

6Л2

Д 23

31.6

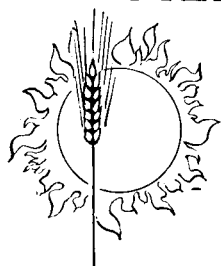
П071620

В. С. ДВЕРНЯКОВ

# СОЛНЦЕ- ЖИЗНЬ, ЭНЕРГИЯ

В. С. ДВЕРНЯКОВ

# СОЛНЦЕ- ЖИЗНЬ, ЭНЕРГИЯ



Книга посвящена волнующей человечество энергетической проблеме. В ней рассказывается о процессах, протекающих на Солнце и Земле, видах солнечно-земных связей, принципах использования солнечной энергии для теплоснабжения зданий, теплиц, успехах космического материаловедения и технологии с использованием солнечной энергии.

Для широкого круга читателей.

Ответственный редактор  
академик АН УССР В. И. ТРЕФИЛОВ

Рецензенты

доктор физико-математических наук В. Г. ЛИТОВЧЕНКО  
кандидат физико-математических наук М. К. РОДИОНОВ

Редакция научно-популярной литературы  
Заведующий редакцией А. М. АЗАРОВ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЕ ИЗДАНИЕ

ВАСИЛИЙ СЕМЕНОВИЧ ДВЕРНЯКОВ

**СОЛНЦЕ — ЖИЗНЬ, ЭНЕРГИЯ**

Печатается по решению Редакционной коллегии  
научно-популярной литературы АН УССР

Редактор Л. А. Лащенко. Оформление художника Л. Г. Гончаровой. Художественный редактор И. В. Козий. Технический редактор Б. М. Кричевская. Корректоры Э. В. Ткаля, Д. Я. Кашпер, Л. И. Семенюк.

ИБ № 7784

Сдано в набор 16.06.86. Подп. в печ. 27.11.86. БФ 01162. Формат 84×108/32. Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Выс. печ. Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 6,2. Уч.-изд. л. 6,73. Тираж 5000 экз. Заказ 6-635. Цена 25 к.

Издательство «Наукова думка». 252601 Киев 4, ул. Репина, 3.  
Киевская книжная типография научной книги, 252004 Киев 4, ул. Репина, 4.

### СОЛНЦЕ И ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В НЕМ

#### ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Так называемая небулярная гипотеза образования Солнечной системы была выдвинута более 300 лет назад Р. Декартом. Примерно 4,6 млрд. лет назад в межзвездном пространстве на периферии нашей Галактики в результате сжатия образовалось огромное облако из газа и пыли, которое, вращаясь все быстрее, постепенно приняло форму диска. Затем на одной из стадий эволюции центральная часть тела стала настолько массивной, плотной и горячей, что в ней начались ядерные реакции. И тогда оно стало звездой — Солнцем. Из частиц окружающей пыли в результате аккреции<sup>1</sup> сформировались планеты и их спутники. Эта гипотеза кажется достаточно простой и правдоподобной. Однако исследователи, занимающиеся вопросами происхождения и эволюции Солнца, расходятся в деталях.

Поэтому в настоящее время не существует общепринятой теории, которая могла бы объяснить, как образовалось первоначальное протопланетное облако, как и когда Солнце начало светить, как и когда образовались планеты.

П. Лаплас развил первоначальную идею Р. Декарта и объяснил, почему газопылевое облако, из которого образовалось Солнце, должно было вращаться с возрастающим ускорением: по закону сохранения момента количества движения уменьшение радиуса вращающейся массы компенсируется увеличением скорости вращения. Он предположил, что от этого облака должна была отделиться серия колец, из которых сформировались планеты и спутники.

В 1745 г. Ж. де Бюффи выдвинул дуалистическую теорию происхождения Солнечной системы. Массивное тело

---

<sup>1</sup> Аккреция — процесс поглощения, собирания из окружающего пространства рассеянного вещества (пыли, газа) достаточно массивным телом.

(он считал, что это была комета) прошло вблизи от Солнца и вырвало из него вещество, из которого впоследствии образовались планеты и их спутники. В настоящее время эта теория не принята, поскольку большая часть вырванной из Солнца материи должна была бы упасть обратно или рассеяться, прежде чем из этих конденсатов смогли образоваться планеты.

Основная причина существования в XVIII — XIX вв. большого числа разнообразных теорий происхождения Солнечной системы заключалась в отсутствии данных наблюдений, которые могли быть объяснены теорией.

За последние три десятилетия получено огромное количество новой информации с помощью космических аппаратов, запущенных к различным планетам Солнечной системы, а также в результате исследований метеоритов, позволяющей расширять наши знания.

Метеориты являются образцами первичной материи Солнечной системы. В их веществе заключены газы, содержащиеся в протопланетном облаке. При минералогическом анализе метеоритов можно рассчитать температуры и давления, существовавшие в облаке во время химических реакций между отдельными частицами пыли и окружающим газом. По относительному количеству содержащихся в метеоритах продуктов радиоактивного распада можно определить время объединения и формирования их родительских тел.

Изучая изображения твердых поверхностей планет, переданные на Землю с космических кораблей, можно узнать о протекающих на них вулканических и геологических процессах.

Мы уже знаем, что наша Галактика примерно в два-три раза старше Солнечной системы. Многое выяснилось о процессах рождения и гибели звезд, о том, какие химические элементы, образовавшиеся в результате ядерных реакций в недрах взрывающихся звезд, вошли в состав крошечных пылинок и как эти последние объединились в темные туманности, поглощающие свет далеких звезд. Крупинки, состоящие из пыли межзвездных газов, представляют собой сырье, из которого сформировалось солнечное протопланетное облако.

Какова природа этого облака и как оно эволюционировало? Когда образовалось Солнце? Как возникли планеты? Почему они приобрели ту или иную форму? Из различных оценок размера первичного протопланетного облака вытекают совершенно разные картины его структуры.

Вещество планеты в самом общем виде можно разделить на три класса: горные породы, льды, газы. Составляющими горных пород являются железо, оксиды и силикаты магния, а также других металлов, в основном алюминия и кальция. При давлениях, характерных для первичного протопланетного облака, и температурах в пределах от 1000 до 1800 К, все эти вещества должны существовать в твердой фазе. Меркурий, Венера, Земля, Марс, Луна и два из главных спутников Юпитера в основном состоят из горных пород. Смесь горных пород и льда представлено вещество Урана и Нептуна, в меньшей мере — Сатурна и Юпитера.

Водород и инертные газы, самые летучие элементы, при любой возможной температуре протопланетного облака будут оставаться в газообразном состоянии. В пределах Солнечной системы эти вещества в той мере входят в состав тел, в которой могут удерживаться в планетных атмосферах силой тяжести, а при наличии кислорода — образуют химические соединения, например воду.

Планеты образовались в результате накопления межзвездных пылинок и последующего увеличения их массы за счет налипания газов. При столкновении эти частицы приклеиваются одна к другой, образуя комплексы. По прошествии некоторого времени эти комплексы пылинок будут объединяться в большие конгломераты, а иногда распадаться. За десятки и сотни лет комплексы могут оседать сквозь газ по направлению к плоскости симметрии протопланетного облака.

После того как сформировались планеты, большая часть газа солнечного протопланетного облака должна остаться на орбитах вокруг Солнца вместе с бесчисленным количеством малых тел и несвязанной пыли. Каким же образом околосолнечное пространство было очищено от этих тел и пыли?

Известно, что на одной из стадий эволюции молодые звезды выбрасывают материю с громадной скоростью. Можно считать, что Солнце прошло через подобную стадию и вызванный ею жестокий *ветер* разогнал солнечное протопланетное облако, унеся оставшийся газ в пространство. Внутренние планеты освободились от остатков первичной атмосферы, состоящей из водорода, гелия и пыли протопланетного облака, а внешние должны были сформироваться и захватить водород и гелий прежде, чем солнечный ветер смог бы их унести.

Для того чтобы протосолнце *разгорелось*, плотность вещества в его центре должна была достичь величины, по

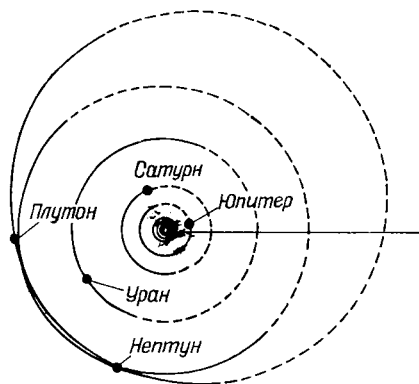
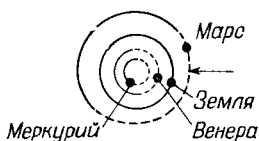


Рис. 1.  
Схема  
строения  
Солнечной  
системы.



крайней мере в сто раз превышающей нынешнюю. Только при этом условии могли начаться термоядерные реакции и подуть интенсивный ветер, а Солнце приобрело теперешнюю конфигурацию.

В тот момент, когда засветилось Солнце и возник ветер, сдувавший газ, началось окончательное очищение межпланетного пространства и завершение формирования планет.

Солнечный свет действует на частицы как сопротивляющаяся среда, заставляя их смещаться по спирали к Солнцу, а на твердые тела большого размера — иначе. Температура освещенных Солнцем участков их поверхности выше, чем теневых, следовательно, они испускают значительно больше света. В результате возникают силы, которые могут вызвать возмущение орбиты тела либо в сторону Солнца, либо в противоположную, в зависимости от направления вращения тела. Образно говоря, солнечный свет как бы выметает большинство тел малых размеров, оставшихся после формирования Солнечной системы. Это одна из гипотез, но она не исключает других.

Солнечный шар, раскаленный в результате термоядерных реакций, излучает равномерно во все стороны световую энергию мощностью  $(L_{\odot}) = 3,83 \cdot 10^{26}$  Вт. На Землю, например, попадает лишь половина миллиардной доли всего солнечного излучения. Эта величина, умноженная на светимость Солнца, дает световую энергию, изливающуюся на нашу планету. Ее мощность достигает  $1,75 \times 10^{17}$  Вт.

Водород и гелий могут удерживаться в атмосфере только достаточно массивных тел. Такие планеты, очевидно, потому и стали гигантами, что водород и гелий — самые распространенные элементы Солнечной системы. Кроме того, падение равновесной радиационной температуры с удалением от Солнца привело к тому, что эти планеты, состоящие из легких элементов, расположены на перифе-

рии Солнечной системы, а малые, составленные из плотного вещества,— близко к Солнцу.

Схема строения Солнечной системы показана на рис. 1. Большой круг, по которому происходит видимое годовое движение Солнца на небесной сфере, называется эклипкой.

Примерно 4,6 млрд. лет назад наша планета завершила свое формирование из межзвездного газа и пыли. Последние планетные «зародыши» тела типа метеоритов и астероидов упали на Землю и образовали огромные кратеры. Земля разогревалась изнутри за счет выделения гравитационной потенциальной энергии при аккреции, а также распада радиоактивных элементов; ее тяжелое жидкое ядро, состоящее из железа, отделилось от более легкой кремниевой мантии и коры, газы (в основном водород) и сконденсировавшаяся вода просачивались изнутри к поверхности, из простых органических соединений возникли сложные молекулы, которые объединились в самовоспроизводящиеся молекулярные системы — первые земные организмы. В недрах планеты начал работать интенсивный тепло- и массообменный механизм, который породил цепи складчатых гор и вызвал их непрерывные изменения; в основном сформировались материки и океаны. Из множества самовоспроизводящихся молекулярных систем, благодаря естественному отбору, получили право на жизнь наиболее приспособленные к последующим изменениям среды. Растения эволюционировали таким образом, что смогли использовать солнечный свет в видимой области для разложения воды на водород и кислород; водород ускользал в окружающее пространство, восстановительная атмосфера сменилась окислительной. Постепенно возникли организмы средней сложности, а затем — первые разумные существа.

4 октября 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли (СССР). С этого момента началась эра освоения космического пространства. Вначале космические аппараты выходили на орбиту вокруг Земли, а затем — вокруг ее безжизненного естественного спутника — Луны. Со временем космонавты стали выходить в открытый космос, а 21 июля 1969 г. впервые высадились на поверхность Луны. Это были американские космонавты А. Армстронг и Э. Олдрин. В течение краткого времени они исследовали ближайшие окрестности, а затем вернулись на Землю.

Четырнадцать космических аппаратов вошли в атмосферу Венеры, восемь из них в течение многих десятков

минут работали на ее поверхности, прежде чем разрушились под воздействием высокой температуры.

Более десятка аппаратов направлено к Марсу; один из них в течение года посылал информацию с орбиты вокруг планеты. Другой под действием возмущающих сил Венеры двигался к Меркурию по траектории, которая обеспечивала многократное прохождение вблизи этой внутренней планеты. Несколько космических аппаратов с успехом прошли через пояс астероидов, приблизились к Юпитеру и были выброшены силой тяготения в межзвездное пространство.

## СТРУКТУРА СОЛНЦА

Защитный слой газа вокруг Земли, т. е. атмосфера, очень чувствителен к солнечному излучению. Знание свойств энергии, получаемой земной атмосферой, дает возможность лучше понять земные процессы, такие, как химия атмосферы, характер геологической эволюции планеты и возможность установления радиосвязи на дальние расстояния.

Атмосфера Земли мешает регистрации солнечного излучения, поскольку она поглощает все падающие на нее лучи за исключением нескольких относительно узких участков волн в видимой и инфракрасной областях и в радиодиапазоне. Турбулентные вихри в атмосфере преломляют солнечное излучение и ограничивают пространственное разрешение солнечной структуры.

**Ядро Солнца.** Масса Солнца в 330 тыс. раз превышает земную. Под влиянием собственной гравитации его вещество в центре сжато до столь большой плотности и имеет настолько высокую температуру, что там возникают ядерные реакции. Они-то и являются источником энергии, которая непрерывно излучается Солнцем в пространство.

Относительно небольшое ядро содержит большую часть массы Солнца и почти полностью определяет его светимость (рис. 2). Например, в центральной сфере, радиус которой равен  $1/4$  солнечного ( $1/64$  объема Солнца), заключена половина массы и генерируется 99 % солнечной энергии. В центре температура достигает  $1,5 \cdot 10^6$  К, давление порядка  $250 \cdot 10^9$  атм, а удельная масса  $160 \text{ г/см}^3$ . Хотя ядра его атомов упакованы в тысячу раз плотнее, чем в металле, высокая температура поддерживает вещество в газообразном состоянии. Кристаллической структуры, свойственной твердому телу, там нет — электроны

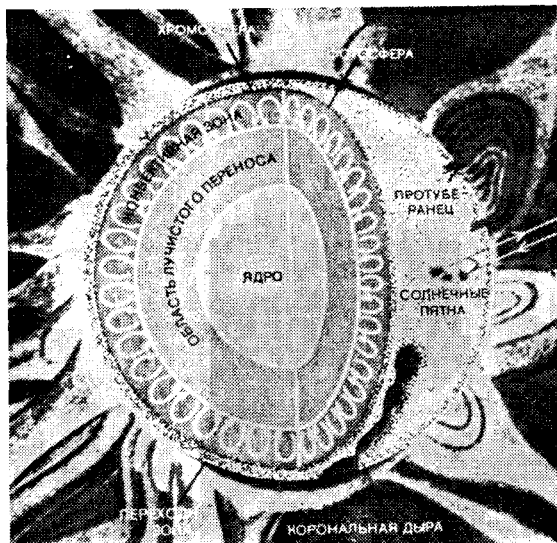


Рис. 2.  
Строение Солнца.

и «голые» ядра движутся как свободные частицы. Энергия освобождается в результате образования ядер гелия из ядер водорода. Из каждого грамма водорода, участвующего в реакции, 0,007 г превращается в энергию.

Энергия от ядра Солнца переносится к поверхности в виде излучения, при этом температура, плотность, давление среды и средняя энергия фотонов быстро уменьшаются. Проникая, или диффундируя, к поверхности, фотоны поглощаются и переизлучаются много раз, и энергия, исходящая из ядра в виде высокоэнергетичных гамма-лучей, превращается последовательно в рентгеновское, затем в далекое ультрафиолетовое и, наконец, в видимый свет — наиболее характерную часть солнечной энергии.

Мы не можем наблюдать ядро, промежуточную область и конвективную зону Солнца, их характеристики определяются на основании теоретических расчетов. Начиная с фотосферы, основным источником наших знаний становятся уже наблюдения.

По мере перемещения газов через конвективную зону к внешним слоям их плотность, температура и давление продолжают уменьшаться. И, наконец, они достигают слоя, где поглощение или рассеяние фотонов снижаются до минимума. Теперь они беспрепятственно проникают через прозрачные вышележащие слои атмосферы и входят в межпланетное пространство. Такой слой и называется

*фотосферой* (сферой света). Это тот яркий белый диск, который мы видим, глядя на Солнце.

Большая часть наблюдаемого нами излучения исходит из очень тонкого слоя (около 100 км толщиной). Он составляет 0,014% или 1/7 секунды дуги при наблюдении с Земли. Радиус Солнца на уровне фотосферы равняется примерно  $0,7 \cdot 10^6$  км, или 109 радиусам Земли. Соответственно его средний угловой диаметр, видимый с Земли, составляет 31' 59''. Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца равняется примерно 27 g, давление около 0,01 атм, а температура в верхней части фотосферы 4300 К. Если считать излучение Солнца равновесным, то по закону Стефана — Больцмана эффективная температура излучающего слоя должна равняться 5780 К. Фотосфера излучает почти всю испускаемую Солнцем энергию, максимум ее приходится на видимую часть спектра. Подсчитано, что примерно половина солнечной энергии, достигающей нашей планеты, приходится на видимый участок спектра. Он потому и называется видимым, что наши глаза развили чувствительность именно к этой области спектра.

Таким образом, хотя вещество Солнца целиком находится в газообразном состоянии, особо выделяется его внешняя часть, состоящая из трех слоев: фотосферы, хромосферы и короны, которые именуются солнечной атмосферой. Рассмотрим их кратко.

Фотосфера неоднородна по яркости. На фотографиях видно потемнение к краю. Особенность фотосферы — наличие гранул, которые имеют вид рисовых зерен и достигают в длину 1 тыс. км. Они являются следствием конвективных потоков.

В фотосфере наблюдаются удивительные явления. Поскольку слои, лежащие над ней, поглощают лишь небольшое количество поступающей изнутри энергии и могут беспрепятственно излучать ее в пространство, можно было бы ожидать, что с высотой температура все время будет убывать. Однако в действительности она достигает минимума у верхней границы фотосферы, а затем опять начинает возрастать, достигая в короне порядка  $10^6$  К, что приближается к температуре солнечного ядра. Потому-то на фотографиях в белом свете видно отчетливое потемнение к краю солнечного диска, а на снимках в коротковолновом излучении, характерном для верхних слоев солнечной атмосферы, наоборот, яркость возрастает. Дополнительный приток энергии в верхние слои атмосферы происходит в результате накопления волн из нижележащих конвективных зон. Небольшое, но играющее заметную роль количество нелу-

чистой энергии переносится волнами через фотосферу, а затем диссипирует (распределяется) в хромосфере и короне, повышая их температуру.

Возмущения, создаваемые зоной активного перемешивания (зоной конвекции), ответственны также за ритмичные подъемы и опускания всей солнечной атмосферы, имеющей период около 5 мин. Установлено, что эти гармонические колебания с длиной волны 5 тыс. км или меньше распространяются также вдоль солнечной поверхности. Основной причиной их возникновения можно считать как направленные вверх низкочастотные звуковые волны, так и гравитационные, возбуждаемые турбулентностью в фотосфере. Структура солнечной атмосферы показана на рис. 2.

Область над поверхностью фотосферы, простирающаяся до высоты примерно 1500 км, называется *хромосферой* (сферой цвета). Она была впервые обнаружена в XIX в. во время солнечного затмения как темно-красное светящееся кольцо, которое вспыхивает на несколько секунд до и после полной фазы. Темно-красное свечение объяснено главным образом излучением в линии молекулярного водорода.

Хромосфера неоднородна. Ее верхняя часть имеет ячеистую структуру и называется *хромосферной сеткой*. Последняя связана с крупномасштабными конвективными элементами в фотосфере (супергрануляция), имеющими в диаметре 30 тыс. км. По краям супергранул в большом количестве располагаются струи, поднимающиеся до высот порядка 3000 км. Это так называемые *спикулы* (диаметром около 500 км), образующие *кусты*, простирающиеся в вышележащую область, в корону. Каждая спикула имеет короткое время жизни — 15 мин.

Во время солнечного затмения на несколько секунд до полной фазы и после нее на краю солнечного диска появляется яркая алая вспышка. В эти короткие мгновения мы видим хромосферу, т. е. прозрачный слой, лежащий над фотосферой.

Поскольку хромосфера находится непосредственно над областью минимума температуры, плотность в ее нижних слоях продолжает быстро уменьшаться с высотой. Поэтому велико и общее падение плотности в хромосфере (в  $10^{-4}$  раз), что, как в случае фотосферы, объясняет многие ее свойства. Хромосферу можно считать *пенной* на поверхности турбулентной и относительно плотной фотосферы, накрепко связанной магнитными полями с движущимся под ней веществом.

Когда низкочастотные звуковые волны, возникающие в турбулентной конвективной зоне, проникают в хромосферу, с ними происходят существенные изменения двоякого рода. Во-первых, вследствие быстрого падения плотности они ускоряются и превращаются в ударные волны. Если поток энергии остается примерно постоянным, то амплитуда скорости вещества на фронте волны должна возрастать. Это приводит к более энергичным столкновениям частиц и, следовательно, к более сильному нагреванию вещества при прохождении волн. Во-вторых, уменьшение его плотности в присутствии магнитного поля способствует переносу энергии магнитогидродинамическими волнами. Эти волны, распространяясь вдоль поля, индуцируют колебания заряженных частиц — электронов и ионов, при столкновениях которых друг с другом и нейтральными частицами энергия волн превращается в тепловую. Совместное действие этих двух механизмов на протяжении около 2 тыс. км повышает температуру хромосферы от 4300 К у ее основания почти до корональных величин. Гравитационные волны, возбуждаемые в фотосфере проникающими туда конвективными движениями, также могут взаимодействовать с магнитными полями и служить дополнительными источниками ее нагревания.

Высокая температура вещества в хромосферной сетке является следствием усиленных магнитных полей, которые облегчают перенос механической энергии вверх и способствуют диссипации магнитогидродинамических волн.

В хромосферной сетке берут начало яркие струи светящегося газа, которые поднимаются на высоту почти 100 тыс. км, чтобы угаснуть там через 2—5 мин. Эти языки пламени, или спикулы (копья), видны на снимках края солнечного диска, где они кажутся расположенными очень тесно из-за наложения вдоль луча зрения. Поэтому хромосферу называют иногда *горящей прерией*.

**Корона.** Над хромосферой находится область крайне низких плотностей, очень трудная для наблюдения. Интенсивность излучения солнечной короны в белом свете, т. е. *белой короны*, примерно в  $10^6$  раз меньше интенсивности излучения диска. Ее яркость приблизительно равна яркости полной Луны. Считается, что ударные волны, исходящие из грануляционного слоя фотосферы, переносятся через хромосферу в корону, где их энергия диссипирует в локальную тепловую. Это один из путей оттока энергии из фотосферы, которая также сферически-неоднородна и имеет сложную структуру, состоящую из *лучей, полярных*

*щеток, опахал, арок и шлемов.* Их образование тесно связано с конфигурацией магнитного поля в короне.

Наблюдения с поверхности Земли с помощью коронографов (телескопы, в которых устраняется изображение диска Солнца) дают неполную информацию об излучении белой короны на расстоянии в несколько радиусов Солнца, потому что фон неба, т. е. свет фотосферы, рассеянный в земной атмосфере, ярче слабого свечения короны.

Обычно корону наблюдают при полном солнечном затмении (оно происходит примерно раз в три года), используя экранирующее действие Луны, поскольку она имеет почти такой же угловой размер, как и Солнце.

Для наблюдения полного солнечного затмения экспедициям с многочисленным и громоздким оборудованием приходится добираться в самые отдаленные места земного шара. И при наступлении полной фазы затмения в их распоряжении оказывается самое большее несколько минут, если, конечно, не подведет погода.

Другой способ исследования белой короны — подъем коронографа над толщей нашей атмосферы на зондирующих ракетах. Эффективность его еще больше увеличивается при использовании орбитальных космических кораблей.

Установлено, что температура короны составляет порядка  $10^6$  К, а ее внутренней части —  $1,5 \cdot 10^6$  К. Однако, несмотря на столь высокую температуру короны, общее количество заключенной в ней энергии невелико. Хотя средние значения последней для каждой частицы достаточно высоки, плотность ее мала вследствие исключительно низкой концентрации частиц: на расстоянии четырех солнечных радиусов в  $1 \text{ см}^3$  коронарного газа содержится  $10^5$  частиц, а в земной атмосфере на уровне моря —  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Из-за низкой плотности корона излучает в  $10^3$  раз меньше энергии, чем хромосфера.

Вследствие высокой температуры короны и сильной ионизации ее вещества большая часть излучения приходится на высокоэнергетические области спектра — рентгеновскую и далекую ультрафиолетовую, где излучение фотосферы и хромосферы слабо. Поэтому в свете этих спектральных областей корону можно наблюдать без коронографа.

Корона не статична — она расширяется под действием собственного градиента давления в направлении, противоположном действию солнечной гравитации, т. е. в межпланетное пространство. Поток солнечных частиц, который называется солнечным ветром, достигает Земли со



Рис. 3.  
Видимый  
солнечный диск  
с протуберанцем

Рис. 4.  
Протуберанцы и  
хромосфера в  
период  
солнечного  
затмения.

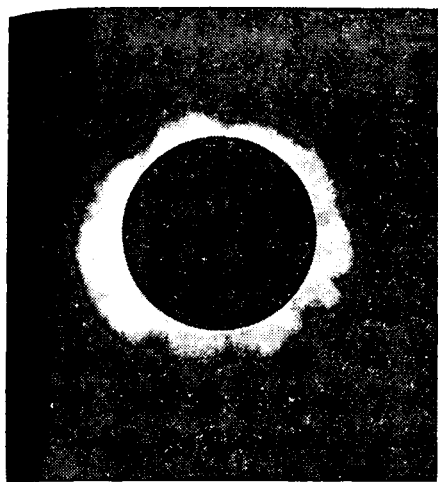
сверхзвуковой скоростью (около 400 км/с). Их концентрация составляет всего несколько частиц в  $1 \text{ см}^3$ , а температура — примерно  $10^5 \text{ К}$ . Расстояние между Солнцем и Землей поток проходит приблизительно за 5 сут (свету требуется для этого 8 мин).

Вблизи Солнца (на расстоянии примерно трех радиусов) геометрия потока определяется структурой магнитного поля. Однако при большем удалении от Солнца магнитное давление становится меньше газового, и солнечный ветер искажает магнитные поля, вытягивая их из окрестности Солнца в межпланетное пространство. Таким образом, Земля фактически погружена во внешние слои атмосферы Солнца, плотность которых очень мала.

На фотографии фотосферы (рис. 3) четко видна ее гранулированная структура и огромная солнечная вспышка (протуберанец) на внешнем краю солнечного диска.

Протуберанец отчасти напоминает огненный фонтан (рис. 4). Массы раскаленных газов и паров вырываются с невероятной силой и с гигантской скоростью взлетают вверх на несколько десятков тысяч, а часто и на сотни тысяч километров (до 600—700 тыс. км высотой). Брызги и огненные хлопья паров и газов разбрасываются во все стороны, заревом охвачены громадные пространства. А внизу, у основания большого протуберанца, хромосфера изоборуждена мелкими выступами.

Хромосфера, протуберанцы и вся остальная часть солнечной атмосферы слишком слабо сияют, чтобы их можно было видеть в обычных условиях. В прошлом их наблю-



дали только во время полных солнечных затмений, причем лишь в течение нескольких минут, и протуберанцы представлялись чем-то вроде огненно-красных гор. Теперь, благодаря современным астрономическим приборам, нет необходимости дожидаться затмений.

Затмение Солнца 18 августа 1868 г., наблюдаемое с территории Индии, стало знаменательным событием в истории науки. Тогда

впервые с большим успехом был применен спектроскоп, благодаря чему было убедительно доказано, что протуберанцы состоят из раскаленных газов, по преимуществу водорода. В дальнейшем английский астроном Дж. Н. Локьер показал, что протуберанцы состоят из того же вещества, что и хромосфера, т. е. являются ее продолжением.

В настоящее время к затмению Солнца мы относимся как к обыденному явлению, а специалисты-астрофизики — с огромным любопытством.

Когда Солнце еще не полностью покрыто Луной, по краям его начинают сверкать, как рубины, протуберанцы. Но вот яркий серп Солнца превращается в нить, распадающуюся на светлые точки, которые видны мгновение. Как яркая звезда, сверкнет и исчезнет последний луч. Полное затмение началось, и природа меняется.

Вместо Солнца на небе виден черный круг. Вокруг него — великолепный ореол из нежных серебристо-белых лучей, на фоне которых сверкают и мерцают красные огненные фонтаны, струи, облака, рога и т. д. Это и есть протуберанцы (см. рис. 4). А блестящий серебристо-белый ореол, сквозь который просвечивают протуберанцы, не что иное, как солнечная корона. Она будет видна недолго. Две-три минуты, редко — более пяти. А затем горизонт начинает светлеть. Внезапно ослепительной синей звездой вспыхивает первый луч Солнца. И как по взмаху волшебной палочки исчезает корона. Стремительно прибывает свет. Затмение заканчивается, возвращается день.

## МИР ВИДИМОГО СОЛНЦА

Установлено, что по числу атомов Солнце на 91 % состоит из водорода, на 9 % — из гелия. По массе гелий вносит заметно больший вклад — 27 %, поскольку она вчетверо больше массы атома водорода. Любопытно, что гелий был открыт по фраунгоферову спектру Солнца, а на Земле был обнаружен значительно позже. И свое название этот элемент получил от греческого слова *гелиос* — Солнце.

На основе закона всемирного тяготения оценим массу Солнца:  $m_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30}$  кг, а ускорение свободного падения на его поверхности  $g_{\odot} = \frac{G m_{\odot}}{R_{\odot}^2} 274$  м/с<sup>2</sup>, что почти в 20

раз больше земного. Казалось бы, и плотность вещества Солнца должна быть очень высокой. Однако это не так  $\rho_{\odot} = 1,41 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, т. е. немногим больше, чем у воды и существенно меньше средней плотности Земли:  $\rho_{\oplus} = 5,52 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Причиной этого является низкая молекулярная масса солнечного газа и высокая температура его недр.

Значительная доля энергии, освобождающейся в процессе ядерного сгорания водорода внутри Солнца, в виде излучения уходит в межпланетное пространство через фотосферу. Последняя является непосредственным источником электромагнитного излучения, которое распределяется непрерывно по различным длинам волн (спектру) — от ультрафиолетовой области до инфракрасной. Другими словами, от Солнца, как и от любых раскаленных твердых и жидких тел, исходят лучи разных цветов. Излучение фотосферы может быть приравнено к излучению абсолютно черного тела при температуре 5800 К.

Абсолютно черное тело — тело, поглощающее весь падающий на него поток излучения независимо от спектрального состава и температуры этого тела. Черное тело применяется как источник излучения с известными свойствами, например, в качестве светового эталона (при температуре затвердевания чистой платины).

Мощность потока солнечной радиации на верхней границе земной атмосферы, усредненного по всему спектральному диапазону, на высоте 82 км составляет 952 кал/см<sup>2</sup>·мин, или 0,14 Вт/см<sup>2</sup>. Это и есть так называемая солнечная постоянная.

Солнечное электромагнитное излучение характеризуется весьма протяженным спектром: приблизительно от 1 Å (10<sup>-8</sup> см) до 10 м и более. И хромосфера и корона явля-

ются источником значительной части излучения, лежащего вне пределов видимой части спектра, т. е. 0,4 — 0,76 мкм.

Поскольку температура коронарного газа достигает  $10^6$  К, существенная часть его теплового излучения приходится на рентгеновский и ультрафиолетовый диапазоны ( $10^{-3}$  — 0,2 мкм). Излучение короны и хромосферы способствует формированию земной ионосферы.

Посмотрите внимательно на фотографию солнечной поверхности на рис. 3, снятую через телескоп. Кажется, будто по ней рассыпаны зерна. Эти образования называются гранулами и представляют собой видимые проявления конвекции во внешнем слое Солнца. В центре их плазма поднимается, а по краям опускается и охлаждается за счет излучения. Контраст яркости свидетельствует о разности температур на поверхности. Таких гранул на Солнце около 1 млн. и размер их колеблется от 200 до 1300 км. Картина очень динамична — отдельная гранула живет около 10 мин, затем граница ее расплывается, и тут же возникает новая.

О характере вращения Солнца мы судим по регулярному перемещению деталей его поверхности. Этот огненный газовый шар вращается не как единое твердое тело, как, например, Земля: точка на экваторе солнечной поверхности совершает оборот за 25, а вблизи полюсов — за 35 сут. Так же неоднородно (дифференцированно) движение точек на разной глубине Солнца.

То, что мы называем видимой поверхностью Солнца, — весьма условное понятие. Ведь свет разной длины волны исходит с различных, хотя и близких друг к другу глубин. Чем же физически определяется поверхность Солнца? Резкий край его диска означает, что здесь большая часть солнечной энергии покидает навсегда светило. Быстрое падение температуры вблизи поверхности приводит к стремительному убыванию с высотой плотности вещества, однако резкой границы изменения плотности нет.

Неравномерное вращение и конвекция являются главными факторами в процессе перераспределения магнитных полей, *всплывающих* из-под фотосферы. Со временем, в конце цикла, мигрирующее к полюсу поле оказывается достаточно сильным, чтобы изменить знак первоначального околополюсного поля. Таким образом, знак поля меняется приблизительно каждые 11 лет.

**Солнечный спектр.** Хорошо известно, что так называемый белый свет имеет сложный состав, в котором условно выделяют красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Это было установлено еще

И. Ньютоном и, несмотря на некоторую условность, используется и в настоящее время.

Для разложения белого света на отдельные компоненты, т. е. для получения спектра, обычно используют отполированную стеклянную призму. Наблюдая радугу, ореол вокруг Луны, «игру» цветов бриллианта, хрусталя — всюду мы встречаем разложение начального белого цвета — от Солнца или другого источника — на разные цвета спектра.

Слово *спектр* происходит от латинского *spectrum* — представление, образ и выражает в физике совокупность различных значений, которые может принимать данная физическая величина. Спектры оптические испускания получаются от источников света разложением их излучения по длинам волн  $\lambda$  так называемыми спектральными приборами и характеризуются функцией распределения энергии испускаемого света в зависимости от длины волн —  $f(\lambda)$ .

Электромагнитное поле Солнца (солнечный спектр) состоит из видимых и невидимых излучений, способность превращений которых в другие виды энергии различна. Как указывалось ранее, солнечное излучение, действуя на протяжении многих миллионов лет, явилось источником всех видов энергии на Земле.

В основном энергетическом интервале заключены следующие области спектра Солнца по длинам волн: 0,28 — 0,4 мкм — ультрафиолетовая, 0,4 — 0,76 — видимая и 0,76 — 6 мкм — инфракрасная.

Исходя из классификации длин электромагнитных волн, для светового электромагнитного излучения принят интервал длин волн от  $\lambda_{\min} = 10^{-2}$  до  $\lambda_{\max} = 5 \cdot 10^2$  мкм. Энергия в области длин волн  $\lambda < 10^{-2}$  мкм относится к радиоизлучению.

Таблица 1. Цветовая характеристика солнечного луча

Цвет	Промежуток $\lambda$ , мкм	Типичная $\lambda$ , мкм	Цвет	Промежуток $\lambda$ , мкм	Типичная $\lambda$ , мкм
Ультрафиолетовый					
Вакуумный	$10^{-3}$ —0,2	—	Желто-зеленый	0,55—0,57	0,56
Далекий	0,2—0,3	—	Желтый	0,57—0,58	0,58
Ближний	0,3—0,4	—	Оранжевый	0,58—0,62	0,60
Фиолетовый	0,4—0,45	0,43	Красный	0,62—0,76	0,64
Синий	0,45—0,48	0,47	Инфракрасный		
Голубой	0,48—0,50	0,50	Ближний	0,76—25	—
Зеленый	0,50—0,55	0,53	Дальний	25— $10^4$	—

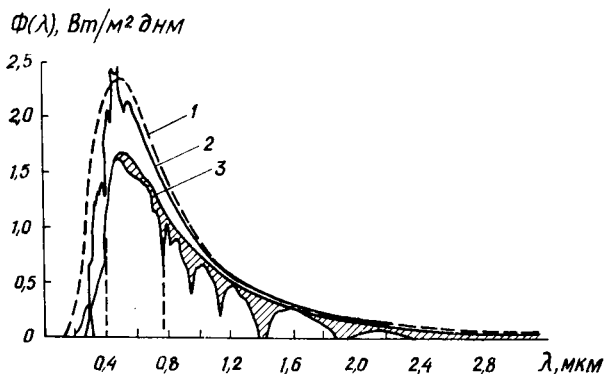


Рис. 5. Спектральное распределение нормальной плотности потока прямого солнечного излучения на верхней (2) и нижней (3) границах атмосферы, а также плотности потока излучения черного тела при температуре 6000 К (1). Заштрихованные области соответствуют поглощению энергии атмосферными газами.

Более 99 % энергии светового излучения Солнца заключено в интервале длин волн от 0,28 до 6 мкм. При этом считается, что в интервалах  $\Delta\lambda$  от  $10^{-2}$  до 0,28 и от 6 до  $5 \cdot 10^2$  мкм может содержаться энергии соответственно менее 0,5 и 0,4 % количества излучаемой Солнцем энергии во всем световом диапазоне длин волн. Цвет солнечного луча по длинам волн приведен в табл. 1.

Вблизи солнечной поверхности излучение не успевает полностью достичь теплового равновесия, поэтому солнечный спектр не полностью совпадает со спектром равновесного теплового излучения. Атомы каждого элемента испускают большую часть света в частотах, характерных только для этого элемента. Набор таких частот (сотни узких линий при известных длинах волн) — спектр элемента. Над видимой поверхностью Солнца газ относительно холодный. Выборочное поглощение света атомами этого холодного газа приводит к тому, что в солнечном спектре есть множество (20 тыс.) узких провалов — темных линий Фраунгера (впервые их обнаружившего), образованных всеми веществами солнечной атмосферы. Спектральный анализ позволяет узнать очень многое о солнечной поверхности: по интенсивностям и длинам волн фраунгеровых линий определяется химический состав газа, а по ширине — температура поглощающей среды и т. д.

К сожалению, с Земли нельзя наблюдать спектр Солнца таким, каков он в действительности, поскольку земная атмосфера искажает его. Прежде всего она сокращает длину линий спектра и вызывает в нем появление линий поглощения. Последние преобладают в красной и желтой областях и являются следствием поглощения части солнечного спектра составляющими атмосферы, главным образом парами воды, кислородом и др.

Как уже говорилось, наиболее широко используемой характеристикой солнечного прямого излучения на верхней границе атмосферы Земли, которое поглощается черной поверхностью, является так называемая *солнечная постоянная*, равная  $0,14 \text{ Вт/см}^2$ . Начиная с 60-х годов XX в. ее определяли непосредственно. На основе анализа результатов большого количества измерений, проведенных в СССР, США и других странах, приведенная выше величина солнечной постоянной установлена с точностью около 1 %. Уточнение ее происходило главным образом за счет данных в ультрафиолетовой ( $\lambda < 0,29 \text{ мкм}$ ) и инфракрасной ( $\lambda > 2,4 \text{ мкм}$ ) областях спектра, а также за счет ошибок во всем световом диапазоне.

Во время перигелия (январь) величина среднего значения нормальной плотности потока излучения приблизительно на 3,4 % больше, а в афелии (июль) на 3,4 % меньше солнечной постоянной. Спектральное распределение нормальной плотности потока прямого солнечного излучения на верхней и нижней границах атмосферы Земли показано на рис. 5. Для сравнения приведено распределение плотности потока излучения черного тела при температуре 6000 К.

Прежде чем перейти к оценке значений солнечного излучения на уровне моря, рассмотрим эволюцию земной атмосферы и ее структуру.

### СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

#### ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Состав земной атмосферы определяется геологической историей нашей планеты. Нам мало что известно о точной последовательности процессов ее формирования, однако можно предположить, что атмосфера Земли начала образовываться с того момента, когда гравитация достигла величины, достаточной для удержания атомов и молекул.

Современные знания о распространенности элементов в Солнечной системе позволяют допустить, что первоначальный состав атмосферы был представлен в основном водородом ( $H_2$ ), гелием (He), углекислым газом ( $CO_2$ ), метаном ( $CH_4$ ) и парами воды ( $H_2O$ ) со следами азота ( $N_2$ ) и других газов. Одно из ее основных изменений состоит в уменьшении на несколько порядков относительного содержания инертных газов: аргона (Ar), ксенона (Xe), криптона (Kr), неона (Ne).

Малое содержание тех или иных веществ связывается с тепловыми процессами (высокие температуры, взрывы и другие катаклизмы), в которых атмосферные газы могли бы приобрести энергию, достаточную для отрыва от Земли. Для преодоления земной гравитации необходимы скорости около 11 км/с, т. е. более высокие, чем те, которые обеспечиваются ядерными взрывами или большими извержениями вулканов.

Другое значительное изменение атмосферного состава — появление больших количеств углекислого газа и паров воды. Некоторые специалисты предполагают, что эти компоненты возникли в атмосфере за счет *избыточной летучести* из первоначальных горных пород, т. е. земной коры и ниже расположенных слоев. Горячие источники и вулканы по настоящий день напоминают о такого рода вентиляции, которая миллиарды лет назад могла иметь грандиозные масштабы. Пары воды, конденсируясь, образовали гидросферу (в частности океаны), а углекислый газ

был вовлечен в жизненные процессы и частично превратился в известняк и другие карбонаты. Некоторое количество воды подвергалось фотолизу с образованием молекул водорода и кислорода. Тем временем более легкие газы (гелий и водород) были утрачены в значительной степени, и этот процесс продолжался в верхних слоях атмосферы за счет диффузии.

Оценка массы веществ (в значительной степени углекислого газа), которая перешла в литосферу (влажная среда *твердой* Земли, включающая земную кору и верхний слой мантии) при образовании карбонатов, наводит на мысль о том, что, по-видимому, первичная атмосфера была очень плотной, подобно нынешней атмосфере Венеры, где давление у поверхности в 100 раз больше, чем на Земле.

Существует несколько теорий, объясняющих эволюцию молекулярного азота, на который в настоящее время приходится около 80 % общей массы атмосферы. По одной из них, он является одним из газов, появившихся из-за названной выше избыточной летучести. Очень незначительная реакционная способность сохранила его в элементарном состоянии, а относительно высокая молекулярная масса обеспечила малые потери в процессах диффузии.

Среди основных компонентов атмосферы наиболее интересен газообразный кислород, обладающий высокой реакционной способностью. Если Земля была когда-либо раскаленным телом, кислород должен был присутствовать в связанном состоянии — в виде оксидов. Много предположений было выдвинуто относительно эволюции кислорода, который в нашей Солнечной системе в свободном состоянии содержится, очевидно, только в атмосфере Земли. Имеется наиболее признанное объяснение, по которому его подавляющая часть в современной атмосфере образовалась в процессе фотосинтеза. Предполагается, что только первоначальное малое количество необходимого кислорода образовалось в результате фотолиза воды.

Не надо думать, что все это произошло раз и навсегда в далеком прошлом. На Земле этот процесс продолжается и сейчас, хотя и не так интенсивно, как в начале эволюции. Как известно, земная кора и ныне обновляется, а вулканы выбрасывают в атмосферу немалые количества паров воды, углекислоты, сернистого газа, хлористого водорода и других газов. Почему же они не сохраняются в атмосфере?

Мы знаем, что газы любой атмосферы должны находиться в химическом равновесии как друг с другом, так и с океаном и с веществом земных пород. Поэтому кис-

лотные оксиды, выброшенные вулканами, очень быстро растворяются в воде океана, образуя соли. Из нерастворимых солей образуются осадочные породы.

Краткий экскурс в эволюцию атмосферы позволяет сделать два вывода: во-первых, химический состав атмосферы постоянно изменяется, во-вторых, любой средний состав, определенный на данный момент, должен, вероятно, измениться в геологическом масштабе времени.

Земная атмосфера хорошо перемешана и имеет однородный состав на высоте ниже 90 км. По структуре, о которой будет сказано далее, этот слой называется *гомосферой*. Водород и гелий из-за низкой плотности стремятся подняться вверх. Над гомосферой находится *гетеросфера*, где концентрация этих газов нарастает с высотой. И выше 700 км атмосфера Земли полностью состоит только из этих газов. Казалось бы, поскольку они улетучиваются в космос, их количество должно непрерывно снижаться. Однако на Земле и в ее атмосфере происходят процессы, поддерживающие постоянное содержание этих легких газов. Гелий образуется в земной коре при распаде тяжелых радиоактивных элементов, а водород верхней атмосферы образуется из ... воды! Под действием ультрафиолетовой части солнечного излучения молекулы воды на высотах 30—50 км распадаются на водород и кислород. И, таким образом, улетучивание водорода в космос приводит к убыли воды на Земле и к возрастанию содержания кислорода в атмосфере.

Каждую секунду из атмосферы в космос улетучивается около 1 кг водорода. Посмотрим, надолго ли хватит воды в океане и ледниках планеты. 1 кг водорода содержится в 9 кг воды. Когда мы разделим всю массу воды на скорость ее убывания, то окажется, что ее хватит на 5000 млрд. лет. Так что океан неисчерпаем, ведь возраст Земли 5 млрд. лет. Изменение концентрации кислорода за последние 60 лет не превышало 0,01 %, что практически означает неизменность его содержания.

## СТРУКТУРА АТМОСФЕРЫ

Для существования различных газов атмосферы нужно, чтобы они не реагировали друг с другом и с веществами, из которых составлена поверхность планеты, хотя это условие и не является абсолютно необходимым. Например, кислород, как известно, очень активен и легко вступает в химические реакции. На поверхности Земли много веществ, способных окисляться. Как уже говорилось, кислород-

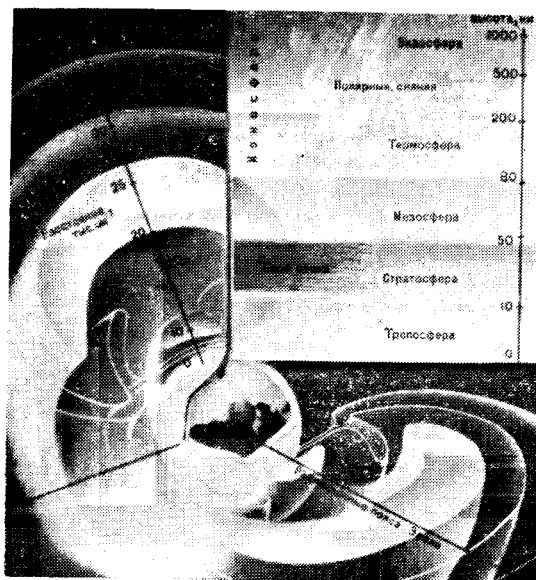


Рис. 6.  
Структура  
земной  
атмосферы  
(«слоеный  
пирог»).

ное равновесие поддерживается здесь реакциями фотосинтеза, и атмосфера остается устойчивой в химическом отношении при постоянном облучении половины планеты солнечным светом.

Рассмотрим вертикальное строение атмосферы Земли, которое очень похоже на слоеный пирог (рис. 6). Основными параметрами, определяющими ее строение, являются давление, плотность, температура, а также химический состав. Давление сначала круто уменьшается от  $1,013 \times 10^5$  Па на уровне моря до высоты 150 км, а на больших — более плавно (рис. 7).

Плотность и концентрация вещества также убывают с высотой.

Изменение температуры носит более сложный характер: она имеет два минимума на высотах около 15 и 80 км, а выше — монотонно возрастает (рис. 8).

Структура верхней части атмосферы определяется воздействием

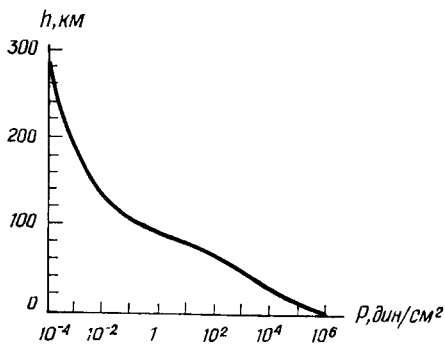


Рис. 7. Распределение по высоте атмосферного давления.

солнечного излучения. В интервале длин волн от 0,1 до 1000 Å солнечное излучение активно воздействует на некоторые ее составляющие. В результате фотодиссоциации часть молекул кислорода расщепляется на атомы. Выше 200 км больше атомов, чем молекул; ниже 100 км определенная часть атомов кислорода соединяется с его молекулами, образуя слой озона. Здесь наблюдается фотоионизация как основных молекулярных составляющих атмосферы ( $O_2$  и  $N_2$ ), так и атомов кислорода, образующихся при фотодиссоциации. Нейтральные и ионизированные компоненты химически взаимодействуют, и в итоге возникает много вторичных продуктов, как нейтральных, так и ионизированных. Часть фотоэлектронов с большой энергией, возникающих при фотоионизации, нагревают верхнюю область атмосферы.

На основе распределения температуры с высотой земную атмосферу подразделяют на четыре области: *тропосферу, стратосферу, мезосферу и термосферу*. Верхние границы этих областей именуются соответственно *тропопаузой, стратопаузой, мезопаузой и термопаузой*.

Тропопауза — область между поверхностью Земли и тропосферой, в которой температура убывает с высотой. Для нее характерны интенсивная конвекция и образование облаков. Высота тропопаузы неодинакова: она больше над экватором, чем над полюсами, а в средних широтах, где господствуют сильные западные ветры (струйные течения), меняется скачкообразно.

Выше тропопаузы, в стратосфере, температура растет вплоть до стратопаузы, на высоте, равной 50 км. Здесь сосредоточена большая часть атмосферного озона с максимумом плотности на высоте 25—30 км. Поглощение солнечного излучения озоном является причиной положительного градиента температуры.

Между стратосферой и мезопаузой располагается мезосфера (80 км), характеризующаяся низкими температурами, что подтверждено данными прямых измерений.

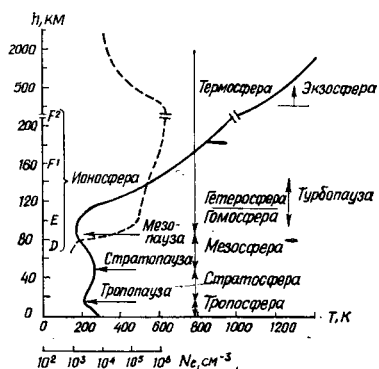


Рис. 8. Изменение с высотой температуры (сплошная линия), электронной концентрации (пунктирная), а также обозначения различных областей атмосферы.

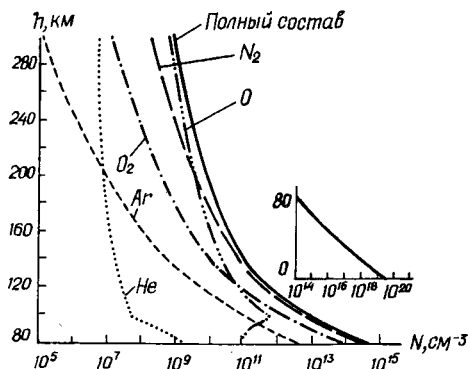


Рис. 9. Изменение с высотой концентрации различных составляющих атмосферы (модель CIRA, 1965).

ласть выше этого уровня, т. е. термopause, можно рассматривать как изотермическую.

Между поверхностью Земли и высотой, несколько превышающей мезopause, происходит почти полное перемешивание составляющих атмосферы турбулентными движениями воздуха. Поэтому средняя молекулярная масса постоянна и равна 29,6. Область эта именуется *гомосферой*, а ее верхняя граница — *гомпauseй*. Еще выше — область, где молекулярная масса медленно убывает, начинается *гетеросфера*.

Над мезopauseй состав атмосферы изменяется в результате фотохимических реакций, так что молекулярная масса уменьшается. По-видимому, турбулентность довольно резко прекращается на высоте примерно 120 км, устраняя тем самым препятствие для диффузионного разделения составляющих атмосферы. Этот уровень называется *турбоopauseй*.

Зависимость концентрации составляющих компонентов земной атмосферы от высоты показана на рис. 9.

Чередование холодных и горячих прослоек в земной атмосфере объясняется характером взаимодействия солнечного излучения с разными газами атмосферы, т. е. тем, как они поглощают свет различных длин волн.

В экзосфере и термосфере солнечные лучи проходят через первый фильтр, который задерживает самое коротковолновое излучение — далекий ультрафиолет. В результате эта часть солнечного спектра наиболее сильно отличается от спектра абсолютно черного тела (планковского)

Выше мезopauseй начинается термосфера. Здесь температура монотонно растет с высотой, сначала быстро, примерно до 300 км, а затем более плавно, возможно, до границы *магнитосферы* (т. е. полости вокруг Земли, образуемой горячим солнечным ветром). Дальнейшее ее увеличение становится настолько незначительным, что об-

и связана с солнечными циклами. Поэтому температура экзосферы существенно ниже в фазе спокойного Солнца (1000 К) и выше — при максимуме его активности (до 1300 К).

Достигая стратосферы, солнечные лучи встречают мощную преграду в виде слоя озона. На высоте 20—30 км он имеет максимальную концентрацию, причем уже в верхней части этого слоя полностью поглощается излучение в диапазоне  $220 < \lambda < 290$  нм.

В этом небольшом интервале длин волн содержится в три раза больше энергии, чем в далеком ультрафиолете, поглощенном в экзосфере. Из-за более высокой плотности воздуха в стратосфере эта энергия распределяется на гораздо большую массу газа, поэтому ее температура намного ниже температуры экзосферы и термосферы (примерно 0 °C).

Теплые и холодные слои атмосферы высвечивают в космос тепловое излучение и обмениваются энергией между собой. К теплым слоям энергия поступает за счет поглощения солнечного света, а до холодных эта радиация уже не доходит, им достаются лишь остатки после перемешивания и переизлучения.

Все эти процессы происходят на освещенной стороне Земли, ночная при этом охлаждается, и поэтому по всей толще атмосферы температура к утру, перед восходом, самая низкая. Максимум она достигает незадолго до захода Солнца. И тем не менее ночи не хватает, чтобы разрушить слоистую структуру атмосферы. Слои перемешиваются только полярной ночью.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЦА НА ЗЕМЛЮ

Нельзя обойти молчанием воздействие околосолнечного пространства на все планеты Солнечной системы, в частности на Землю.

Главное из этих воздействий — притяжение. Согласно закону всемирного тяготения, открытого И. Ньютоном, два тела притягивают друг друга с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату их расстояния. Масса Солнца больше земной в 330 тыс. раз, и оно, бесспорно, оказывает колоссальное воздействие на нашу планету, прежде всего — на ее водяную и воздушную оболочки.

В океанах и открытых морях через каждые 12 ч 12 мин вода начинает прибывать, заливая берега, сначала мед-

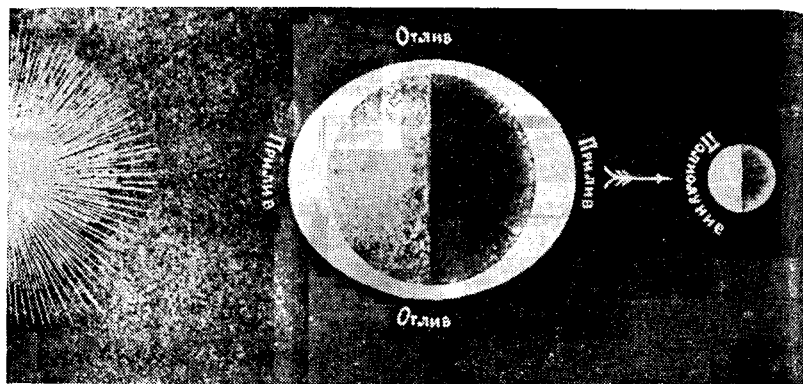


Рис. 10. Совместное действие Солнца и Луны при полнолунии на водяную поверхность Земного шара.

ленно, а затем все быстрее. Так продолжается около 6 ч, пока подъем воды не достигнет наибольшей величины. Это — *прилив*. Вслед за тем уровень моря начинает спадать. Понижение его продолжается также около 6 ч. Происходит *отлив*. Едва вода достигнет самого низкого уровня, как снова начинается прилив, и так — без конца.

Два прилива и два отлива происходят в течение 24 ч 50 мин, т. е. за период, равный лунным суткам.

Луна притягивает к себе все частицы Земного шара. Всего сильнее — в точках, наиболее приближенных к Луне, слабее — в центре Земли и еще слабее — на противоположной части нашей планеты.

Следовательно, вся водная поверхность Земли, обращенная к Луне, вспучивается. Однако и на диаметрально противоположной ее части происходит то же самое, поскольку крайние частицы в самых удаленных от Луны точках как бы отстают от тех, которые ближе к Луне. В результате и здесь вспучиваются воды.

Таким образом, вся водная поверхность нашей планеты всегда вытянута в обе стороны вдоль линии, соединяющей центры Земли и Луны. В этих местах происходит прилив. А на диаметрально противоположных участках происходит вдавливание этой поверхности, т. е. отлив. И за оборот Луны вокруг своей оси приливная волна обходит Земной шар.

Совершенно так же, как и Луна, действует на водную поверхность Земли Солнце. Однако, несмотря на колоссальную по сравнению с Луной массу, его воздействие менее значительно. Приливная сила Солнца в 2,25 раза

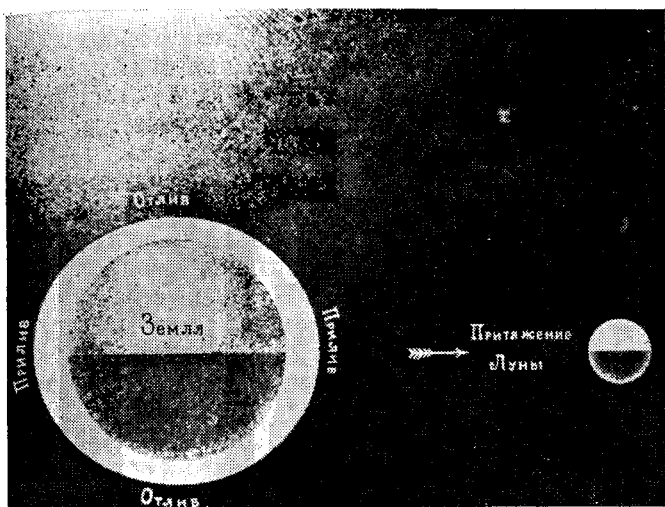


Рис. 11. Противоположное действие Солнца и Луны на водяную поверхность Земли во время первой и последней четверти Луны.

слабее лунной, поэтому мы не замечаем приливов и отливов, вызываемых его притяжением. Более выражено его влияние при нарушении правильности лунных приливов. Во время новолуния или полнолуния в сизигиях — когда Луна и Солнце располагаются приблизительно на одной линии, хотя бы и по разным сторонам от Земли, их приливные силы действуют в одном направлении и суммируются (рис. 10). А во время первой и последней лунных четвертей, в квадратурах, когда Солнце и Луна видны с Земли под углом  $90^\circ$ , солнечный прилив совпадает с лунным отливом, и наоборот. Приливные силы ослабляют друг друга, и в этот период приливы наименее сильны (рис. 11).

Таким образом, действие солнечного притяжения изменяет силу приливов, а также нарушает правильность их наступления. Подобные же явления происходят в воздушной, твердой оболочках и в коре Земли, но они менее доступны непосредственному наблюдению.

Теперь зададимся вопросам — отчего дует ветер? Известно, что сильнее всего за день прогреваются тропические области, где солнечные лучи падают на Землю почти отвесно. Градиент (перепад) температуры у поверхности становится выше равновесного (адиабатического), поэтому и возникает вертикальный поток воздуха. Вблизи эквато-

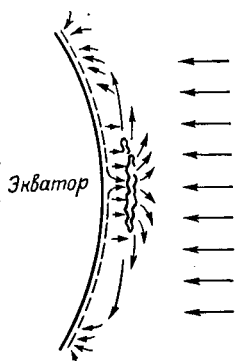


Рис. 12. Схема возникновения ветров.

ра, поднимаясь, он расширяет верхнюю границу тропосферы. Здесь она вдвое выше, чем у полюсов (17 км). Воздух на больших высотах растекается от экватора; северный — на север, а южный — на юг (рис. 12). Затем возникают тепловые потоки, конвективные и вызванные возмущением в результате убыли воздушных масс.

Верхний ветер в северном и южном полушариях отклоняется из-за вращения Земли и приобретает западное направление, а нижний, дующий в сторону экватора, — восточное. Восточный ветер, преобладающий на океанских просторах тропических высот, называется пассатом.

В результате термофизического действия Солнца и ветра аналогичным образом меняют свое направление океанические течения. Средняя скорость ветра на земле составляет 10, а течений — 0,1 м/с.

Итак, ветры и течения вызываются солнечным излучением, которое обеспечивает атмосферу и океаны энергией движения, а те, в свою очередь, диссипируют, переходя в тепло. Однако это излучение не изменяет среднего количества движения Земли: ветры и течения не влияют на скорость вращения Земли.

## СВЕТ СОЛНЦА И ПРИНЦИПЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Если сравнить яркость Солнца и других небесных тел, то для одинаковой освещенности потребовалось бы не менее 0,5 млн. полных лун, 4000 млн. планет яркости Юпитера, 50000 млн. звезд первой величины.

Как всякая материальная среда, поток солнечных фотонов оказывает давление на тела на поверхности Земли. Концентрация энергии (ее количества на единицу площади) солнечных лучей на Земле невелика — в горных районах достигает 800—1000 Вт/м<sup>2</sup>. Естественным средством консервации солнечной энергии является процесс превращения ее во внутреннюю энергию вещества, происходящий в растениях, т. е. фотосинтез. Ему мы обязаны всеми запасами горючего на нашей планете. Делаются попытки ускорить это запасание путем выращивания в специальных

условиях простейших водорослей хлореллы. Ее урожай примерно в 20 раз превосходит урожай обычных культур. Однако, очевидно, что таким образом решить проблему концентрации энергии в больших масштабах вряд ли удастся.

Искусственная концентрация небольших количеств солнечной энергии в настоящее время производится с помощью линз, зеркал при одновременном превращении ее в тепло или электричество с использованием термо- и фотоэлементов.

Используя различные оптические схемы концентрации, удастся получить в фокусе температуру до  $4000^{\circ}\text{C}$ , т. е. превратить солнечную энергию в тепло. Этот способ связан с большими капитальными затратами, использованием громоздкого и тяжелого оборудования при относительно малом энергетическом выходе.

Теоретически КПД превращения солнечной энергии в теплоту сгорания органических веществ за счет фотосинтеза равен примерно 12,5 %. Эта цифра получена на основе общепринятого положения о том, что не более 25 % видимого света (этот диапазон составляет примерно половину солнечного излучения) может быть превращено в химическую энергию конечных продуктов.

В преобразователях световой энергии в электрическую используется фотоэффект, открытый в 1887 г. Г. Герцем. Он выражается в выбивании электронов с поверхности вещества фотонами света (внешний фотоэффект) или только из кристаллической решетки внутри полупроводника (внутренний фотоэффект), а также в возникновении под действием света, падающего на границу металл — полупроводник, электродвижущей силы (ЭДС), которая вызывает появление или изменение тока в цепи (фотоэффект запирающего слоя). Эти явления в принципе аналогичны тем, которые происходят под воздействием тепла — термоэмиссия, термоэлектричество. Состояние и перспективы развития процессов преобразования солнечной энергии в другие виды будут рассмотрены ниже (см. гл. 3).

Можно сказать о перспективе создания световых двигателей. Как известно, полеты в космическом пространстве представляют собой движение в электромагнитных полях. Их энергию можно использовать для приведения корабля в движение, если сообщить ему заряд, например, посредством ускорителей заряженных частиц. Тогда, изменяя величину заряда и направление, можно, используя энергию взаимодействия с внешними полями, ускорять или замедлять движение космического корабля.

Другой тип — фотонный ракетный двигатель. В нем фотоны света используются как рабочее тело (горючее и окислитель в жидкостном реактивном двигателе), а источником энергии служит какой-либо вид энергии вещества (химическая, термоядерная и др.). Однако идеи подобных световых двигателей еще далеки от практического воплощения.

Итак, носителями высококонцентрированной энергии являются сложные частицы вещества (молекулы, атомы и их ядра). Внутренняя энергия этих частиц в процессе ее освобождения в подавляющем большинстве случаев превращается во внутреннюю энергию тел (тепло или электричество), а затем в двигателях превращается в механическую. Пока что человечество широко использует химическую энергию топлива и энергию рек, т. е. источники, запасы которых составляют всего лишь 5 % всех энергоресурсов Земли.

Солнечные электромагнитные волны могут оказаться единственным источником энергии для человечества после того, как все минеральные ресурсы Земли будут исчерпаны. Единственным по причине своей неисчерпаемости и безвредности для природы.

Дефицит энергии всегда будет существовать для человечества, «энергетического рая» быть не может, и в поисках «относительного рая» люди не раз будут обращаться к Солнцу.

## ХИМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЦА

Химическое воздействие солнечной лучистой энергии на газовые оболочки Солнца и Земли играет очень большую роль. В любом масштабе пространства и времени атмосфера Земли претерпевает более или менее значительные физические и химические превращения. Очень часто скорость изменения концентрации какого-нибудь вещества связана одновременно с химическими реакциями и с физическими диффузионными процессами. Однако в настоящее время мы еще не имеем точных сведений даже о количестве важных химических и физических процессов, не говоря уже о вкладе каждого из них.

Химический состав атмосферы Земли меняется по всем трем пространственным координатам, а также во времени, причем от последнего зависят также источники и стоки ее составляющих. Кроме того, обнаруживаются вариации состава в различных пространственных масштабах — от метров до тысяч километров; при этом для разных ве-

ществ требуется разное пространственное разрешение. Наибольшей способностью воздействовать на химические процессы в атмосфере обладают лучи большей преломляемости: синие, фиолетовые и ультрафиолетовые. То же влияние могут оказывать и остальные части солнечного спектра, однако, в меньшей степени.

Зная количество энергии, испускаемой Солнцем, в единицу времени, нетрудно подсчитать, что за счет излучения оно ежесекундно теряет 4,6 млн. т массы, поскольку каждую секунду на

Солнце 630 млн. т водорода превращается в гелий. Если допустить, что скорость ядерного синтеза гелия постоянна и солнечное вещество всегда хорошо перемешано, то, зная массу Солнца и принимая уменьшение содержания водорода с 100 до 81,76 %, можно подсчитать, когда «зажглось» наше Солнце. Это произошло 20 млрд. лет назад. Однако этот возраст явно завышен. В составе Солнца присутствуют тяжелые химические элементы, возраст которых близок к 5 млрд. лет или даже меньше.

В настоящее время на Солнце обнаружено 74 химических элемента. Несомненно, там есть и другие, однако в таких малых количествах, что спектральным анализом их нельзя выявить. При определении содержания какого-либо элемента погрешность составляет 15 %.

Зная массу Солнца и температуру его поверхности, на основании законов термодинамики можно рассчитать возрастание температуры по направлению к центру (рис. 13). Высокие температуры внешних слоев Солнца затрудняют образование химических соединений, и большая часть атомов здесь находится в диссоциированном и ионизированном состояниях.

Потоки частиц, электромагнитное излучение Солнца и его магнитные поля — это основные источники информации, из которых мы черпаем представления о Солнце как звезде, генерирующей энергию. Поэтому детальные сведения о всех типах солнечного излучения крайне важны для агрономии, метеорологии, физики атмосферы, Солнца

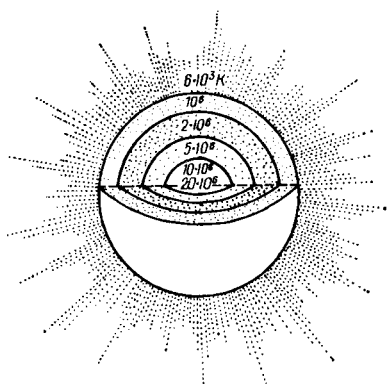


Рис. 13. Схема распределения температур Солнца.

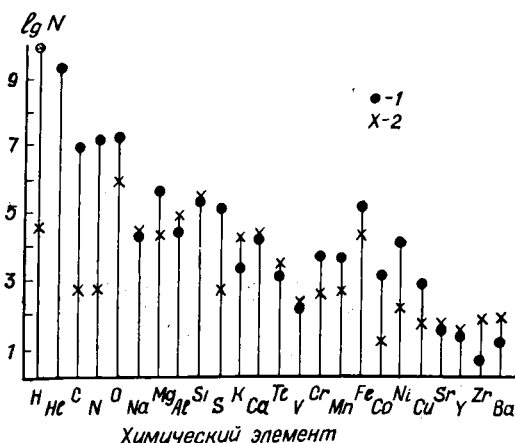


Рис. 14. Сравнение среднего относительного числа атомов различных химических элементов на поверхности Солнца (1) и в земной коре (2).

и звезд. Полный поток солнечного излучения — это одно из решающих граничных условий, необходимых для построения моделей внутреннего строения Солнца и уточнения представлений о ядерных процессах как основном источнике всей излучаемой Солнцем энергии. Вследствие решающего влияния Солнца на баланс энергии и физическое состояние земной атмосферы точное определение потока солнечного излучения существенно для количественного описания структуры атмосферы Земли и других планет, а также солнечно-земных связей. Земной климат в значительной мере зависит от потока излучения Солнца. Следовательно, любые флуктуации потока солнечной радиации должны сопровождаться ответной реакцией земной климатической системы, которая состоит из атмосферы, океанов, суши, криосферы (снежный и ледяной покровы) и биосферы.

Известно, что все твердые или жидкие тела при высоких температурах дают однообразный сплошной спектр всегда и для всех тел одинаковый, а газообразные — яркие линии на темном фоне. Собственно говоря, сплошной спектр с темными линиями и спектр со светлыми линиями на темном фоне — это два крайних типа, между которыми заключены все остальные. Каждый элемент в газообразном состоянии имеет только ему одному свойственные линии, которые всегда занимают в спектре принадлежащее только им одним место. Это и является ключом к

определению химического состава разных тел, причем необходимо наличие элементов в газообразном состоянии. Что касается звезд, это условие всегда выполняется. Как видно из рис. 14, относительное содержание некоторых элементов на поверхности Земли и Солнца существенно расходится, однако для таких элементов, как натрий, кремний, кальций, стронций оно совпадает.

Встреча света с веществом всегда сопровождается их взаимодействием. С одной стороны, вещество отражает, преломляет, поглощает свет, может менять его поляризацию. Влияние вещества на свет начинается еще на расстоянии. Так, лучи, испускаемые звездами, проходя около Солнца на расстояниях в миллионы километров, заметно отклоняются, как бы притягиваются им, в результате чего положение звезд на небесном своде как бы смещается. С другой стороны, свет давит на вещество (хотя это давление ничтожно мало), вызывает в нем химические изменения.

Под действием света из вещества могут выбиваться электроны, при этом оно начинает светиться (рассеяние света, флуоресценция, фосфоресценция). И, наконец, свет, поглощаясь веществом, нагревает его.

Вот пример химического действия света. Окрашенную в тонком слое поверхность бумаги или ткани поместим перпендикулярно солнечным лучам. Под действием солнечного света краска постепенно выцветает. Все ее частицы, равномерно распределенные на ткани, одинаковы, на каждую падает как будто одинаковый свет, однако ткань выцветает постепенно: сначала распадается одна молекула, потом другая и т. д. Если свет падает равномерно и молекулы одинаковы, следовало бы ожидать, что либо распадутся сразу все, либо ни одна, либо разложение произойдет мгновенно при поглощении всеми молекулами краски достаточного количества энергии. На самом же деле процесс идет медленно и постепенно. Можно предположить, что либо краска состоит из неодинаковых частиц молекул, либо фронт падающего света неравномерный: в одних точках энергия сосредоточена, в других ее нет.

Доказано, что нет оснований сомневаться в тождестве молекул краски. Остается одно: фронт светового пучка в действительности неоднороден. Его энергия сосредоточена в определенных центрах, отделенных друг от друга.

Всесторонне изучив действие света, ученые пришли к общему выводу: частицы вещества могут поглощать свет и излучать его только целыми квантами, т. е. фотонами.

При монохроматическом свете с частотой  $\nu$  величина кванта равна  $h\nu$ , где  $h$  — постоянная величина ( $6,62 \times 10^{-27}$  эрг·с). Тогда постепенное выцветание ткани становится понятным. Поскольку энергия светового потока сосредоточена в квантах, разлагаются только те молекулы вещества, на которые наталкиваются кванты света. Если за определенное время вещество поглотило энергию  $E$ , то количество разложившихся молекул определяется по формуле  $N = E/h\nu$ . Для простых случаев химического разложения под действием света эти рассуждения вполне правомочны. Прерывный, квантовый характер действия света проявляется всюду: при нагревании вещества, при электрических действиях света, при флуоресценции и т. д. При очень слабых световых пятнах прерывность световой энергии различается невооруженным глазом.

Лучи радиодиапазона имеют очень малую частоту, поэтому и квант ничтожно мал; в этом случае крайне трудно уловить прерывный характер излучения. Наоборот, для лучей Рентгена, имеющих большую частоту, квант велик, и здесь квантовые действия света особенно резки и отчетливы.

Свет, согласно опытам П. Н. Лебедева, падая на зачерненную пластинку, которая полностью его поглощает, давит на эту пластинку с силой, равной  $E/\tau c$ , где  $E$  — энергия поглощаемого света за время  $\tau$ ,  $c$  — скорость света. Если пластинка имеет зеркальную поверхность, полностью отражающую свет, то давление на нее вдвое больше. Как показал П. Н. Лебедев своими многолетними опытами, свет давит не только на твердые тела, но и на газы, что чрезвычайно важно для современной теории солнечных явлений.

Факт бесспорный — излучение сопровождается уменьшением солнечной массы. Солнце само себя сжигает, его масса переходит в мировое пространство в виде активной формы энергии — световой радиации.

Два литра воды по массе равны свету, получаемому всей Землей от Солнца за секунду. Общеизвестно, что за счет этой массы света живет вся Земля, в то же время два литра воды кажутся нам незаметной «мелочью».

Солнечные лучи несут с собой солнечную массу. Свет — не бестелесный посланник Солнца, а само Солнце, часть его, долетевшая до нас в совершенной, раскрытой в энергетическом смысле форме, в форме света.

## СОЛНЕЧНЫЙ ЛУЧ И ЖИЗНЬ НА ЗЕМЛЕ

С появлением на Земле растительного и животного мира солнечное излучение стало играть более существенную роль в преобразовании лика нашей планеты, особенно на ранних этапах развития жизни, когда оно являлось одной из движущих сил эволюции, ибо способствовало возникновению многочисленных мутаций.

В Большой Советской Энциклопедии дано следующее определение мутации (*mutatio* — изменение, перемена): «...внезапно возникающие естественные (спонтанные) или вызываемые искусственно (индуцированные) стойкие изменения наследственных структур живой материи, ответственных за хранение и передачу генетической информации». Способность мутировать — универсальное свойство всех форм жизни от вирусов и микроорганизмов до высших растений, животных и человека. Углубленное изучение мутации началось с зарождением на пороге XX в. экспериментальной генетики.

Луч Солнца, поглощенный зелеными листьями растений, превращается в великую силу, приводящую в движение машину жизни. В микроскопически малых органоидах клетки световой луч преобразуется в скрытую энергию химической связи между атомами. Он как бы сжимается в мощную пружину, которая затем постепенно расправляется и отдает запасенную энергию Солнца. Эти превращения совершаются каждую секунду в тканях зеленого растения, а точнее — в зернах хлорофилла, которые являются связующим звеном между Солнцем и жизнью на Земле.

В самом общем виде фотосинтез, т. е. синтез при участии света, состоит в образовании из углекислоты воздуха и почвенной влаги сложных органических соединений углерода, кислорода и водорода. Благодаря использованию минеральных солей почвы в их состав включаются также азот, фосфор, сера, железо, натрий и другие элементы. В итоге возникают огромные молекулы белков, нуклеиновых кислот, углеводов, жиров, которые являются строительными материалами клетки, кирпичиками здания жизни.

Фотосинтез — многоступенчатый процесс, который до сих пор еще не полностью расшифрован. Большое количество последовательных реакций (этапов фотосинтеза) подразделяют на два типа: одни осуществляются под непосредственным влиянием поглощенного света, другие — в темноте. Для световых фотохимических реакций обязательно наличие вещества, избирательно поглощающего из-

лучение определенной длины волны. В реакциях фотосинтеза эту роль выполняет хлорофилл. Очень важной особенностью фотохимических реакций является независимость их скорости от температуры среды. Поглотив порцию солнечных лучей, хлорофилл не нуждается больше в притоке энергии, для того чтобы начать процесс фотосинтеза.

Реакции фотосинтеза, протекающие в темноте, называют темновыми, химическими. Они регулируются и управляются белковыми катализаторами — ферментами. Скорость темновых, как и вообще всех химических реакций зависит от температуры и при ее повышении на  $10^{\circ}\text{C}$  возрастает в два-три раза.

Излучение Солнца воспринимается глазом как белый свет, однако все окружающие нас предметы имеют разную окраску. Откуда берется вся эта богатейшая цветовая гамма?

Прежде всего важное значение имеет состав падающего солнечного света. Большинство окружающих нас предметов собственного света не излучает — мы видим лишь результат взаимодействия солнечного света с поверхностью или всей толщей предметов.

Задавались ли вы вопросом — почему в тени деревьев мы видим беспорядочно раскинутые на земле пятна света различной величины, но одинаково правильной эллиптической формы? Почему снег белый, небо синее, листья летом зеленые, а осенью меняют по-разному окраску? А бесконечное разнообразие окраски цветов и оперения птиц?

Посмотрите на свою собственную тень на землю и вы увидите, что у ног она резко очерчена, а чем ближе к голове, тем она больше расплывчата. Почему? Многие, например, полагают, что пейзаж, отраженный в спокойной воде, ничем не отличается от реального и только перевернут вверх ногами. Но ведь это далеко не так!

А лунная или солнечная дорожка на море, реке, в канале — великолепное зрелище! Тысячи ярких искорок ритмически вспыхивают и гаснут, и главное — почти одновременно по всей дорожке. Каким образом она появляется и почему имеет такую ширину в данный момент? Почему искажаются солнечный и лунный диски во время восхода и заката?

Если смотреть невооруженным глазом на звезды, видно, что они меняют яркость и цвет. В телескопе же заметно их легкое дрожание. Отчего мерцание звезд и планет различно?

Свет имеет только один элемент пространственности — направление лучей. Для живого зеленого листа он не только вестник окружающих предметов, но источник его жизни. Лист тянется к Солнцу, солнечные лучи определяют положение листа. Листья разрастаются в солнечную сторону, располагаются на дереве так, чтобы не загораживать друг другу Солнце. Очень многие растения и цветы поворачиваются вслед за суточным движением Солнца по небосводу. Этот так называемый фототропизм (иногда отрицательный) проявляется также у многих бактерий, инфузорий и других простейших организмов. Такая реакция на свет, на направление его лучей может рассматриваться как примитивная форма зрения. Глаз в отношении энергии приспособлен не к самому Солнцу, а к солнечному свету, рассеянному от окружающих тел.

Установлено, что при 6000 К половина лучистой энергии превращается в видимый свет. Но 6000 К — это температура Солнца! Существует какая-то связь между излучением Солнца, черным телом и глазом. Она подтверждает несомненный факт, что глаз развился вследствие существования Солнца, в известном смысле для Солнца и под его действием.

Поэтому ответы на большинство поставленных выше вопросов следует искать в устройстве нашего глаза, положении наблюдателя по отношению к наблюдаемому предмету, и Солнца — на небосводе, состоянии атмосферы, ее локального состава и т. д. Белый цвет снега — это отражение яркого неба в мелких кристалликах льда. А вот снежные хлопья, медленно падающие с серого неба, определенно кажутся темными. Как известно, белое, серое, черное различаются только по яркости, и мерой этих различий служит окружающий фон. В данном случае этим фоном является небо, которое намного ярче наблюдаемых снизу снежных хлопьев.

Серое небо кажется гораздо темнее покрытой снегом Земли. Это — оптический обман, в чем легко убедиться с помощью зеркала. Если расположить его так, чтобы отражения неба и снега оказались рядом, увидим противоположную картину: белое небо и серый снег.

Сильное мерцание звезд свидетельствует о неоднородности атмосферы, о наличии в ней слоев различной плотности. Эта неоднородность усиливается при определенных метеорологических условиях, и, казалось бы, логично предположить, что мерцание звезд связано с определенной погодой.

Как правило, мерцание увеличивается при снижении

атмосферного давления и температуры, а также повышенной влажности. При этом оно бывает гораздо интенсивнее при ветре нормальной силы, чем при очень слабом или очень сильном. Таким образом, состояние атмосферы зависит от большого числа факторов, поэтому покамест невозможно использовать интенсивность мерцания звезд для предсказания погоды.

Итак, вся гамма цветов, доступных визуальному восприятию,— следствие взаимодействия солнечного света с веществами, из которых состоят окружающие нас предметы.

Мы воспринимаем лишь ничтожную часть внешнего мира, ту, которую способны отразить наши органы чувств. Однако объективно мир вовсе не таков, каким мы его видим и слышим. Поэтому нам приходится с помощью приборов и интеллекта вносить коррективы в картину мира, существующую в нашем представлении.

Вообразите исполнение симфонии оркестром с поврежденными инструментами: у рояля действуют одна-две клавиши, у большинства скрипок порваны струны, в духовых инструментах остались редкие клапаны и т. д. Та музыка, которую мы услышим, даст столь же малое представление о симфонии, как и наши органы чувств — об объективной картине мира.

Тем не менее надо совершенствовать инструменты познания, чтобы расширить возможности наших органов и глубже познать окружающий мир, а затем на основе этих знаний использовать его богатства.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ЗЕМЛЕ

#### ЦВЕТ, ТЕМПЕРАТУРА ТЕЛА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ С СОЛНЕЧНЫМ СВЕТОМ

Если раскалить различные твердые тела (металлические, неметаллические) до одной и той же температуры, то энергия будет распределяться по спектру их излучения неодинаково вследствие разной отражательной способности их поверхности. Только в том случае, когда ее цвет приближается к абсолютно черному, т. е. она полностью поглощает излучение, это распределение для различных тел будет одинаковым.

В раскаленном теле энергия возбужденных молекул переходит в свет, который, в свою очередь, поглощается молекулами. Таким образом, взаимодействуют два потока излучения — внешнее падающее и собственное, связанное с переходом энергии возбужденных молекул в свет. При нагреве разных тел излучением механизм поглощения ими энергии существенно различается. Оценка механизма лучистого теплообмена в зависимости от наличия или отсутствия фазовых переходов на поверхности материала тела, от состояния газовой среды, коэффициента черноты поверхности, спектрального коэффициента поглощения является задачей чрезвычайно сложной.

Для каждой конкретной температуры тела устанавливается равновесие между поглощением и излучением. Закон распределения энергии в спектре абсолютно черного тела гласит, что по мере повышения температуры максимальная область спектральной кривой перемещается в сторону коротких волн. При нагреве большинства неорганических материалов с ростом температуры виден переход от красного цвета к белому. Частным следствием этого закона является постоянная величина произведения длины волны, соответствующей максимуму спектральной кривой, на абсолютную температуру, т. е.  $\lambda_{\text{макс}} T = 2897,18 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ . Отсюда, зная длину волны максимума интенсивности излучения, можно определять температуру тела.

Все окружающие нас предметы, в том числе и те, которые обычно считаются непроницаемыми для света (скальные и горные породы, земля, стволы деревьев, металлы и т. д.), поглощают, отражают и рассеивают солнечный свет в тонких приповерхностных слоях. Кроме того, интенсивность этих процессов существенно зависит от состояния поверхности (неровности, бугристости и т. п.). Поглощение повышает температуру тела, что, в свою очередь, смещает спектральную кривую максимума интенсивности.

Предметы, дающие правильное отражение, — весьма редкое явление в окружающем нас мире. Посмотрите издалека на крыши домов, покрытых черепицей или шифером, на асфальтированную дорогу в знойный солнечный день и вы заметите, что они блестят. Эти отражения возникают вследствие того, что температура воздуха над крышами, асфальтом близка к температуре поверхности, и поэтому он более разрежен. Это снижает показатели его преломления. Лучи солнечного света изгибаются, что приводит к миниатюрным миражам на нагретых поверхностях или к масштабным — в пустыне.

Например, в солнечную погоду вам приходилось наблюдать, что абсолютно сухая бетонная или асфальтированная дорога кажется покрытой лужами воды. Однако то, что мы принимаем за воду, есть не что иное, как небо, отраженное дорогой в некотором отдалении от нас.

Искажение очертаний Солнца или Луны во время восхода и захода объясняется также обычным миражом. Вообще существует гипотеза о внезапном искривлении луча света, исходящего от Солнца, при встрече с поверхностью раздела двух сред или, как говорят, с поверхностью разрыва.

Все разнообразие цветов и оттенков покровов живых существ на Земле создается не только за счет наличия в их коже, шерсти, перьях или чешуе красящих веществ. Цветовые эффекты, как правило, вызваны отражением, поглощением, спектральным разложением солнечного света, явлениями интерференции и дифракции. Например, в оперении крохотных колибри имеется один-два пигмента, а фантастическое богатство их окраски — это игра света в бесчисленных крохотных капельках жидкости, расположенных между бороздками оперения и играющих роль призмочек. Разнообразие и яркость цветов оперения павлинов, петухов и других птиц создается в определенной мере за счет дифракции и интерференции света на волокнах, бороздках перьев, взаимного отражения двух по-разному окрашенных прилегающих поверхностей.

В зеленом листе растений, несмотря на то, что его толщина много меньше 1 мм, происходят те же процессы отражения, поглощения и рассеяния. Поглощение, как уже говорилось, осуществляется зернами хлорофилла, рассеяние — бесчисленными включениями, которыми так богаты клетки, либо неровностями поверхности листа. Цвет и яркость зелени существенно зависят от направления наблюдения — к Солнцу или от него. Кроме того, солнечный свет вызывает в растениях непосредственные физиологические превращения, благодаря которым их цвет меняется в течение нескольких минут. Например, в тени хлорофилловые зерна распределяются между клетками внешней и внутренней стороны листа так, что он выглядит свежезеленым. Когда же лист обращен к Солнцу, то эти зерна концентрируются в его глубине, и окраска становится желтоватой.

Листья некоторых растений (например борца) блестят, будто лакированные. Это вызвано набуханием эпидермических клеток, растягивающих поверхность листа, пока она не становится совершенно гладкой.

В общем случае поглощение излучения в любом непрозрачном веществе происходит в слое, толщина которого пропорциональна  $k_v$ , коэффициенту поглощения. Толщину поглощающего слоя  $\delta(z)$  можно также выразить через расстояние, на которое проникает излучение в вещество или, как еще говорят, через длину свободного пробега излучения ( $l_R = 1/k_v$ ), т. е.  $\delta(z) \sim l_R$ .

В отличие от прозрачного диэлектрика металл имеет комплексный показатель преломления. В тепло переходит сравнительно малая доля энергии поля, о чем свидетельствует большая интенсивность отраженной волны. Отражательная способность металла обусловлена непроходимостью его толстых слоев для световых волн и тесно связана с поглощательной способностью. Поэтому, изучая отражаемый от металла свет, мы можем в некотором смысле заглядывать внутрь него и тем самым получать сведения о механизме поглощения им света.

Исследуя взаимодействие света с веществом на основе электромагнитной теории распространения волн и электронной теории строения вещества, можно объяснить и рассчитать коэффициенты отражения, преломления, поглощения и излучения идеальными твердыми телами (монокристаллами).

Молекулы вещества, встречаясь со всеми типами излучения (т. е. во всем диапазоне электромагнитных волн), так или иначе подвергаются его воздействию (табл. 2).

Таблица 2. Явления в молекулах, вызываемые излучением различных длин волн

Длина волны	Область	Реакция атомов и молекул
$3 \cdot 10^8$ — $3 \cdot 10^5$ м	Силовая	—
$3 \cdot 10^5$ —300 м	Звуковая	—
300—3 м	Радиоволновая	Молекулярные переносы и переориентация сред
$3$ — $10^{-4}$ м	Микроволновая	Молекулярные вращения, электронные переориентации
$10^5$ —700 нм	Инфракрасная	Колебания молекул, тепловые эффекты
600—400 нм	Видимая	Электронные переходы низкой энергии в валентной зоне
400—10 нм	Ультрафиолетовая	Высокоэнергетические электронные переходы в валентной зоне
10—0,03 нм	Рентгеновская	Переходы электронов во внутренних оболочках
0,03— $3 \cdot 10^{-4}$ нм	Гамма-лучи	Ядерные переходы

Все небесные явления, которые нам удается наблюдать, сложные, порой грандиозные по масштабам и потрясающие по красоте, являются следствием воздействия всех видов энергии электромагнитного излучения на Землю и ее окружение.

Отметим, что явления, вызываемые в молекулах вещества излучением различных энергетических зон, часто используют для воспроизведения последних. Например, электромагнитное излучение звукового диапазона применяется в микрофонах, телефонах, телеграфе. Радиоволны, т. е. электромагнитные волны, имеют настолько малую энергию, что ее хватает только на то, чтобы передвигать на короткое расстояние молекулы и переориентировать в них положение некоторых ядер. Этот эффект лежит в основе спектроскопического метода ядерного парамагнитного резонанса, на основе которого изучают характеристики ядра в основном и возбужденном состояниях.

Энергии, соответствующие микроволновой области излучения, заставляют молекулы газа вращаться вокруг центров их масс и меняют взаимную ориентацию электронов. Первый эффект используется в микроволновой спектроскопии для изучения молекулярных вращений, второй — в электронной при исследовании состояния неспаренных электронов в химических системах.

Излучение в инфракрасной области вызывает резонанс колебаний атомов при химических связях, что широко используется в инфракрасной спектроскопии. Энергия видимой и ультрафиолетовой областей могут вызывать в атомах и молекулах возбуждение электронов и перевод их из нижних энергетических состояний в верхние, т. е. на менее стабильные энергетические уровни. Это явление применяется в видимой и ультрафиолетовой абсорбционной спектроскопии (абсорбция — объемное поглощение вещества или энергии электромагнитных колебаний).

Ультрафиолетовое излучение, обнаруженное И. В. Риттером в 1881 г., определяется как область волн длиной 10—400 нм. Для удобства она подразделяется на более мелкие участки: 10—180 нм — вакуумный ультрафиолет, пропускается только вакуумом; 180—280 — далекий ультрафиолет, пропускается кварцем и фотографическим желатином; 280—300 — средний ультрафиолет, обуславливает пигментацию кожи; 300—400 нм — ближний ультрафиолет, который пропускается обычным стеклом. Излучение в диапазоне 200—400 нм вызывает фотохимические реакции и разрыв связей во многих органических соединениях.

Очень часто излучения в ультрафиолетовом диапазоне используют для исследования пленок красок и лаков. Под его действием органические соединения нередко вызывают друг у друга флуоресценцию (возбуждаемое свечение).

Видимый свет в диапазоне 400—700 нм, обладающий большой энергией, может вызвать многие химические реакции, в частности фотохимические (400—500 нм).

Инфракрасное излучение, обнаруженное В. Гершелем в 1800 г., обуславливает тепловые эффекты, которые могут вызвать физические или химические изменения вещества. Химические изменения вещества в этом случае, как правило, являются косвенным результатом, поскольку тепловое воздействие ускоряет реакции.

Если вещество нагревать до достаточно высокой температуры, оно будет либо разрушаться, либо начнет испускать свет в результате возбуждения электронов атомов или молекул, при этом большая часть выделенной энергии находится в инфракрасной области. Видимый свет начинает появляться при температуре свыше 1000 К, ультрафиолетовое излучение — выше 2000 К.

## ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

В давние времена основным источником энергии, используемой человеком, была мускульная сила, сначала его собственная, а впоследствии — прирученных животных: лошадей, быков, буйволов, верблюдов. Однако как ни совершенны мускулы, как ни высок их КПД, со временем человек стал использовать химические источники энергии, главным образом дрова. К началу XVI в. их доля в энергетическом рационе достигла 90 %. К началу XX в. они были вытеснены более эффективным видом топлива — углем.

Нефть тогда использовалась еще очень мало. В наше время на ее долю приходится третья часть всех видов топлива, столько же — на долю угля и вместе взятые газ, торф, сланцы, дрова и некоторые другие виды горючего. Примерно десятую часть всей потребляемой энергии дают атомные электростанции.

Так обстоит дело с расходом на энергетические нужды природных ресурсов Земли. Но надолго ли их хватит?

Сейчас во всем мире ежегодно добывается около 11—12 млрд. т условного топлива (т. е. такого, калорийность которого равна 7 тыс. ккал/кг, что примерно равно этому показателю для угля). Около трети топлива (в основном уголь) потребляется тепловыми электростанциями, столько же (нефть) — транспортом. Оставшаяся треть расходуется промышленностью (в основном металлургической) и на бытовые нужды.

Каковы же запасы доступных для извлечения горючих ископаемых (без СССР)? Дать точный ответ на этот вопрос затруднительно, но по приблизительным расчетам, угля около  $2,9 \cdot 10^{12}$  т, нефти  $0,37 \cdot 10^{12}$  и газа  $0,5 \cdot 10^{12}$  т.

По подсчетам американских ученых, все запасы топлива будут исчерпаны через 65—90 лет. Может быть, с помощью различных технических ухищрений удастся продлить этот срок до 100—150 лет, но это же мгновение по сравнению с многовековой историей цивилизации.

Особенно плохо обстоят дела с нефтью. Ее мировая добыча постоянно увеличивается. Если положение не изменится, то запасы нефти, как и газа, будут исчерпаны к концу тысячелетия. А ведь нефть является ценнейшим химическим сырьем. Возмущенный сжиганием нефти, великий русский химик Д. И. Менделеев воскликнул: «Топить можно и ассигнациями!»

Энергия любого вида органического топлива — это солнечная энергия, аккумулированная в форме химической. Солнечная энергия концентрируется главным образом в углеводах — глюкозе, сахаре, крахмале и целлюлозе. При сжигании топлива выделяется запасенная в нем солнечная энергия. Однако этот процесс экологически далеко не безвреден, поскольку отравляет атмосферу токсичными веществами. Не меньшую угрозу таит в себе перегрев атмосферы в результате чрезмерного выброса углекислоты и поступления больших количеств «искусственной» энергии. Во избежание этой опасности человечество вынуждено обратиться к самой природой уготовленному источнику энергии — Солнцу.

В настоящее время приобретает актуальность ветроиспользование. Некоторые ветроэлектростанции (ВЭС) имеют мощность до 400—1250 кВт. На Филиппинах разработан план строительства ВЭС мощностью 3 тыс. кВт.

КПД ВЭС достигает 50 %. Особенно перспективны так называемые тропопаузные ВЭС — станции, размещенные на высоте 8—12 км, где всегда дуют постоянные по скорости и направлению ветры, скорость которых в 3—7 раз выше, чем у земли (80—100 м/с). Но создание и установка таких ВЭС еще связана с рядом технических трудностей.

Велики запасы приливной энергии Мирового океана, т. е. энергии приливов и отливов. Энергия всего одного цикла прилив — отлив составляет около  $8 \cdot 10^{12}$  кВт · ч, что в 100 раз превышает энергию, произведенную всеми ГЭС мира. Однако работы по использованию энергии приливов и отливов морей и океанов, т. е. «лунной энергии», пока ведутся недостаточно активно.

Огромное количество энергии заключено в морских или океанских течениях, в первую очередь в мощнейшем из них — Гольфстриме. По расчетам специалистов, мощность турбин, установленных на глубине 30—130 м, где скорость течения достигает 3,3 км/ч, может достигать 25 тыс. МВт.

По-видимому, столь же экзотическими представляются установки, использующие разность температур между верхним и глубинными слоями морской и океанской воды. Вблизи экватора температура поверхностных слоев океана достигает 28, а на глубине 2 км — 4 °С. В 50-е годы термогидроэлектростанция мощностью 14 тыс. кВт была построена у Атлантического побережья Африки. В настоящее время станции подобного рода пока еще очень сложны и экономически не выгодны. Но в будущем положение может измениться.

Несколько лучше обстоит дело с использованием геотермальных вод. Этот способ получения энергии имеет ряд преимуществ — технологическая простота, практическая неиссякаемость энергии источников и их широкое распространение. Непрерывно возобновляющаяся тепловая энергия всех подземных вод земной коры оценивается в  $3 \cdot 10^{27}$  кал, а доступных для использования (85 млн. км<sup>3</sup>) —  $4 \cdot 10^{21}$  кал, что во много раз превышает ресурсы всех видов минерального топлива. Во многих геотермальных источниках температура воды достигает 200—300, пара — 600—800 °С, что позволяет строить высокоэффективные тепловые электростанции. Сегодня имеются реальные возможности применения геотермальной энергии в 40 странах.

И, наконец, каковы перспективы непосредственного использования лучистой энергии Солнца? Солнечное излучение приносит на Землю около  $10^{24}$  эрг/с, в то время как уровень производства энергии во всем мире еще не достиг  $10^{20}$  эрг/с. Считается, что наиболее эффективно прямое преобразование солнечной энергии в электрическую. Это осуществляется в основном тремя способами: непосредственной установкой фотоэлементов на зданиях, покрытием больших площадей земли (например пустынь) достаточно дешевыми пленочными фотоэлементами и, наконец, выносом энергоустановок в космос, где имеется высокая солнечная радиация и не мешает вес, с последующей передачей и преобразованием энергии в электричество на Земле. Американскими учеными, например, разработан один из вариантов внеземной радиационной энергоустановки мощностью 10 тыс. МВт. Масса станции всего 25 т, стоимость — 20 млрд. долларов.

Согласно наиболее общепризнанным прогнозам, основную часть энергии в будущем человечество будет получать от Солнца, в разумных пределах «разбавляя» ее термоядерной энергией.

### **НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ТЕПЛО, СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ**

В основе пристального внимания специалистов в солнечной энергии лежит прежде всего озабоченность скорым истощением запасов традиционных видов топлива. Особое внимание уделяется практическому использованию этого вида энергии для горячего водоснабжения и отопления зданий. Современный опыт эксплуатации большого числа экспериментальных и промышленных систем солнечного теплоснабжения свидетельствует о том, что подобные уста-

новки, несмотря на высокие начальные затраты при наличии аккумуляторов и дополнительных источников энергии, уже сейчас экономически оправдывают себя в благоприятных климатических регионах благодаря экономии топлива.

С точки зрения применения энергии Солнца на Земле следует учитывать излучение в интервале длин волн 0,3 — 2,5 мкм, которое проходит через атмосферу, подвергаясь изменениям вследствие рассеяния и поглощения. Характеристика солнечной радиации в ясные дни на горизонтальной поверхности для различных широт показана на рис. 15.

Условия теплообмена в солнечных бытовых и энергетических установках, возникающие за счет перемешивания различных слоев, существенно зависят от свойств материалов, из которых состоят основные их узлы, в частности их теплопроводности. Для достижения максимального поглощения используют, как правило, непрозрачные материалы. Их поверхности должны хорошо поглощать видимый свет и хорошо пропускать лучи длинноволновой области спектра.

Поскольку плоские солнечные коллекторы обычно работают при достаточно низких температурах, практически все испускаемое ими излучение приходится на область длин волн меньше 3 мкм. Спектральное распределение отражательной способности для некоторых реальных поверхностей показано на рис. 16. Исследования, направленные на создание поверхностей, поглощающих свет определенной длины волны (селективной), которые применяются как в космических аппаратах, так и на Земле, привели к определенным достижениям в этой области. Так, при изготовлении коллекторов необходимое сочетание оптических свойств поверхностей достигается в основном тремя путями.

1. Создание покрытий, которые хорошо поглощают видимый свет и пропускают длинноволновое излучение. Они могут быть нанесены на поверхности с малой степенью черноты, которые служат подложкой.

2. Установка интерференционных фильтров на подложках с низкой степенью черноты. Например, трехслойные покрытия  $\text{SiO}_2$  — Al —  $\text{SiO}_2$  на подложках из алюминия имеют отражательную способность ниже 0,1 для видимой части спектра и более 0,9 — для длинноволнового излучения.

3. Специальная обработка поверхности металла (нанесение царапин, травление и т. д.), в значительной мере повышающая поглощение коротковолнового излучения за

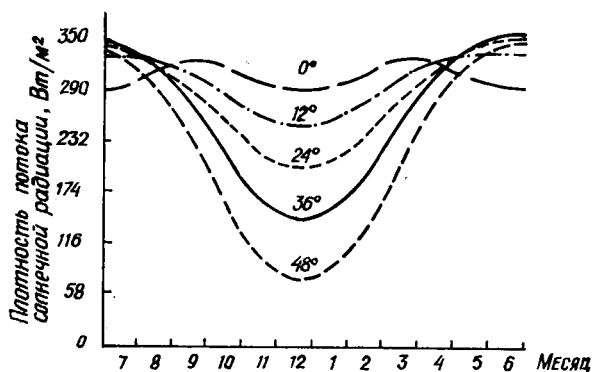


Рис. 15. Данные по солнечной радиации в ясные дни на горизонтальной поверхности для различных широт.

счет образования набора «полостных» поглотителей. Длинноволновое излучение отражается от такой поверхности, как от гладкой.

Солнечные коллекторы рассчитаны на работу в течение длительного времени. Их поверхности подвержены воздействию окисляющей и коррозионно-активной среды, относительно высоких температур. Зависимость их радиационных характеристик от температуры и времени эксплуатации требует отдельного исследования.

Нормальная солнечная радиация является переменной величиной и в лучшем случае составляет порядка 1 кВт/м<sup>2</sup>. Рабочий интервал длин волн лежит в области 0,3—3 мкм, т. е. значительно меньше, чем собственного излучения большинства поверхностей поглощающих материалов. Создание коллекторов сопряжено с решением проблем теплообмена при низких и переменных плотностях потока энергии, а также относительно большой роли излучения.

Плоские коллекторы используются главным образом в системах горячего водоснабжения; их можно также применять для систем отопления и кондиционирования. Они устанавливаются неподвижно как неотъемлемый элемент стены или крыши дома с оптимальной ориентацией для конкретной широты его расположения и времени года, на который рассчитана его работа. Они могут использоваться как водо- и воздухонагреватели, а также для получения пара низкого давления.

При проектировании и изготовлении коллекторов большое значение имеет установление предельной минималь-

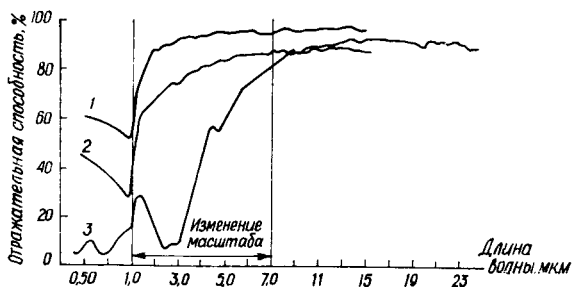


Рис. 16. Спектральные отражательные способности некоторых поверхностей:

1 — полированный цинк на полированном алюминии; 2 — оцинкованное железо толщиной 0,56 мм, промышленная обработка; 3 — солнечный коллектор, химическая обработка оцинкованного железа.

ной стоимости получаемой энергии. Необходимо также учитывать изменения температуры среды, ветровые нагрузки, град, дождь, снег, удобство при эксплуатации и ремонте и т. д.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Из всех способов получения электричества из энергии Солнца наиболее эффективным и проверенным в условиях длительной эксплуатации на Земле и в космосе является фотоэлектрический метод прямого преобразования лучистой энергии в электричество с помощью полупроводниковых солнечных батарей (СБ). КПД лучших образцов СБ, установленных на поверхности Земли, достигает 22—26, а у промышленных образцов — 10—14 %. Теоретически показана возможность создания СБ на однородных полупроводниках, у которых КПД составляет более 30 %.

Полупроводниковые материалы замечательны тем, что их свойства непостоянны и существенно зависят от внешних условий. Один и тот же полупроводник ведет себя то как самый настоящий проводник, то как типичный изолятор, а порой обнаруживает совсем иные, лишь ему одному присущие свойства. Многие причины, от которых зависит поведение полупроводника, трудно даже уловить.

На любые внешние воздействия разные полупроводники реагируют по-разному. На одних заметнее сказывается свет, на других — температура, на третьих — влажность. Проявляется эта чувствительность в зависимости от того,

какого цвета световые лучи или в каком интервале изменяется температура. До тех пор, пока мы не научились управлять свойствами полупроводников, нельзя было говорить о практическом использовании их в фотопреобразователях.

Орбиты, по которым движутся электроны вокруг ядра атома, называются энергетическими уровнями, так как положение электронов в атоме определяется запасом их энергии: чем он больше, тем слабее действует на него притяжение ядра и тем дальше соответственно его орбита. В атоме существуют только определенные «разрешенные» энергетические уровни, между которыми находятся «запрещенные». И если электрон приобретает дополнительную энергию, он должен сразу перескочить на более удаленную орбиту. Если же, наоборот, он отдает энергию, то перескакивает на ближе расположенную орбиту. Это связано с тем, что электрон приобретает энергию лишь определенными порциями — квантами. Из этих элементарных порций — квантов, или фотонов, и состоит свет.

Таким образом, поглощая или излучая свет, электрон переходит из одного квантового состояния в другое. Аналогично протекает процесс при передаче тепла. Ближе всех к ядру находится «разрешенная» зона самых бедных энергией электронов, затем — «запрещенная», потом — вновь «разрешенная» и т. д.

Для нас представляют интерес зоны, не заполненные электронами, наиболее удаленные от ядра и более слабо связанные с ним, которые участвуют в химических связях между атомами и обуславливают электропроводность полупроводника. Это так называемые валентные электроны (от лат. *valentia* — сила). Валентность атома — способность присоединять к себе и удерживать другие атомы. Именно поведением валентных электронов и определяются различия между металлами, полупроводниками и изоляторами.

У разных полупроводников ширина «запрещенной» зоны различна. У кремния она, например, составляет 1,1 эВ. Это энергия, которая может оторвать электрон, освободить его. Видимый свет Солнца состоит из набора разных фотонов, соответствующих всем цветам радуги. Их наибольшее количество мог бы уловить материал с «запрещенной» зоной шириной 1,5 эВ.

До недавнего времени кремний больше всех других материалов приближался к этой идеальной мерке, поэтому фотоэлементы делали именно из него. Если до предела уменьшить в нем потери энергии в процессе ее преобра-

зования, то КПД можно довести до 22 %. Теоретически это — предел максимальных возможностей кремния.

Кристалл кремния представляет собой совокупность атомов, каждый из которых окружен четырьмя соседними и связан с ними валентной связью. Ни один из валентных электронов правильного, «чистого» кристалла не способен участвовать в переносе электричества, т. е. чистый кремний (как и германий), лишенный примесей и структурных дефектов, при комнатной и низкой температуре является диэлектриком. Добавляя в кремний или германий ничтожные количества ( $10^{-5}\%$ ) определенных элементов, можно управлять механизмом их электропроводности. Так, если в один из узлов кристаллического кремния ввести пятивалентный атом мышьяка, то пятый электрон окажется свободным. В результате, если в кристалле объемом  $1\text{ см}^3$  среди  $5 \cdot 10^{22}$  атомов кремния имеется  $10^{15}$  атомов мышьяка, то концентрация свободных электронов составит почти  $10^{15}\text{ см}^{-3}$ . А в кристалле германия, где пятый электрон мышьяка связан еще слабее, содержание последних составит  $10^{15}\text{ см}^{-3}$ .

Когда фотоны света, обладающие энергией выше 1,12 эВ (т. е. инфракрасные лучи с длиной волны короче  $\lambda=1,1\text{ мкм}$  и видимый свет), падают на кремниевый полупроводник, они передают свою энергию кристаллу, освобождая связанные электроны. Для германия ширина «запрещенной» зоны равна 0,79 эВ. Наличие некоторых примесей может существенно уменьшить среднюю длину свободного пробега электронов, или диффузионную длину. Эта величина ( $l_n$ ) является важной характеристикой чистоты и совершенства структуры кристалла полупроводников и в значительной мере определяет КПД преобразования энергии. У самых совершенных монокристаллов полупроводников ее значение достигает нескольких миллиметров. Для получения высокого КПД преобразователя достаточно иметь  $l_n=0,2-0,5\text{ мм}$ .

Требуемая прозрачность верхнего слоя фотопреобразователя возможна при его очень малой толщине — 2,5 мкм, необходимо иметь диффузионную длину не менее 0,2—0,5 мм требует чистоты кристаллов. Выполнение этих условий так же, как и способы нанесения слоя, представляет трудную технологическую задачу. Эти и другие обстоятельства задерживают рост КПД солнечных преобразователей.

Казалось бы, можно увеличить КПД, повышая интенсивность облучения (например, с помощью солнечных концентраторов) и понижая коэффициент отражения (у кремния

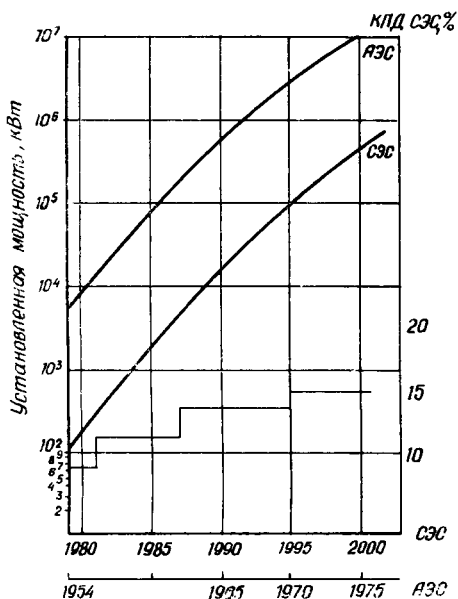


Рис. 17. Программа развития солнечной наземной энергетики.

он равен 28 %). Однако с увеличением интенсивности облучения уменьшается время жизни избыточных носителей зарядов, что приводит к замедлению роста КПД. Не дает заметного эффекта и уменьшение коэффициента отражения.

За последнее время ученые многих стран создали новые, искусственные полупроводники, в том числе такие, у которых ширина «запрещенной» зоны еще ближе к заветной величине 1,5 эВ. Это соединение кадмия с серой или теллуром, индия с фосфором. У фотоэлементов на основе гетероструктур арсенида галлия КПД

достигает 25 % в условиях концентрированных солнечных потоков в тысячи солнц. Развитие методов производства и создание новых полупроводниковых материалов, а также новых типов преобразователей приводит к неуклонному снижению стоимости модулей солнечных элементов. Так, министерством энергетики США намечено снизить в 1986 г. стоимость 1 Вт на 70 центов, а к 1990 г. довести ее до 15—50 центов. Можно ожидать, что в недалеком будущем фотоэлектрическая солнечная энергетика станет серьезным конкурентом другим энергетическим производителям.

Имеются идеи построить трехслойную солнечную батарею, в которой каждый слой «впитывал» бы лишь часть солнечного излучения, пропуская все остальное. Допустим, верхний слой поглощает только ультрафиолетовые лучи, средний — видимые, нижний — инфракрасные. Кремниевые батареи пропускают 50 % инфракрасных лучей. Их может преобразовать в электричество другой полупроводник. У трехслойной батареи теоретический КПД составит 40 %.

Все эти варианты требуют усиленных исследований, и осуществить их на практике будет не так-то просто, но

перспектива, которую они открывают, чрезвычайно заманчива.

Как известно, интенсивность солнечного излучения значительно колеблется в зависимости от времени года и суток. Поэтому проблема использования его энергии сталкивается с необходимостью ее аккумулирования и хранения в течение определенного времени. Из всех способов аккумулирования солнечной энергии наиболее перспективным представляется ее преобразование в химическую энергию в результате фотохимических реакций.

Наземные СЭС из кремния примерно в 100 раз дороже атомных электростанций (АЭС). Разница в стоимости может быть компенсирована за счет снижения энергоемкости и автоматизации производства, а также использования концентраторов солнечного излучения.

В нашей стране намечено расширение работ по созданию современной сырьевой базы солнечной энергетики — производству полупроводникового кремния, стекла, пластмассы для концентраторов, созданию новых производственных мощностей по выпуску солнечных батарей и модулей для одновременного получения электрической и тепловой энергии, систем аккумулирования.

Модель развития солнечной энергетики показана на рис. 17, а программа изменения стоимости солнечных элементов и полупроводникового кремния, необходимого для ввода СЭС, — на рис. 18. Применение концентраторов позволит снизить потребность в полупроводниковом кремнии пропорционально степени концентрации.

Страны Европейского экономического сообщества создали специальную комиссию по гелиоэнергетике, генеральным председателем которой избран профессор В. Пальц. По программе работ в этой области предусмотрены ежегодные ассигнования в размере 4 млн. долларов.

Наземная солнечная фотоэнергетика нашей страны

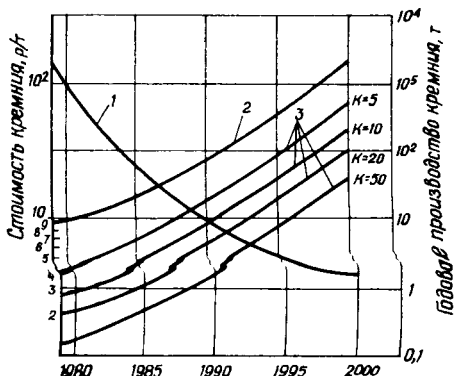


Рис. 18. Программа изменения стоимости полупроводникового кремния и его производства:

1 — стоимость кремния; 2 — потребность в кремнии без концентраторов; 3 — потребность в кремнии с концентраторами.

имеет около 150 малых автономных установок, в том числе мощностью до 500 Вт, которые способны функционировать без обслуживания человеком в течение 15—30 лет. Опыт их эксплуатации свидетельствует о том, что даже при высокой стоимости получаемой энергии (50—100 р. за 1 Вт) они имеют преимущества перед другими средствами энергообеспечения (например аккумуляторы, низковольтные линии электропередач или маломощные тепловые двигатели). Удешевление энергии можно осуществить за счет применения новой специальной технологии изготовления СБ для наземного применения.

Прогнозируемое к 2000 г. снижение стоимости 1 кВт энергии, получаемой на наземных СЭС, до 100—200 долларов позволит говорить о рождении крупномасштабной солнечной энергетике, которая будет базироваться на полупроводниковой технологии. Ожидается, что в грядущем столетии СЭС будут так же широко распространены, как атомные и термоядерные электростанции.

### ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ПЕЧИ

Для получения высоких тепловых потоков требуются высокотемпературные источники лучистой энергии. Поскольку они изготавливаются из твердых материалов, наивысшая температура источников ограничивается точкой плавления материалов. Наиболее удобны для практического использования в качестве материалов для высокотемпературных источников графит ( $T_{пл} = 3600^\circ\text{C}$ ) и вольфрам ( $T_{пл} = 3400^\circ\text{C}$ ). Температура Солнца, как мы уже говорили, составляет порядка 6000 К, поэтому оно представляет собой высокоэффективный источник лучистых потоков.

В фокусирующих коллекторах используются оптические системы (зеркала или линзы) для увеличения плотности солнечной радиации на поверхности, поглощающей энергию, что позволяет уменьшить ее площадь и, следовательно, снизить тепловые потери. Однако при этом возрастают потери рассеянного света и оптические.

Приемники фокусирующих коллекторов способны повышать плотность потока солнечной радиации в широком диапазоне значений — от 1,5—2 до 10 тыс. Вт/см<sup>2</sup>, т. е. увеличивать рабочие температуры в фокусе, однако при этом значительно возрастают требования к точности оптических систем и, следовательно, их цена. Стоимость энергии, получаемой от системы с фокусирующими коллекторами, является, таким образом, прямым следствием рабочей температуры.

С инженерной точки зрения применение фокусирующих коллекторов выдвигает ряд дополнительных проблем. Такие коллекторы должны (за исключением случаев очень малых степеней концентраций) «следить за Солнцем» так, чтобы прямая радиация была постоянно направлена на поверхность приемника. В то же время конструктор имеет возможность менять конфигурацию системы, т. е. манипулировать набором конструктивных параметров. Существует также ряд эксплуатационных требований, связанных, в частности, с необходимостью предохранять оптические системы в течение длительного времени от пыли, атмосферного влияния, окисления и т. п. С помощью новых материалов и инженерных решений можно увеличить плотность потока радиации на приемнике. Эти средства, линзы и отражатели, могут быть классифицированы по типам компоновки и ориентации систем, по степени концентрации радиации, которую они могут обеспечить, а также по конструктивным материалам и назначению.

Для получения высоких температур необходимо собрать определенное количество солнечной энергии и сконцентрировать ее на малой площади. Осуществляется это, как правило, при помощи параболических отражателей. Если направить ось параболического отражателя на Солнце, в его фокальной плоскости будет формироваться солнечное изображение.

Особенностью теплового источника в данном случае является его резко меняющаяся пространственная характеристика. Как известно, видимый диск Солнца имеет угловой диаметр  $32'$ . Поэтому фактически в полость параболического концентратора входит не строго параллельный пучок солнечных лучей, а сноп элементарных конических поверхностей, которые упираются вершинами в зеркальную поверхность.

Диаметр изображения Солнца ( $d$ ) определяем из выражения

$$d = f \operatorname{tg} 16' = \frac{f}{107,3},$$

где  $f$  — фокусное расстояние параболы. Изображение Солнца будет резким, если отношение фокусного расстояния ( $f$ ) к диаметру параболы ( $D$ ) достаточно велико (как в астрономических телескопах). Для получения высоких температур в гелиоустановках эту величину необходимо максимально уменьшить, чтобы в пределах солнечного изображения получить наибольшую концентрацию излучения. Вместо отношения  $f/D$  в гелиотехнике удобнее

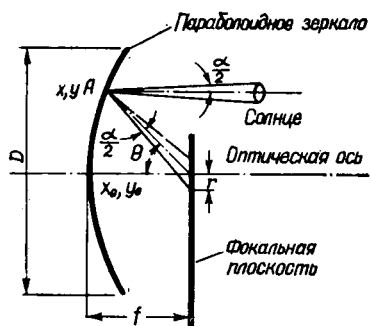


Рис. 19. Концентрация солнечного излучения с помощью параболического зеркала.

кусе параболы (фокальной) представляет собой эллипс, большая ось которого существенно превышает диаметр солнечного изображения. Вследствие этого некоторая часть лучистой энергии Солнца, отраженная элементарным участком вблизи точки  $A$ , проходит вне солнечного изображения. Для всех гелиоустановок можно вычислить отношение количества энергии, получаемой в пределах солнечного изображения, к общему количеству энергии, получаемой в фокальной плоскости, для каждого конкретного отношения  $f/D$ , или  $\Theta$ . Этот показатель называется степенью концентрации энергии ( $\eta_c$ ).

Если рассматривать в фокусе полость, имитирующую абсолютно черное тело, с круглым отверстием, равным диаметру солнечного изображения, тогда

$$\eta_c = \left( \frac{1 + \cos \Theta}{2} \right)^2.$$

Это выражение получено в предположении, что параболический отражатель идеален. Практически, чем больше угол открытия, тем труднее добиться высокой степени геометрической точности.

На рис. 20 представлены зависимости для рассматриваемых случаев (полость и плоская пластина) степени концентрации ( $\eta_c$ ), концентрации ( $c$ ) и максимально достижимой температуры ( $T_{\text{макс}}$ ) от угла раскрытия параболы ( $\Theta$ ). Концентрация ( $c$ ) — это отношение теплового потока в пределах солнечного изображения в фокусе к тепловому потоку, который был бы отражен плоским зеркалом с той же отражательной способностью, что и парабо-

пользоваться углом раскрытия зеркала ( $\Theta$ ), который образуется между оптической осью параболы и линией, соединяющей фокус с краевой точкой параболы (рис. 19).

Таким образом, падающий на параболу в точке  $A$  пучок солнечных лучей с углом при вершине конуса  $32'$ , отражается от нее в виде конуса с тем же углом при вершине, ось которого проходит через фокус параболы. Сечение отраженного конуса с плоскостью в фо-

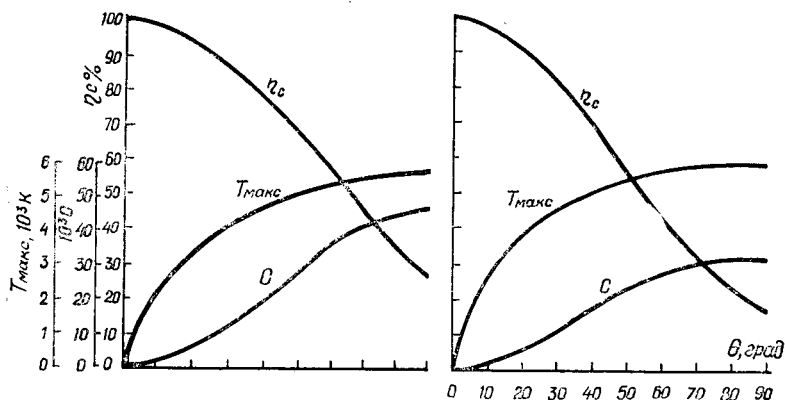


Рис. 20. Степень концентрации энергии ( $\eta_c$ ), концентрация ( $c$ ) и максимально достижимая температура ( $T_{\max}$ ) в зависимости от угла открытия для приемника в виде полости (слева) и пластины (справа), помещенных в фокусе.

лическое зеркало. Кривые на рис. 20 представлены для идеальных условий — геометрически идеального параболоида с 100 %-ной отражательной способностью, помещенного вне атмосферы. Максимальный поток, получаемый в этих условиях, равен произведению солнечной постоянной ( $P_0 = 0,14$  Вт/см<sup>2</sup>) на концентрацию, соответствующую углу открытия (90°). Этот поток составляет 6,44 кВт/см<sup>2</sup> для абсолютно черного тела и 4,34 кВт/см<sup>2</sup> — для плоской пластины.

Известно, что около 20 % солнечной радиации поглощается атмосферой. Следовательно, поверхности Земли достигает  $0,8 P_0$ . Отражательная способность параболоидных зеркал составляет, как правило, 0,85. Тогда достижимая величина коэффициента отражения составит  $0,8 \cdot 0,85 = 0,68$ . За пределами некоторого определенного угла (около 60°) концентрация потока увеличивается слабо: чем больше угол  $\theta$ , тем меньше точность параболы ( $\gamma$ ). Поэтому считается, что максимальный угол открытия отражателя практически равен 60°.

Вследствие неравномерного излучения солнечного диска плотность потока энергии в фокальном изображении имеет максимальное значение в центре и понижается к краям.

Методами калориметрирования в самых первых исследованиях было установлено, что распределение облученно-

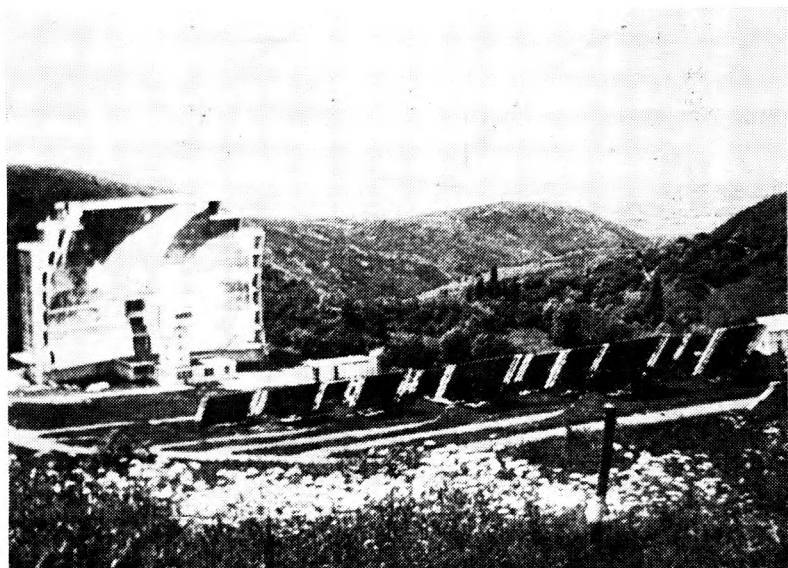


Рис. 21. Внешний вид солнечной печи мощностью 1 МВт (Франция).

сти в фокальном пятне реального параболоида в осевом и радиальном направлениях весьма неравномерно: изменяется от минимального значения у края, проходит через максимум по центру пятна и вновь падает до минимума. Такая кривая обычно описывается так называемым интегралом вероятности, или функцией ошибок Гаусса.

В зависимости от назначения солнечной установки, ее мощности, рабочих температур, особенностей эксплуатации требования к концентраторам могут быть самыми разнообразными. В соответствии с этим будут разными конструкции фокусирующих зеркал, материалы и методы, используемые при их изготовлении. В настоящее время находят применение цельные стеклянные (прожекторного типа) и составные (фацетные). При создании крупных концентраторов для высокотемпературных печей и солнечных электростанций в основном используются стеклянные зеркала. Наряду с этим все большее применение находят новые конструкционные материалы и технологические приемы. Прогресс, естественно, обусловлен стремлением снизить стоимость и массу зеркал, улучшить их эксплуатационные качества, создать специальные концентраторы для космической энергетики и материаловедения. Например,

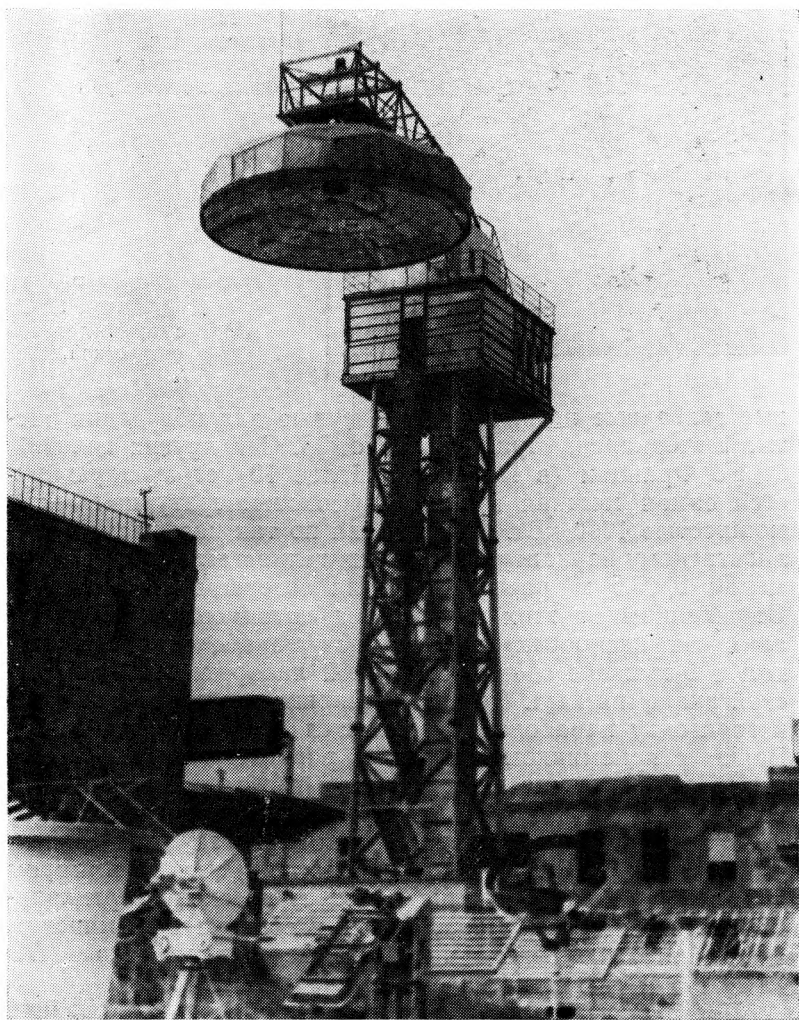


Рис. 22. Высокотемпературная вертикальная солнечная установка с  
факетным концентратором диаметром 10 м.

в качестве материалов для концентраторов используют полимерные пленки, никель, алюминий, стеклопластик, пластмассу и т. д.

В настоящее время в мире действует ряд солнечных электростанций, в которых используются различные принципы преобразования энергии, а также высокотемператур-

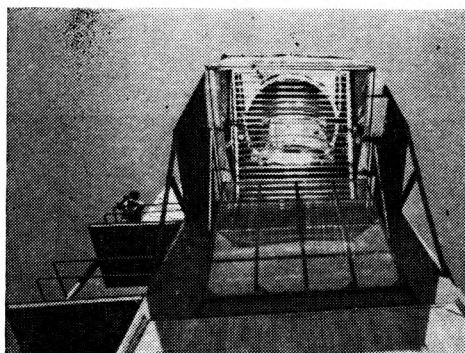


Рис. 23.  
Вертикальная  
солнечная печь с  
зеркалом диаметром  
2 м.

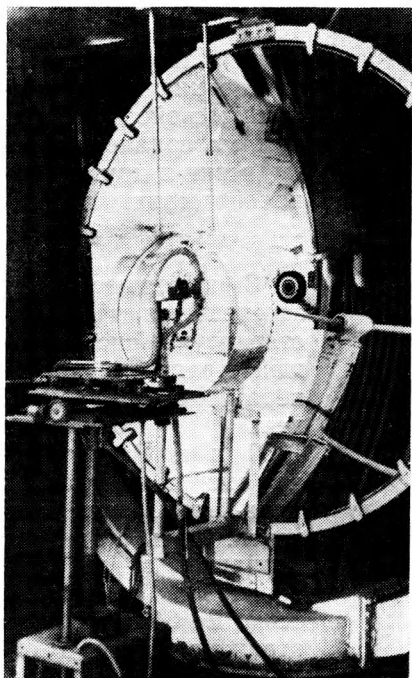
Рис. 24.  
ВТСУ  
с горизонтальной  
оптической осью.

ные солнечные печи, предназначенные для получения чистых материалов, отработки узлов СЭС и других целей.

Во Франции (в Пиренеях) более 10 лет эксплуатируется самая мощная в мире высокотемпературная печь мощностью 1000 кВт. Создана она по так называемому гелиостатному варианту: 64 плоских гелиостата, каждый размером  $5 \times 5,5$  м, расположены на северном склоне горы. Отраженный от этих гелиостатов поток солнечной радиации «зафиксирован» на огромном параболоиде, встроенном в 9-этажное здание солнечной лаборатории Французской академии наук (рис. 21). Ширина этого наклоненного к горизонту параболоида равняется 40, а высота — 50 м. Башня с приемником излучения, расположенная в фокусе параболы, оснащена лифтом и всем необходимым оборудованием для разнообразных технологических операций.

У нас в стране создана высокотемпературная солнечная установка с фасетным параболоидным концентратором диаметром 10 м. Установка работает по схеме вертикальной оптической оси. Разработана и создана в Армянском отделении Всесоюзного института источников тока (АО ВНИИТ) и расположена в Ереване (рис. 22).

Поверхность параболоидного концентратора разбита на пять поясов, на каждый из которых определена расчетным путем стрела прогиба фасетов. Последние изготовлены методом молирования. Концентратор закреплен на высоте около 30 м. На отметке 24 м размещено лабораторное помещение и откидной мостик для прохода к фокусу. В центре башни имеется лифт. Внизу расположен гелиостат, состоящий из 300 плоских зеркал, размером  $0,6 \times 0,6$  м. Общая площадь гелиостата около  $110 \text{ м}^2$ . Мощность печи — 35 кВт. Температура в фокальном пятне диаметром 30 см достигает  $2000^\circ\text{C}$ .



В АО ВНИИТ созданы и много лет эксплуатируются концентраторы прожекторного типа с диаметром зеркала 1,5—2 м. Высокотемпературные солнечные установки (ВТСУ) снабжены, как правило, системами автоматического слежения за Солнцем и регулирования лучистого потока в фокальном объеме. И, наконец, экзотический снимок в зеркале гелиостата ВТСУ с вертикальной оптической осью и диаметром концентратора 2 м (рис. 23). Установка снабжена гелиостатом размером  $3 \times 3$  м и шторным регулятором лучистых потоков.

В Научно-производственном объединении

«Солнце» АН ТССР создан ряд высокотемпературных солнечных установок, на которых проводятся исследования по выращиванию монокристаллов и получению новых полупроводниковых соединений. ВТСУ с горизонтальной оптической осью и диаметром концентратора 1,5—2 м показана на рис. 24. Один и тот же гелиостат размером  $3,5 \times 3$  м обслуживает также концентратор вертикальной оси. Синтез полупроводникового соединения осуществляется в предварительно вакуумированной кварцевой ампуле.

Несколькими гелиоустановками высокотемпературного назначения располагает АН УзССР. Они созданы по различным оптическим схемам, диаметр концентратора достигает 1—3 м. На этих установках широким фронтом ведутся работы в области синтеза сверхогнеупорных оксидов, а также по получению аморфных оксидных соединений методом сверхострых закалок.

Солнечная печь с диаметром концентратора 2 м и гелиостатом имеет фокусное расстояние концентратора 850 мм, фокальное изображение диаметром 10 мм. Максимальная плотность облучения при непосредственном слежении концентратора за Солнцем достигает 25, в гели-

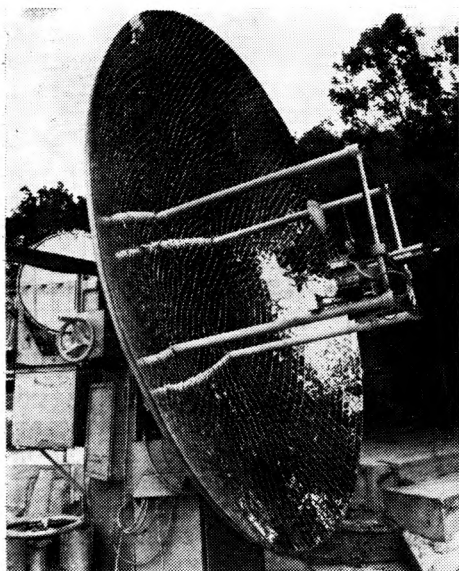


Рис. 25. Гелиотехническая установка СГУ-6.

ший концентратор, в фокальном объеме которого будут осуществляться в полупромышленном масштабе переплав оксидов, синтез тугоплавких соединений, сложных систем, сверхострые закалки оксидных материалов и т. п.

Солнечными печами мощностью 2—3 кВт располагает АН УССР. Наиболее крупные из них (с диаметром зеркальной параболы 3 и 5 м) созданы на базе радиоастрономических антенн. Как известно, зеркало антенны всегда изготавливается с предельной точностью по геометрии.

Требования к шероховатости поверхности параболы должны укладываться в полуволну рабочего диапазона. Поэтому если создать технически доступными средствами оптическую поверхность на геометрически правильной параболе, то таким путем, оказывается, можно существенно продлить (или возродить) жизнь морально устаревшего оборудования. Главным при этом является способ нанесения зеркального слоя на сплошную параболу. Установки СГУ-6 (рис. 25) и СГУ-7 (рис. 26) были изготовлены путем соединения небольших зеркальных факет размером  $60 \times 60$  мм с помощью специального клея-герметика. Этот клей играет роль демпфирующего слоя между стеклом

остатном варианте —  $13 \text{ мВт/м}^2$ . Используется установка для исследования теплофизических свойств различных материалов, сварки, резки и других технологических процессов. Мощность печи 1,5 кВт.

В настоящее время завершается строительство крупнейшей в нашей стране высокотемпературной солнечной печи мощностью 1000 кВт. Расположена она в предгорьях Тянь-Шаня, близ Ташкента. Печь создана в варианте с горизонтальной оптической осью. Ее 64 гелиостата отражают лучи в об-

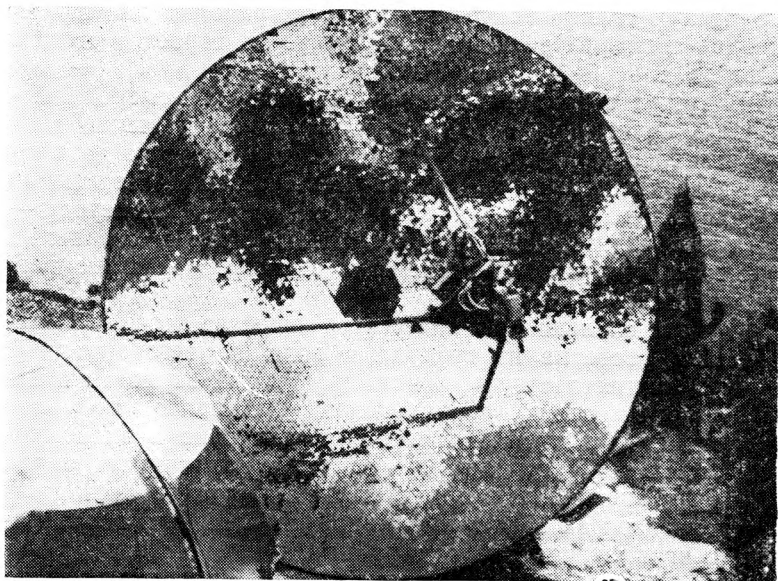


Рис. 26. Внешний вид установки СГУ-7.

фацет и металлической подложкой, компенсирующего разницу коэффициентов их термического расширения.

Таким образом, созданные в 1972 г. гелиотехнические установки эксплуатируются до настоящего момента без нарушения приклея и потери отражательной способности в условиях морского климата на Крымской гелиотехнической базе Института проблем материаловедения АН УССР.

### **СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ, ФОТОСИНТЕЗ И ИЗМЕНЕНИЕ НАСЛЕДСТВЕННЫХ СТРУКТУР**

«...Когда-то, где-то на землю упал луч солнца, но он не упал на бесплодную почву, упал на зеленую былинку пшеничного ростка или, лучше сказать, на хлорофилловое зерно. Ударяясь о него, он потух, перестал быть светом, но не исчез. Он только затратился на внутреннюю работу, он рассек, разорвал связь между частицами углерода и кислорода, соединенными в углекислоте.

Освобожденный углерод, соединяясь с водой, образовал крахмал. Этот крахмал, превратясь в растворимый сахар, после долгих странствий по растению отложился, наконец, в зерне в виде крахмала же или в виде клейковины.

...Этот луч солнца согревает нас. Он приводит нас в движение. Быть может, в эту минуту, он играет в нашем мозгу»<sup>2</sup>.

Растение строит свое тело в основном из углерода, водорода, кислорода, серы, фосфора, калия, кальция, магния и железа, причем оно усваивает эти вещества не в виде отдельных элементов, а как более сложные соединения водорода и кислорода, главным образом воды, углерода — из газообразного соединения углекислоты, а остальные элементы получает из почвенных растворов в форме различных солей.

О том, сколько органического вещества может синтезировать растение из воздуха и воды за вегетационный период, свидетельствует, например, урожай зерновых культур. С точки зрения энергетического баланса подобное производство в высшей степени рационально и экономично. На синтез 1 кг глюкозы растение затрачивает около 4,4 кВт/ч энергии. Примерно столько же потребляет цветной телевизор за 15 ч непрерывной работы. Для образования 1 кг виноградного сахара необходимо связать 400 г чистого углерода, синтезированного из 0,75 м<sup>3</sup> углекислого газа. Поскольку содержание последнего в воздухе составляет 0,033 %, то для получения такого количества углерода растение должно «обработать» 2250 м<sup>3</sup> воздуха. При этом разлагается 0,6 л воды с выделением 0,75 м<sup>3</sup> чистого кислорода.

В глобальном масштабе наземные растения и растения морей ежегодно связывают 42,2 млрд. т углерода, который расходуется на образование 105,5 млрд. т виноградного сахара.

Растение — это сложный организм, и его реакции на изменения окружающей среды очень разнообразны. Очень любопытно, например, их отношение к интенсивности света. При ее снижении уменьшается продуктивность растений. Однако для них опасен и очень интенсивный, прямой свет — процесс фотосинтеза замирает. К негативным явлениям следует отнести капризы погоды, недостаток влаги, минерального питания, вредители и т. д.

Конечная цель всего живого — выжить и дать потомство, и практически на каждом шагу мы встречаем примеры безраздельной победы растений в борьбе с враждебностью окружающей среды, победы, подготовленной умением организмов принаравливаясь к изменяющимся условиям существования.

---

<sup>2</sup> Тимирязев К. А. Собр. соч.— М., 1957, т. 1, с. 293.

Как поставить себе на службу неиссякаемую энергию Солнца, следуя примеру растений? Академик Н. Н. Семенов считал, что каждая живая клетка — миниатюрный химико-энергетический завод со множеством специальных «цехов». На этом «заводе» все взаимосвязано, и каждый элемент в клетке действует с «оглядкой» на другие узлы (осуществляет обратную связь). И если мы пожелаем, например, получить определенное вещество, которое синтезируется в организме, то, используя принципы природы (не копируя ее), сможем со временем в простом виде реализовать любой химический процесс, осуществляемый в организме.

Биологические системы используют не ультрафиолет, а более бедные энергией лучи — видимые. Однако их фотосинтезирующие системы очень нежны, и не могут использоваться в технологических установках. Заменой их более простыми и надежными системами занимается химическая бионика.

Трудно удержаться от восхищения перед чувствительностью растений к ничтожным количествам света. Кончики побегов мышиного горошка, например, реагируют на свет электрической лампочки мощностью 25 и 100 Вт на расстоянии 30 и 70 км соответственно.

«Оптическая система» растений спокойно выдерживает такие перепады в уровнях освещенности, которые не выносит даже человеческий глаз, имеющий, как известно, высокую адаптационную способность.

Давно было замечено, что в оптимальных условиях освещенности и обеспеченности углекислым газом лимитирующим фактором скорости фотосинтеза растений является температура среды. В 1932 г. был осуществлен такой опыт. Одни растения подвергали непрерывному освещению, другие — чередованию света (0,00001 с) и темноты (0,04—0,4 с). Оказалось, что в первом случае коэффициент использования растениями поглощенной энергии света во много раз меньше, чем во втором.

В природной обстановке растения, обитающие на суше, не всегда подвергаются действию света одного и того же спектрального состава. Как известно, в течение суток существенным образом изменяется состав солнечного излучения. Так, при положении Солнца в зените на долю инфракрасных лучей приходится до 50 %, видимых — 46 и ультрафиолетовых — всего 4 % всей суммы излучения, тогда как при положении Солнца у горизонта последние исчезают совсем, доля видимых — уменьшается (28 %) и заметно возрастает процент инфракрасных (72 %). Меня-

ется состав солнечной радиации и в пасмурную погоду. Например, если в ясный солнечный день преобладает коротковолновая радиация, то в облачный максимум излучения перемещается к более длинным волнам.

На современном этапе развития сельского хозяйства огромная роль принадлежит селекции, одному из мощных факторов научно-технического прогресса в растениеводстве, которая позволяет значительно повысить урожайность сельскохозяйственных культур. Основной движущей силой этого процесса является выведение высокоурожайных сортов, способных интенсифицировать сельскохозяйственное производство.

Одна из главных задач, стоящих перед селекционерами и учеными смежных специальностей (генетиков, биохимиков и др.) — выведение новых сортов пшеницы со стабильной и высокой потенциальной урожайностью, сравнительно короткостебельных и высокоустойчивых к экстремальным погодным условиям, вредителям и болезням, с высокими технологическими качествами зерна. На этом пути предстоит преодолеть обратную зависимость между урожайностью, короткостебельностью, морозо- и зимостойкостью.

Среди решающих факторов, обеспечивающих успех в селекционной работе, является наличие исходного селекционного материала, его ценность и качество. Очень важно найти правильный и наиболее эффективный способ получения такого материала.

В практике селекционной работы применяются различные методы выведения новых сортов. Наряду с классическими методами создания селекционного материала (гибридизация и отбор) за последние годы у нас в стране и за рубежом разрабатывается метод получения исходного материала у пшеницы при помощи физических и химических мутагенных факторов, так называемый индуцированный мутагенез. Он позволяет решить такие важные проблемы, как увеличение урожайности, содержание и улучшение качества белка; создание короткостебельных, устойчивых к вредителям сельскохозяйственных растений, повышение их морозо- и зимостойкости. Используя мутагенез, можно вывести очень ценные в селекционном отношении формы, которые нельзя получить при гибридизации и последующем отборе.

Излучение Солнца является одним из главных элементов непрерывного круговорота энергии и вещества, который определяет жизнь. Если изменить энергетический уровень и характер воздействия солнечной энергии на растительные организмы на различных стадиях их развития,

бесспорно, должны измениться их признаки (фенотип). При отборе фенотипов выживают формы конкретного взаимодействия наследственных признаков (генотип) и среды. Мутагенные процессы во многом определены изменением качественного и количественного содержания солнечной энергии. Эти изменения, обусловленные циклами солнечной активности, геотермальными процессами, резкими изменениями климата, локальными катастрофами, хорошо описываются известной формулой: среда  $\rightarrow$  фенотип  $\rightarrow$  генотип.

Основываясь на этих общеизвестных фактах и принимая во внимание, что изменения интенсивности солнечного света, состава, давления и температуры окружающей среды являются основными факторами естественного эволюционного или спонтанного мутагенеза, специалисты пытались воспроизвести некоторые факторы для возбуждения так называемой генетической памяти и получения исходного материала с необходимыми положительными признаками для селекционной работы.

На этом пути вдохновляющую роль играет то обстоятельство, что среди множества способов воздействия на семена сельскохозяйственных культур, предпринимаемых в настоящее время (семена давят, травят, трясут, облучают, озвучивают и т. п.), выбранные нами являются безвредными, не жесткими, оправданными эволюцией развития и относительно легко осуществимыми.

К внешним условиям воздействующих факторов относится уровень концентрации падающего солнечного света. Иногда его выражают через коэффициент кратности, т. е. отношение плотности лучистого потока в фокальном объеме зеркального параболоида к плотности нормальной солнечной радиации на данной широте и в данный момент времени. Кроме того, внешними воздействующими факторами считаются продолжительность импульса облучения, температура и влажность окружающего воздуха и в зерне в момент действия импульса, а также спектральный состав нормальной солнечной радиации.

При фотохимических реакциях каждая молекула, поглощающая один квант света (один фотон), переходит в возбужденное состояние и вовлекается в химические реакции. Для перевода 1 моля вещества ( $6 \cdot 10^{23}$  молекул) в возбужденное состояние необходимо  $6 \cdot 10^{23}$  квантофотонов. Эта величина (т. е. энергия «1 моля» фотонов) получила название эйнштейна (Е).

Воспользовавшись константами, можно рассчитать, что энергия 1 Е равна частному от деления  $2854 \cdot 10^7$  кал на

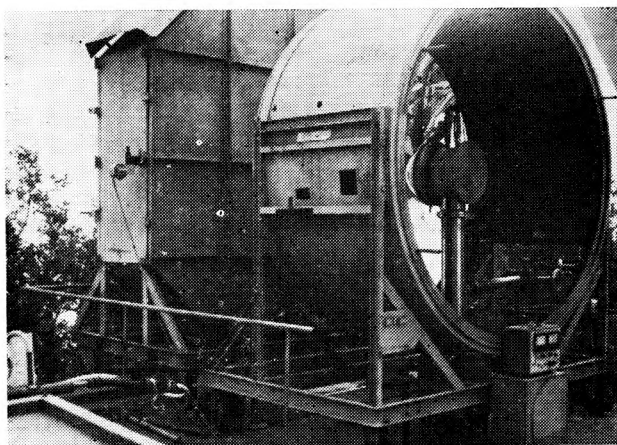


Рис. 27.  
Установка  
«Атон-1».

длину волны (в нанометрах), т. е.  $1 \text{ Е} = 2854 \cdot 10^7 / \lambda \text{ нм}$ . Для синего цвета ( $\lambda = 450 \text{ нм}$ ) 1 Е соответствует 64 тыс. кал, а для красного ( $\lambda = 660 \text{ нм}$ ) — 43 тыс. кал. Кванты света разных длин волн обладают различной энергией — для синего цвета она больше, чем для красного.

Существует, как было показано выше, определенное количественное соотношение между числом поглощенных квантов и числом возбужденных, или активированных, молекул.

Пропуская свет разной длины волны через раствор исследуемого вещества и следя за его поглощением, можно установить спектр поглощения данного вещества. Например, если максимум поглощения приходится на красную область (660 нм), то это означает, что для перехода электрона с заполненной внутренней орбитали на незаполненную внешнюю необходимо 43 ккал на 1 моль.

Каждый тип молекул имеет свой характерный спектр поглощения, и по нему можно определять, т. е. идентифицировать вещества, выделенные из растительной или животной клетки.

В силу своей мягкости, близости природе растений и повсеместной доступности импульсное облучение концентрированным солнечным светом растений и их органов заслуживает внимания в качестве мутагенного фактора и становится эффективным средством изменения наследственности сельскохозяйственных культур.

В Мироновском научно-исследовательском институте селекции и семеноводства пшеницы совместно с Институтом проблем материаловедения и Институтом молекуляр-

ной биологии и генетики АН УССР проводятся работы по созданию исходного материала для селекции с помощью облучения семян озимых и яровых пшениц импульсным концентрированным солнечным и искусственным светом. Это целесообразно во многих отношениях: во-первых, семена можно облучать в контролируемых условиях; во-вторых, можно обрабатывать большое количество семян при одних и тех же параметрах; в-третьих, генетические изменения, возникшие в одной клетке семени, могут распространиться на значительную часть растения, развивающуюся из этой клетки.

Основная задача исследований — создание сравнительно короткостебельного, морозоустойчивого, зимостойкого и высокопродуктивного селекционного материала по озимым и яровым пшеницам. Для изучения взяты сорта озимых и яровых пшениц различного эколого-географического происхождения с целью выявления специфической реакции этих сортов на светои импульсное облучение.

В основу методических разработок по облучению семян заложено понятие о кратности облучения ( $K^*$ ), которое представляет собой отношение плотности солнечной энергии в данном сечении фокального объема ( $E_{\phi}$ ) к плотности нормальной солнечной радиации в момент облучения ( $E_0$ ):

$$K^* = \frac{E_{\phi}}{E_0} .$$

Семена облучаются в специальной солнечной печи — параболической металлической сплошной антенне диаметром 2,8 м, на которую наклеены зеркальные кусочки (фацеты).

Облучение семян импульсным электрическим светом производится на лабораторной установке «Уран-1», выполненной на базе эллипсоидного зеркала диаметром 0,60 м и ксеноновой лампы высокого давления, спектр излучения которой близок к солнечному, а также на установке «Атон-1» (рис. 27).

Разработана схема облучения в специальных кассетах, позволяющая однообразно ориентировать положение зародышей в направлении к источнику воздействия. Тем-

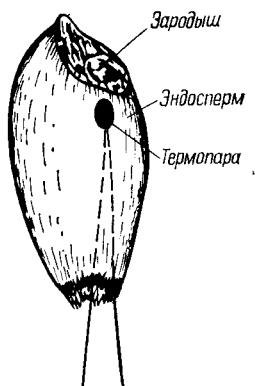


Рис. 28.  
Зерно пшеницы  
с термопарой внутри.

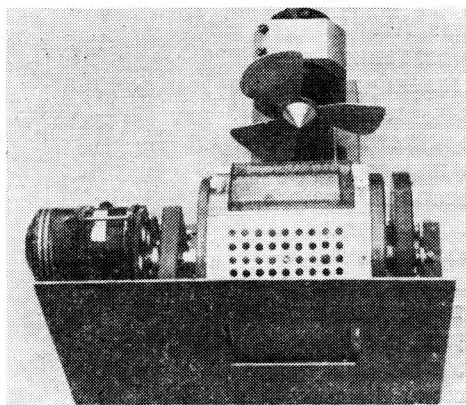


Рис. 29.  
Шестигранный  
пакетник —  
приемник излучения.

Рис. 30.  
Гелиостатная  
установка «Атон-1».

пература внутри семян измеряется с помощью хромель-копелевой термопары (диаметр термоэлектродов 0,2 мм), введенной в зерновку на глубину 2—3 мм (рис. 28).

Импульсность облучения достигается вращением шестигранного кассетника в заданном сечении фокального объема, которое определяет кратность облучения (рис. 29).

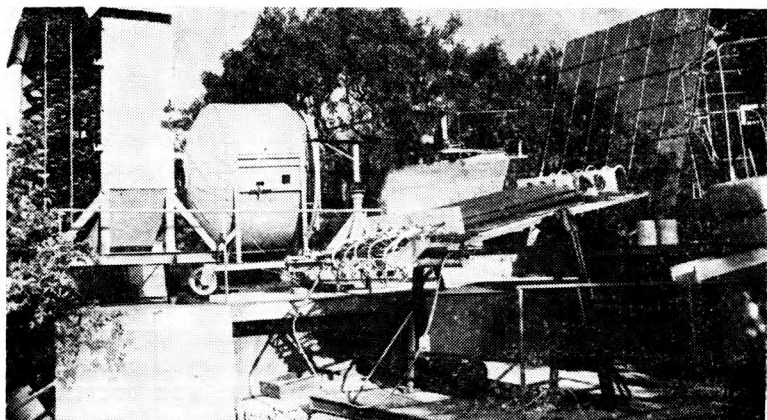
В тех случаях, когда облучение проводили в ультрафиолетовом диапазоне спектра (лампа ПРК-100 размещается над шестигранником), использовали гелиостатную установку «Атон-1» (рис. 30).

Весь обработанный материал высевали в основном в полевых условиях, часть семян яровых пшениц выращивали ускоренным методом, используя климатические камеры и теплицы. В течение всего вегетационного периода осуществляли визуальный контроль за ростом и развитием, т. е. проводили так называемые фенологические наблюдения, а после уборки проводили полный анализ структуры урожая по методике Государственной комиссии по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур.

Морозостойкость растений определяли методом прямого промораживания в посевных ящиках, зимостойкость — по числу перезимовавших растений.

При выращивании яровых и озимых пшениц, полученных из облученных семян, во втором и последующих поколениях проводили отбор форм, отличающихся от исходных повышенной продуктивностью колоса и большей устойчивостью к влиянию экстремальных условий в процессе зимовки.

Суть этого нового приема получения исходного селекционного материала заключается в прерывистом действии концентрированного солнечного света, сфокусированного



на растительный объект, которое является дополнением к естественному солнечному облучению. В силу своей импульсивности и высокого фототермического действия он относится к высокоэнергетическому типу излучения наряду с ультрафиолетовым, рентгеновским и радиоактивным. Под его влиянием в клетках семян происходят разнообразные изменения — ионизация и возбуждение атомов, разрыв слабых связей с образованием свободных радикалов, появление вторичных электронов, приводящие к реакциям, несвойственным для растений в нормальных условиях. И, естественно, возможность получения полезных внутриклеточных изменений при этом не меньше, чем при других видах воздействия.

Определенный интерес вызывают работы Мироновского научно-исследовательского института селекции и семеноводства пшеницы, получившего с помощью фототермического мутагенеза перспективные формы озимой пшеницы. В 1985 г. одна из них в производственных условиях дала урожай порядка 47 ц/га, что превышает средний урожай этой культуры на 8—10 ц/га. Эта форма отличается короткостебельностью (90—95 см), устойчивостью к полеганию, высоким качеством зерна и зимостойкостью. Еще целый ряд форм этой культуры, отличающихся комплексом полезных признаков и свойств, успешно проходят испытания в различных звеньях селекционного процесса.

## УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ И ОХРАНА ПРИРОДЫ

Можно ли повысить устойчивость растений к холоду и заморозкам? Решение этой проблемы имеет огромное практическое значение: внезапно наступающие холода и заморозки наносят большой урон урожаю возделываемых культур.

Установлено, что растения лучше переносят холод в темноте, чем на свету. Например, огурцы в темноте выживают и при температуре  $2^{\circ}\text{C}$ , тогда как на свету при таком похолодании погибают. Полагают, что губительное действие света связано с накоплением в клетках растений избыточной солнечной энергии: при пониженной температуре фотосинтез прекращается, поэтому возбужденные молекулы хлорофилла не в состоянии передать энергию химическим веществам.

Факты как будто противоречат тому, что свет нужен для закалки растений. Однако это не так. Свет необходим растениям при фотосинтезе для накопления ассимилятов, т. е. сложных веществ, составляющих организм. Но он не нужен и даже вреден, когда фотосинтез прекращается в силу очень низкой температуры.

О важном значении света для закаливания растений свидетельствует такой пример. Если побеги яблони в течение четырех месяцев выдерживать на свету, то они переносят морозы до  $-35^{\circ}$ , тогда как в темноте они погибают уже при  $-18^{\circ}\text{C}$ . Аналогично влияет свет и на морозоустойчивость корней. Корни обычно значительно чувствительнее к действию холода, чем крона деревьев. Например, у яблони они погибают при  $-17^{\circ}$ , в то время как надземная часть выдерживает  $-40^{\circ}\text{C}$ . Если же корни выкопать и держать на свету в течение 3—5 месяцев, то они, закаляясь, выживают и при  $-35^{\circ}\text{C}$ .

Разные растения неодинаково реагируют на действие холода. Например, капуста и лук переносят мороз до  $-10^{\circ}$ , пшеница и рожь — до  $-29^{\circ}$ , а деревья — до  $-60^{\circ}\text{C}$  и ниже.

Недавно удалось повысить и морозостойкость пшеницы. Проростки озимой пшеницы, помещенные в 20 %-ный раствор сахарозы и выдержанные в темноте при низкой положительной температуре в течение двух недель, не погибли даже при  $-32^{\circ}\text{C}$ . Столь резкое повышение морозостойкости пшеницы связано с возросшей в результате обработки устойчивостью ее протоплазмы к обезвоживанию

и механическим повреждениям. Когда же проростки выдерживались в растворах других сахаров, они погибали, как и незакаленные. Данные этих опытов свидетельствуют о том, что морозоустойчивость растений увеличивается благодаря углеводам, которые внутри клетки превращаются в сахарозу.

Эта гипотеза о механизме морозоустойчивости растений способствовала выведению невымерзающих форм путем так называемой витрификации, т. е. восстановления жизнеспособности осторожным размораживанием после резкого охлаждения ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) и с помощью закаливания, а также разработки лабораторных методов определения морозоустойчивости растений и отбора морозоустойчивых форм, в частности у озимых. Оказалось, что важны не только условия закалки, но и скорость оттаивания растений. Если она очень высока, обезвоженные протопласты почти мгновенно впитывают образующуюся воду, что вызывает структурные нарушения в клетках и их отмирание. При медленном оттаивании этого не происходит, и клетки остаются живыми.

При воздействии на семена различных культур температурой, светом или другими факторами уменьшается количество тормозителей, и тем самым нарушается покой.

Рассмотрим один из любопытнейших фактов, с которым нам пришлось столкнуться и который остался вне научного объяснения. При выборе наиболее эффективных режимов предпосевного облучения семян пшеницы концентрированным солнечным светом казалось логичным ввести в зерновку максимально возможное количество квантов света, т. е. воздействовать так называемыми сублетальными дозами. Для определения этого порога были облучены семена различных сортов пшеницы, и началась «жаркая битва», каждый раз завершающаяся проращиванием семян в увлажненных сосудах — чашечках Петри. Напомним, что при любом режиме облучения в одно из центральных зерен на глубину 2—3 мм вводится термопара. Постепенное ужесточение режимов опыта (в течение 10—15 мин температура держалась в пределах  $100\text{—}110^{\circ}\text{C}$ ) привело к выявлению поразительного факта: зерна (почти изжаренные) прорастали! Не правда ли, удивительно?! Естественно, количество проросших семян не превышало 10 %, но это уже не важно. Ведь известно, что белок сворачивается при  $46^{\circ}\text{C}$ !

Этот результат зафиксирован многократно при облучениях на солнечном концентраторе. Для его подтверждения был проведен эксперимент в электрической печи (тер-

мостате). Процесс нагрева и выдержка температуры были такими же, как в опыте на концентраторе, их фиксировали также по показаниям термопары, введенной внутрь одного из зерен. Оказалось, что прорастает примерно то же количество семян.

Этот любопытный факт представлен в специальной научной литературе без какой-либо интерпретации<sup>3</sup>.

В настоящее время в Мироновском научно-исследовательском институте селекции и семеноводства пшеницы выращивается уже не в одном поколении пшеница из зерен, оказавшихся победителями в этом «жарком сражении».

Огромную роль в деле увеличения пищевого баланса на нашей планете призван сыграть растительный мир Мирового океана. Как известно, в морях и океанах синтезируется 7/8 всех органических веществ Земли. Но человек, пока еще очень робко касается этих колоссальных богатств. Взять к примеру водоросли — изумительные поставщики белка. По подсчетам ученых, в Мировом океане обитает 17 тыс. различных видов водорослей. Однако лишь очень незначительная часть используется человеком для пополнения белковых запасов. Например, в Республике Чад выращивается в специальных водоемах водоросль спирулина, которая ежегодно дает неплохой урожай — 45 т/га, а это — 25 т самого настоящего белка. Цифра немалая, если учесть, что с такой же площади сельскохозяйственных угодий и за то же время можно получить лишь 40 кг животного белка. Высокий выход белка при разведении водорослей объясняется и высоким урожаем, и тем, что водоросли содержат 60—65 % белка, т. е. в три раза больше, чем мясо животных. Мировой океан — не только источник пищи, но и «легкие» Земли. В нем ассимилируется значительная часть углекислого газа атмосферы и выделяется более половины содержащегося в ней кислорода. Но и его «кислородные возможности» сокращаются: моря и океаны все больше загрязняются продуктами, уничтожающими все живое. Известный норвежский ученый Тур Хейердал считает, что если не будет принято решительных и срочных мер, то в течение ближайших 10 лет жизнь в Средиземном море будет уничтожена вследствие засорения и отравления вод отходами промышленного производства.

---

<sup>3</sup> Тимошенко В. М., Дверняков В. С., Шалин Ю. П. и др. Изменение жизнеспособности семян пшеницы под влиянием теплового и светового воздействия. — Физиология и биохимия культур. растений, 1978, т. 10, № 3, с. 227—231.

# **КОСМИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

## **ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ**

В 1969 г. на борту советского космического корабля «Союз-6» впервые была осуществлена сварка и резка металлов, что положило начало космической технологии. Работы производились с помощью специальной установки «Вулкан», разработанной в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР. Эта установка позволяет проводить сварку тремя способами — электронным лучом, сжатой дугой, плавящимся электродом.

Американские космонавты в 1973 г. на борту орбитальной станции «Скайлэб» изучали поведение расплавленных металлов в невесомости. Причем так же, как и на «Вулкане», в качестве источника тепла они использовали электронный луч для расплавления материалов.

Далее, в 1975 г. на борту советской орбитальной станции «Салют-4» была осуществлена технология иного плана. На зеркало солнечного телескопа было нанесено отражающее покрытие, что позволило восстановить оптические свойства поверхности. В земных условиях пришлось бы сооружать большую специальную вакуумную камеру, тогда как в космосе вакуум «под рукой».

В совместном советско-американском полете «Союз — Аполлон» выполнен другой технологический эксперимент под названием «Универсальная печь», который заключался в расплавлении и последующем охлаждении различных сплавов, а также исследовании их свойств в условиях невесомости.

Бесспорно, что горячая обработка металлов в условиях космоса непременно окажет влияние на конструкции будущих космических и орбитальных аппаратов, предназначенных для длительной работы. Уже сейчас очевидна необходимость проведения на орбите плановых и аварийных технологических работ, связанных с нагревом, расплавлением и напылением металлов и неметаллов.

Возникновение космической технологии следует считать следствием бурного развития космонавтики и научных исследований, позволивших сделать выводы о возможностях и преимуществах выполнения в космосе технологических работ как непосредственно человеком, так и с помощью автоматов. Бесспорно также, что космическая технология окажет существенное влияние на земную технологию и будет непосредственно использоваться на Земле. В далеком будущем на орбитальных заводах будут созданы такие производственные условия, которые на Земле невозможны. Изыскания новых материалов либо изделий с особыми свойствами могут оказаться неожиданно плодотворными вследствие обнаружения новых эффектов, которые существенно расширят наши представления в материаловедении и принесут неоценимую пользу для земной цивилизации.

Например, в условиях невесомости можно получать однородные смеси самых разных по плотности веществ. Они не расслаиваются, легкие частицы не всплывают на поверхность, а тяжелые не оседают на дно. Таким образом предполагается получать пенистые металлы с кристаллизацией расплавов и равномерным распределением газовых пузырьков. Такой пенометалл будет прочнее самой высококачественной стали, а по удельному весу — почти как дерево. Например, пенистый алюминий (35 % алюминия и 65 % газа) свободно плавает в воде. Такие материалы являются мечтой конструкторов.

Или взять, например, композиционные материалы — затвердевшие смеси на основе металлов и неметаллов, наполненные волокнами, усами, порошками других материалов. Они имеют широкое распространение в быту и технике. Это различные армированные пластики, жаропрочные и износостойкие материалы. Потребность в них непрерывно растет. Однако получить равномерное распределение включений в расплаве основы на Земле не удастся вследствие существенной разницы плотностей компонентов материала. К примеру, для создания полупроводниковых приборов нового поколения необходима равномерная композиция галлий — висмут, расплавы которых очень трудно смешиваются. Получить такую композицию можно только в космосе.

В невесомости можно получать кристаллы из растворов и расплавов, не заключенных в контейнеры, что позволит обеспечить различные новые области техники продукцией высокой чистоты. Кроме того, можно получать кристаллы, в десять и более раз превышающие размеры «земных»; отливать полые металлические шарики идеальной формы,

которые окажутся в пять—восемь раз долговечнее «земных» и получать стекла из тугоплавких оксидов с очень ценными оптическими свойствами.

Но прежде чем приступить к сложным технологическим операциям в космическом пространстве, ученым предстоит провести огромный комплекс теоретических и экспериментальных исследований, в частности изучить поведение жидкого расплава металлов в космическом вакууме, жидкостей, содержащих твердые частицы и газовые включения.

Нередко при космических полетах земные материалы неожиданно начинают вести себя необычно. Так, во время полета американского корабля «Джемини-4» космонавтам пришлось пережить несколько тревожных минут. После выхода в открытый космос им пришлось потратить немало усилий, чтобы закрыть заклинивший люк. Это произошло вследствие так называемой диффузионной, или холодной, сварки металлов. В земных условиях это происходит так: если с поверхности двух металлов снять защитную оксидную пленку и плотно соединить их, то за счет взаимной диффузии атомов эти две поверхности непременно «сварятся». В космосе, где нет кислорода, пленка оксида не образуется и порой та, которая имеет земное происхождение, исчезает. В результате не раскроются антенны, не закроются люки, не разъединятся состыковавшиеся корабли и может произойти катастрофа. Поэтому все материалы и конструкции на Земле проходят экспериментальную проверку, прежде чем «прописаться» в космосе.

Среди этих испытательных средств особое место занимает комплекс имитаторов солнечного излучения. В течение длительного времени материалы и конструктивные изделия, предназначенные для использования в космосе, облучают мощными ксеноновыми лампами. Так, через 48 ч облучения обычно прозрачная в земных условиях пластинка из оргстекла становится абсолютно мутной. Это, как известно, происходит за счет ультрафиолетового излучения, содержание которого в солнечном спектре в космическом пространстве значительное, а на Земле оно имитируется с помощью так называемых водородных ламп (т. е. электрическим разрядом в среде водорода). Ксеноновые и водородные лампы дают возможность оценить воздействие коротковолнового излучения Солнца в лабораторных условиях и подобрать стекла иллюминатора, оптических приборов, гермошлемов скафандров и т. д.

Кроме того, в лабораторных условиях проверяется воздействие корпускулярного солнечного ветра — потока за-

ряженных частиц. Этот ветер опасен как для космонавтов, так и для всего корабля в целом. Как известно, свойства материалов определяются расположением атомов в кристаллической решетке. И любые нарушения этого «порядка» приводят к изменению характеристик материала. Под воздействием потока заряженных частиц происходит два явления: ионизация атомов материала и их смещение. Полимеры, например, при этом становятся хрупкими, ломкими, растрескиваются, некоторые полупроводники изменяют проводимость, что может вывести из строя электронные приборы и солнечные батареи.

Моделирование условий космической среды позволяет оценить воздействие последних на тот или иной материал и решить задачу их использования наиболее простым и дешевым способом. В настоящее время практически все условия будущих полетов, за исключением длительной невесомости, воспроизводятся в лабораторных условиях. Зачастую строительство комплекса наземных испытаний обходится дешевле, чем запуск спутника.

Для отработки многих технологических процессов широко используются эксперименты на летающей лаборатории. В частности, предварительным испытаниям подвергалось оборудование для исследования технологических процессов в космосе, разработанное Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР. На борту самолета создается кратковременная невесомость (20—25 с), однако достаточная для того, чтобы установить характерные особенности некоторых технологий в невесомости, например, особого литья, основанного на смачивании затвердевшего вещества жидким расплавом, или получения слоистых материалов любой формы с необходимым количеством слоев. Кроме того, создан специальный стенд для имитации работы испытателя в космическом скафандре при выполнении различных производственных операций.

Самым перспективным направлением при использовании космической техники для научных исследований и реализации новых технологических процессов является создание долговременных орбитальных станций со сменным обслуживающим персоналом. Такая станция представляет собой большую научную лабораторию в космосе, позволяющую проводить интереснейшие исследования в области физики элементарных частиц и космических лучей, проверять некоторые положения теорий относительности и гравитации. Орбитальная станция — это полигон для отработки и испытания агрегатов и систем. Со временем регулярные транспортные корабли позволят возвращать узлы

станции на Землю, ремонтировать или заменять другими. На них можно будет отрабатывать методы сборки и монтажа конструкций, систем крупных антенн для радиоастрономии и космической связи, оптических рефлекторов и лазерных отражателей.

По мнению академика Б. Е. Патона, для проведения производственных циклов в рабочих отсеках орбитальных станций и кораблей необходимо существенно расширить объем предварительных экспериментальных исследований. Для этого важно создавать и испытывать установки по возможности наиболее универсальные. Причем на орбите нецелесообразно для каждой операции или серии однотипных операций использовать различное оборудование. Надо, чтобы одну установку можно было сравнительно быстро переоборудовать даже в условиях полета или заменить в ней отдельные узлы, чтобы обеспечить выполнение всех или почти всех задач на борту космического аппарата и вне его.

Первыми в космосе используются и будут использоваться стационарные и переносные установки с ручным и полуавтоматическим управлением, а в перспективе, после освоения технологических операций, — полностью автоматизированные устройства с программным управлением. Но все они должны отвечать единым для всего, что выносится в космос, требованиям. Это — малые масса и размер, минимальные потребности в энергии, высокая надежность.

#### **ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ СОЛНЕЧНОГО НАГРЕВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕГО ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ**

Солнце является единственным естественным, экологически чистым и неисчерпаемым источником энергии. Особенно неocenима возможность ее использования в космическом пространстве. Большие перспективы открывает применение лучистой энергии Солнца для решения самых различных технологических, материаловедческих и биофизических задач.

В свое время К. Э. Циолковский писал: «Здесь можно непосредственной силой Солнца с помощью зеркал и стекол получить огненные очаги любой величины с температурой от 273° холода до 6000° тепла. Преобразованием солнечной энергии в механическую, а затем в электриче-

скую можно получить до 20 тысяч градусов и более»<sup>4</sup>. Далее он предлагал конструкции солнечных агрегатов в космическом пространстве, предназначенных для получения энергии и выполнения технологических и материаловедческих работ: «...Зеркала могут быть (параболоиды) громадных размеров, т. к. при тонкой их поверхности и малой массивности они целы и не гнутся от тяжести, которой нет. Для более правильной формы им полезно придать слабое вращение вместе с камерой, с которой зеркало составляет одно целое... Полезную температуру можно регулировать величиною поверхности зеркала и разного рода заслонками. Если требуется еще и определенное давление, то отверстие приходится плотно закрывать прозрачным для лучей заслоном... Но теми же камерами можно пользоваться для нагревания готовых сплавов с целью их отливания, прессования и кования для придания желаемых форм»<sup>5</sup>.

Преимущества использования солнечной энергии для космического производства заключаются в следующем. Простота подвода и дозирования, независимость ее усваивания от электромагнитных материалов позволяют с помощью одного устройства выполнять различные процессы: сварку, пайку, термообработку, разделительную резку, зонную очистку, получение полупроводниковых и отражательных пленок особой структуры и т. д.

Возможность бесконтактного подвода энергии к изделию допускает обработку материалов в атмосфере любого состава и давления, в том числе в глубоком вакууме. Учитывая отсутствие механического воздействия лучей на обрабатываемую поверхность, можно утверждать, что их энергия является идеальным источником для выращивания монокристаллов, сварки тонколистовых конструкций без опасности прожога и т. п. В ряде работ советских ученых показана принципиальная возможность выполнения перечисленных технологических процессов на стационарных наземных гелиоустановках и устройствах, использующих сфокусированную лучистую энергию Солнца.

Предложены конструкции орбитальных солнечных энергетических устройств и наземных гелиоустановок, позволяющих обрабатывать технологические процессы. Высокое качество полученных сварных и паяных соединений легированных сталей и титановых сплавов, возможность передачи концентрированной лучистой энергии с помощью си-

<sup>4</sup> Циолковский К. Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами.— Калуга, 1926, с. 25.

<sup>5</sup> Там же.

ловых световодов — все это свидетельствует о целесообразности и широкой перспективе прямого использования солнечной энергии в космическом материаловедении.

Преимущества использования солнечной энергии непосредственно, без преобразования, в процессах плавления, испарения, сварки и термообработки материалов кажутся на первый взгляд неоспоримыми. Тем не менее имеется и целый ряд недостатков, затрудняющих осуществление этих работ.

Прежде всего очень сложно создать точный концентратор с достаточно большой отражательной способностью и устойчивый к воздействию метеорных частиц. Кроме того, цикличность светотени на околоземной орбите требует особого планирования экспериментов. Обычно для них предусматриваются запуски по орбитам, приближающимся к полюсам. В этих случаях станция будет все время освещена Солнцем. Много нерешенных вопросов связано с системой слежения за Солнцем, дозировкой лучистого потока на приемник и поведением многих материалов в космических условиях.

Однако проведенные к настоящему времени эксперименты на наземных гелиотехнических средствах свидетельствуют о реальной возможности и широкой перспективе использования солнечного нагрева в космическом материаловедении.

Комплекс наземных гелиотехнических средств, предназначенных для отработки технологических и материаловедческих процессов с использованием солнечного нагрева, может быть представлен следующими установками.

Специальная гелиоустановка (СГУ-1) предназначена для сравнительного исследования свойств материалов под воздействием регулируемых тепловых лучистых потоков. Здесь определяется скорость, механизм разрушения, термостойкость и температурные поля внутри материала. Диаметр зеркального параболоида СГУ-1 равен 1,5 м. Регулируемая плотность излучения от 0 до 1300 Вт/см<sup>2</sup>, максимально достижимая температура 3 200 К (рис. 31).

СГУ-2М предназначена для исследования предварительно напряженного состояния на прочностные характеристики металлов с защитными пленками и неметаллов при одностороннем нагреве (рис. 32). С помощью ее можно определить предел прочности на растяжение, сжатие и изгиб при различных тепловых потоках и направлениях прикладываемой нагрузки (от нагрева к нагреву).

На СГУ-3 можно исследовать комбинированное воздействие на материал лучистого и конвективного тепловых по-

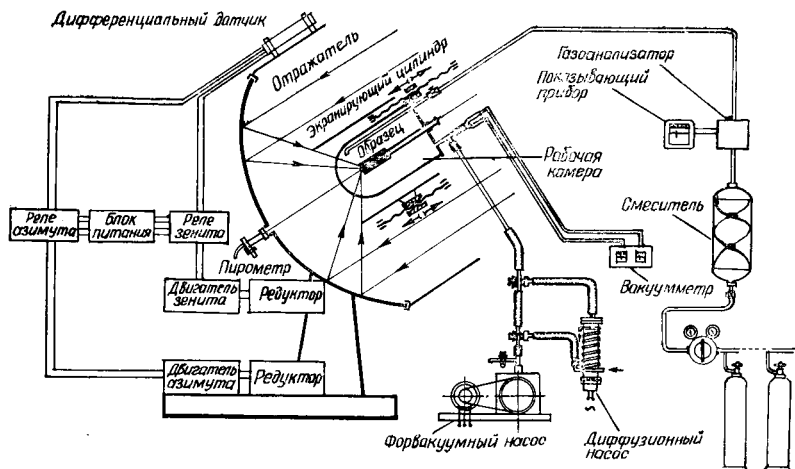


Рис. 31. Схема установки СГУ-1.

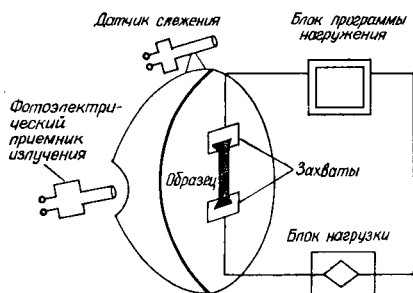


Рис. 32. Схема установки СГУ-2М.

токов. Интенсивность радиации в фокальной области и подводимый к ней высокотемпературной сверхзвуковой струей конвективный тепловой поток могут автоматически регулироваться по заданной программе. В качестве источника конвективного теплового потока используется генератор сверхзвуковой струи (ГСВ) — безвоздушный реактивный движитель (рис. 33).

СГУ-5 создана для исследования процессов сварки, пайки и термообработки металлических и неметаллических материалов с помощью концентрированной солнечной энергии на базе зеркального параболоида диаметром 2 м (рис. 34).

Установка «Гелиос» предназначена для исследования влияния импульсного облучения на оптические материалы, биологические и растительные ткани (рис. 35). Она разработана в двух вариантах.

1. Для облучения в фокусе при непосредственном слежении за Солнцем. Максимальная плотность потока  $150 \text{ Вт/см}^2$  и достижимая температура  $2000 \text{ К}$ .

2. По оптической схеме Кассегрена с фотозатвором и линзой. Экспериментальное определение параметров дает максимальную плотность потока до  $100 \text{ Вт/см}^2$ . Эта установка позволяет получать контролируемые импульсы различных плотностей и длительности, а также импульсы

Рис. 33. Схема установки СГУ-3.

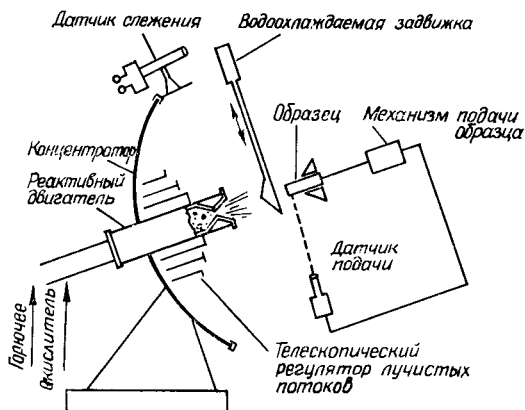
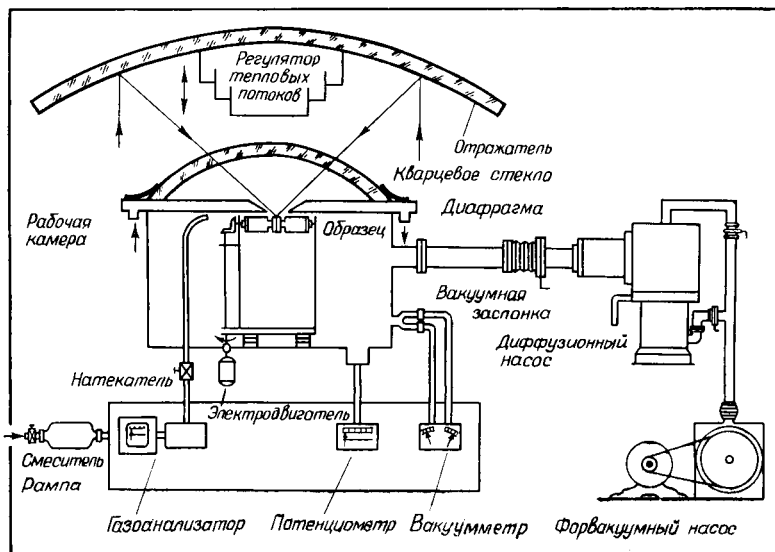


Рис. 34. Схема установки СГУ-5.



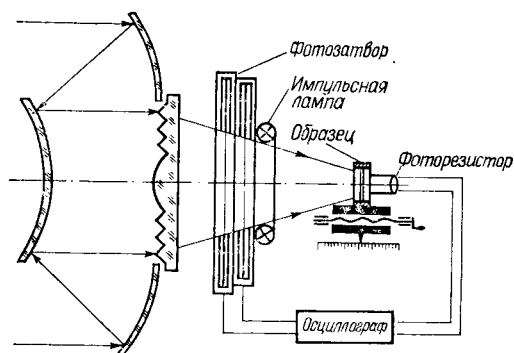


Рис. 35. Схема установки «Гелиос-2».

различной формы (с заданным законом «нарастания» и «сброса»).

Для исследования процессов взаимодействия интенсивного солнечного излучения с крупномасштабными объектами, обработки различных схем солнечных энергетических установок, аккумулирующих устройств предназначена гелиоустановка СГУ-7 (см. рис. 26) на базе астрономической антенны диаметром 5 м. Она создана путем наклейки зеркальных факетов на сплошную параболическую антенну. Из-за дефектов поверхности и неточности юстировки факетов в фокальной плоскости диаметром 150 мм достигнута максимальная плотность лучистого потока —  $100 \text{ Вт/см}^2$ .

## РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ

**Диффузионная сварка.** Одним из наиболее перспективных методов сварки является диффузионное соединение деталей в твердом состоянии. Интерес, который за последние годы проявлялся к этому методу, связан с применением его для соединения жаропрочных сплавов, тугоплавких (ниобий, вольфрам, молибден, тантал) и активных металлов (титан, цирконий, бериллий), а также сверхтвердых сплавов разнородных металлов, специальной керамики, металлокерамических материалов и металлов с неметаллами как в земных, так и в космических условиях. Для получения соединения двух идеальных образцов необходимо сблизить их на расстояние, достаточное для установления молекулярной связи.

Если процесс осуществлять в глубоком вакууме, то поверхность металла будет не только предохраняться от загрязнения (например окисления), но и очищаться в ре-

зультате возгонки и диффузии в глубь металла, т. е. для создания контакта по всей поверхности нужны процессы массопереноса.

Процесс диффузионной сварки в космосе, очевидно, будет происходить следующим образом. Подлежащие соединению детали устанавливаются в контакте друг с другом и поддерживаются в таком положении за счет внешнего давления. Затем узел нагревается до определенной температуры, подвергается необходимому сварочному давлению и выдерживается в этих условиях заданное время.

Вследствие воздействия повышенной температуры атомы соединяемых металлов приобретают большую энергию, становятся все более и более подвижными и начинают хаотически мигрировать. Их перемещение через поверхность раздела за определенное время приводит к образованию соединения без расплавления. Как отмечалось ранее, диффузия происходит различными путями и с различной скоростью. При температуре, близкой к точкам плавления, атомы многих металлов за 1 с могут менять место  $10^8$  раз.

При невозможности эффективно соединить два материала непосредственно целесообразно применять прокладки из другого материала. Они повышают прочность и плотность, позволяют понизить температуру сварки, получить соединения без образования хрупкой интерметаллической прослойки, исключить образование чрезвычайно стойких оксидов на поверхности алюминия, титана, дисперсионно-твердеющих сплавов.

В установках диффузионной сварки могут применяться самые различные источники нагрева (индукционный, контактный, радиационный, электронный луч). Часто применяется комбинированный нагрев.

В космосе диффузионная сварка может выполняться с использованием в качестве нагревателя концентратора солнечной энергии.

**Электронно-лучевая сварка.** Электронный луч — наиболее освоенный и универсальный инструмент обработки металлов в вакууме. Уже сейчас остросфокусированные пучки электронов широко применяются для сварки, резки, точной обработки, плавки, напыления и термообработки различных материалов. При работе с электронным лучом практически полностью отсутствуют реактивные силы.

При электронно-лучевой сварке в невесомости расплавленный металл удерживается в ванне силой поверхностного натяжения, которая в общем случае уменьшается с повышением температуры металла. Давление пучка и реактивное давление паров металла стремятся вытеснить

жидкий металл из зоны плавления. Поэтому при исследованиях было чрезвычайно важно установить, удастся ли обеспечить хорошее формирование швов при сварке электронным лучом, отличающимся чрезвычайно высокой концентрацией энергии и, следовательно, вызывающим перегрев расплавленного металла.

В СССР проводятся исследования электронно-лучевой сварки в условиях невесомости. Эксперименты по сварке металлов проводились при постоянных мощности луча (1 кВт — во время опытов в летающей лаборатории; 0,6 кВт — в условиях разгерметизированного орбитального отсека корабля «Союз-6») и скорости перемещения образцов относительно неподвижного луча (соответственно 30 и 18 м/ч).

Металлы толщиной 1,5—2 мм сваривались без образования сквозного кратера в ванне. Благодаря этому были снижены требования к стабильности параметров режима: ускоряющего напряжения, тока пучка, удельной мощности в пятне нагрева, угла сходимости пучка на изделии, скорости сварки, вакуума.

Исследования показали, что глубина и ширина проплавления в условиях невесомости и в наземных лабораториях идентичны. При пребывании расплавленного металла в невесомости установлена идентичность формы шва и параметров проплавления с получаемыми в обычных условиях.

Серия многолетних экспериментальных исследований завершилась натурными испытаниями в открытом космосе. Эксперименты в открытом космосе подтвердили реальную возможность осуществления монтажных и технологических работ в космическом пространстве с использованием ручного электронно-лучевого инструмента.

**Сварка и обработка с помощью оптического квантового генератора (ОКГ).** При получении сварных швов лучом ОКГ процесс протекает следующим образом: вначале лучом плавят и испаряют металл, создавая отверстие, затем делают следующее отверстие вдоль линии шва. При этом расплавленный материал заполняет предыдущее отверстие, образуя непрерывный шов. В некоторых наземных установках этот способ используется для получения точечного соединения (вместо сварных соединений, получаемых при применении длинных устойчивых импульсов). Глубина сварных швов может быть в три раза больше, чем их ширина.

Мощный однородный поток света по выходе из резонатора ОКГ концентрируется фокусирующей системой на об-

рабатываемой поверхности. Использование голубого света позволяет получать меньшее фокальное пятно, чем при длинноволновом красном или инфракрасном.

При сварке лазером требуется особо тщательная подготовка поверхности обрабатываемых деталей. Процесс чрезвычайно чувствителен к присутствию оксидов, грязи, масла и даже отпечатков пальцев. Это связано с малым временем нахождения сварочной ванны в жидком состоянии. Посторонние включения не успевают испаряться и удаляться из сварочной ванны, как это имеет место при других способах сварки. Однако в условиях высокого космического вакуума это вряд ли будет большим препятствием.

С помощью лазера могут быть выполнены сварные соединения, аналогичные получаемым методом плавления (успешно свариваются прямолинейные и кольцевые швы).

Наиболее пригодны для сварки лазером медь, серебро и золото, так как из-за высокой теплопроводности они способны противостоять мгновенному нарастанию температуры в фокусе луча, что предотвращает выброс металла из сварочной ванны.

При импульсной сварке металлов с пониженной теплопроводностью верхние слои его успевают испариться, в то время как нижние еще не нагрелись. Более целесообразно использовать лазер с непрерывным излучением мощностью 100—150 Вт.

По процессу взаимодействия поверхности с полем излучения, образованию расплава, формированию шва и аппаратуре, используемой для диагностики энергетических параметров, технология с помощью ОКГ наиболее близка к гелиотехнологии.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА ДЛЯ СВАРКИ И ПАЙКИ МЕТАЛЛОВ**

В СССР были проведены исследования по использованию лучистой энергии Солнца для получения неразъемных соединений различных металлов. При этом перспективной представлялась возможность получать сварные и паяные соединения в условиях космоса, где имеются естественные благоприятные факторы.

Для моделирования в земных условиях процессов гелиосварки, пайки и термообработки, а также решения многих вопросов, которые могут возникнуть в космических условиях, в Институте проблем материаловедения совмест-

но с Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН СССР была разработана и создана специальная гелиоустановка СГУ-5 (см. рис. 34).

Установка состоит из следующих основных узлов: вакуумной системы (вакуумная сварочная камера с вакуумным агрегатом); механизма закрепления и перемещения образца; системы автоматического слежения за Солнцем; контролирующей аппаратуры; концентратора лучистой энергии (отражатель).

В качестве последнего использован параболоид прожекторной установки со следующими параметрами: диаметр параболоида 2000 мм; фокусное расстояние 850 мм; угол раскрытия  $120^\circ$ ; теоретический диаметр фокального пятна 8,4 мм; коэффициент отражения зеркального покрытия 0,87; точность изготовления 0,8 мм.

Такой концентратор обеспечивает при нормальной солнечной радиации ( $0,07 \text{ Вт/см}^2$ ) плотность лучистого потока в фокальном пятне диаметром 8 мм около  $1400 \text{ Вт/см}^2$ . При этом температура абсолютно черного тела, эквивалентная энергии в фокальном пятне, превышает 3600 К.

Вакуумная система установки состоит из камеры и агрегата. Вакуумная камера снабжена насадкой из кварцевого стекла и закреплена на оптической оси параболоида в его фокальной плоскости. В ней размещены водоохлаждаемая сменная диафрагма, механизм закрепления и вращения образца с установкой его свариваемой кромки в фокальной плоскости, датчики вакуума и температуры. Сменные водоохлаждаемые диафрагмы ограничивают площадь поперечного сечения лучистого потока, выделяя его центральную часть. Тем самым регулируется суммарный тепловой поток и обеспечивается подвод к свариваемым кромкам наиболее высококонцентрированного лучистого потока.

Вакуумный агрегат размещен на станине прожекторной установки и состоит из двух насосов: масляного форвакуумного и пароструйного. Вакуумная система обеспечивает в сварочной камере давление  $10^{-4}$  мм рт. ст. и поддерживает его во время сварки в течение 10 мин в пределах  $10^{-3}$  мм рт. ст.

Механизм закрепления и перемещения образца позволяет использовать образцы цилиндрической формы диаметром 50 мм и длиной 70 мм. Скорость вращения плавно регулируется в пределах 1,8—9,4 м/ч. Установка оснащена аппаратурой для замера солнечной радиации, температуры образца, вакуума, а также системой автоматического слежения за Солнцем.

Величину подводимой мощности лучистого потока и степень его концентрации изменяли с помощью сменных охлаждаемых диафрагм, экранирующего цилиндра, а также точности фокусировки. Диапазон изменения плотности потока можно варьировать в довольно широких пределах в зависимости от поставленной задачи: сварки, пайки, диффузионной сварки в твердом состоянии, местной термообработки.

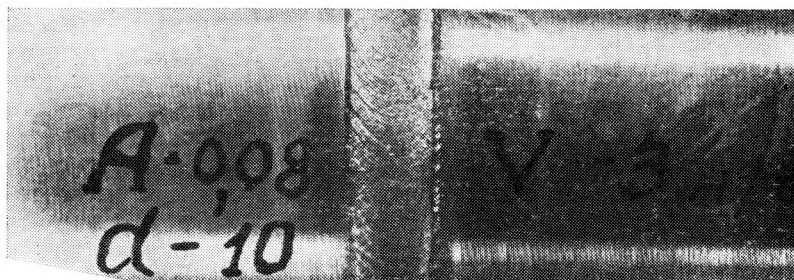
Плотность лучистых тепловых потоков определяли с помощью водоохлаждаемого калориметра. Погрешности измерений составляли  $\pm 5\%$ .

Поскольку эксперименты по сварке и пайке осуществлялись в вакуумной камере с оптически прозрачным стеклом, которое рассеивает часть подводимой энергии, проводили оценку этих потерь. Измерения показали, что использованные чистые кварцевые, молибденовые и другие полусферические стекла толщиной 2—5 мм уменьшают лучистый поток на 18—20 %.

Кроме того, необходимо учитывать, что при сваривании вследствие конденсации газообразных продуктов оптические свойства внутренней поверхности стекла заметно снижаются. Например, кварцевое стекло, проработавшее 5 мин при сварке образца из нержавеющей стали, как показали измерения, поглощает до 50 % энергии. При более длительной работе (свыше 8—10 мин) количество пропускаемой ими энергии становится ничтожно малым.

Скорость сварки в зависимости от толщины буртика и рода материала была от 0,7 до 3,5 м/ч. Установлено, что концентрированный солнечный луч обеспечивает расплавление, сварку стали и титанового сплава даже при малой плотности солнечной радиации, составляющей 0,04 Вт/см<sup>2</sup> и диаметре отверстия диафрагмы 12 мм, т. е. при плотности теплового потока около 300 Вт/см<sup>2</sup>. Эта величина в условиях космического пространства при отсутствии атмосферы и облачного покрова (когда интенсивность лучистой энергии Солнца составляет более 0,14 Вт/см<sup>2</sup>, т. е. в три-четыре раза выше), очевидно, может быть обеспечена при значительно меньшем размере фокусирующего зеркала, чем в условиях эксперимента, что создает благоприятные предпосылки для разработки компактной установки для сварки и пайки в условиях космоса.

Данные наблюдений за процессом плавления свариваемых металлов свидетельствуют о том, что процесс идет без разбрызгивания, сварочная ванна спокойная, с зеркальной поверхностью, без кратера, характерного для всех других способов сварки плавлением. Отсутствие кра-



теров и наплывов в месте сварки позволяет без каких-либо средств дополнительного регулирования вводимой тепловой мощности производить замыкание круговых швов. Внешняя поверхность шва сварных соединений стали и титанового сплава при равномерном движении образца гладкая. Хотя сварка производилась в потолочном положении навесу, это не влияло на качество формирования сварного шва.

Пневмо- и гидроиспытания, а также металлографические исследования и рентгеновское просвечивание показали, что металл шва плотный, без каких-либо внутренних дефектов; по прочности и структуре шва и околошовной зоны сварные соединения нержавеющей стали подобны соединениям, выполненным аргонодуговой сваркой. Однако ширина зон термического влияния сварного соединения при гелионагреве в сравнении с аргонодуговой сваркой значительно больше. Прочность сварных соединений образцов из стали X18H10T—50 кгс/мм<sup>2</sup>, т. е. составляет 90 % прочности основного металла.

Диффузионная сварка осуществлялась на образцах из титанового сплава при наименьшей плотности солнечной радиации — около 0,03 Вт/см<sup>2</sup>; при этом мощность теплового потока в фокусе составляет всего 200 Вт/см<sup>2</sup>, давление на соединяемых кромках — 0,4 кгс/мм<sup>2</sup>. Исследова-

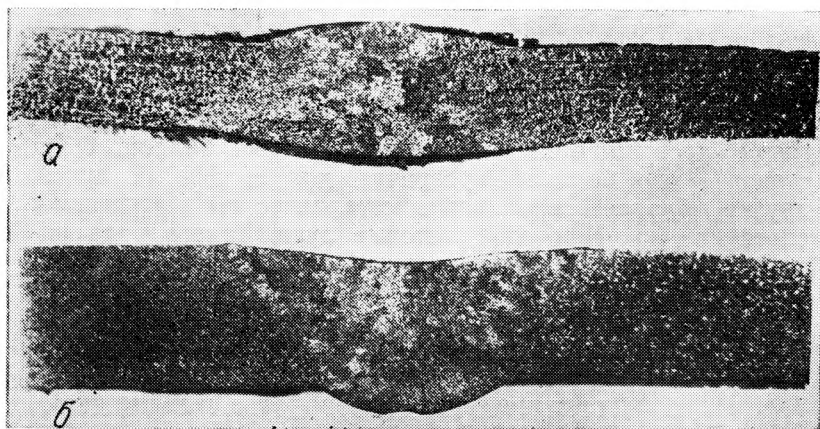


Рис. 36. Внешний вид и разрезы образцов из стали X18H10T (а) и сплава ВТ-1 (б), сваренных солнечной энергией.

ниями свойств и микроструктуры показана принципиальная возможность качественных соединений при сварке в твердом состоянии.

Высокотемпературная пайка производилась на стали расфокусированным лучом при прямой солнечной радиации плотностью  $0,03 \text{ Вт/см}^2$ , скорость вращения образца при пайке достигала  $1,6 \text{ м/ч}$ , серебряно-медный припой закладывался встык между буртами. Об окончании процесса пайки при визуальном наблюдении судили по расплавлению припоя. Исследования структуры шва и механических свойств показали, что качество паяных соединений не уступает выполненным традиционными способами.

Результаты экспериментов по применению концентрированной солнечной энергии в качестве источника нагрева для сварки и пайки свидетельствуют о перспективности этого метода в земных и особенно в космических условиях.

Внешний вид и разрезы цилиндрических образцов, сваренных солнечным лучом, показаны на рис. 36. Один образец выполнен из стали X18H10T, сваренный встык со скоростью  $3 \text{ м/ч}$ , диаметр отверстия диафрагмы равен  $10 \text{ мм}$ . Уровень плотности нормальной солнечной радиации  $0,08 \text{ Вт/см}^2$ . Другой — из сплава ВТ-1, сваренный при тех же условиях.

Разрезы сварных швов (см. рис. 36, справа) явно свидетельствуют о значительной величине зоны термического влияния.

Представьте себе космонавта, вышедшего из корабля в открытый космос и держащего в руках небольшой сверток из тонкой эластичной пленки, снабженный миниатюрным газовым баллончиком. Космонавт нажимает кнопку на баллончике, срабатывает клапан, и сверток, наполняясь газом, превращается в чечевицеобразный баллон. Одна стенка этого баллона прозрачна для солнечных лучей, другая обладает зеркальным металлическим покрытием и способна фокусировать световые лучи. Такого рода надувной баллон-рефлектор можно использовать для местного разогрева, сварки и других технологических операций в космосе.

### **ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА В КОСМОСЕ**

Возможность организации промышленного производства в условиях космоса зависит от стоимости транспортировки сырья и возвращения готовых изделий на Землю, что определяется, в свою очередь, успехами в разработке транспортной космической системы. Снижение стоимости получаемых продуктов возможно за счет увеличения продолжительности пребывания персонала в каждой смене, а также внедрения автоматизации производственных процессов. Вероятно, вначале в космосе будут изготавливаться особо ценные полуфабрикаты или изделия, такие, как кристаллы для электронной техники или фармацевтические концентраты. Кроме того, там могут создаваться материалы, которые на Земле вообще получить не удастся. В этом случае, даже при высокой стоимости доставки на орбиту грузов, ценность продукта будет определяться в основном его необходимостью.

Несмотря на то что в последние годы размеры космических аппаратов постоянно увеличиваются, в будущем по-прежнему будет невозможно запустить на орбиты в собранном состоянии большие антенны, телескопы и т. п. По некоторым прогнозам могут, например, понадобиться антенны диаметром от 40 до 65 м. Однако диаметр летательных аппаратов не будет намного превышать 3—6 м, что потребует разработки специальных технических приемов сборки в открытом космосе крупногабаритных изделий из отдельных частей за бортом космического летательного аппарата. Антенна или концентратор в модульном исполнении представляются наиболее перспективными, поскольку панели такой антенны, напоминающие пчелиные соты, собираются как блочные дома. При этом

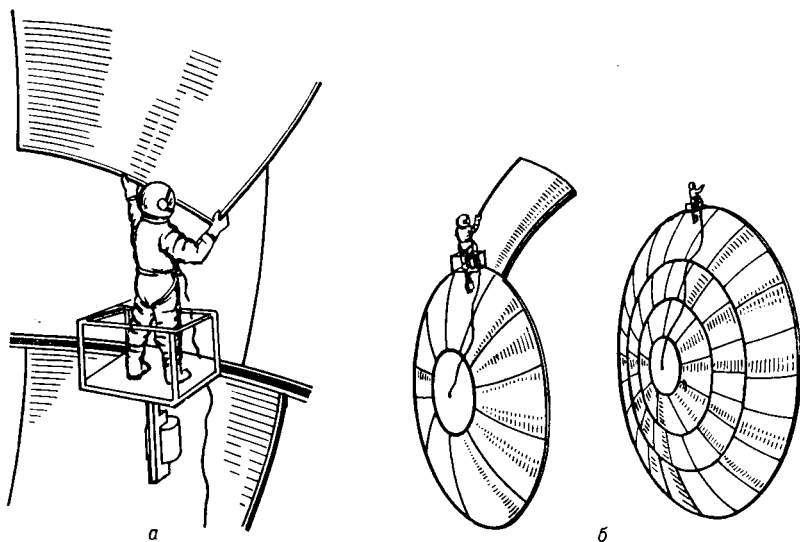


Рис. 37. Сборка панелей концентратора в космических условиях (а); внешний вид собранных панелей концентратора (б).

обычно необходимо выравнивать и скреплять панели одинаковых размеров, что требует минимума оборудования, мастерства и времени. С точки зрения такой сборки предварительно анализировали модульную антенну диаметром 45 м, состоящую из 240 панелей.

Техника сборки несколько необычна, поскольку используется «эскалаторный» принцип, когда космонавт становится на специальные подмости и начинает производить сборку по ходу движения аппарата. Она начинается с прикрепления к круговой секции панели размером  $2,7 \times 2,54$  м. Когда один ряд собран, космонавт начинает собирать второй, и так далее, до тех пор, пока все 240 панелей не будут на месте (рис. 37).

Основной вопрос при анализе процесса такой сборки заключался в способности человека передвигать и укладывать панели относительно больших размеров. При исследованиях, выполненных недавно компанией «Дженерал Дайнемикс», испытания приемов сборки проводились в подводных условиях, которые отчасти моделировали космические. Каждая панель представляла собой рамку из клееной фанеры с матерчатой сетью посередине, благодаря чему она динамически сбалансирована так, что поверхностное сопротивление было минимальным, незави-

симо от ее положения в воде. Было почти безразлично, двигали ли панель вперед боком или плашмя. «Космонавт», одетый в скафандр, поднимал панель, наклонял ее под углом  $90^\circ$  и укладывал в подготовленный каркас.

Такие эксперименты могут быть использованы при определении продолжительности сборки антенн. Так, антенну диаметром 45 м можно собрать за 400 мин, включая 1 ч на отдых космонавта.

### **КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО НАГРЕВА**

Ни одна из ныне действующих гелиоустановок не соответствует требованиям, предъявляемым к эксплуатации их в условиях космического пространства. Они должны быть предельно малогабаритными и легкими, иметь системы дистанционного наблюдения и автоматического управления процессами нагрева, перемещением и сменой образца, а также автономную, не зависящую от положения космической станции систему ориентирования на Солнце.

Кроме того, необходимо, чтобы на этих установках можно было обрабатывать космические операции и процессы в земных условиях.

Такая установка предложена советскими учеными. Она компактна, и ее гелиоустройство можно крепить к космическому аппарату либо устанавливать на вакуумную систему в земных условиях. Установка имеет многопозиционный механизм для проведения серии опытов без разгерметизации вакуумной системы.

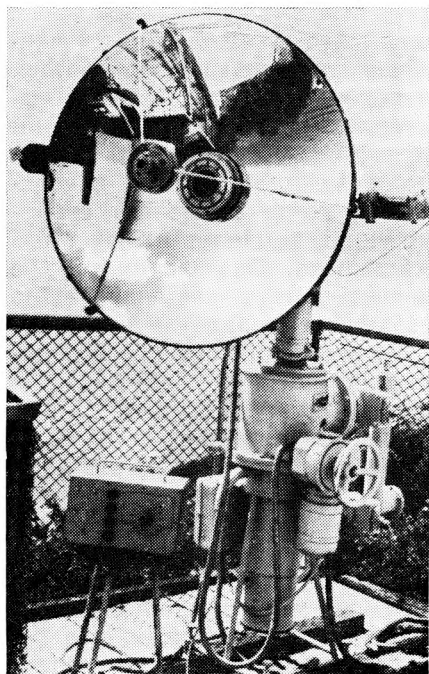


Рис. 38. Внешний вид установки «Луч-1».

Смена образцов производится автоматически. Благодаря специально разработанным элементам оптической системы обеспечивается необходимая плотность лучистой энергии на нагреваемой поверхности, автоматически регулируемая по заданной программе. Имеется дистанционное управление, позволяющее наблюдать за процессами, которые происходят в фокальной зоне оптической системы установки.

Внешний вид и принципиальная схема установки «Луч-1» по-

казаны на рис. 38, 39. Концентратор — параболоид из сплава алюминия, передняя поверхность которого зеркальная, а тыльная, предназначенная для обеспечения жесткости, облегчения и радиационной теплоотдачи, выполнена в виде сотовых ячеек. От концентратора лучистый солнечный поток направляется на контротражатель, выполненный также в виде параболоида (оптическая схема Мерсе-на). Посредством штанги с электроприводом контротражатель фиксируется в таком положении, чтобы отражаемый им параллельный лучистый поток попадал на фокусирующую кварцевую линзу, изготовленную по специальной технологии в виде концентрических колец на одной из поверхностей (так называемую линзу Френеля). Вследствие этого на образец подается высококонцентрированный лучистый поток энергии, плотность которого достаточна для расплавления тугоплавких материалов. Посредством регулируемой диафрагмы он автоматически поддерживается в пределах заданной величины либо может изменяться по определенной программе путем изменения диаметра оптического отверстия. Рабочая камера выполнена в виде стакана с фланцем и двумя патрубками, в одном из которых смонтированы линза Френеля и диафрагма. В камере с помощью упоров и установочных винтов закреплена сварочная головка. Привод осуще-

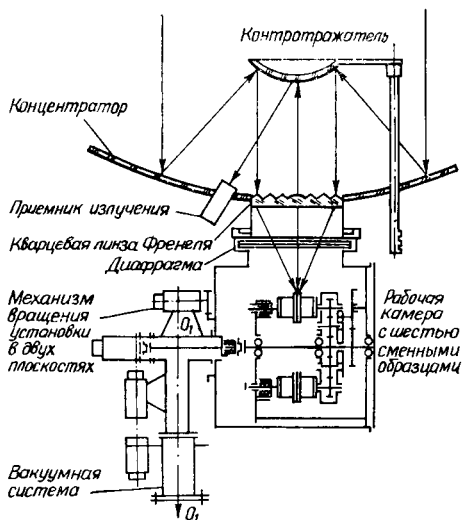


Рис. 39. Принципиальная схема «Луч-1».

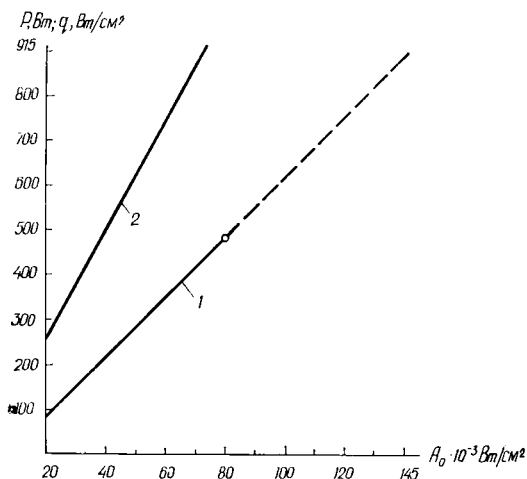


Рис. 40.  
Экстраполяция  
параметров  
установки «Луч-1»  
на условия  
космоса.

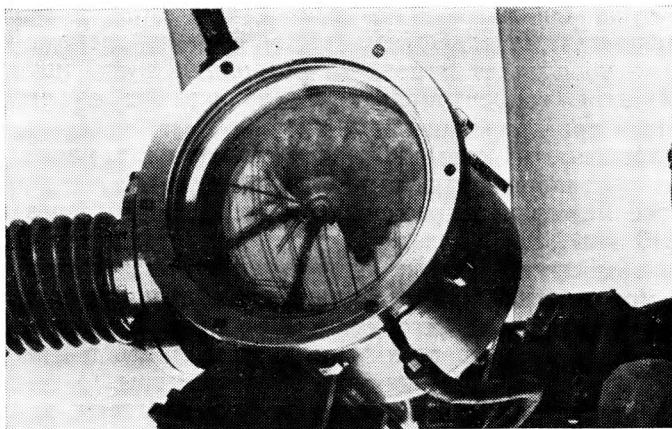
Рис. 41.  
Вакуумная камера  
с тиглем из тантала.

ствляется через муфты и промежуточный вал от электродвигателя с многоступенчатым редуктором. Поворот головки на каждую позицию осуществляется мальтийским механизмом. Рабочая камера и смонтированная на ней оптическая система (концентратор-контротражатель) через подвижное вакуумное уплотнение соединено с крестовиной механизма вращения установки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Слежение за Солнцем осуществляется по двум взаимно перпендикулярным плоскостям (по зениту и азимуту). Электродвигатели питаются от специальных устройств, принимающих сигналы от фотодатчиков электронно-оптического прицела установки.

Наблюдение за процессами в вакуумной камере осуществляется с помощью телесистемы при использовании отражения в основном концентраторе гелиоустройства.

Нормальная плотность солнечной радиации для широты, где была опробована установка «Луч-1», обычно не превышает  $0,08-0,1$  Вт/см<sup>2</sup>, в то время как за пределами атмосферы она составляет  $0,145$  Вт/см<sup>2</sup> (в диапазоне  $A_0 = 0,08-0,145$  Вт/см<sup>2</sup> зависимость  $I$  экстраполирована штриховой линией на рис. 40). При  $A_0 = 0,0607$  Вт/см<sup>2</sup> установлено, например, что мощность лучистого потока в фокальном пятне линзы составляет  $418$  Вт. При такой радиации мощность, входящая в полость концентратора, равна  $1240$  Вт. КПД установки, определенный как отно-



шение приведенных выше величин, составляет 33,8 %. При этом 90 % энергии распределено в фокальном пятне диаметром приблизительно 7 мм, и ее средняя плотность составляет 870 Вт/см<sup>2</sup>. Экстраполяция зависимости 2 (см. рис. 40) дает плотность излучения в фокусе линзы для нормальной солнечной радиации ( $A_0 = 0,145$  Вт/см<sup>2</sup>), равную 1900 Вт/см<sup>2</sup> при мощности 915 Вт. Такой энергии вполне достаточно для осуществления технологических операций, связанных с расплавлением металлов и тугоплавких соединений. В наземных условиях, где уровень нормальной падающей радиации почти в два раза меньше, чем за пределами атмосферы, экспериментально показана возможность резки, сварки и пайки, в частности хромоникелевых и титановых сплавов толщиной 0,2—1 мм со скоростями соответственно 40—6 м/ч.

Результаты исследования взаимодействия конструктивных узлов и систем, а также оценки энергетических параметров малогабаритной гелиоустановки «Луч-1» можно принять за основу при создании гелиоустановки, предназначенной для эксплуатации на орбитальных пилотируемых станциях.

Предварительные исследования по получению пленочных материалов с использованием солнечного нагрева проводились на установке СГУ-5. Вакуумная камера с кварцевым колпаком и тиглем из тантала в центре диафрагмы показана на рис. 41. На этой установке проводили эксперименты по созданию так называемых «силовых» световодов, предназначенных для передачи сфокусированного пучка солнечных лучей.

Тигель из тантала на водоохлаждаемой диафрагме размещается таким образом, что со стороны нагрева (днища) не пропускает паров. Внутренняя полость тигля подогревается концентрированным излучением со стороны днища и ориентирована на Солнце.

Пластины, на которые наносится покрытие, расположены напротив полости танталового тигля на расстоянии, которое может варьировать от 25 до 105 мм (через каждые 10 мм). Это позволяет выбирать нужное расстояние в зависимости от глубины вакуума, длины свободного пробега молекул испаряемого вещества с целью достижения наибольшей степени его осаждения. Температура тигля, который крепится в трех точках, измерялась в одной из них с помощью платинородиевой термопары.

Пластины, или, как их называют специалисты, подложки, на которые наносится покрытие, состоят из монокристаллического кремния. Обычно такие подложки используются при изготовлении интегральных схем в радиоэлектронной промышленности. Покрытия выполняют из кремния, его монооксида и алюминия. Перед их нанесением поверхности пластин тщательно обезжиривались.

Структура полученных пленок и фазовый состав были исследованы на электронном микроскопе. Установлено, например, что пленки монооксида кремния имеют радужные размытые кольца (так называемые кольца Гало), которые мы иногда в хорошую погоду наблюдаем вокруг Солнца и Луны. Это свидетельствует о высоком совершенстве полученных пленочных структур.

Установлена принципиальная возможность получения пленок в широком диапазоне толщин из различных материалов (диэлектриков, полупроводников, металлов) с использованием солнечной энергии. Пленки с хорошей точностью соответствуют по составу испаряемому веществу, примесей не обнаружено. Все это позволяет считать, что такую технологию можно использовать для получения пленок различных материалов высокой чистоты.

Одним из самых рациональных способов использования лучистой солнечной энергии для нагрева материалов является концентрация ее с помощью различных оптических систем (концентраторы, линзы и т. д.). Но средств передачи лучистого потока из фокального объема оптической системы и свободное манипулирование этим энергетическим пучком на нагреваемом объекте до настоящего времени не существует.

В последнее время для передачи изображения на расстояние и в линиях связи широкое распространение полу-

чили волокна из оптического стекла. Они собираются в световодный жгут, по которому можно передавать информацию с гораздо большей эффективностью и при значительно меньших материальных затратах. Волокно толщиной примерно в человеческий волос составлено из двух видов стекла с разными показателями преломления ( $n$ ) и представляет собой жилу ( $n_1$ ), покрытую оболочкой ( $n_2$ ). По закону полного внутреннего отражения от поверхности оболочки луч, вошедший в жилу под определенным углом к ее оси, выйдет из выходного торца световода под таким же углом почти без потерь.

Одним из необходимых условий для создания таких световодов являются незначительные различия в коэффициентах термического расширения стекломатериалов жилы и оболочки. Потери при светопередаче существенно зависят от качества используемых стекол (наличие примесей, дефектов и т. д.).

Для передачи интенсивных потоков лучистой энергии с наименьшими потерями разрабатываются жесткие и гибкие «силовые» световоды. Первые представляют собой стержни, состоящие также из сердцевины и оболочки. Они могут быть прямолинейными либо изогнутыми под определенным углом и иметь различный диаметр (20 мм и более).

При этом весьма существенным требованием, кроме общих, является устойчивость стекломатериала жилы и оболочки к резким изменениям температуры (термостойкость) и к длительному действию интенсивного излучения. Как правило, центральные световедущие жилы изготавливают из стекла с высоким показателем преломления ( $n_1=1,6-1,8$ ), а оболочку — с меньшим показателем ( $n_2=1,4-1,5$ ). Предельный угол «захвата» лучей этой световодной парой определяется так называемой апертурой волокна, т. е. разностью показателей преломления жилы и оболочки. В зависимости от подобранных пар стекол эта числовая апертура может превышать единицу.

В гелиоэнергетике в качестве концентрирующего элемента в основном применяют зеркальный параболоид с углом раскрытия  $120^\circ$ . Чтобы световод, размещенный в фокальной плоскости параболоида, мог воспринимать лучистый поток, сходящийся под углом  $120^\circ$ , его апертура должна быть не менее 0,86. Поэтому необходимо использовать стекла с большой разностью показателей преломления.

В фокальном пятне зеркального параболоида диаметром 1,5 м плотность лучистого потока достигает порядка

1000—1500 Вт/см<sup>2</sup>, при которой разрушается большинство оптических материалов, т. е. растрескиваются, оплавляются и «горят». Поэтому для создания силовых световодов необходимо найти оптические материалы, стойкие к воздействию лучистых потоков таких плотностей и с малым светопоглощением. При подборе необходимо также добиваться того, чтобы коэффициенты термического расширения при этих предельных температурах стекол жилы и оболочки были близкими.

В результате многочисленных исследований из числа испытанных и устойчивых к концентрированному излучению стекол выбрана пара для жилы и оболочки, из которых были изготовлены как жесткие световоды, так и гибкие жгуты волокон. Эта пара устойчиво работала в фокальном пятне параболического зеркала диаметром 1,5 м в течение нескольких часов. Плотность потока на входе составляла 500 Вт/см<sup>2</sup>; на выходе из световода энергии было достаточно для воспламенения дерева, бумаги и расплавления серебряного припоя ПОС-40 (металл для пайки, который в расплавленном состоянии заполняет зазор между соединениями деталей и, затвердевая, образует шов).

Установлена возможность создания силовых световодов для передачи концентрированного солнечного излучения из фокальной зоны гелиоконцентратора к месту его использования. Следует, однако, отметить, что многие вопросы остаются нерешенными, например, создание пары с максимальной апертурой для «захвата» угла 120°, охлаждение входного торца световодного жгута, концентрация лучей на выходном торце и т. д.

В случае ориентации корабля на Солнце (известно, что ее можно проводить с точностью до 3") дополнительной следящей системы для приведенной гелиоустановки не требуется. Кстати, для гелиотехнических устройств точность слежения за Солнцем может быть гораздо грубее — до 5'. При такой ситуации работа аппарата существенно упрощается: входной торец световода может быть жестко зафиксирован, выходной — укреплен также внутри, а набор концентрирующих кварцевых линз также установлен неподвижно.

Космонавту при производстве работ остается только, уперев фиксатор к объекту нагрева, самому регулировать лучистый поток через многолепестковый автозатвор, так, как производится диафрагмирование в фотоаппарате.

В настоящее время разработаны пары оптических стекол для силовых световодов с апертурой, достигающей

0,55, которая позволяет согласовать угол «захвата» лучей световодом с углом, под которым они входят внутрь борта корабля, т. е. использовать всю энергию фокального пятна. Экспериментальная проверка работоспособности таких световодов в наземных условиях показала их длительную устойчивость при воздействии на входной торец потоками плотностью до 500 Вт/см<sup>2</sup>.

К сожалению, потери в таких световодах еще велики: при длине 300 мм так называемый коэффициент светопропускания составляет 40 %. Тем не менее расчеты показывают, что приведенное гелиоустройство позволяет осуществлять пайку и термообработку поверхностей различных материалов в космических условиях с помощью лучистой энергии Солнца.

## **ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ**

### **МЕСТО СОЛНЦА В ЭНЕРГЕТИКЕ БУДУЩЕГО**

К концу XX в. население нашей планеты достигнет 6—6,5 млрд. человек, что потребует существенного увеличения расходов энергоресурсов. Их распределение в мировом масштабе можно представить в следующем усредненном виде: около 20 % идет на получение электроэнергии, 20 — на обеспечение транспорта (авиация, морской, речной транспорт, автотранспорт и т. д.), 30 — на отопление и технологические процессы низкого потенциала (до 150 °С) и 30 % — на высокопотенциальные процессы (500—1500 °С) в металлургической, химической промышленности и т. д. Около 70 % энергопотребления покрывается нефтью и газом.

В работах специалистов ядерная и солнечная энергии часто рассматриваются как конкуренты. Сотрудники Международного института прикладного системного анализа (ИИАСА) предлагают рассматривать их как формы энергии, дополняющие друг друга. Вероятнее всего, что в будущем эти два вида энергетических ресурсов будут использоваться в самых широких масштабах.

Ежедневно Земля получает от Солнца в тысячу раз больше энергии, чем вырабатывается всеми электростанциями мира. Задача состоит в том, чтобы научиться использовать хотя бы небольшое ее количество. Разработка способов потребления солнечной энергии только начинается. Не будет ошибкой сказать, что многие из существующих проектов отличаются сложностью, тяжеловесностью. Эти разработки базируются на сегодняшних научно-технических возможностях общества. Думается, что широкомасштабное использование солнечной энергии будет осуществляться с помощью совершенно новых технологий.

Но, как известно, в энергетике одной из важных проблем, кроме получения энергии, является обеспечение возможностей ее длительного хранения и передачи в больших

масштабах. Существует мнение, что в качестве партнеров солнечной энергии должны выступать различные виды жидкого или газообразного топлива, причем наиболее вероятной «кандидатурой» является водород, обладающий высокой теплотворной способностью. Его получение с использованием солнечной энергии, например, путем электролиза воды, может быть достаточно дешевым, а его транспортировка и хранение не представляют сложности. Отсюда вывод: наиболее экономичная возможность использования солнечной энергии, которая «просматривается» сегодня, — это направлять ее для получения вторичных видов энергии в солнечных районах земного шара. Полученное жидкое или газообразное топливо можно будет перекачивать по трубопроводам или перевозить танкерами в другие районы Земли.

Практически же, рассматривая не слишком отдаленное будущее глобальной энергетической системы, надо думать об использовании солнечной энергии, так как только ее ресурсы являются практически неисчерпаемыми. И если ядерная энергия уже завоевала прочное место, то ближайшим препятствием на пути развития солнечной энергетики может явиться высокая капиталоемкость солнечных электростанций. Однако она может быть существенно снижена в результате разработки новых способов использования энергии Солнца.

### **КОСМИЧЕСКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

Сегодня космические корабли используют не больше нескольких киловатт электроэнергии. В США разработаны проекты пилотируемых орбитальных станций, потребляющих до 100 кВт.

Все виды первичных источников энергии могут быть разделены на две группы: бортовые, т. е. размещенные на борту космического аппарата, и внешние.

Целесообразность использования энергии солнечного излучения при освоении космического пространства человечеством не вызывает сомнений. Подавляющее большинство созданных и разрабатываемых космических аппаратов оснащены энергетическими системами на базе фотоэлектрических преобразователей. Однако совершенно очевидно, что использование солнечной энергии в космосе отнюдь не исчерпывается применением фотоэлектрических систем. Весьма заманчивым представляется осуществление в космическом пространстве технологических процессов

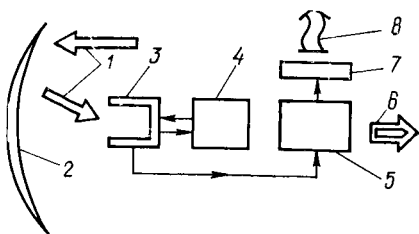


Рис. 42. Принципиальная схема СЭУ:

1 — поток солнечного излучения;  
2 — концентратор; 3 — приемник;  
4 — аккумулятор тепла; 5 —  
преобразователь тепла в электричество;  
6 — электроэнергия; 7 — холодильник-  
излучатель; 8 — сброс тепла в космос.

Как известно, в большинстве своем такие устройства требуют достаточно высоких температур. Поэтому возникает необходимость в концентрации солнечных лучей, а также в аккумулировании тепла для использования его в периоды пребывания аппарата в тени. Система концентратор — приемник и тепловой аккумулятор образуют в совокупности так называемый солнечный высокотемпературный источник тепла (СВИТ). Естественно, конструкция каждого СВИТа определяется его назначением. Наиболее перспективным в настоящее время представляется использование их при технологических работах в космосе, в космических солнечных энергетических установках и тепловых ракетных двигателях.

Используемые в настоящее время кремниевые солнечные батареи для энергообеспечения космических аппаратов, очевидно, и далее будут интенсивно развиваться. Однако определенные преимущества имеют солнечные тепловые энергетические установки (СТЭУ). В них тепло солнечного излучения преобразуется в электрическую энергию (рис. 42).

Сконцентрированное излучение попадает в приемник, который представляет собой полое тело с отверстием для входа лучей. В приемнике преобразуется тепловая энергия солнечных лучей в электрическую. Эти преобразователи могут быть термоэлектрическими, термоэмиссионными и машинными соответственно по замкнутым циклам Стирлинга, Ренкина, Брайтона.

Энергетическая космическая установка может преобразовать энергию электромагнитного излучения с помощью солнечных фотоэлементов в постоянный электриче-

монтажа, пайки, сварки диффузионной и плавлением, получение пленочных и других материалов с помощью прямого использования сконцентрированных солнечных лучей. К числу весьма перспективных устройств для использования теплоты солнечных лучей относятся также теплоэнергетические установки, системы жизнеобеспечения и терморегулирования на космических кораблях.

ский ток, который затем преобразовывается в энергию СВЧ излучения и передается на Землю, где она вновь переводится в энергию электрическую.

Для осуществления технологических процессов в космическом пространстве СВИТ могут оказаться весьма экономичными и удобными в эксплуатации. Этому способствует ограниченность бортовых энергоустановок космических аппаратов (КА) при относительно больших затратах энергии на осуществление технологических процессов.

По мнению специалистов фирмы «Норт Америкэн Рокуэл Корпорейшн», создание такой печи не представляет принципиальных технических трудностей и она должна явиться идеальным средством для плавки любых металлов в космосе. При этом использование концентрированной солнечной энергии для монтажных работ в ряде случаев может эффективно дополнять другие традиционные методы соединения пространственных металлоконструкций.

Конструкция концентраторов и используемые материалы должны в течение длительного времени обеспечивать заданную геометрическую форму и высокое качество отражательной поверхности в период функционирования в космосе.

На высоте 200—250 км атомарный кислород околоземного космического пространства, где давление среды составляет  $136 \cdot 10^{-6}$  Па ( $10^{-6}$  мм рт. ст.), может вызвать окисление сильно нагретых металлических материалов. В этих условиях, во-первых, полностью или частично исчезает верхний поверхностный газовый слой, и, во-вторых, существенно увеличиваются диффузия и испарение летучих компонентов материала. Эти факторы могут существенно повлиять на прочностные характеристики применяемых материалов. Отражательные свойства поверхности концентраторов можно восстановить путем металлизации ее алюминием с использованием СВИТа в космосе.

По предварительным оценкам, температура концентраторов может колебаться от 325—340 К на освещенной части орбиты до 230—240 К на теневом участке. Многократное воздействие термоциклов представляет собой опасность для толстостенных и пластмассовых конструкций. Большие температурные градиенты могут привести к деформациям и искажению формы концентратора. На отражательные свойства их покрытий пагубно влияет ультрафиолетовое излучение, а также электронные и протонные потоки большой плотности.

Испытания образцов концентраторов на КА дают наиболее объективную информацию о возможности их работы в условиях космической среды. Комплекс воздействующих факторов при этом невозможно воспроизвести в лабораторных наземных условиях.

Эксперименты по устойчивости отражательных и терморегулирующих покрытий были проведены на американских спутниках ATS-1, ATS-3, орбитальной астрономической лаборатории, космическом зонде «Маринер-4». Результаты экспериментов подтвердили данные лабораторных исследований о наибольшем ухудшении отражательных свойств в коротковолновой части спектра. Наиболее стабильными оказались пленки на подложках из алюминия и никеля с алюминиевыми покрытиями и защитными пленками из оксидов кремния и алюминия. Снижение интегрального коэффициента отражения составляет 6—8 %, причем происходит оно в первые 1000 ч пребывания в космосе и далее мало изменяется.

### НАЗЕМНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В северо-восточной части Крымского полуострова вблизи пос. Ленино завершается сооружение первой СЭС мощностью 5 МВт. Предварительно была проведена оценка региональных метеоусловий. Среднее фактическое солнечное время в году составляет 2 тыс. ч. Станция может работать при высоте Солнца над горизонтом, равной 15°. Максимальная плотность нормальной солнечной радиации составляет 0,9, средняя — 0,77 кВт/м<sup>2</sup>.

Эта станция создается в башенном варианте. Высота башни 90 м, на ее вершине расположен парогенератор с естественной циркуляцией. Окружность приемника тепла 7 м. Вокруг башни ярусами будет расположено поле гелиостатов (1600 шт.), которое строится в четыре этапа. Разработана конструкция гелиостатов размером 5×5 м. Каждый гелиостат состоит из 36 плоских фацет, закрепляемых так, чтобы их положение можно было регулировать. Общая площадь застройки составляет 44 га.

Внутренний радиус первого ряда гелиостатов 75, наружный — 200 м. Ярусы смещены, и гелиостаты будут обслуживаться с помощью перемещающихся кранов.

В парогенераторе давление пара достигнет 40 атм. Средняя мощность турбины равна 3,5 МВт. Запроектирован тепловой аккумулятор, который заряжается насыщенным паром с температурой 250 °С. Аккумулятор — огромные железобетонные емкости, заполненные водой, общим

объемом 1 тыс. м<sup>3</sup>. Расчетный КПД аккумулирования достигает 75, проектный — 12 %. Слежение гелиостатов за Солнцем осуществляется автоматически с использованием ЭВМ. Привод гелиостатов электромеханический.

По утверждению научных разработчиков станции, для диапазона мощностей до 5 МВт удельные капитальные вложения должны быть в пределах 700—1000 р/кВт при стоимости отражателей, близкой к 35 р/м<sup>2</sup>.

Там же предполагается построить солнечную электростанцию мощностью 200—300 МВт, которая будет подключена к общей энергосистеме. Годовая выработка электроэнергии по предварительным расчетам составит 445 млн. кВт·ч.

В США (штат Нью-Мехико) создан солнечный полигон, в составе которого имеется испытательный стенд солнечной электростанции башенного типа. Он состоит из 78 гелиостатов, на каждом из которых монтируется 25 стеклянных фацет размерами  $1,25 \times 1,25$  м. В центре каждой фацеты закреплен 16-дюймовый диск, а зеркальная поверхность поддерживается опорным кольцом. Специальный тяговый механизм может прогибать фацету, создавая определенную фокусировку. На стенде можно выполнять целый комплекс исследований.

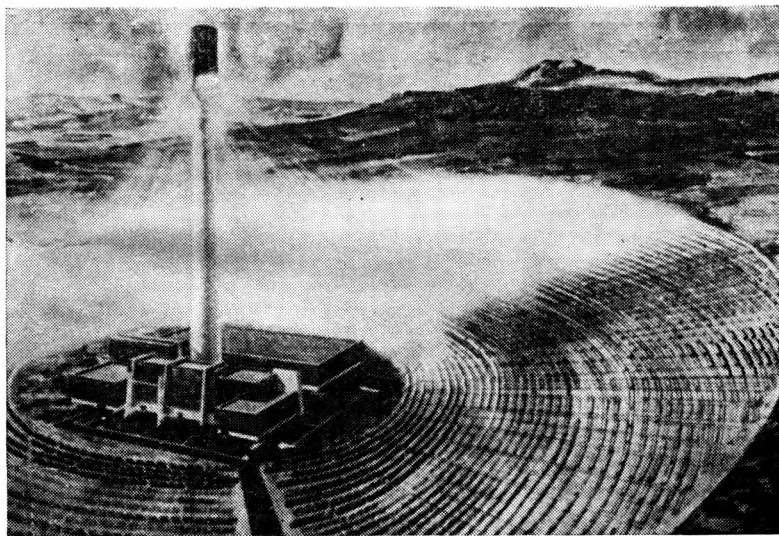


Рис. 43. Солнечная электростанция башенного типа мощностью 10 МВт.

Во Франции (в Пиренеях), вблизи крупнейшей в мире высокотемпературной солнечной печи мощностью 1 МВт построена гибридная (башенная и модульная) СЭС мощностью 3 МВт. Ее модульная часть имеет параболические концентраторы, а башенная — поле гелиостатов.

В Японии завершается строительство двух солнечных СЭС мощностью по 1 МВт. Одна из них модульного, другая — башенного типа. Основная цель этой разработки — сравнение этих двух типов СЭС. Строительство ведется в рамках обширной 30-летней программы «Солнечный свет». К 1990 г., как полагают, Япония будет обладать экономичными солнечными преобразователями.

Схема СЭС башенного типа мощностью 10 МВт конструкции фирмы «*Honeywell*» показана на рис. 43. В этом проекте электрический генератор и тепловой аккумулятор расположены внутри башни.

По подсчетам специалистов, для полного удовлетворения потребностей Западной Европы в электроэнергии ( $1,2 \cdot 10^{12}$  кВт/год) СЭС должны занимать площадь, примерно равную протяженности автомобильных дорог по всей Западной Европе ( $2,8 \cdot 10^6$  км). Предлагается разместить СЭС в пустынях Африки, производить на них водород и транспортировать его в Европу. При этом СЭС не будут вызывать перегрева атмосферного воздуха над ними, а почва под гелиостатами будет охлаждаться незначительно.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Барабой В. А.* Солнечный луч.— М. : Наука, 1976.— 240 с.
- Борисов Е. Б., Пятнова И. Н.* Ключ к Солнцу.— М. : Мол. гвардия, 1964.— 303 с.
- Беляков И. Т., Борисов Ю. Д.* Технология в космосе.— М. : Машиностроение, 1974.— 290 с.
- Вавилов С. И.* Глаз и Солнце.— М. : Наука, 1981.— 125 с.
- Гулиа Н. В.* Накопители энергии.— М. : Наука, 1980.— 150 с.
- Джавески Дж.* Перспективы гелиоэнергетики.— Электроника, 1979, № 15, с. 25—41.
- Дверняков В. С.* Кинетика высокотемпературного разрушения материалов.— Киев : Наук. думка, 1981.— 152 с.
- Использование солнечной энергии при космических исследованиях* : Сб. ст. Пер. с англ.— М. : Мир, 1964.— 415 с.
- Камерон А. Д.* Происхождение и эволюция солнечной системы.— В кн. : Солнечная система : Пер. с англ.— М. : Мир, 1978, с. 56—110.
- Лидоренко Н. С., Рябиков С. В., Стребков Д. С.* Солнечные наземные фотоэлектрические станции.— В кн. : Преобразование солнечной энергии. М. : Наука, 1985, с. 5—12.
- Минарт М.* Свет и цвет в природе.— М. : Физматгиз, 1958.— 424 с.
- Патон Б. Е.* Заводы в космосе.— Новое время, 1975, № 15, с. 23—26.
- Стырикович М. А., Синяк Ю. В., Чернавский С. Я.* Дальние перспективы развития мировой энергетики.— Энергетика, топливо. Вып. 14. Достижения и перспективы, 1981, № 3, с. 12—25.
- Францевич И. Н.* Химическое и биохимическое аккумулирование солнечной энергии.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1984.— 48 с.— (Новое в науке, технике, производстве. Сер. 8; № 19).

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЛАВА 1. СОЛНЦЕ И ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В НЕМ

Происхождение Солнечной системы . . . . .	3
Структура Солнца . . . . .	8
Мир видимого Солнца . . . . .	16

### ГЛАВА 2. СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

Образование и эволюция земной атмосферы . . . . .	21
Структура атмосферы . . . . .	23
Физические воздействия Солнца на Землю . . . . .	27
Свет Солнца и принципы его использования . . . . .	30
Химическое воздействие Солнца . . . . .	32
Солнечный луч и жизнь на Земле . . . . .	37

### ГЛАВА 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ЗЕМЛЕ

Цвет, температура тела и взаимодействие его поверхности с солнечным светом . . . . .	41
Возобновляемые источники энергии . . . . .	46
Низкопотенциальное тепло, солнечные коллекторы . . . . .	48
Преобразование солнечной энергии . . . . .	51
Высокотемпературные солнечные печи . . . . .	56
Солнечная радиация, фотосинтез и изменение наследственных структур . . . . .	65
Устойчивость растений к внешним воздействиям и охрана природы . . . . .	74

### ГЛАВА 4. КОСМИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

История развития космического материаловедения и технологии . . . . .	77
Преимущества и недостатки солнечного нагрева при использовании его для космического материаловедения и технологии . . . . .	81
Различные виды соединений металлов . . . . .	86
Использование лучистой энергии Солнца для сварки и пайки металлов . . . . .	89
Оценка целесообразности организации производства в космосе . . . . .	94
Конструкции установок для технологии с использованием солнечного нагрева . . . . .	96

### ГЛАВА 5. ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

Место Солнца в энергетике будущего . . . . .	104
Космические солнечные энергетические сооружения . . . . .	105
Наземные солнечные электростанции . . . . .	118
Список рекомендуемой литературы . . . . .	111

25 к.

Из этой книги читатель узнает, что Солнце — это не только основа возникновения и развития жизни на нашей планете, первоисточник всех видов энергии на ней, но и «технолог», позволяющий путем концентрации лучей осуществлять безотходные энергосберегающие процессы в современном материаловедении и «воссоздавать» различные периоды из истории солнечно-земных связей.

НАУКОВА ДУМКА

