proc. UN Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961.
- (51) Bliss, R.W. and Bliss, M.D., Performance of an experimental system using solar energy for heating and night radiation for cooling, *Ibid.*
- (52) Hay, H.R., Roof-, ceiling- and thermal-ponds, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 41/16, July 1975.
- (53) Catalanotti, S., Cuono, V., Piro, G., Ruggi, D., Silvestrini, V. and Troise, G., The radiative cooling of selective surfaces, Solar Energy 17 (2), 83-90 (1975).
- (54) Heap, R., Heat pumps, Ambient Energy Conference, Interbuild, London, 1975, reported in Heating and Ventilating News, December 1975.
- (55) Griffiths, M.V., Some aspects of heat pump operation in Great Britain, Proc. I.E.E., 104A, 262-78, 1956.
- (56) Vale, B. and Vale, R., The autonomous house, 87-107, Thames and Hudson, London, 1975.
- (57) McVeigh, J.C., Solar heating feasibility report, Appendix D, Clumber Park : an interpretive study, Countryside Commission, Cheltenham, 1976.
- (58) Bourne, R.C., A volume collector-heat pump demonstration house, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 14/13, July 1975.
- (59) Mumma, S.A. and Sepsy, G.F., A comparative experimental study of direct solar heating and solar assisted heat pump heating, Paper 45/2, *Ibid.*
- (60) Tabor, H., Large-area solar collectors for power production, Solar Energy 7, 189-194 (1963).
- (61) Saulnier, B., Chepurnyi, N., Savage, S.B. and Lawand, T.A., Field testing of a solar pond, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 35/1, July 1975.
- (62) Weinberger, H., The physics of the solar pond, Solar Energy 8, 45-56 (1964).
- (63) Rabl, A. and Nielsen, C.E., Solar ponds for space heating, Solar Energy 17 (1), 1-12 (1975).
- (64) Styris, D.L., Zaworski, R.J., Harling, O.K. and Leshuk, J., The non-convecting solar pond. Some applications and stability problem areas. US ERDA Contract No. AT(45-1)-1830 and ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 35/2, July 1975.
- (65) Dickenson, W.C., Clark, A.F., Day, A.J. and Wouters, L.F., The shallow solar pond energy conversion system, Solar Energy 18 (1), 3-10 (1976).
- (66) Talbert, S.G., Eibling, J.A. and Lof, G.O.G., Manual on solar distillation of saline water, Office of Saline Water, US Dept. of Interior, Research and Development Progress Report No. 546, 1970.
- (67) United Nations Dept. of Economic and Social Affairs, Solar distillation as a means of meeting small-scale water demands, UN Sales No. E 70 II B1, 1970.
- (68) Read, W.R.W., A solar still for water desalination, Report ED 9, CSIRO, Melbourne, 1965.
- (69) Cooper, P.I. and Read, W.R.W., Design philosophy and operating experience for Australian solar stills, Solar Energy 16 (1), 1-8 (1974).
- (70) Aegean Island installs world's largest solar distillation plant, Civil Engineering and Public Works Review, 1005, September 1967.
- (71) Porteous, A., Fresh water for Aldabra, Engineering p.490, 15 May 1970.
- (72) McCracken, H., Solar stills for residential use, Paper E 6, Conf. The Sun in the Service of Mankind, UNESCO, Paris, 1973.
- (73) Howe, E.D. and Tleimat, B.W., Twenty years of work on solar distillation at the University of California, Solar Energy 16 (2), 97-105 (1974).
- (74) Garg, H.P. and Mann, H.S., Effect of climatic, operational and design parameters on the year round performance of single sloped and double sloped solar still under Indian arid zone conditions, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 46/4, July 1975.
- (75) Proctor, D. and Morse, R.N., Solar Energy for the Australian food processing industry, Paper 43/2, *Ibid.*

К главе 6

- (1) Telkes, M., Solar thermoelectric generators, Journal of Applied Physics 25 (6), 765-777, June 1954.
- (2) Utilization of Solar Energy, Report of the NPL Committee (UK), published in Research 5, 522-529 (1952).
- (3) Solar energy : a UK assessment, UK Section, ISES, London, 1976.
- (4) Cohen, C.L., In Japan, clean energy comes first, Electronics 47 (7), 104-5 (1974).
- (5) An Assessment of Solar Energy as a National Energy Resource, NSF/NASA Solar Energy Panel, 1972.
- (6) Currin, C.C., Ling, K.S., Ralph, E.L., Smith, W.D. and Stirn, R.J., Feasibility of low cost silicon solar cells, 9th Photovoltaic Specialists Conference, Maryland, May 1972.
- (7) Mytton, R.J., Progress in the development of cadmium sulphide terrestrial solar batteries, Proc. Conf. on Photovoltaic Cells, UK Section, ISES, November 1974.
- (8) Boer, K.W. et al, CdS/Cu₂S solar cells for large scale terrestrial applications, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 21/7, July 1975.
- (9) Saha, H., Metal-Cu₂S Schottky barrier solar cell, Paper 21/9, Ibid.
- (10) Rosenblatt, A.I., Energy crises spurs development of photovoltaic power sources, Electronics 47 (7), 106 (1974).
- (11) Richards, E.R., The use of solar cells in the maritime field, Proc. Conf. on Photovoltaic Cells, UK Section, ISES, November 1974.
- (12) Polgar, S., Use of solar generators in Africa for broadcasting equipments, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 13/1, July 1975.
- (13) Haas, G.M., Bloom, S. and Cherdak, A., Experience to date with the Mitre Terrestrial Photovoltaic Energy System, Paper 21/3, Ibid.
- (14) A sort of battery, New Scientist 63 (905), 77 (1974).
- (15) Post, R.F. and Post S.F., Flywheels, Scientific American 17, December 1973.
- (16) Dawson, J.K., Prospects for hydrogen as an energy resource, Nature 249, 724-726, 21 June 1974.
- (17) Mlavsky, A.I., Press release comments, Tyco Laboratories Inc., Waltham, Mass. 02154, 1974.
- (18) Kobayashi, M., A proposal for a consistent process of manufacturing silicon for solar cells from silica by the use of solar energy, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 21/6, July 1975.
- (19) Lalor, E., Solar Energy for Ireland, National Science Council, Dublin, February 1975.
- (20) Hall, D.O., Photobiological energy conversion, Sun at Work in Britain 1, 14-17 (1974).
- (21) Long, S., The photosynthetic potential of C₄ - plants in cool temperate ecosystems with particular reference to *Spartina townsendii*, Proc. Conf. Solar Energy : Biological conversion systems, UK Section, ISES and British-Photobiological Society, June 1975.
- (22) Burrow, A.C. and Taylor, L.E., Growing Milowatts - bring back the axes, Ballarat Institute of Advanced Education, Australia, 1974.
- (23) Reed, T.B., Bioconversion of solar energy, Testimony before the US House of Representatives Subcommittee on Energy, 18 June 1974.
- (24) Read, W.R. and Czech, J., Operating experience with a solar timber kiln, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 46/2, July 1975.
- (25) Akyurt, M. and Selouk, M.K., A solar drier supplemented with auxiliary heating systems for continuous operation, Solar Energy 14, 313-320 (1973).
- (26) Peart, R.M. and Foster, G.H., Grain drying with solar energy, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 46/1, July 1975.
- (27) Wolf, M., Utilization of solar energy by bioconversion - an overview, Testimony before the US House of Representatives Science and Astronautics Committee, 13 June 1974.
- (28) Mitsui, A., Long range concepts : applications of photosynthetic hydrogen production and nitrogen fixation research, Conf. Capturing the Sun through Bioconversion, Washington, March 1976.
- (29) Making curry and haggis from leaves, The Times, 1 April 1976.
- (30) Cooper, A., Papers on the nutrient film technique, The Glasshouse Crops Research Institute, Littlehampton, Sussex, 1975-6.
- (31) Lawand, T.A., Alward, R., Saulnier, B., and Brunet, E., The development and testing of an environmentally designed greenhouse for colder regions, Solar Energy 17 (5), 307-312 (1975).
- (32) Schneider, T.R., Substitute Natural Gas from Organic Materials, ASME Winter Meeting, New York, 27-30 November 1972.
- (33) Archer, M.D., Photochemical Aspects of Solar Energy Conversion, in Photochemistry 6, ed. D. B. B. Smith, Chemical Society, Specialist Periodical Report, London, 1975.
- (34) Archer, M.D., The outlook for photochemical energy conversion, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 22/3, July 1975.
- (35) Porter, G., Photochemical energy conversion, Sun at Work in Britain 1 12-13 (1974).
- (36) Chark, W.D.K. and Echert, J.A., Photogalvanic Cells, Solar Energy 17 (3), 147-150 (1975).

К главе 7

- (1) Blackwell, B.F. and Feltz, L.V., Wind energy - a revitalized pursuit, SAND-75-0166, Sandia Laboratories Energy Report (March 1975).
- (2) Reed, J.W., Maydew, R.C. and Blackwell, B.F., Wind energy potential in New Mexico, SAND-74-0077, Sandia Laboratories Energy Report (July 1974).
- (3) Juul, J., Wind Machines, Wind and Solar Energy Conference, New Delhi, UNESCO (1956).
- (4) Golding, E.W. and Stodhart, A.H., The use of wind power in Denmark, ERA Technical Report C/T 112 (1954).
- (5) Clark, W., Energy for survival, p. 539, Anchor Press, New York, 1975.
- (6) Putnam, P.C., Power from the wind, D. Van Nostrand, New York, 1948.
- (7) Gimpel, G., The windmill today, ERA Technical Report IB/T22 (1958).
- (8) Cameron Brown, C.A., Windmills for the generation of electricity, Institute for Research in Agricultural Engineering, Oxford University, 1933.
- (9) Powell, F.E., Windmills and wind motors, Percival Marshall & Co., London, 1928.
- (10) Golding, E.W., The generation of electricity by wind power, E. & F Spon 1955. Reprinted CIT 1976.
- (11) Venters, J., The Orkney windmill and wind power in Scotland, The Engineer, 27th January 1950.
- (12) Wind generated electricity prototype 100-kW plant, Engineering 179, 4652, 28th March 1955.
- (13) Tagg, J.R., Wind driven generators: The difference between the estimated output and actual energy obtained, ERA Technical Report C/T 123 (1960).
- (14) Golding, E.W. and Stodhart, A.H., The potentialities of windpower for electricity generation, British Electrical and Allied Industries Research Association, Tech. Rep. W/T16 (1949).
- (15) Davenport, A.G., Proceedings of the (1964) Conference on Wind Effects on Building and Structure Vol. 1, HMSO (1965).
- (16) Caton, P.G., Standardised maps of hourly mean wind speed over the United Kingdom and some implications regarding wind speed profiles, Fourth International Conference on Wind Effects on Building and Structures, London, 1975.
- (17) Hayment, R., Wind energy in the U.K., The Building Services Engineer, 44, 63-69 (June 1976).
- (18) Montin, G.W.W., The bland economics of windpower, Wind Energy Supply Company, Redhill (1975).

- (19) Tables of surface wind speed and direction over the United Kingdom, Meteorological Office, Met 0792, HMSO (1968).
- (20) Darrieus, G.J.M., Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current, US Patent 1,835,018, 8th December 1931.
- (21) Klemin, A., The Savonius wing rotor, Mechanical Engineering 47, No. 11, (November 1925).
- (22) Savonius, S.J., The S-rotor and its application, Mechanical Engineering 53, No. 5 (May 1931).
- (23) Brace Research Institute, McGill University, Montreal, Canada.
- (24) South, P. and Rangi, R.S., A wind-tunnel investigation of a 14 ft diameter vertical-axis windmill, National Research Council of Canada, LTR-LA-105 (September 1972).
- (25) South, P. and Rangi, R.S., The performance and economics of the vertical-axis wind turbine developed at the National Research Council, Ottawa, Canada, Agricultural Engineer (February 1974).
- (26) Kocivar, B., World's biggest windmill turns on for large-scale wind-power, Popular Science (March 1976).
- (27) Puthoff, R.L. and Sirocky, P.J., Preliminary design of a 100 kW wind turbine generator, NASA, NASA TM X-71585 (August 1974).
- (28) Hamilton, R., Can we harness the wind?, National Geographic (December 1975).
- (29) Hinrichsen, D. and Cawood, P., Fresh breeze for Denmark's windmills, New Scientist, 567-570, 10th June 1976.
- (30) Solar Energy: a UK assessment, UK Section ISES, London (May 1976).
- (31) Lewis, R.I., Wind power for domestic energy, Appropriate Technology for the U.K., University of Newcastle-upon-Tyne (March 1976).
- (32) Lilley, G.M. and Rainbird, W.J., A preliminary report on the design and performance of directed windmills, ERA Technical Report C/T 119, (1957).
- (33) Environmental Design Group, Wind-Solar Folio, Proposals for the Lewes District Council, Sussex (1975).

К главе 8

- (1) Dewhurst, J. and McVeigh, J.C., A low-cost solar heater, The Heating and Ventilating Engineer, March 1968.
- (2) McVeigh, J.C., Some experiments in heating swimming pools by solar energy, J.I.H.V.E. 39, pp 53-55, June 1971.
- (3) How to heat your swimming pool using solar energy, Brace Research Institute, McGill University, January 1965, revised February 1973.

- (4) deWinter, F. and Lyman, W.S., Home built solar water heaters for swimming pools, ISES Congress 'The Sun in the Service of Mankind' Paris 1973
- (5) Plumb, M., Solar tanning for swim pool heating bill, Sussex Express and County Herald, 28th May 1976.
- (6) Carter The Hon. Mrs B.. Brenca Solar Exports Ltd., Rogate, Hants.
- (7) Heywood, H., An appraisal of the use of solar energy, Society of Engineers 57, p 155 (1966).
- (8) Heywood, H., Solar Energy: Past, present and future applications, Engineering 176, p 409 (1953).
- (9) Brachi, P., Sun on the roof, New Scientist, 19th September 1974.
- (10) Scoville, A.E., An alternative cover material for solar collectors, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 30/11, July 1975.
- (11) Duffie, J.A. and Beckman, W.A., Solar Energy Thermal Processes, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- (12) Solar Water Heaters, CSIRO Division of Mechanical Engineering, Circular No. 2, 1964.
- (13) McVeigh, J.C., Advances in Solar Energy, Heating and Ventilating News, September 1975.
- (14) How to build a solar water heater, Brace Research Institute, McGill University, February 1965, revised February 1973.
- (15) Solar Water Heaters, a summary of (12), J.I.H.V.E. p 309, January 1967.
- (16) Reynolds J.S. et al. The Atypical Mathew Solar House at Coos Bay, Oregon, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 43/12, July 1975.
- (17) McVeigh, J.C., Developments in solar energy utilisation in the United Kingdom, ISES Congress, Los Angeles, Extended Abstracts, Paper 10/4, July 1975.
- (18) Richards, S.J. and Chinnery, D.N.W., A solar water heater for low-cost housing, National Building Research Institute, Bulletin 41, CSIR Research Report 237, Pretoria, South Africa 1967.
- (19) Heywood, H., Operating experiences with solar water heating, J.I.H.V.E. 39, pp 63-69, June 1971.
- (20) Harris, J., The British solar panel is born, Building Services Engineer 42, p 432, October 1974.
- (21) Building Research Establishment, Energy Conservation: a study of energy conservation in buildings and possible means of saving energy in housing, BRE Current paper CP 56/75, 1975.
- (22) Courtney, R.G., An appraisal of solar water heating in the UK, BRE Current paper CP 7/76, 1976.
- (23) Awards for Solar Heating, Architects Journal, 10th September 1975,
- (24) Swinburne, A., CDA Solar Heating Forum, Southampton 1976, reported in Heating and Ventilating News 19 (7)(1976).
- (25) Chinnery, D.N.W., Solar Water Heating in South Africa, National Building Research Institute, Bulletin 44, CSIR Research Report 248, Pretoria, South Africa, 1967.
- (26) Bräd, Differential Temperature Controller Plan, Eithin-y-Caer, Churchstoke, Powys.
- (27) O'Connel, J.C., The problems associated with the use of differential temperature controllers, Solar Energy for Buildings Seminar, North East London Polytechnic, February 1976.
- (28) Booker, C. and Gray, B., Inflation? But we are burning money, The Observer, London, 6th October 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава первая. Введение и исторический обзор	5
Глава вторая. Солнечное излучение	14
Глава третья. Устройства для нагрева воды и воздуха	24
Глава четвертая. Применение солнечной энергии для отопления	65
Глава пятая. Преобразование солнечной энергии в теп- ловую и ее использование	112
Глава шестая. Фотоэлементы, биологические системы преобразования энергии и фотохимия	136
Глава седьмая. Энергия ветра	150
Глава восьмая. Вопросы практического применения си- стем солнечного нагрева	161

Д. Мак-Вейг

ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Редактор издательства А. В. Ежков
Обложка художника И. Е. Сайко
Технический редактор В. В. Хапаева
Корректор Г. А. Полонская
ИБ № 2586 («Энергия»)

Сдано в набор 30.04.81 Подписано в печать 17.09.81 Формат 84×108¹/₃₂
Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литературная Печать высокая
Усл. печ. л. 11,34 Уч.-изд. л. 12,22 Тираж 5900 экз. Заказ 1240 Цена 80 к.

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государствен-
ном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной
торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10