

УДК 621.362

К. И. Луданов

Институт проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Новый способ преобразования энергии солнечного излучения в электричество для энергоснабжения космических станций

Надійшла до редакції 29.03.07

Пропонується новий спосіб перетворення енергії сонячного випромінювання в електроенергію, альтернативний фотоперетворенню. На даний спосіб та енергоустановку для його реалізації вже отримано позитивні рішення Укрпатенту. Новий спосіб енергоперетворення включає дві фази: концентрування сонячного випромінювання за допомогою параболоїдних дзеркал з отриманням високопотенційного тепла в геліоприймачі і наступне перетворення теплоти в електроенергію в рамках теплового циклу «високотемпературний електролітичний розклад водяної пари на водень і кисень + електрохімічна генерація шляхом реакції рекомбінації отриманих газів в низькотемпературній паливній комірці». Новий спосіб перетворення дає двократну перевагу порівняно з фотоелектроперетворенням.

ВВЕДЕНИЕ

С момента запуска первого искусственного спутника Земли, оснащенного аккумуляторной батареей, возникла проблема энергоснабжения космических аппаратов (КА). Уже решена задача бортового энергоснабжения долгоживущих модульных орбитальных станций, и наконец, возникла новая проблема — энергоснабжение стационарной космической станции, которая начнет функционировать на Луне в 2020 г. Первой космической энергоустановкой (КЭУ), использующей энергию солнечного излучения, была фотобатарея, установленная на спутнике «Авангард» в 1958 г. Солнечные КЭУ делятся на две основные группы: фотоэлектрические, в которых энергия солнечного излучения преобразуется непосредственно в электроэнергию и КЭУ, в которых солнечное излучение предварительно преобразуется в высокопотенциальное тепло. Полученное тепло затем преобразуется в электроэнергию либо непосредственно [1] (без электромеханической фазы: в термоэмиссионных или

термоэлектрических преобразователях тепла), либо через тепловой цикл (замкнутый паротурбинный и газотурбинный цикл, двигатель Стирлинга). Наиболее перспективной из перечисленных является фотоэлектрическая КЭУ. КПД фотоэлектропреобразователей (ФЭП), на основе которых будут созданы КЭУ, зависит от материала ФЭП. Эффективность (теоретическая/достигнутая) ФЭП составляет [10]: 21.7 %/15 % для кремния, 25 %/6 % для фосфида индия, 26 %/18 % для арсенида галлия, 27 %/7 % для теллурида кадмия, 22 %/1.0 % для фосфида галлия и 19 %/8 % для сульфида кадмия. Таким образом, КПД для ФЭП не превышает 27 %/18 %. Такой низкий КПД компенсируется значительным увеличением площади фотобатарей и постоянным ориентированием их поверхности перпендикулярно к направлению солнечного излучения.

Известен вид тепловых двигателей, называемый регенеративным топливным элементом (РТЭ), в котором реализуется замкнутый термодинамический цикл преобразования тепла в

работу. Он преобразует теплоту Q_1 при высокой температуре T_1 в электроэнергию W и теплоту Q_2 при низкой температуре T_2 [5]. РТЭ включает, кроме топливного элемента (ТЭ), термический регенератор топлива (РТ) и внешнюю нагрузку R . В РТЭ при высокой температуре T_1 проводится термическое разложение (реакция диссоциации) молекул «рабочего тела» (продукта электрохимической реакции рекомбинации «топлива» и «окислителя» в ТЭ), и сепарация его на компоненты. Эти компоненты рабочего тела цикла (реактанты) потом раздельно подаются на электроды ТЭ, а с клемм РТЭ во внешнюю цепь подается электроэнергия W , которая потребляется нагрузкой R .

Таким образом, новый тепловой двигатель (на основе нового термодинамического цикла) — аналог РТЭ — должен иметь в своем составе низкотемпературный ТЭ, высокотемпературный «регенератор топлива» и источник высокопотенциального тепла Q_1 .

Водородно-кислородные топливные элементы были изобретены английским физиком Гровом [11] еще в 1839 г. (элементы Грова). Они давно освоены. Например, среднетемпературные водородно-кислородные ТЭ с щелочным электролитом (элементы Бекона, 1946 г.) в Японии используют на электростанциях мощностью до 10 МВт, которые базируются целиком на базе ТЭ. Более того, они регулярно летают в космос (например, находились на Луне в составе космического аппарата «Аполло» [10]), причем в качестве основного источника электроэнергии.

Разложение воды электролизом на водород и кислород впервые в мире провели А. Карлейль и У. Никольсон еще в 1800 г.; законы электролиза изучены М. Фарадеем. Высокотемпературные электролизеры водяного пара известны уже более 20 лет и могут функционировать на основе твердых электролитов из диоксида циркония ZrO_2 при температурах до 1000 °С, [3, 6, 9].

В 1860 г. О. Мушо создал большой параболический солнечный концентратор для привода в действие парового двигателя, и в 1861 г. получил патент на солнечный двигатель. Первая современная солнечная печь была построена в 1921 г. Штраубелем. После Второй мировой войны на юге Франции в Одейо был создан крупномасштабный солнечный концентратор с 63 зеркалами площадью 45 м² каждое, где в

фокусе была достигнута температура 3500 °С. В настоящее время десятки солнечных электростанций преобразуют энергию концентрированной солнечной радиации в паротурбинных тепловых циклах в электроэнергию и отпускают ее непосредственно в сеть [4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ нового способа показывает, что наиболее низкоэффективным элементом теплового двигателя является термический регенератор топлива. Кроме того, в результате термической регенерации получают смесь двух компонентов: топлива и окислителя, которую необходимо сепарировать. Поэтому возникает проблема поиска эффективной замены термического регенератора топлива, которую легко можно было бы «состыковать» с таким эффективным источником высокопотенциального тепла, как солнечный концентратор. Ведь фотоэлемент — базовый приемник солнечного излучения в КЭУ — практически «не приемлет» концентрации солнечной радиации. Кроме того, фотоэлементы не отличаются высокой эффективностью и быстро деградируют, особенно в космических условиях.

Наша задача — разработка нового теплового двигателя (цикла) с прямым преобразованием высокопотенциального тепла от концентратора солнечного излучения в термодинамическом цикле, включающем только обратимые электрохимические процессы преобразования энергии.

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СПОСОБА И УСТАНОВКИ

В 2006 г. Укрпатент выдал положительные решения по двум заявкам на изобретение: «Способ преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию» и «Автономная установка для преобразования концентрированного солнечного излучения в электроэнергию», в которой реализуется упомянутый способ.

Преимущества заявленного способа безмашинного преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию таковы.

1. В энергопреобразующей установке практически нет движущихся частей и элементов вра-

щения, поэтому отсутствуют узлы трения, а следовательно, и механический износ, вызываемый трением.

2. Бесшумная работа оборудования, отсутствие вибраций.

3. Отсутствует так называемый «масштабный эффект», проявляющийся в том, что эффективность традиционных энергопреобразующих установок увеличивается с увеличением их мощности, поэтому нет смысла создавать крупные блоки, рациональнее использовать установки малой мощности у места энергопотребления.

4. Эффективность преобразования практически не зависит от величины нагрузки (нет проблем с низким КПД при недогрузке).

5. При включении энергопреобразующей установки практически отсутствует «пусковой режим» (т. е. очень быстрый запуск).

**ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА**

На рис. 1 представлена схема автономной энергоустановки для преобразования энергии концентрированного солнечного излучения в электроэнергию. Энергоустановка включает высокотемпературный электролизер водяного пара 1, который установлен в гелиоприемнике 2 солнечного концентратора 3; а также низкотемпературный топливный элемент 4, электрокабели 5 от него до электролизера 1 для его питания, трубки для транспорта водорода 6 и кислорода 7 (от электролизера до топливного элемента), трубку 8 для транспорта воды в обратном направлении, стартовую фотобатарею 9.

Энергоустановка работает следующим образом. В стартовом режиме фотобатарея 9 преобразует солнечное излучение в электроэнергию для питания высокотемпературного электролизера 1, на который подается по трубе 6 догретая до состояния сильно перегретого пара (теплом от концентратора 3 солнечного излучения) вода от топливного элемента 4. Вырабатываемый в электролизере 1 водород и кислород подаются по трубам 6 и 7 к топливному элементу 4, который начинает вырабатывать электроэнергию в процессе ЭХГ (электрохимической генерации) в реакции рекомбинации и питать по электрокабелям 5 электролизер 1.

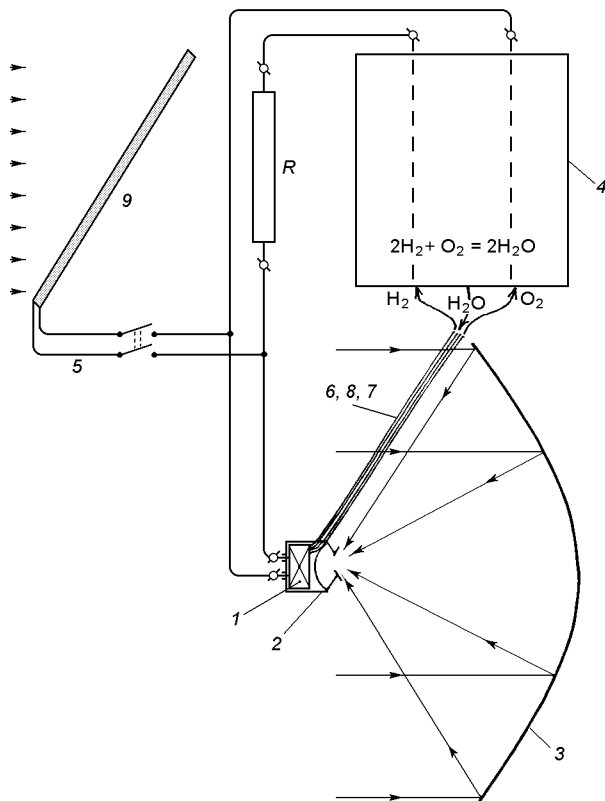


Рис. 1. Схема установки

В базовом режиме фотобатарея 9 отключается от энергоустановки, а ЭДС, которая вырабатывается топливным элементом, обеспечивает не только разложение молекул H₂O в электролизере, а еще и выдачу электроэнергии на внешнюю нагрузку R. В данном случае вода представляет собой рабочее тело, которое циркулирует в замкнутом контуре, однако не только в разных фазах (жидкости и пара), а еще и в виде образующих ее компонентов: водорода и кислорода. Регенерация высокопотенциального тепла осуществляется путем теплопередачи от потоков перегретых водорода и кислорода, текущих от электролизера к воде, которая подается от топливного элемента в обратном направлении, — через стенки металлических труб, которые приведены для этого в непосредственный тепловой контакт.

Базовый режим цикла начинается с того момента, когда электроэнергия W₁, которая выра-

батывается на ТЭ, становится большей, чем энергия, необходимая для электролиза W_2 . При этом $(\Delta\varphi_0)_{ТЭ}$ начинает играть роль ЭДС $E_{ТЭ}$ в цепи ТЭ + ЭЛ + R , так как превышает равновесное напряжение электролиза: $E_{ТЭ} > \Delta\varphi_{ЭЛ}$ ($\Delta\varphi_{ЭЛ} = 0.8$ В для 1000 °С [6]). В замкнутой электрической цепи ТЭ — ЭЛ — R — ТЭ начинает течь ток I , который выполняет на внешней нагрузке R полезную работу $A = \Delta W = I^2 R \cdot t$. Величина тока I в этом контуре пропорциональна массовому расходу продуктов электролиза (водород + кислород), которые подаются на ТЭ (или же расходу воды, которая подается обратно — с ТЭ на ЭЛ).

Однако в случае $I > 0$ во внутренних контурах и ТЭ, и ЭЛ возникают необратимые потери [11] в значительной мере за счет омического сопротивления соответствующих электролитов ($r_{ТЭ}$ и $r_{ЭЛ}$). При этом ухудшаются внешние (вольт-амперные) характеристики ТЭ и ЭЛ. На клеммах ТЭ напряжение снижается по отношению ЭДС ($U_{ТЭ} = E_{ТЭ} - I \cdot r_{ТЭ}$), а на клеммах ЭЛ — повышается по отношению равновесного напряжения электролиза ($U_{ЭЛ} = \Delta\varphi_{ЭЛ} + I \cdot r_{ЭЛ}$). Это приводит к тому, что доля электроэнергии, которая используется на внешней нагрузке R , будет уже не 35 % ($(1.23 \text{ В} - 0.8 \text{ В})/1.23 \text{ В} = 0.35$) от максимума, который может выработать ТЭ, а меньше: $A = \Delta W = I \cdot (U_{ТЭ} - U_{ЭЛ})t = I \cdot (E_{ТЭ} - \Delta\varphi_{ЭЛ})t - I^2(r_{ТЭ} + r_{ЭЛ})t$. Разность, которая возникла от необратимых потерь на ТЭ ($I^2 r_{ТЭ}$) и на ЭЛ ($I^2 r_{ЭЛ}$), представляет собой так называемое джоулево тепло, в которое необратимо преобразуется электричество.

Надо отметить, что джоулево тепло, выделяемое в ЭЛ ($q_1 = I^2 r_{ЭЛ}$), потом используется полезно — прибавляется к теплу $Q_{энд}$ от «теплового резервуара-источка» высокопотенциальной теплоты при максимальной температуре цикла T_1 , которое используется для реализации эндотермической восстановительной реакции высокотемпературного электролиза водяного пара. Тепло же, которое выделяется в ТЭ ($q_2 = I^2 r_{ТЭ}$), потом не используется, а отводится в окружающую среду вместе с теплом $Q_{экс}$ экзотермической реакции рекомбинации топлива (H_2) и окислителя (O_2). Скорректированная формула для КПД цикла при этом имеет вид

$$\eta_{ц} = 1 - Q_2/Q_1 = 1 - (Q_{экс} + q_{ТЭ})/(Q_{энд} + q_{ЭЛ}) = \\ = 1 - (Q_{экс} + I^2 r_{ТЭ})/(Q_{энд} + I^2 r_{ЭЛ}),$$

где $Q_{энд}$ — тепло эндотермической реакции в ЭЛ, $Q_{экс}$ — тепло экзотермической реакции рекомбинации в ТЭ, $I = I_{опт}$ — ток в эквивалентной электрической схеме цикла.

Приравнивая к нулю производную dA/dI

$$dA/dI = 0 =$$

$$= d[I \cdot (E_{ТЭ} - \Delta\varphi_{ЭЛ})t - I^2(r_{ТЭ} + r_{ЭЛ})t]/dI,$$

получаем оптимальную величину тока:

$$I_{опт} = (1/2)(E_{ТЭ} - \Delta\varphi_{ЭЛ})/(r_{ТЭ} + r_{ЭЛ}).$$

Подставляя $I_{опт}$ в выражение для экстремального значения работы цикла, получаем

$$A_{экс} = (1/4)(E_{ТЭ} - \Delta\varphi_{ЭЛ})^2/(r_{ТЭ} + r_{ЭЛ})t.$$

РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КПД

КПД концентрации солнечного излучения. В оптических системах [4], концентрирующих солнечную радиацию в соответствии с «идеальной» моделью Теплякова, параболическое зеркало концентрирует прямое излучение в точку, которая называется фокусом. В методе расчета оптических систем на основе элементарных конических лучистых пучков, разработанного В. И. Чиколевым, учитывается конечный размер источника излучения. В рамках этой модели все солнечное излучение концентрируется не в точке, а в фокальном пятне радиусом $r_{фп}$. Для специальной гелиоустановки СГУ-1 [8] с диаметром параболоида 1.5 м диаметр теоретического изображения Солнца в фокальном пятне равен $d_0 = 2f \cdot \varphi_0 = 5.93$ мм, где $f = 637$ мм — фокальное расстояние параболоида, $\varphi_0 = 4.654 \cdot 10^{-3}$ рад — угловой размер Солнца.

В рамках теоретической модели все излучение отражается от зеркала и попадает в фокальное пятно радиусом $r_{фп}$, а облученность в пределах солнечного изображения можно найти по формуле $E = R_s \cdot E_0 \cdot (\sin U / \varphi_0)^2$, где $E_0 = 1365$ Вт/м² — солнечная постоянная, $U = 60^\circ$ — угол раствора параболоида в СГУ-1, $R_s = 1$ — идеальная отражательная способность. Подставляя эти

значения в формулу, получаем $E = 4.73$ кВт/см²). Теперь энергия солнечного излучения, попадающего в круг солнечного изображения в фокальном пятне, равна $Q_0 = \pi(d_0/2)^2 E = 1.42$ кВт, а радиус фокального пятна, в которое попадает вся энергия ($Q_{\text{СГУ}} = Q_1 = \pi(D/2)^2 E_0 = 2.412$ кВт), собранная зеркалом, равен $r_{\text{фн}} = d_0 / [(1 + \cos U) \cos U] = 7.91$ мм.

Расчет теоретической эффективности нового цикла прямого преобразования теплоты в электроэнергию. Водородно-кислородный ТЭ при нормальных условиях ($t = 25$ °С и 1 атм) генерирует ЭДС $E_{\text{ТЭ}} = 1.23$ В, а при $t = 1000$ °С $\Delta\varphi_{\text{эл}} = 0.8$ В [11]. При этом выделяется количество теплоты $Q_2 = 23.1$ ккал/моль (17 % от химической энергии $\Delta H = -136.5$ ккал/моль), свободная энергия Гиббса $\Delta G = -113.4$ ккал/моль (83 % от ΔH) преобразуется в электроэнергию $W_{\text{ТЭ}}$. Работа A цикла составляет 35 % от $W_{\text{ТЭ}}$

$$A/W_{\text{ТЭ}} = (W_{\text{ТЭ}} - W_{\text{эл}}) / W_{\text{ТЭ}} = (1.23 \text{ В} - 0.8 \text{ В}) / 1.23 \text{ В} = 0.35,$$

или 29 % от химической энергии ΔH ($0.35 \cdot 0.83 = 0.29$), или же энтальпии реакции рекомбинации газов H_2 и O_2 . Таким образом, для КПД цикла: $\eta_{\text{ц}} = A / (A + Q_2) = (0.29) / (0.29 + 0.17) = 0.29 / 0.46 = 0.645$, а в итоге получаем $\eta_{\text{ц}} = 64.5$ % для $t_1 = 1000$ °С ($\Delta\varphi_0 = 0.8$ В) и $t_2 = 25$ °С ($\Delta\varphi_0 = 1.23$ В).

Теоретический КПД энергоустановки «СГУ-1 + тепловой цикл». Проведем расчет КПД СГУ-1 с полостным приемником солнечного излучения. Поскольку $T = 1273$ К, $T_0 \approx 300$ К ($T^4 \gg T_0^4$), то тепловые потери собственным излучением через отверстие гелиоприемника составляют $Q_5 = f_{\text{фн}} \cdot \sigma_0 T^4 = 1.964(\text{см}^2) \cdot 14.9(\text{Вт}/\text{см}^2) = 29.26$ Вт. А КПД солнечной печи, т. е. блока «СГУ-1 — приемник излучения» равен

$$\eta_{\text{СГУ}} = (Q_1 - Q_5) / Q_{\text{СГУ}} = (2412 - 29.26) \cdot 100 \% / 2412 = 98.8 \%$$

Таким образом, теоретическая эффективность преобразования солнечного излучения в электроэнергию равна $\eta = 0.645 \cdot 0.988 = 0.637$, что почти в 2.5 раза превышает теоретические оценки КПД ФЭП ($\eta_{\text{фэл}} = 27$ %).

РЕАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СГУ

Традиционно СГУ включает параболическое зеркало (концентратор) и полостной приемник солнечного излучения, входное отверстие которого расположено в плоскости фокального пятна. Плотность концентрированного солнечного излучения в области фокального пятна описывается нормальным распределением

$$Q(r) = E_{(0)} \exp(-Cr^2).$$

Тепловой поток Q концентрированного солнечного излучения, входящего в отверстие приемника, определяется по формуле $Q(r) = E_{(0)} \cdot \pi [1 - \exp(-Cr^2)] / C$, где $E_{(0)}$ — плотность потока концентрированного излучения в фокусе, C — коэффициент сосредоточенности потока в фокальном пятне, r — радиус входного отверстия. Тепловые потери собственным излучением через отверстие приемника равны $Q_5 = \pi r^2 \sigma_0 T^4$, поскольку в данном случае $T^4 \gg T_0^4$ ($T_0 \approx 300$ К). Тепло, подводимое к электролизеру, равно разности

$$Q_1 = E_{(0)} \cdot \pi [1 - \exp(-Cr^2)] / C - \pi r^2 \sigma_0 T^4.$$

Дифференцируя это выражение по площади отверстия $S = \pi r^2$, находим оптимальное значение $S_{\text{опт}}$ или радиуса отверстия:

$$S_{\text{опт}} = (\pi / C) \cdot \ln [E_{(0)} / (\sigma_0 T^4)],$$

$$(r_{\text{опт}} = \sqrt{S_{\text{опт}} / \pi}),$$

при котором подводимое количество теплоты Q_1 максимально:

$$(Q_1)_{\text{max}} = (\pi / C) \{ E_{(0)} - \sigma_0 T^4 [1 + \ln [E_{(0)} / (\sigma_0 T^4)]] \}.$$

Проведем расчет КПД СГУ-1 [2] с параметрами: диаметр параболического зеркала 1.5 м [7, 8], степень концентрации зеркала $N_s = 32400$, коэффициент сосредоточенности $C = 6.26$ см⁻², температура в полости гелиоприемника $T_1 = 273$ К + $t_1 = 1273$ К, плотность заатмосферного солнечного излучения $E_0 = 1.365$ кВт/м², плотность концентрированного излучения в фокусе СГУ-1 $E_{(0)} = E_0 \cdot N = 4.42$ кВт/см², $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴). Получим площадь отверстия гелиоприемника $S_{\text{опт}} = 2.86$ см² ($r_{\text{опт}} = 9.54$ мм), $(Q_1)_{\text{max}} = 2.168$ кВт, $\eta_{\text{СГУ}} = (Q_1)_{\text{max}} / Q_{\text{СГУ}} = 2.168 / 2.412 = 0.9$.

Итак, КПД преобразования данной КЭУ равен $0.9 \cdot 0.645 = 0.58$, что вдвое выше, чем теоретическая эффективность фотоэлектропреобразования.

Если учесть, что действительную эффективность электрохимического преобразования энергии в топливных элементах оценивают в [5] на уровне $2/3$ от теоретической, то реальная эффективность данного цикла может составить 38.7%. Таким образом, реальная оценка эффективности цикла вдвое выше достигнутой в области фотоэнергетики (18%). А реальная эффективность нового теплового цикла в этом случае (43%) будет на 30% выше, чем КПД цикла Ренкина (33%).

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЦИКЛЕ

Термодинамика электрохимического преобразования энергии. Химическую энергию веществ [9], принимающих участие в реакции рекомбинации топлива и окислителя, а также электролиза продукта их синтеза, можно представить в терминах изобарно-изотермического потенциала (свободной энергии Гиббса):

$$H = G + T \cdot S,$$

где H — теплосодержание.

Изменение химической энергии веществ в процессе окислительно-восстановительных электрохимических реакций ($O_x + ne^- \leftrightarrow Red$) можно записать следующим образом:

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S.$$

Здесь $\Delta G = \Delta \varphi_0 \cdot n \cdot F = A$ — изменение упорядоченной части химической энергии веществ, $\Delta \varphi_0$ — разность равновесных электродных потенциалов, n — число валентных электронов, $F = e \cdot N_A = 96.5$ кКл/моль — число Фарадея, e — заряд электрона, N_A — число Авогадро.

Величина $T \cdot \Delta S$ — изменение неупорядоченной части химической энергии (теплота) — может быть реализована в виде теплового эффекта Q_p электродной реакции. Этот эффект может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от того, какая реакция имеет место: реакция рекомбинации (экзотер-

мическая $Q_{экз}$, с отводом тепла в окружающую среду) или реакция электролиза (эндотермическая $Q_{энд}$, с подводом тепла из окружающей среды).

Возможность получения в процессе реакции рекомбинации на электродах топливного элемента электроэнергии определяется значением свободной энергией Гиббса:

$$-\Delta G = -\Delta H + T \cdot \Delta S.$$

Таким образом, энтальпия реакции ΔH (или теплота сгорания в случае необратимого хода реакции) в общем случае включает две составляющие: свободную энергию ΔG , которая может быть преобразована в электроэнергию, и остаток $T \cdot \Delta S$, реализуемый в виде теплового эффекта электродной реакции $Q_p(T)$.

Трактовка термодинамики электрохимических окислительно-восстановительных реакций. Энтальпия ΔH для реакции рекомбинации $H_2 + 1/2O_2 - \Delta H \rightarrow H_2O$ может быть представлена в виде

$$\Delta H_2 = W_2 + Q_{экз},$$

а для реакции электролиза $H_2O + \Delta H \rightarrow H_2 + 1/2O_2$ — в виде

$$\Delta H_1 = W_1 + Q_{энд}.$$

Зависимость энтальпии и энергии Гиббса от температуры представлена на рис. 2. Видно, что химическая энергия окислительно-восстановительной реакции ΔH очень слабо зависит от температуры в широком диапазоне температур

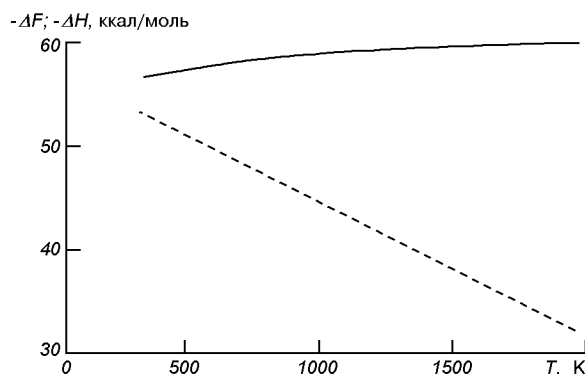


Рис. 2. Энтальпия и свободная энергия Гиббса, выделяемые в результате реакции $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

[11]. При этом свободная энергия Гиббса ΔG с увеличением температуры значительно уменьшается, в первом приближении — линейно:

$$\Delta G(T) = \Delta G_0 + \delta G(T),$$

где $\delta G(T) = (\partial \Delta G / \partial T)_p (T - T_0)$. Для нормальных условий $\Delta G_0 = -56.7$ ккал/моль, $\Delta G = n_e \cdot F \cdot \Delta \varphi_0$, $(\partial \Delta G / \partial T)_p = n_e \cdot F \cdot (\partial \Delta \varphi_0 / \partial T) < 0$. Для реакции рекомбинации $H_2 + O_2$ $(\partial \Delta \varphi_0 / \partial T)_p = -0.312 \cdot 10^{-3}$ В/К.

Тепловой эффект Q_p электродной реакции с увеличением температуры также значительно увеличивается:

$$Q_p(T) = (Q_p)_0 + (\partial Q_p / \partial T)_p (T - T_0) = T_0 \Delta S + [\Delta S + T(\partial \Delta S / \partial T)_p](T - T_0).$$

Расчет вырабатываемой мощности, расхода воды и силы тока в электрической цепи цикла. Рабочее тело в цикле (вода) выступает и в форме двух фаз (жидкости и пара), и в виде двух компонентов (топлива H_2 и окислителя O_2).

Согласно объединенному закону Фарадея для выделения 1 грамм-моля (18 г) воды на электроде необходимо 28.6 А·ч, откуда расходу воды $(dm/dt)_{рт} = 1$ г/ч соответствует ток 1.6 А. Мощность, выделяемая на внешней нагрузке, равна $P_R = I \cdot \Delta U = 1.6 \text{ А} \cdot 0.43 \text{ В} \approx 0.7 \text{ Вт}$ (для 1 кг/ч $P_R = 0.7$ кВт).

ВЫВОДЫ

Предложен новый способ преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию, альтернативный фотопреобразованию. На этот способ и энергоустановку для его реализации уже получены положительные решения Укрпатента. Новый способ энергопреобразования включает две фазы: концентрацию солнечного излучения параболаидными зеркалами с получением высокопотенциального тепла в гелиоприемнике и последующее преобразование теплоты в электроэнергию в рамках теплового цикла «высокотемпературное электролитическое разложение водяного пара H_2O на компоненты (H_2 и O_2) + электрохимическая генерация путем реакции рекомбинации полученных газов в низкотемпературном топливном элементе».

Реальная эффективность предлагаемого способа преобразования прямого солнечного излучения в электроэнергию практически вдвое превосходит эффективность преобразования в фотоэлектрических батареях, деградация которых оценивается до 40 % в год в условиях космического УФ-облучения [10]. Кроме того, необходимо отметить и хорошие энергетические характеристики предлагаемой установки, что очень важно для условий космоса.

Предельная эффективность $\eta_{\text{н}} = 64.5$ % прямого преобразования теплоты в электроэнергию при $t_1 = 1000$ °С и $t_2 = 25$ °С почти вдвое больше, чем эффективность цикла Ренкина в ТЭС (33 %), а оценка реальной эффективности 38.7 % превышает эффективность цикла Ренкина на 40 %. Столь высокая эффективность нового цикла объясняется очень высокой степенью обратимости процессов преобразования энергии как в топливном элементе, так и в электролизере, так как и подвод тепла к циклу, и отвод происходит почти изотермически (в этом случае КПД цикла близок к КПД цикла Карно). Ведь в цикле очень малы необратимые потери на джоулево тепловыделение, причем джоулево тепло, выделяемое в электролизере, используется затем полезно, так как добавляется к теплу Q_1 , подводимому к циклу при максимальной температуре T_1 .

Вода в данном случае выступает в качестве рабочего тела, циркулирующего в цикле, причем не только в виде двух ее фаз, — жидкости и пара, — но и в форме двух ее компонентов — водорода и кислорода. Кроме того, параллельно потокам рабочего тела и его компонентов по замкнутому контуру ТЭ—ЭЛ—R—ТЭ течет электрический ток, причем во внешних участках цепи ТЭ и ЭЛ — это поток электронов, а во внутренних участках цепи ТЭ и ЭЛ — это поток ионов. В данном случае тепло в цикле переносится только рабочим телом и его компонентами за счет собственной теплоемкости (это тепло в основном регенерируется в противоточном теплообменнике), а свободная энергия Гиббса переносится потоком электронов и ионов с реализацией полезной работы цикла A на внешней нагрузке R .

Высокотемпературный электролиз перегретого пара H_2O возможен до температур 1500—2000 °С, выше которых начинается процесс тер-

мической диссоциации водяного пара на молекулярный водород H_2 и кислород O_2 , поэтому эффективность данного цикла может быть значительно увеличена при условии разработки новых типов твердых электролитов, способных работать при более высоких температурах (вплоть до $1500^\circ C$).

Диоксид углерода CO_2 в качестве рабочего тела аналогичного цикла также перспективен для КЭУ, поскольку нижняя температурная граница рабочего диапазона цикла с CO_2 значительно ниже, чем у воды, температурный диапазон которой снизу ограничен температурой тройной точки $273.15 K$.

1. Вопросы космической энергетики / Сб. пер. под ред. А. А. Куландина, С. В. Тимашева. — М.: Мир, 1971.
2. Дверняков В. С., Пасичный В. В. Определение параметров специальной гелиоустановки (СГУ), предназначенной для исследования тугоплавких металлов // Доповіді АН УРСР.—1966.—№ 6.—С. 762—766.
3. Демин А. К., Кузин Б. Л., Липинин А. С. Экспериментальное исследование теплового режима высокотемпературного электролизера для разложения воды // Электрохимия.—1987.—23, вып. 9.—С. 1258—1260.
4. Захидов Р. А., Умаров Г. Я., Вайнер А. А. Теория и расчет гелио-технических концентрирующих систем. — Ташкент: ФАН, 1977.—144 с.
5. Кокорев Л. С., Харитонов В. В. Прямое преобразование энергии и термоядерные энергетические установки. — М.: Атомиздат, 1980.—216 с.
6. Легасов В. На пути к водороду. — М.: Знание, 1985.—Сер. Техника.—№ 10.—С. 42—57.

7. Луданов К. И. Калориметрирование солнечных печей // Тр. 3-й Междунар. конф. «МЕЕ-2004». — Кацевели, 2004.—С. 553—554.
8. Пат. Украины № 65770 А. Способ калориметрирования оптических печей / К. И. Луданов. — Заявл. 16.05.2003, Бюл. № 4.
9. Химическая энциклопедия. — М.: БРЭ, 1988—1998.— 5 т.
10. Худяков С. А. Космические энергоустановки. — М.: Знание, 1984.—Сер. Космонавтика, астрономия.— № 7.—64 с.
11. Чанг Ш. Преобразование энергии. — М.: Атомиздат, 1965.—312 с.

NEW METHOD FOR THE TRANSFORMATION OF SOLAR RADIATION ENERGY INTO ELECTRIC POWER FOR ENERGY FEEDING OF THE SPACE VEHICLES

K. I. Ludanov

We propose a new method for the transformation of solar radiation energy into electric power, which is alternative for photo-transformation. Ukrpatent's positive decisions are obtained for the method and for the installation for its realization. Our method for energy transformation includes two phases: concentration of solar radiation by paraboloid mirrors with high potential heat obtaining in the helio receiver and the next heat transformation into electric power in the framework of the thermal cycle "high temperature electrolytic steam decomposition on the components (H_2 and O_2) + electrochemical generation by the way of the water recombination from H_2 and O_2 in the low temperature fuel cell". The new method gives the double superiority in comparison with the photo-transformation.