

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.47

К ПРОБЛЕМЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

И. И. Собельман

Предельная температура нагрева.— Концентраторы солнечного излучения.— Селективные покрытия.— Селективные газовые приемники излучения.— Проекты солнечных тепловых электростанций.

Интерес к проблеме использования солнечной энергии начал проявляться сравнительно давно. Неоднократно делались весьма оптимистические прогнозы, согласно которым солнечная энергетика должна внести заметный вклад в обеспечение энергетических потребностей мира. Наибольшие надежды связывались с прямым преобразованием энергии солнечного излучения в электричество. Эти надежды, однако, пока не оправдались. Полупроводниковые солнечные элементы эффективно используются в космосе в ряде других приложений. Они обеспечивают коэффициент преобразования $\sim 10\%$, причем есть реальные надежды достигнуть значений $\sim 15\text{--}20\%$ (см. ¹). Тем не менее получение с их помощью энергии в сколь-нибудь крупных масштабах оказалось невозможным вследствие высокой стоимости полупроводниковых материалов. Электроэнергия солнечных батарей обходится в сотни раз дороже электроэнергии современных тепловых электростанций.

Другое направление, связанное с разработкой солнечных установок для отопления и кондиционирования, по ряду причин также не получило развития.

В результате стало складываться убеждение, что солнечная энергетика неконкурентоспособна. Интерес к ней упал, и в течение ряда лет проблемами солнечной энергии продолжали заниматься лишь отдельные энтузиасты *).

За последние годы, однако, отношение к возможности широкого использования солнечной энергии стало заметно меняться (см., например, ²⁻⁵). Это определяется рядом причин. Во-первых, как никогда ранее, стало ясным, что проблема энергии является главной проблемой науки и техники, и вместе с тем стало осознаваться, что будущее этой проблемы далеко не безоблачно, прежде всего из-за растущей опасности загрязнения окружающей среды (см., например, ^{6, 7}).

Мировое потребление энергии в настоящее время составляет $\sim 10^{13}$ киловатт-часов в год (средняя мощность $\sim 10^{12}$ Вт) и удваивается каждые 15 лет. Ожидать замедления темпов роста энергопотребления вряд ли реально. Особенно если учесть, что сегодняшний уровень в основном

*) Сказанное, разумеется, не относится к таким напряжениям, как источники энергии для космических кораблей, солнечные печи и другие устройства узкоцелевого назначения.

определяется промышленно развитыми странами. Так, на долю США при 6% населения мира приходится 35% потребляемой энергии. При существующих же темпах роста неминуемо возникает ряд серьезных проблем, связанных с загрязнением окружающей среды продуктами сгорания и радиоактивными отходами, а также с перегревом, или так называемым тепловым загрязнением.

Солнечная энергия в этом смысле обладает несомненными преимуществами. Неудивительно, что все более настойчиво далаются попытки сдвинуть проблему солнечной энергии с мертвой точки. Основной вопрос, который при этом возникает, состоит в том, каково в действительности соотношение между возможной стоимостью энергии солнечных электростанций и стоимостью энергии тепловых и атомных электростанций сегодня и каким это соотношение может быть в ближайшем будущем.

С большой степенью вероятности можно ожидать, что стоимость электроэнергии, вырабатываемой на тепловых и атомных электростанциях, будет возрастать. Это связано как с тем, что наиболее богатые месторождения нефти, угля и урана будут постепенно исчерпываться, так и с тем, что по-настоящему действенные меры, препятствующие загрязнению окружающей среды (в том числе надежные методы захоронения радиоактивных отходов и гарантия безаварийности атомных электростанций), требуют очень больших затрат.

Что же касается солнечной энергии, то здесь появились предложения, вселяющие определенный оптимизм. В частности, выяснилось, что имеется вполне реальная возможность создания мощных тепловых солнечных электростанций. По достаточно реалистическим оценкам стоимость электроэнергии, получаемой на таких электростанциях, должна быть сравнимой с существующей в настоящее время.

Эффективность использования тепловой энергии прежде всего определяется температурой нагрева. Неудача большинства предпринимавшихся ранее попыток создания солнечных тепловых установок во многом предопределялась тем, что реализуемая в них температура нагрева ограничивалась значениями $T \lesssim 100^\circ\text{C}$. Повышение температуры нагрева до $T \sim 500^\circ\text{C}$, а это сейчас представляется вполне реальным, причем с помощью сравнительно простых средств, использующих уже имеющуюся технику, значительно увеличивает эффективность преобразования солнечной энергии.

Настоящая статья посвящена краткому обзору имеющихся в настоящее время предложений по преобразованию солнечной энергии в тепло и электричество и тех физических принципов, на которых эти предложения базируются. Основное внимание уделяется возможности реализовать высокотемпературный нагрев с помощью методов, пригодных для создания мощных тепловых установок.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА

Температура нагрева солнечным излучением T ограничивается двумя процессами — тепловым излучением нагреваемого тела и теплоотдачей в окружающую среду. В условиях равновесия

$$\alpha P_c = S' (\varepsilon \sigma T^4 + h \Delta T), \quad (1)$$

где P_c — поток солнечного излучения, α — поглощательная способность, ε — излучательная способность, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/см}^2\text{сек} \cdot \text{град}^4$, h — коэффициент теплоотдачи, ΔT — разность температуры тела и окружающей среды, S — освещаемая поверхность, S' — полная поверхность тела. Коэффициент теплоотдачи h зависит от размеров тела, состояния атмосферы и может меняться в довольно широких пределах, $h \simeq 2 \cdot 10^3$ —

$-3 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^2\text{сек} \cdot \text{град}$ ^{8, 9}. В интервале температур $T \simeq 400-900^\circ\text{K}$ ($\Delta T \simeq 100-600^\circ$) при $\varepsilon \sim 1$ и максимальном значении h получим $\varepsilon \sigma T^4 \approx h \Delta T$. При минимальном значении h $\varepsilon \sigma T^4 \gg h \Delta T$. Опустим второй член в (1) и оценим предельную температуру нагрева, определяемую потерями на тепловое излучение, положив $P_c = 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ (10^3 вт/м^2), что соответствует потоку на сороковой параллели в середине дня:

$$T \leq \left(\frac{P_c}{\sigma} \right)^{1/4} \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \frac{S}{S'} \right)^{1/4} = 365 \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \frac{S}{S'} \right)^{1/4} (^\circ\text{K}). \quad (2)$$

Таким образом, максимальная температура нагрева черного тела ($\alpha = \varepsilon = 1$) не достигает и 100°C .

Увеличить температуру нагрева можно двумя путями — за счет применения концентраторов солнечного излучения и за счет фактора α/ε . Вторая из этих возможностей связана с тем, что в (2) входит отношение поглощательной способности α и излучательной способности ε для разных областей спектра. Основная часть солнечного потока сосредоточена в видимой и ближней инфракрасной областях спектра $\lambda \sim 0,35-1,2 \text{ мкм}$. Тепловое же излучение при температурах $T < 1000^\circ\text{K}$ расположено в инфракрасной области $\lambda \gtrsim 2 \text{ мкм}$. Поэтому оптимальные условия реализуются в тех случаях, когда нагреваемое тело эффективно поглощает солнечное излучение и вместе с тем обладает высокой прозрачностью или большим коэффициентом отражения в инфракрасной области $\lambda \sim 2-10 \text{ мкм}$.

Нетрудно найти предельную температуру нагрева, которая может быть получена при максимально благоприятных обстоятельствах. Пусть нагреваемое тело (например, газ) обладает только одной полосой поглощения на частоте ω , расположенной в области максимума солнечного спектра. Тогда тепловое равновесие между телом и солнечным потоком (поглощаемая энергия равна излучаемой) устанавливается при температуре T , которая связана с эффективной температурой Солнца T_c соотношением

$$\frac{4\pi}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} = \frac{\Delta O_c}{\exp(\hbar\omega/kT_c) - 1}, \quad (3)$$

где ΔO_c — телесный угловой размер Солнца. Поскольку в максимуме солнечного спектра $\hbar\omega \approx 2,82 kT_c$, имеем $\exp(\hbar\omega/kT) \gg 1$, $\exp(\hbar\omega/kT_c) \gg 1$ и

$$\frac{\hbar\omega}{kT} \approx \frac{\hbar\omega}{kT_c} + \ln \frac{4\pi}{\Delta O_c}. \quad (4)$$

Подставив $T_c \approx 6000^\circ\text{K}$, $\Delta O_c = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ стер}$, $\omega = 2\pi c/\lambda$, $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, получим $T \approx 1500^\circ\text{K}$.

Рассмотренный пример показывает, что с принципиальной точки зрения при оптимальном выборе спектральных характеристик тела потери на тепловое излучение не препятствуют получению весьма высоких температур нагрева. Вопрос состоит в том, каким образом реализовать условия, наиболее близкие к оптимальным. Возможные пути решения этой задачи будут рассмотрены в двух следующих разделах. Прежде, однако, мы выясним, что может дать применение концентраторов солнечного излучения.

КОНЦЕНТРАТОРЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим для конкретности нагрев цилиндрического объема с радиусом R , помещенного в фокус цилиндрического концентратора, перекрывающего пучок солнечного излучения с поперечным размером D . В этом случае $S' = \pi S$, а левая часть (1) должна быть домножена на фактор

концентрации $\xi = D/2R$. В результате получим

$$T \leq \left(\frac{P_c}{\sigma} \right)^{1/4} \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \frac{\xi}{\pi} \right)^{1/4} = 365 \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \frac{\xi}{\pi} \right)^{1/4} (^\circ\text{K}). \quad (5)$$

Пусть концентратор расположен вдоль земной параллели, т. е. в направлении восток — запад, таким образом, что его плоскость симметрии перпендикулярна оси вращения Земли. В этом случае направление на Солнце n_c отклонено от плоскости симметрии концентратора на угол θ , где

$$\sin \theta = \sin \delta \cos \psi = 0,39 \cos \psi; \quad (6)$$

здесь δ — угол между плоскостью земного экватора и плоскостью земной орбиты, равный 23° , углом ψ задается годовое движение Земли вокруг Солнца, причем $\psi = \pm \pi/2$ в дни равноденствия. Как видно, в течение года величина $\sin \theta$ меняется в пределах $\pm 0,39$. Соответствующее смещение фокуса концентратора заключено в пределах $\pm 0,39 f$, где f — фокусное расстояние. Для того чтобы в течение всего года весь солнечный поток перекрывался нагреваемым объемом, необходимо потребовать выполнения неравенства $R > 0,39 f$. Отсюда можно найти максимально допустимое для данного концентратора значение ξ . Рассмотрение такого типа можно провести для отражателей любого профиля, например параболических, а также для плоских френелевских концентраторов. Такое рассмотрение дает $\xi = 3-5$.

Если пойти на усложнение концентрирующей системы и допустить периодическую (раз в несколько недель) подстройку плоскости симметрии отражателя и полуденному направлению n_c , то можно обеспечить $\xi = 10-15$. Применение неподвижных концентраторов ($\xi = 3-5$) и концентраторов с сезонной подстройкой ($\xi = 10-15$) позволяет получить следующие значения предельной температуры нагрева:

$$\xi \approx 5T, \leq 400 \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \right)^{1/4} (^\circ\text{K}), \quad (6)$$

$$\xi \approx 15T, \leq 540 \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \right)^{1/4} (^\circ\text{K}). \quad (7)$$

Таким образом, с помощью сравнительно простых концентраторов солнечного излучения можно поднять температуру нагрева черного тела ($\alpha/\varepsilon = 1$) до $400-500^\circ\text{K}$ ($\sim 100-200^\circ\text{C}$).

Из-за зависимости $T \propto \xi^{1/4}$ дальнейшее повышение температуры требует значительного увеличения ξ . Так, для $T \approx 800^\circ\text{K}$ необходимы концентраторы с $\xi \approx 75$. Факторы концентрации такого порядка могут быть обеспечены только с помощью систем, допускающих слежение за суточным движением Солнца хотя бы по одной угловой координате *).

В литературе рассматриваются также системы, в которых сферический отражатель неподвижен, а слежение осуществляется перемещением приемника излучения (см., например, ¹⁰). При этом используется то обстоятельство, что при любом положении Солнца все лучи, падающие на зеркало, перехватываются цилиндрическим приемником, ось которого проходит через центр кривизны зеркала. Это позволяет осуществлять слежение перемещением приемника, закрепленного одной точкой в центре кривизны зеркала. Достижимые значения ξ имеют порядок 10^2 . В экспериментальных исследованиях подобных систем площадь сферического сегмента доводилась до $\sim 10^4 \text{ м}^2$, причем были получены удовлетворительные результаты

*) Сложные фокусирующие системы, позволяющие осуществлять слежение за движением Солнца по двум угловым координатам, применяются в солнечных печах. В них достигаются значения $\xi \approx 10^4$

До последнего времени концентрирующие системы типа неподвижный отражатель — подвижный приемник считались пригодными лишь для сравнительно мелкомасштабных солнечных тепловых установок. В последнее время, однако, начинают обсуждаться возможности их использования и в крупномасштабных установках^{10, 11}.

Если все же ориентироваться только на самые простые концентраторы — неподвижный и с сезонной подстройкой плоскости симметрии, то увеличение температуры нагрева по сравнению с (6), (7) может быть достигнуто лишь за счет фактора α/ε в (5).

СЕЛЕКТИВНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Хорошо известен принцип «тепловой ловушки», основанный на так называемом парниковом эффекте. Нагреваемое тело закрывается оболочкой, прозрачной в видимой области спектра и поглощающей в инфракрасной области (стекло или специальные пленки). Такая оболочка пропускает солнечное излучение и вместе с тем частично ослабляет тепловое излучение нагреваемого тела наружу. Можно использовать не один, а несколько защитных слоев. В таких устройствах удастся несколько повысить эффективность нагрева, причем как за счет уменьшения потерь на тепловое излучение, так и за счет уменьшения конвективной теплоотдачи. Однако достигаемое без применения концентраторов повышение температуры невелико (см., например,⁹).

Другой подход основан на применении селективных покрытий, обеспечивающих эффективное поглощение солнечного излучения и вместе с тем маленькие значения излучательной способности ε в инфракрасной области спектра (см., например,¹²⁻¹⁴). Существует несколько различных методов получения нужной селективности.

Во-первых, имеется ряд материалов, хорошо поглощающих или пропускающих солнечное излучение и обладающих большим коэффициентом отражения r в инфракрасной области. В соответствии с законом Кирхгофа излучательная способность таких материалов мала, $\varepsilon = 1 - r$. Например, карбид гафния HfC в области 4—10 $\mu\text{м}$ имеет коэффициент отражения $r = 0,8-0,9$, а в видимой области $\approx 0,25$. Отражение в видимой области может быть уменьшено, если на поверхность HfC нанести слой прозрачного диэлектрика. С помощью таких материалов можно получить значения $\alpha/\varepsilon \approx 4-5$.

Для повышения селективности можно использовать более сложные многослойные покрытия, например трехслойные — диэлектрик, полупроводник, металл¹⁴⁻¹⁶. Поглощение происходит в слое металла. Первые два слоя прозрачны для солнечного излучения. Их назначение — ослабить тепловое излучение за счет большого коэффициента отражения полупроводника в инфракрасной области.

Наконец, могут применяться и многослойные интерференционные покрытия, аналогичные тем, что используются для просветления оптики.

При использовании селективных покрытий с малым значением ε существенно возрастает относительная роль теплообмена с окружающей средой (второй член в правой части (1)). Предельные температуры нагрева, допускаемые потерями на тепловое излучение, могут быть реализованы только при условии, что тепловые потери меньше потерь на излучение. Тепловые потери можно снизить до необходимого уровня, заключив нагреваемое тело в прозрачную вакуумированную оболочку.

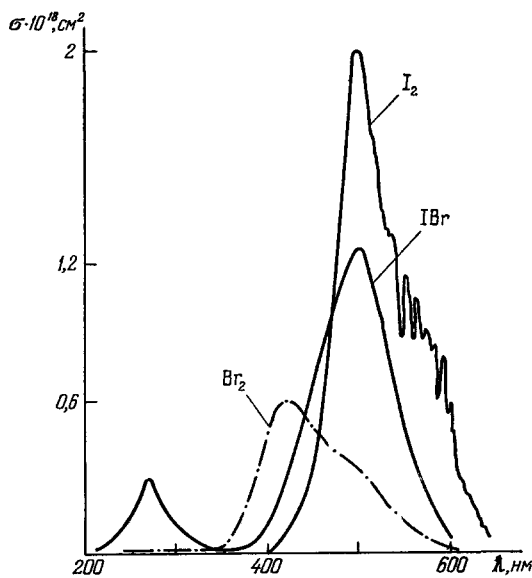
В лабораторных исследованиях за счет сложных многослойных покрытий удастся довести отношение α/ε примерно до 7—10¹⁴.

Используя одновременно концентрацию солнечной энергии и селективные покрытия, можно в принципе получить температуру нагрева, достаточную для целого ряда приложений. Так, при $\alpha/\varepsilon \approx 8$ и $\xi = 4$ (неподвижный концентратор) $T \approx 650^\circ\text{K}$. При $\alpha/\varepsilon = 8$ и $\xi = 13$ (концентратор с сезонной подстройкой) $T \approx 870^\circ\text{K}$.

Следует, однако, отметить, что применяемые в настоящее время селективные покрытия, как правило, недостаточно термостойки и к тому же довольно дороги¹⁴. Поэтому в следующем разделе рассматривается другой возможный путь реализации нужных значений параметра α/ε , основанный на применении селективных газовых приемников солнечного излучения. Такие приемники были предложены независимо автором¹⁷ и Палмером¹⁸.

СЕЛЕКТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В первом разделе было показано, что в случае газа, прозрачного в инфракрасной области и имеющего полосу поглощения в области максимума солнечного спектра, потери на тепловое излучение максимально подавлены. Они начинают про-



Спектры поглощения паров Br_2 , I_2 , IBr .

являться лишь при температурах порядка 1000°K и выше. Высокой прозрачностью в инфракрасной области обладают газы симметричных двухатомных молекул типа X_2 . Такие молекулы не имеют дипольных моментов и, следовательно, не имеют ни колебательного, ни вращательного спектров поглощения. Вместе с тем в области максимума солнечного спектра некоторые из них имеют мощные полосы электронного поглощения. Примером являются молекулы брома (Br_2) и йода (I_2). Спектры поглощения Br_2 и I_2 показаны на рисунке. Максимум поглощения Br_2 расположен в области $\lambda = 0,42 \text{ мкм}$, эффективное сечение поглощения равно $\sigma_{\text{max}} = 6 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ ($T = 293^\circ\text{K}$) и $\sigma_{\text{max}} = 4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$

($T = 900^\circ\text{K}$). Для I_2 соответственно $\lambda = 0,52 \text{ мкм}$ и σ_{max} примерно в три раза больше, чем у Br_2 . Пары Br_2 и I_2 выдерживают нагрев до температуры $T \approx 1000^\circ\text{K}$. Тепловое разложение начинает проявляться лишь при $T > 1100^\circ\text{K}$.

Кроме симметричных двухатомных молекул, нужными свойствами обладают также и некоторые другие двухатомные и трехатомные молекулы. Например, молекула IBr имеет две полосы электронного поглощения в области $\lambda \sim 0,5 \text{ мкм}$ и $\lambda \sim 0,27 \text{ мкм}$ (см. рисунок). То обстоятельство, что она несимметрична и имеет инфракрасный спектр поглощения, не приводит к трудностям. Основная частота колебаний IBr $\nu = 288 \text{ см}^{-1}$ соответствует длине волны $\lambda = 37 \text{ мкм}$. В область же $1\text{--}10 \text{ мкм}$ попадают лишь высокие обертоны. Кроме того, молекула IBr слабодипольна. В дальнейших оценках для определенности мы будем иметь в виду пары

типа Br_2 , I_2 , IBr , а также их смеси друг с другом и с благородными газами, азотом (N_2) и т. п. Приведенные на рисунке спектры поглощения показывают, что в этом случае при надлежащем выборе концентраций можно принять $\alpha = 0,4$.

Как было показано в разделе, посвященном предельной температуре нагрева, в интервале температур $T \leq 1000^\circ\text{K}$ тепловым излучением выбранного газа можно пренебречь. Поэтому температура нагрева ограничивается только тепловым потоком на стенки объема q_T . Примем для определенности, что нагреваемый объем представляет собой цилиндр с радиусом R . В этом случае

$$q_T = \kappa \text{Nu} \frac{\Delta T}{R}, \quad \Delta T = T - T_0, \quad (8)$$

где κ — коэффициент теплопроводности, Nu — число Нуссельта, характеризующее увеличение теплопроводности в результате конвекции, T — максимальная температура внутри объема, T_0 — температура стенок объема. Для Br_2 $\kappa = 10^3 \text{ эрг/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$ ($T \sim 500^\circ\text{C}$). Число Нуссельта Nu можно оценить по формуле ⁸:

$$\text{Nu} \simeq 0,2 \text{Gr}^{1/4}, \quad \text{Gr} = \frac{g R^3 \beta \Delta T}{\nu^2}, \quad (9)$$

где Gr — число Грассхофа, g — ускорение силы тяжести, β — коэффициент теплового расширения, ν — кинетическая вязкость. Для газов с хорошей точностью $\beta = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$. Кинематическая вязкость газов обратно пропорциональна давлению p . Для Br_2 $\nu \approx 0,1 N_0/N \text{ см}^2/\text{сек}$, где N — концентрация молекул, N_0 — концентрация при атмосферном давлении.

Как видно из (9), $\text{Gr} \propto p^2$, а $\text{Nu} \propto \sqrt{p}$, поэтому для уменьшения конвективной теплопередачи выгодны малые давления. Вследствие большой величины сечений поглощения пары Br_2 , I_2 , IBr могут эффективно поглощать солнечное излучение при давлениях, много меньших атмосферного. Для того чтобы обеспечить принятое значение $\alpha \approx 0,4$, необходима такая концентрация молекул, при которой $N \sigma_{\max} 2R \approx 5$. Поскольку $\sigma_{\max} \simeq 5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$, получаем $N \gtrsim 10^{19}/2R$. Концентрация N может быть увеличена за счет бездипольного буферного газа *). Из (8), (9) следует

$$\Delta T \simeq 55 \xi^{4/5} R^{1/5} \left(\frac{N_0}{N} \right)^{2/5}. \quad (10)$$

При атмосферном давлении $N \simeq N_0$ в условиях развитой конвекции (для $R \simeq 10\text{--}20 \text{ см}$ $\text{Gr} \sim 10^8\text{--}10^9$)

$$\Delta T \simeq 55 \xi^{4/5} R^{1/5}. \quad (11)$$

При $N \simeq 10^{-19} (2R)^{-1}$, когда роль конвекции значительно уменьшена (для $R \simeq 10\text{--}20 \text{ см}$ $\text{Gr} \sim 10^5$),

$$\Delta T \simeq 85 \xi^{4/5} R^{3/5}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что при пониженном давлении даже без концентрации солнечной энергии ($\xi = 1$) можно получить $\Delta T \simeq 500^\circ\text{C}$ ($R \simeq 20 \text{ см}$). С применением концентраторов излучения высокотемпературный нагрев возможен и при больших давлениях, вплоть до атмосферного. Так, при $N = N_0$, $R = 20$ и $\xi = 13$, $\Delta T \simeq 700^\circ\text{C}$.

Существенной и очень важной особенностью рассматриваемого газового приемника солнечного излучения является то обстоятельство, что

*) Величина $\kappa \text{Nu} \propto \nu^{-1/2}$ κ меняется от газа к газу значительно меньше чем сами величины κ и ν . Для N_2 и Br_2 отношение величин $\nu^{-1/2} \kappa$ равно 2,2. Для Ag и Br это отношение равно 1,5.

прозрачная оболочка в процессе нагрева остается сравнительно холодной. Температуру оболочки T_0 можно оценить, приравняв тепловой поток из газа q_T потерям на излучение и теплоотдачу в окружающую среду (ср. с. (11)). Поскольку, в отличие от рассматриваемого газа, излучательная способность оболочки $\epsilon_0 = 1$, ее нагрев ограничивается излучательными потерями. Нетрудно показать, что при $\alpha = 0,4$ даже для $\xi = 15$ температура T_0 не превышает температуру окружающей среды больше, чем на 100°C . Поэтому при оценках температуры T в (10) — (12) можно принять $T_0 \approx 300\text{—}400^\circ\text{K}$.

ПРОЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В литературе, посвященной солнечной энергии, обсуждаются самые разнообразные проекты мощных солнечных электростанций. Некоторые из них, хотя и основываются на уже известных научных и технических достижениях, явно имеют в виду далекое будущее. Примером является рассмотренная П. Глазером возможность создания в космосе на синхронной орбите гигантской полупроводниковой батареи. Передачу энергии на Землю предполагается осуществлять в СВЧ диапазоне (см. ³). Ряд проектов, вполне реальных для настоящего времени, характеризуется столь малыми значениями к. п. д. преобразования солнечной энергии в электричество, что они вряд ли могут рассчитывать на успех. К проектам такого типа относятся предложения по созданию гидроэлектростанций, работающих за счет испарения воды. Рассматривались разные возможности, в том числе постройка плотин, отгораживающих от мирового океана морские и океанские заливы. Понижение уровня воды за счет ее испарения создает постоянный источник гидроэнергии. Нетрудно видеть, однако, что к. п. д. таких систем очень мал. Примем, что создаваемый перепад уровней воды H составляет $\sim 10\text{—}100$ м. На испарение 1 г воды затрачивается ~ 600 кал $= 25 \cdot 10^9$ эрг, тогда как потенциальная энергия $gH = 10^6\text{—}10^7$ эрг. С учетом потерь на преобразование в электричество к. п. д. оказывается $\sim 2 \cdot 10^{-5}\text{—}2 \cdot 10^{-4}$. Учет того обстоятельства, что испарение происходит не только за счет излучения, падающего на саму площадь залива, но и за счет притока тепла из смежных областей, существенно не меняет этой оценки.

Наиболее реальными и конкурентоспособными на сегодняшний день представляются солнечные тепловые электростанции. В них предполагается использовать существующие тепловые машины, турбины и т. п., так что отличие солнечных тепловых электростанций от обычных тепловых заключается в основном в способе нагрева рабочего теплоносителя (газ высокого давления, перегретые пары воды и т. п.). Поэтому ниже мы будем обсуждать лишь методы нагрева солнечным излучением.

Рассматриваются разные схемы нагрева. В так называемом варианте с башенным коллектором нагреваемый объем предполагается разместить над зданием электростанции на высоте $100\text{—}300$ м, а солнечный поток направлять на него с помощью расположенных вокруг концентраторов, перекрывающих общую площадь в несколько квадратных километров. Необходимые для таких систем концентраторы довольно сложны. Они требуют, в частности, слежения за суточным движением Солнца.

Значительно более привлекательными представляются схемы нагрева, в которых предполагается использовать сравнительно простые концентраторы солнечной энергии в комбинации с селективными приемниками. Одна из схем такого типа была предложена в работе ¹⁴. Основным элементом коллектора солнечного излучения является длинная линия — концентратор, фокусирующий солнечное излучение на трубопровод с селективным

покрытием. При движении по трубопроводу теплоноситель разогревается от начальной температуры T_i до конечной рабочей температуры T_f . Для того чтобы собирать излучение с большой площади и вместе с тем свести к минимуму потери тепла в пассивных участках трубопроводов, соединяющих коллекторы излучения с тепловой машиной, необходимо обеспечить достаточно большую длину L коллектора излучения. Величина L определяется допустимой скоростью прокачки v и временем разогрева τ . Максимально допустимую скорость можно оценить, потребовав чтобы мощность W' , затрачиваемая на прокачку, не превышала 10^{-2} от мощности теплового потока на выходе трубопровода W .

Пусть Δp — перепад давления. Тогда

$$W' = \pi R^2 v \Delta p, \quad \Delta p = \rho \frac{v^2}{2} \frac{L}{2R} f, \quad [(13)]$$

где ρ — плотность теплоносителя, f — безразмерный коэффициент, зависящий от качества стенок трубопровода. Принимая типичное значение $f = 0,3$, получаем

$$W' = 0,02 \rho R v^3 L. \quad (14)$$

Для W и τ имеем

$$W = c_p \rho \pi R^2 T_f v, \quad (15)$$

где c_p — теплоемкость,

$$\tau \sim \frac{c_p \rho \pi R^2 (T_f - T_i)}{\xi \cdot 2 R P_d} \simeq \frac{c_p \rho R (T_f - T_i)}{\xi P_c}. \quad (16)$$

Учитывая, что $L = v\tau$, и принимая $W'/W \leq 10^{-2}$, $(T_f' - T_i) \sim T_f$, получаем

$$v^3 \leq 1,5 \frac{\xi P_c}{\rho}. \quad (17)$$

Пусть давление газа-теплоносителя, например воздуха, $p \simeq 10$ атм. При $T \sim 500^\circ \text{C}$ и $p = 10$ атм $\rho \approx 5 \cdot 10^{-3}$ г/см³, $c_p \approx 10^7$ эрг/г·град. Подставляя эти значения в (13) — (17) и принимая $\xi \sim 10$, $R \sim 10 \div 30$ см, получаем

$$v \leq 10^3 \text{ см/сек}, \quad \tau \sim 100 \text{ сек}, \quad \frac{\Delta p}{p} \leq 0,03. \quad (18)$$

Таким образом, скорость прокачки можно менять в широких пределах, что позволяет обеспечить большие значения $L = v\tau$, вплоть до километров.

При $R \sim 10\text{--}30$ см и $\xi \sim 10$ $D = 2R\xi \sim 200\text{--}600$ см. Концентраторы с поперечным размером в несколько метров и фактором концентрации $\xi \sim 10$ сравнительно дешевы. При их изготовлении может быть использована простая технология (см., например, ¹⁹). Поэтому комбинация концентратор — приемник с селективным покрытием представляется весьма выгодной. Она позволяет достичь необходимых рабочих температур и одновременно значительно уменьшить площадь селективного приемника *).

При выбранных выше для оценок параметрах газа-теплоносителя и $v = 10^3$ см/сек, $R = 30$ см полный тепловой поток на выходе одного коллектора согласно (15) составляет $W \approx 15$ Мвт.

*) Несомненный интерес представляет применение концентраторов и в случае прямого преобразования в электричество. Если бы удалось создать полупроводниковые элементы, более термостойкие, нежели существующие, то применение концентраторов позволило бы значительно сократить необходимое количество полупроводников.

В работе ¹⁴ предполагается использовать селективные покрытия с $\alpha/\varepsilon \sim 10$ и концентраторы с $\xi \sim 10$. Максимально достижимая температура нагрева при этом, в соответствии с (5), составляет $T_{\max} \simeq 900^\circ\text{K}$. Это позволяет выбрать некоторую оптимальную температуру $T_f < T_{\max}$, при которой обеспечиваются достаточно высокие значения коэффициентов преобразования солнечного излучения в тепло η_t , тепла в электричество η_e и полного коэффициента полезного действия $\eta = \eta_t \eta_e$. Оценки показывают, что вполне реально обеспечить $\eta_t \simeq 0,5$ и даже $0,7$ при $T_f \simeq \simeq 770^\circ\text{K}$ ($\sim 500^\circ\text{C}$). Поскольку при таких температурах для современных тепловых машин $\eta_e \sim 0,3-0,35$, получаем $\eta \sim 0,15-0,2$.

Таким образом, общая площадь, необходимая для электростанции рассматриваемого типа со среднесуточной мощностью в 10^9 вт , должна составлять $\sim 15 \text{ км}^2$.

В работе ¹⁸ показано, что применение газовых селективных приемников солнечного излучения в той же схеме приводит примерно к таким же результатам. Правда, необходимая площадь оказывается примерно в два раза большей, так как в этом случае используется лишь доля $\alpha \simeq 0,4$ солнечного потока P_c . Зато приемники излучения представляются более простыми и дешевыми.

Следует отметить, что конкретный вариант газового селективного приемника, рассмотренный в работе ¹⁸, скорее всего не является оптимальным. Предполагается подмешивать поглощающие компоненты типа Br_2 непосредственно к рабочему газу высокого давления, такому, как аргон. При этом совершенно не используется рассмотренная выше возможность полностью устранить конвективный перенос тепла в приемнике. Не исключено, что применение двухступенчатой схемы — нагрев газа низкого давления с последующей передачей тепла рабочему газу высокого давления в теплообменнике — окажется более выгодным. Кроме того, та часть солнечного потока $(1 - \alpha) P_c$, которая не поглощается в приемнике, а выходит наружу через прозрачную оболочку, может быть использована для предварительного подогрева газа, что несколько увеличивает значение η_t .

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Итак, имеется вполне реальная возможность создания мощных солнечных тепловых установок, обеспечивающих температуру нагрева, достаточную для целого ряда приложений, в том числе и для преобразования энергии солнечного излучения в электричество с к. п. д. $10-20\%$. При этом с площади $\sim 1 \text{ км}^2$ может сниматься электрическая мощность $\sim 10^8 \text{ вт}$ в течение примерно 8 дневных часов.

Как относиться к этим результатам? Дают ли они основание для оптимизма? На этот вопрос не так просто ответить. Если сравнивать солнечную тепловую электростанцию с существующими в настоящее время (тепловыми, атомными, гидроэлектростанциями), то необходимо учитывать целый ряд как положительных, так и отрицательных факторов. Положительные факторы очевидны. Это неисчерпаемость источника энергии, отсутствие загрязнения и перегрева окружающей среды. К отрицательным факторам обычно относят большую площадь, зависимость от погодных условий, специфические условия эксплуатации, связанные с работой только в дневные часы, или необходимость запасать тепло. В конечном счете, однако, все сводится к двум решающим факторам — стоимости и площади.

Будем для определенности говорить об электростанции со среднесуточной мощностью $\sim 10^9 \text{ вт}$. Для такой электростанции, как было пока-

зано выше, требуется площадь $\sim 15\text{--}30 \text{ км}^2$. Эта площадь хотя и велика, но не представляется чрезмерной. Она, в частности, не превышает площади современных гидроэлектростанций на равнинных реках (площадь водохранилища и затопляемых земель). К тому же солнечные электростанции могут располагаться в засушливых районах или пустынях. Для того чтобы полностью удовлетворить сегодняшние потребности в энергии СССР, требуется площадь $\sim 5000 \text{ км}^2$, т. е. квадрат со стороной 70 км, что составляет менее 1% площади, занимаемой под производство продуктов питания *).

Таким образом, сама по себе площадь $15\text{--}30 \text{ км}^2$ для электростанции на 10^9 вт вполне приемлема. Вопрос состоит лишь в том, насколько просты и дешевы будут приемники излучения, позволяющие «собирать» солнечную энергию с такой площади. Среди аргументов, выдвигаемых против солнечной энергетики, часто встречаются ссылки на специфические и непривычные условия эксплуатации. Например, отмечается необходимость периодически чистить концентраторы и приемники от загрязнения. Очевидно, что все опять-таки упирается в стоимость. Затраты на периодическую чистку надо рассматривать так же, как, например, затраты на содержание охраны, необходимой в случае атомной электростанции. Поэтому единственным решающим фактором, по-видимому, является стоимость производства энергии, т. е. стоимость солнечной энергетической установки и ее эксплуатации. Сказанное в равной мере относится как к мощным солнечным электростанциям, так и к солнечным тепловым установкам любого типа.

С точки зрения экономичности наиболее привлекательными в настоящее время представляются варианты солнечных тепловых установок, в которых используются селективные приемники и сравнительно простые концентраторы солнечного излучения (без суточного слежения за движением Солнца). Выше уже отмечалось, что при изготовлении таких концентраторов можно использовать простую и дешевую технологию. Особенно это относится к френелевским концентраторам.

В предварительных оценках экономических факторов всегда присутствует определенный элемент произвола. Тем не менее из оценок, приводимых в работах ^{14, 18}, видно, что стоимость электроэнергии на солнечных тепловых электростанциях оказывается вполне разумной.

При современной стоимости электроэнергии допустимые капитальные затраты на строительство электростанции обычно оцениваются примерно в 200 долларов на 1 кВт ^{14, 18}. Сколько может стоить селективный приемник вместе с концентратором? Газовые селективные приемники очень просты. Общее количество поглощающих компонентов типа Вт_2 невелико. При факторе концентрации $\xi \sim 10$ требуется порядка нескольких десятков грамм Вт_2 на 1 кВт или несколько десятков тонн на 10^9 вт . Поэтому их стоимость в основном определяется стоимостью стеклянного трубопровода и его крепления. При $R \sim 20 \text{ см}$ и $\xi \sim 10$ длина элемента трубопровода, соответствующая мощности 1 кВт , составляет $\sim 8 \text{ м}$. По оценкам в работе ¹⁸ стоимость довольно сложного варианта газового приемника, который рассчитан на нагрев газа высокого давления и снабжен теплоизоляцией неосвещенной части поверхности, составляет ~ 200 долларов на 1 кВт . При оптимальном выборе варианта приемника его стоимость вряд ли будет превосходить несколько десятков долларов на 1 кВт . Приемники с селективными покрытиями, по-видимому, стоят в несколько раз дороже ¹⁴. В этом случае, правда, потребная площадь снижается в 1,5—2 раза.

*) Отметим также, что это меньше площади, занимаемой угольными шахтами, нефтяными промыслами и нефтепроводами.

Стоимость концентраторов также не должна превосходить 100—200 долларов на 1 квт (см., например, ¹⁸).

Не исключено, что эти оценки могут оказаться даже несколько завышенными, так как в них не учитывается в полной мере возможность удешевления технологии в условиях массового производства. Во всяком случае, видно, что солнечные тепловые электростанции могут оказаться вполне конкурентоспособными уже в недалеком будущем. Окончательные выводы, конечно, могут быть сделаны только после создания крупномасштабных опытных установок и изучения опыта их эксплуатации.

Другой вопрос, возникнет ли достаточно острая необходимость в солнечной энергетике и перевесят ли такие ее преимущества, как отсутствие загрязнений и перегрева окружающей среды, те неудобства, которые связаны с отмечавшимися выше специфическими условиями эксплуатации солнечных электростанций. Не исключено, что эти неудобства и трудности сильно преувеличиваются под влиянием предубеждения, традиций и т. п. В этой связи уместно привести следующее высказывание, заимствованное из ²⁰, которое очень удачно характеризует сложившуюся ситуацию:

«Представьте себе, что солнечная энергия используется повсеместно и стоимость ее лишь незначительно превышает обычную. А теперь представьте себе, что я предлагаю следующую революционизирующую идею — пошлите геологические партии в пустыни Ближнего Востока на поиски нефтяных месторождений, после того как нефть будет найдена, постройте там вышки и начните добычу. Представьте себе, что я предложил бы транспортировать эту нефть по нефтепроводу или на специализированных нефтеналивных судах на другой конец земного шара, где ее подвергали бы переработке, а затем развозили потребителям на грузовиках. Я уверен, что нашлось бы множество людей, которые убедительнейшим образом доказали бы экономическую неосуществимость моего предложения».

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Васильев, А. П. Ландцман, Полупроводниковые фотопреобразователи, М., «Сов. радио», 1971.
2. Г. Люстиг, Курьер Юнеско, № 1, 4 (1974).
3. П. З. Глейзер, *ibid.*, № 1, 16 (1974).
4. Г. Я. Умаров, А. А. Ершов, Солнечная энергетика, М., «Знание», 1974.
5. D. Mog, Appl. Optics 14, A158 (1975).
6. D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. R.angers, W. W. Behrens, III, The Limits to Growth, N. Y., University Books, 1972.
7. П. Л. Капица, УФН 118, 307 (1976).
8. М. А. Михеев, Основы теплопередачи, М., Госэнергоиздат, 1956.
9. M. Young, Appl. Optics 14, 1503 (1975).
10. W. G. Stewart, F. Kreith, *ibid.*, p. 1509.
11. F. Kreith, in: Tri-state Fossil Fuels Energy Conference Denver, Colorado, June 1974.
12. М. М. Колтун, Гелиотехника (АН Узб. ССР), № 5, 38 (1972).
13. У. А. Арифов, *ibid.*, № 6, 3.
14. A. Meinel, P. Meinel, Phys. Today 25 (2), 44 (1972).
15. G. Hass, H. H. Schroeder, A. F. Turner, JOSA 46, 31 (1956).
16. T. J. McMahon, S. N. Jaspersen, Appl. Optics 13, 2750 (1974).
17. И. И. Собыльман, заявка на изображение № 1992357/24-6 (от 24.I 1974 г., положительное решение от 25.IV.1975 г.).
18. H. B. Palmer, in: Proc. of the 8th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference University of Pennsylvania, August 13—16, 1973.
19. В. А. Грилихес, В. М. Матвеев, В. П. Полуэктов, Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов, М., «Машиностроение», 1975.
20. Д. Берман, Курьер Юнеско, № 1, 24 (1974).