Повышение эффективности системы солнечного теплоснабжения

А. Жамалов КазГос ЖенПИ

Эффективность использования солнечной энергии прежде всего определяется температурой нагрева коллектора. Большинство предпринимавшихся ранее попыток создания солнечных тепловых установок во многом заканчивалось тем, что реализуемая в них температура нагрева ограничивалась значениями $t<100$ °С.

Повышение температуры нагрева до 500 °С, а это сейчас представляется вполне реальным, причем с помощью сравнительно простых средств, использующих уже имеющуюся технику, значительно увеличивает эффективность преобразования солнечной энергии [1].

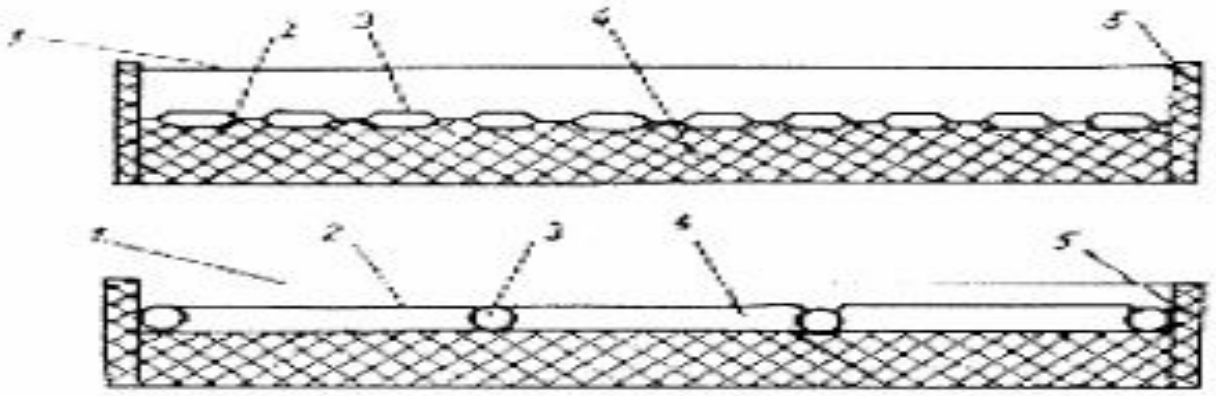
На рис.1 показана модель солнечного коллектора, состоящего из следующих элементов: коллектора, несущих конструкций, прозрачной изоляции.

Изоляция обладает тем свойством, что является прозрачно видимой частью спектра Солнца. Таким образом, лучистая энергия Солнца, поглощаясь и отражаясь в прозрачной изоляции, проходит во внутренний объем воздушного пространства с дальнейшим поглощением приемной поверхности и коллектором. Здесь особенно важно, что между приемной поверхностью и коллектором должен иметься идеальный тепловой контакт. Лучистая энергия, поглощаясь на теплоприемной поверхности, преобразуется в длинноволновую радиацию.

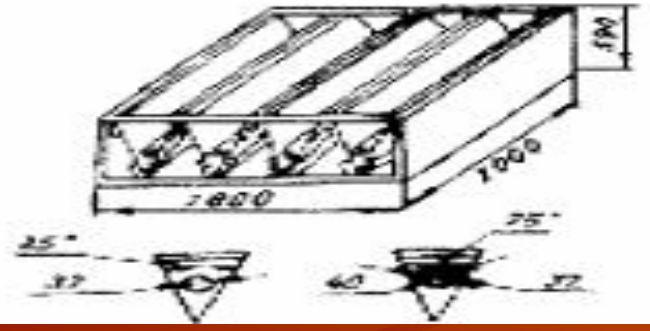
От теплоприемной поверхности эта радиация в виде теплопроводности, конвекции и лучеиспускания передается на внутреннюю поверхность прозрачной изоляции и в ней поглощается. Вследствие этого эффекта температура прозрачной изоляции изменяется, потери тепловой энергии увеличиваются, так как создается внутренний источник тепла. С другой стороны, от теплоприемной поверхности за счет собственного излучения через прозрачную изоляцию и донную часть установки некоторая часть энергии теряется в виде тепловой энергии.

В настоящей работе предлагается способ предотвращения этих тепловых потерь. Для этого рассмотрим тепловой баланс солнечного коллектора.

Принципиальные схемы солнечных коллекторов с теплоприемником из стального штампосварного радиатора и разборным листотрубным теплоприемником



Схематическое изображение фокусирующего коллектора



Температура нагрева солнечным излучением ограничивается двумя процессами: тепловым излучением поверхности и теплоотдачей в окружающую среду. В условиях равновесия

$$SaE = S^{I}\left(\varepsilon\sigma T^{4} + \alpha\Delta T\right) \qquad (1)$$

где E – поток солнечного излучения: a – поглощательная способность; ε – излучательная способность; $\delta = 5{,}67\cdot10^{-6}$ Дж/м^{2}с·град^{4}; ΔT – разность температур между теплоприемной поверхностью и окружающей средой; S^{I} – полная поверхность теплоприемника; S – освещенная поверхность; α – коэффициент теплоотдачи, зависит от размеров теплоприемника, состояния атмосферы, может менятся в довольно широких пределах ($\alpha \approx 2\cdot10^{3} - 3\cdot10^{4}$ Дж/м^{2}с·град^4). В интервале температур $T \approx 400 - 900$ К (ΔT 100 – 600 К) при $\varepsilon \approx 1$ и минимальном значении α получим $\varepsilon\delta T^4 \approx \alpha\Delta T$. При минимальном значении $\alpha\varepsilon\delta T >> \alpha\Delta T$. Пренебрегая вторым членом в (1), оценим предельную температуру нагрева, определяемую потерями на тепловое излучение. Положив E=700 Вт (что соответствует потоку на сороковой параллели в середине дня), можно определить температуру

нагрева в виде

$$T \le \left(\frac{E}{\delta}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{dS}{\varepsilon S^{I}}\right)^{\frac{1}{4}} = 365\left(\frac{\alpha\, S}{\varepsilon\, S}\right). \qquad (2)$$

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

Увеличить температуру нагрева можно двумя путями: применением концентраторов солнечного излучения и за счет факторов a/ε. Второй путь связан с тем, что в (2) входит отношение поглощательной (а) и излучательной способности (ε) для разных областей спектра. Основная часть солнечного потока сосредоточена в видимой и ближней инфракрасной областях спектра $\lambda \sim 0{,}75 - 1{,}2$ мкм. Тепловое излучение при температурах $T<1000$ К расположено в инфракрасной области $\lambda>2$ мкм. Поэтому оптимальные условия реализуются в тех случаях, когда нагреваемый теплоприемник эффективно поглощает солнечное излучение и вместе с тем обладает высокой прозрачностью или большим коэффициентом отражения в инфракрасной области $\lambda>2 - 10$ мкм [2].

Нетрудно найти предельную температуру нагрева, которая может быть получена при максимально благоприятных обстоятельствах. Пусть нагреваемое тело (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 излучательной) устанавливается при температуре T которая связана с эффективной температурой Солнца T_c соотношением

$$\frac{4\pi}{\exp\left(\frac{\alpha\omega}{\kappa T}\right)-1} = \frac{\Delta Q_c}{\exp\left(\frac{\alpha\omega}{\kappa T_c}-1\right)}, \qquad (3)$$

где ΔQ_c – телесный угловой размер Солнца. Поскольку в максимуме солнечного спектра $\alpha\omega \approx 2{,}28\ \kappa T_c$, имеем

$$\exp\left(\frac{\alpha\omega}{\kappa T_c}-1\right) \gg 1,\ \exp\left(\frac{\alpha\omega}{\kappa T}-1\right) \gg 1 \text{ и } \frac{\alpha\omega}{\kappa T} \approx \frac{\alpha\omega}{\kappa T_c} + \ln\frac{4\pi}{\Delta Q_c}. \qquad (4)$$

Подставив $T_c \approx 6000$ К, $\Delta Q_c = 6{,}8\cdot 10^{-5}$ стерад, $\omega = 2\pi c/\lambda$, $\lambda = 5\cdot 10^{-4}$ см, получим $T \approx 1500$ К.

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 далее.

Первый подход к решению поставленной задачи основан на применении селективных покрытий, обеспечивающих эффективное поглощение солнечного излучения и вместе с тем малые значения излучательной способности в инфракрасной области спектра [3].

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 мкм имеет коэффициент отражения $\approx 0{,}8-0{,}9$, а в видимой области $\approx 0{,}25$. Отражение в видимой области может быть уменьшено, если на поверхность HfC нанести слой прозрачного диэлектрика. С помощью этих материалов можно достичь значений $\frac{\alpha}{\varepsilon} \approx 4-5$. Следует, однако, отметить, что применяемое в настоящее время селективное покрытие, как правило, недостаточно термостойкое и к тому же довольно дорогое. Поэтому нами предлагается другой возможный путь реализации требующихся значений параметра $\frac{\alpha}{\varepsilon}$, основанный на применении селективных газовых приемников солнечного излучения.

Вначале нами были показано, что в случае прозрачного в инфракрасной области и имеющего полосу поглощения в области максимума солнечного спектра потери на тепловое излучение максимально уменьшаются. Они начинают проявляться лишь при температурах порядка 1000 К и выше. Высокой прозрачностью в инфракрасной области обладают газы симметричных двухатомных молекул типа X_2. Такие молекулы не имеют дипольных моментов и, следовательно, ни колебательного, ни вращательного спектров поглощения. Вместе с тем в области максимума солнечного спектра некоторые из них имеют мощные полосы электронного поглощения, например молекулы брома (Br) и йода (I_2). Спектры поглощения Br и I_2 показаны на рис. 2. Максимум поглощения Br_2 расположен в области $\lambda=0{,}42$ мкм, эффективное сечение поглощения равно $\approx 6\cdot10^{-19}$ см^2 (T= 293 К) и $\approx 4\cdot10^{-19}$ см^2 (T= 900 К). Для I_2 соответственно $\lambda=0{,}52$ мкм и эффективное сечение поглощения в 3 раза больше, чем у Br_2. Пара Br_2 и I_2 выдерживает нагрев до температуры T=1000 К. Тепловое разложение начинает проявляться лишь при T>1100 К [4].

Кроме симметричных двухатомных молекул необходимыми свойствами обладают также некоторые другие двух- и трехатомные молекулы. Например, молекула IBr имеет две полосы электронного

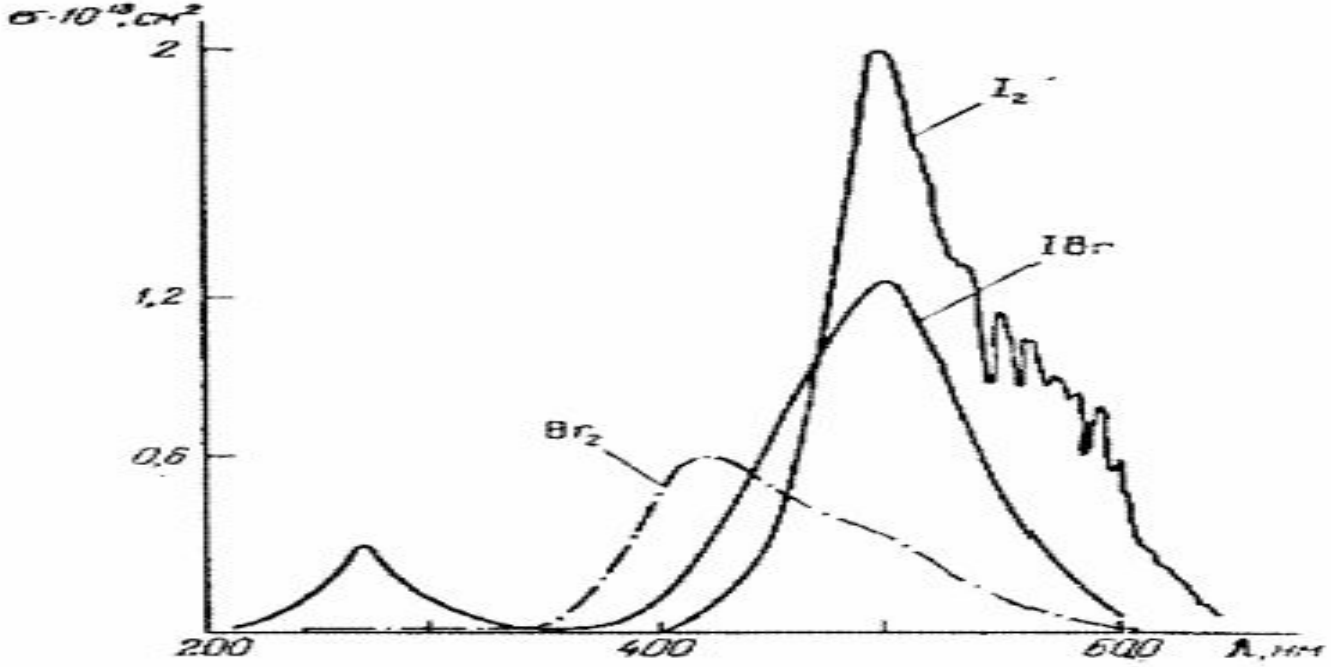


Рис. 2. Спектры поглощения паров Br_2, I_2 и IBr

поглощения в области $\lambda \approx 0{,}3$ и $\lambda \approx 0{,}27$ мкм. То обстоятельство, что она несимметрична и имеет инфракрасный спектр поглощения, не создает трудностей. Основная частота колебаний IBr $\nu = 288$ см$^{-1}$ соответствует длине волны $\lambda \approx 37$ мкм. Кроме того, молекула IBr слабодипольна. В дальнейших оценках для определенности будем иметь в виду пары типа Br, I_2, IBr_2, а также их смеси друг с другом и с благородными газами, азотом и т. п.

Как было показано, предельной температурой нагрева в интервале температур $T \approx 1000$ К тепловым излучением выбранного газа можно пренебречь. Поэтому температуры нагрева ограничиваются только тепловыми потоками на стенки объема.

Примем для определенности, что нагреваемый объем представляет собой цилиндр с радиусом R. В этом случае

$$q_T = \chi Nu \frac{\Delta T_u^m}{R}, \qquad \Delta T = T - T_0. \tag{4}$$

где χ — коэффициент теплопроводности; Nu — критерий Нуссельта,

Нуссельта Nu можно оценить по формуле

$$Nu \approx 0{,}2Gr^{1/4}, \qquad Gr = \frac{gR^3\beta\Delta T}{\nu^2}, \tag{5}$$

где Gr – критерий Грассхофа; g – ускорение силы тяжести; β – коэффициент теплового расширения; ν – кинематическая вязкость.

Для газа $\beta = 3{,}7 \cdot 10^{-3}$ град$^{-1}$. Кинематическая вязкость газов обратно пропорциональна давлению P. Для Br_2 $\nu \approx 0{,}1N_O/N$, где N – концентрация молекул; N_o – концентрация при атмосферном давлении [5].

Как видно из (5), $Gr \approx P^2$, а $Nu \approx \sqrt{P}$, 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 a≈0,4, необходима такая концентрация молекул, при которой $N\sigma_{max}2R = 5$.

Поскольку $\sigma_{max} \approx 5 \cdot 10^{-19}$ см^2, получаем $N \approx 10^{19}/2R$.

Из (4) и (5) следует

$$\Delta T \approx 55\xi^{4/5} \quad R^{1/5}\left(\frac{No}{N}\right)^{2/5}, \tag{6}$$

где ξ – концентрация солнечной энергии.

При атмосферном давлении $N \approx N_B$ с условиях развитой конвекции

$$\left(K = 10 - 20 \text{ см}, Gr \approx 10^5\right) \quad \Delta T \approx 85 \ \varepsilon^{4/5} R^{3/5}. \tag{7}$$

Из (6) видно что при пониженном давлении даже без концентрации солнечной энергии $(\varepsilon = 1)$ можно получить ΔT=500 °C [6].

Итак, имеется вполне реальная возможность создания мощных солнечных тепловых установок, обеспечивающих температуру нагрева, достаточную для целого ряда приложений, в том числе для преобразования энергии солнечного излучения в электрическую.

Гелиоустановка ГУ-300 с гелиоколлектором с полуцилиндрическими отражателями и гелиоустановка ГУ -500 с гелиоколлектором с поглощающими экранами и сотовыми покрытиями