

УДК 621.362

К. И. Луданов

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

МОДИФИКАЦИЯ ПРОЕКТА ГЛЕЗЕРА. НОВЫЙ ТЕПЛОВОЙ ЦИКЛ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Пропонується новий варіант орбітальної сонячної електростанції по «проекту Глезера» з використанням у блоці «концентратор — тепловий цикл» електрохімічного способу прямого перетворення теплоти в електроенергію. Оцінки теоретичної ефективності нового циклу складають 60 % для $t_1 = 850^\circ\text{C}$ та 70 % для $t_1 = 1500^\circ\text{C}$ при тиску робочого тіла 1 атм. Розраховано ефективність нової модифікації електрохімічного циклу при $t_1 = 1000^\circ\text{C}$ та з електролізом пари при зниженому тиску (0.1 атм) і електрохімічній генерації при підвищеному тиску (10 атм). Показано, що ККД електрохімічного циклу прямого перетворення тепла в електроенергію в даному разі (76.35 %) наближається до граничного ККД циклу Карно ($\eta_k = 77\%$ при $t_1 = 1000^\circ\text{C}$). Таким чином, цей принципово новий спосіб енергоперетворення більш ефективний, ніж цикли Брайтона, Стірлінга та Ренкіна і конкурентоздатний фотоперетворенню щодо використання в рамках орбітальної сонячної електростанції по проекту Глезера.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня человечество уже осознало [6], что неконтролируемые выбросы углекислого газа в атмосферу Земли приведут к необратимому изменению климата, опасному для самого его существования. Повышение концентрации CO_2 в атмосфере ведет к возникновению так называемого «парникового эффекта», блокирующего поток собственного теплового излучения поверхности Земли в космос и тем самым повышающего ее температуру. Углекислый газ образуется в основном за счет сжигания энергоносителей: угля, продуктов перегонки нефти и природного газа. Самым опасным является сжигание угля, поскольку в этом случае имеет место максимальное производство CO_2 на единицу выделяемого тепла. Если процесс «потепления» климата не удастся затормозить, то он принесет катастрофические последствия для человечества. В этой связи особенно актуальным является переход на новые источники энергии, в частности на атомную энергию. Однако АЭС имеет невысокий КПД, что приводит к повышенному тепловому «загрязнению» окружающей среды за счет «отработанной теплоты» цикла Q_2 . Многообещающими в плане минимального теплового

«загрязнения» являются высокотемпературные ядерные реакторы с газовым охлаждением ТВЭЛов и термоядерные реакторы с отводом тепла от blankets — на уровне 1000°C . Но это пока перспектива. В то же время в мире уже много лет развивается солнечная энергетика, преобразующая концентрированное солнечное излучение в рамках тепловых циклов в электроэнергию. Например, в США фирма AUSTRALIA построит в ближайшие семь лет целый ряд солнечных электростанций (СЭС) общей мощностью 2 ГВт. Солнечная энергетика исключает выбросы CO_2 в атмосферу и не загрязняет окружающей среды отработанным теплом. Однако зеркала СЭС занимают очень большую территорию, поскольку прямое солнечное излучение имеет низкую плотность: максимальная плотность ($AM1$) в полдень не превышает 0.9 кВт/м^2 , а средняя за день — вдвое ниже заатмосферной (для $AM0$ $E_s = 1.36\text{ кВт/м}^2$). Поэтому сразу же после первых полетов в космос возникла идея (ее автор — инженер Н. А. Варваров, 1960 г.) энергоснабжения Земли из космоса с использованием орбитальных солнечных электростанций (ОСЭС) и передачей электроэнергии на земную поверхность по «радиолучу» [1].

В 1968 г. П. Э. Глезер предложил [10], а в 1973 г. запатентовал [12] конструкцию ОСЭС с фото-

электрическим преобразованием солнечного излучения, которая должна быть расположена на геостационарной орбите (ГСО) Земли с радиусом 36 тыс. км. По оценкам П. Глезера при одинаковой мощности площадь фотобатарей на ГСО будет на порядок меньше, чем на поверхности Земли [2]. На этой орбите спутник Земли постоянно находится над определенной точкой земной поверхности, что позволяет транспортировать электроэнергию от фотоэлектростанции (ФЭС) через передающую СВЧ-антенну диаметром 1 км на определенную точку поверхности Земли, где установлена приемная ректенна диаметром 10–15 км. ФЭС представляет собой два прямоугольника 5×6 км, между которыми расположен преобразователь электроэнергии в высокочастотное излучение 2.45 ГГц («окно прозрачности» атмосферы). Эффективность преобразования постоянного тока в СВЧ-излучение составляет 90 %, а эффективность передачи электроэнергии с шин ФЭС на выходные шины на Земле — около 70 %. В этом проекте Глезер предполагал использовать кремниевые фотоэлементы (ФЭП) толщиной 50 мкм и плоские пленочные отражатели, обеспечивающие двукратную концентрацию солнечного излучения на их поверхности. Коэффициент полезного действия ФЭП в этих условиях планировался на уровне 13.7 %. Такие параметры ОСЭС с ФЭП должны обеспечить проектную мощность 5 ГВт с выходных шин обратного преобразователя ректенны на земной поверхности.

Снижение КПД ФЭП за счет их деградации в космических условиях предполагалось Глезером около 7 % за 30 лет эксплуатации, однако на нынешнем уровне технологии деградация ФЭП за 30 лет достигнет 40 % [9]. Поэтому специалисты фирмы «Боинг» (США) уже в 1973 г. предложили альтернативу для ФЭС — ОСЭС в виде комплекса из 40 модулей, каждый из них включает концентратор солнечного излучения с получением высокопотенциального тепла и его преобразованием в газовом цикле Брайтона [13]. Расчетная эффективность этой схемы с максимальной температурой в гелиоприемнике 2000 °С составила около 30 %, что вдвое выше эффективности ФЭС. Этой же фирмой был предложен

другой вариант преобразования высокопотенциального тепла от солнечных концентраторов: паротурбинный цикл Ренкина с металлическим теплоносителем — калием [11]. Общая эффективность орбитального энергетического комплекса «ОСЭС — антенна/ректенна» составил в этом случае 11 %.

За 40 лет после первого сообщения Глезера опубликовано достаточно много новых проектов ОСЭС [3]. Их анализ показывает, что наиболее «слабым звеном» в цепи энергопреобразования ОСЭС от заатмосферного солнечного излучения до выходных шин ректенны является преобразователь солнечного излучения в электроэнергию, и в частности — недостаточно высокий КПД теплового цикла.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ литературных источников [1–3, 9–13] по проблеме орбитальных солнечных электростанций показал, что ОСЭС с тепловыми циклами Брайтона и Ренкина, а также двигатель с циклом Стирлинга (т. е. все варианты ОСЭС с концентраторами и тепловым циклом) отличаются завышенными массовыми характеристиками, и по этому показателю они уступают ОСЭС с ФЭП. В то же время эффективность фазы преобразования прямого солнечного излучения в высокопотенциальное тепло, как было показано в [10] на примере анализа эффективности концентраторов прожекторного класса, достаточно высокая (90 %). А вот теплоэнергопреобразователи СКЭС на основе тепловых циклов (Брайтона, Стирлинга и Ренкина) имеют серьезные недостатки:

- в качестве обязательного элемента они включают агрегат преобразования механической энергии в электрическую, который значительно утяжеляет конструкцию СКЭС и ухудшает ее энергетические характеристики;
- большие нескомпенсированные крутящие моменты элементов вращения этих преобразователей резко ухудшают технические возможности точного наведения концентратора «на Солнце»;
- вибрации оборудования СКЭС, возможность утечки рабочего тела цикла через уплотнения валов газовых и паровых турбин и т. д.

В этой связи в проблеме СКЭС весьма актуальным является вопрос создания нового высокоэффективного теплового цикла именно с прямым преобразованием энергии, который вообще исключил бы очень тяжелый преобразователь механической энергии в электрическую.

4 августа 2006 г. в Укрпатенте зарегистрирована заявка на «Способ прямого преобразования теплоты в электроэнергию» UA а 2006 08722. По этой заявке на электрохимический цикл преобразования энергии в настоящее время оформляется международная заявка PCT/UA 2007/000013, ее реферат уже опубликован 07.02.2008 г. в бюллетене WIPO (Женева, Швейцария), № WO/2008/016338.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Новый способ прямого преобразования энергии.

Новый способ прямого преобразования энергии в электрохимическом цикле [5] реализуется в блоке «высокотемпературный электролизер (ЭЛ) — низкотемпературный топливный элемент (ТЭ)». Тепло Q_1 от источника высокопотенциального источника (источка) при T_1 подводится к электролизеру перегретого водяного пара, где тот разлагается при подводе электроэнергии W_1 на газы H_2 и O_2 . На пути от ЭЛ к ТЭ эти газы охлаждаются, нагревая встречный поток пара, движущийся от ТЭ к ЭЛ, в регенеративном теплообменнике. В ТЭ проводится ЭХГ путем реакции рекомбинации газов H_2 и O_2 , вырабатывается электрическая энергия W_2 и выделяется отработанное тепло цикла Q_2 , которое отводится в «тепловой сток» при T_2 .

Топливный элемент — это устройство, вырабатывающее электроэнергию за счет энергии электрохимических окислительно-восстановительных реакций реагентов, непрерывно поступающих к электродам извне. Таким образом, он является химическим источником тока непрерывного действия. На электродах ТЭ протекают токообразующие электрохимические реакции: на отрицательном с участием окислителя (чаще всего O_2). При этом на отрицательном электроде ТЭ водород окисляется в результате электрохимической генерации ($H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$), а на положительном электроде — восста-

навливается кислород ($\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$). Равновесная разность потенциалов кислородно-водородной цепи при нормальных условиях ($25^\circ C$ и 1 атм) равна $\Delta\phi_0 = 1.23$ В.

Электролизер — это устройство, в котором происходит обратный процесс, т. е. на электроды ЭЛ подводится электрический ток и подается водяной пар, который разлагается на молекулярный водород и кислород с поглощением тепла электродной реакции. Равновесная разность потенциалов для электролиза водяного пара при давлении 1 атм и температуре $1000^\circ C$ (он уже реализован при этих условиях [4]), составляет 0.8 В. Преобразование химической энергии в ТЭ и обратный процесс в ЭЛ основаны на использовании поверхностных физических эффектов на границе металлический электрод — электролит [7].

Наличие скачка электропотенциала ϕ_0 на границе электрода и электролита объясняется возникновением на межфазной поверхности металл-электролит так называемого «двойного электрического слоя» (д.э.с.). Он образован со стороны электрода свободными электронами металла, а со стороны электролита — положительными концами ионов диссоциированных молекул электролита, поэтому имеет очень высокую электрическую емкость: от 0.1 до 0.4 Ф/м². Между двумя металлическими электродами, разделенными электролитом, возникает равновесная разность потенциалов $\Delta\phi_0 = \phi_A - \phi_K$, которая вызывает появление в электролите ионного тока и возникновение электронного тока через сопротивление внешней нагрузки.

2. Термодинамика преобразования энергии в новом цикле. Из 1-го закона термодинамики для обратимого замкнутого цикла:

$$\oint \partial Q = \Sigma \Delta Q = Q_1 - Q_{12} - Q_2 + Q_{21} = A,$$

где Q_{12} — теплота, отводимая от продуктов высокотемпературного электролиза (H_2 и O_2) на их пути в трубах от ЭЛ к ТЭ, Q_{21} — теплота, подводимая к продукту реакции рекомбинации в ТЭ (H_2O) на его пути от ТЭ к ЭЛ, A — работа цикла. При условии полной регенерации теплоты рабочего тела и его компонентов в цикле т. е. при $Q_{12} = Q_{21}$, работа цикла равна $A = Q_1 - Q_2$, где

$Q_1 = Q_{\text{end}}(T_1)$, $Q_2 = Q_{\text{ekz}}(T_2)$. В электрохимическом цикле работа A находится из энергобаланса: $Q_1 + W_1(\text{ЭЛ}) = Q_2 + W_2(\text{ТЭ})$ в виде $A = \Delta W = W_2 - W_1$.

Для необратимого цикла скорректированное выражение КПД имеет вид

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

где Q_{end} — тепло эндотермической электродной реакции в ЭЛ, $q_{\text{ЭЛ}}$ — джоулево тепло, выделяющееся во внутренней цепи ЭЛ, Q_{ekz} — тепло экзотермической электродной реакции рекомбинации, $q_{\text{ТЭ}}$ — джоулево тепло, выделяющееся во внутренней цепи ТЭ, I — ток в электрическом контуре цикла.

Из 2-го закона термодинамики для обратимого замкнутого цикла имеем

$$\oint dS = \sum \Delta S = \frac{Q_1}{T_1} - \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} - \frac{Q_2}{T_2} + \int_2^1 \frac{\partial Q}{T} = 0,$$

где S — энтропия составляющих теплового баланса. При полной регенерации $\int_1^2 \frac{\partial Q}{T} = \int_2^1 \frac{\partial Q}{T}$,

и из равенства $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$ для обратимого преобразования следует $\eta_{\text{ц}} = 1 - Q_2/Q_1 = 1 - T_2/T_1 = \eta_{\text{к}}$.

Для необратимого замкнутого цикла даже с регенерацией тепла

$$\oint dS = \sum \Delta S = \frac{Q_1}{T_1} - \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} - \frac{Q_2}{T_2} + \int_2^1 \frac{\partial Q}{T} > 0.$$

Поскольку

$$\int_1^2 \frac{\partial Q}{T} = \frac{Q_{12}}{T_{12}}, \quad \int_2^1 \frac{\partial Q}{T} = \frac{Q_{21}}{T_{21}},$$

где $Q_{12} = Q_{21} = kF(\bar{T}_{12} - \bar{T}_{21})$, и $\bar{T}_{12} > \bar{T}_{21}$. Отсюда

$$\Delta S_{12} = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} < \int_2^1 \frac{\partial Q}{T} = \Delta S_{21},$$

и далее $\frac{Q_1}{T_1} < \frac{Q_2}{T_2}$, откуда окончательно имеем:

$$\eta_{\text{ц}} = 1 - Q_2/Q_1 < 1 - T_2/T_1 = \eta_{\text{к}}.$$

Если $\partial Q_{12} = \bar{C}_{12} dT$ и $\partial Q_{21} = \bar{C}_{21} dT$, то

$$\Delta S_{12} = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} = \bar{C}_{12} \ln[(T_2 + \Delta t_2)/T_1]^{-1},$$

$$\Delta S_{21} = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T} = \bar{C}_{21} \ln[(T_1 - \Delta t_1)/T_2]^{-1}.$$

Здесь Δt_1 и Δt_2 — недогрев пара перед ЭЛ и перегрев газов перед ТЭ соответственно.

Из законов гидравлики следует, что для замкнутого гидравлического контура в цикле $\oint dp = 0$, где p — давление рабочего тела и его компонентов. Из условия $\oint dp = 0$ следует $H = \sum \Delta p$, где H — напор, развиваемый циркуляционным насосом, в случае [5] напор H создается столбом жидкости: $H = \rho_f g h$, $\sum \Delta p$ — потери напора на вязкое трение в трубах циркуляционного контура.

3. Электрофизика преобразования энергии в новом цикле. Из 2-го правила Кирхгофа для замкнутого электрического контура имеем:

$$\oint dU = \sum E_j,$$

где падение напряжения

$$\oint dU = \sum \Delta U_j = I \cdot \sum R_j,$$

а $\sum E_j$ — алгебраическая сумма э.д.с., включенных в контур, в нашем случае

$$\sum E_j = \Delta \phi_{0\text{ТЭ}} - \Delta \phi_{0\text{ЭЛ}}.$$

Член $I \cdot \sum R_j$ — сумма падений напряжения на участках цепи: падение напряжения U_R на внешней нагрузке R плюс падение напряжения ΔU_j , которое вызвано джоулевыми потерями на участках цепи контура, как на внешних (электронный ток в проводниках), так и на внутренних (ионный ток в электролите).

В идеальном случае (без потерь на электродах и в электролите) э.д.с. ТЭ и ЭЛ равны $E_{\text{ТЭ}} \equiv \Delta \phi_{0\text{ТЭ}}$ и $E_{\text{ЭЛ}} \equiv \Delta \phi_{0\text{ЭЛ}}$, а напряжение на внешней нагрузке в этом случае составит

$$U_R = \sum (\Delta \phi_0)_i = \Delta \phi_{0\text{ТЭ}} - \Delta \phi_{0\text{ЭЛ}} = [\Delta G(T_2) - \Delta G(T_1)]/(nF).$$

Равновесная разность потенциалов $\Delta \phi_0 = \phi_A - \phi_K$ возникающая в нормальных условиях между двумя электродами («катодом» и «анодом»), представляет собой чисто термодинамическую характеристику электрохимической системы, и практически на электродах не реализуется. Реально в электрохимических системах имеют де-

ло не с $\Delta\varphi_0$, а с так называемым напряжением разомкнутой цепи $U_{\text{нрц}}$, которое отличается от равновесной разности потенциалов $\Delta\varphi_0$ на величину «перенапряжения» $\delta\varphi = \delta\varphi_A + \delta\varphi_K$ (на катоде $\delta\varphi_K$ и на аноде $\delta\varphi_A$), вызванного необходимостью активации двойных электрических слоев электродов. Таким образом, $U_{\text{нрц}} = \Delta\varphi_0 \pm \delta\varphi = \Delta\varphi_0 \pm (\delta\varphi_A + \delta\varphi_K)$, где знак «минус» относится к ТЭ, а знак «плюс» — к ЭЛ (по оценкам [8] для ТЭ с водными электролитами при н. у. $\delta\varphi = 0.13$ В и $U_{\text{нрц}} = 1.1$ В).

Таким образом, в случае необратимого цикла номинальный ток в замкнутом контуре равен $I = [(U_{\text{ТЭ}})_{\text{нрц}} - (U_{\text{ЭЛ}})_{\text{нрц}}] / (r_{\text{ТЭ}} + R + r_{\text{ЭЛ}})$.

В низкотемпературных топливных элементах, которые работают при повышенном давлении и температуре ниже 80 °С, в настоящее время перспективны PEM-электролиты на основе протонообменных полимерных мембран.

В высокотемпературных электролизерах (при 1000 °С) обычно используются твердые электролиты (например $0.91\text{ZrO}_2 \cdot 0.09\text{Sc}_2\text{O}_3$ с подвижным ионом O^{2-}), в которых электропроводность осуществляется движением ионов какого-либо одного знака — катионами или анионами [8].

4. Расчет КПД преобразования энергии в цикле $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$. Водородно-кислородный ТЭ при нормальных условиях (25 °С и 1 атм) генерирует ЭДС $E_{\text{ТЭ}} = \Delta\varphi_0 = 1.23$ В. При этом выделяется тепловой эффект электродной реакции $Q_{\text{екз}}(T_0) = 23.1$ ккал/моль (17 % от ΔH), а свободная энергия Гиббса ($\Delta G = -113.4$ ккал/моль) преобразуется в электроэнергию $W_{\text{ТЭ}} = I \cdot U_R$ (она составляет в нормальных условиях 83 % от ΔH) [8].

Работа цикла A для $t_1 = 850$ °С ($\Delta\varphi = 0.85$ В [7]) составляет 30.9 % от $W_{\text{ТЭ}}$ ($A/W_{\text{ТЭ}} = (W_{\text{ТЭ}} - W_{\text{ЭЛ}}) / W_{\text{ТЭ}} = (1.23 - 0.85) / 1.23$ В = $0.38/1.23 = 0.309$), или 25.65 % от химической энергии $\Delta H = 136.5$ ккал/моль ($0.309 \cdot 0.83 = 0.2565$), т.е. энтальпии реакции рекомбинации газов H_2 и O_2 . Таким образом, КПД цикла равен $\eta_{\text{ц}} = A / (A + Q_2) = 0.2565 / (0.2565 + 0.17) = 0.2565 / 0.4265 = 0.60$. В итоге получаем $\eta_{\text{ц}} = 60$ % для $t_1 = 850$ °С ($\Delta\varphi_{0\text{ЭЛ}} = 0.85$ В) и $t_2 = 25$ °С ($\Delta\varphi_{0\text{ТЭ}} = 1.23$ В).

Если принять, что $\Delta\varphi_0$ с повышением температуры электролиза уменьшается линейно, то с

учетом, что $\Delta\varphi = 0.85$ В при $t = 850$ °С и $\Delta\varphi = 0.8$ В при $t = 1000$ °С, для $t = 1500$ °С имеем $\Delta\varphi_{0\text{ЭЛ}} = 0.633$ В.

Работа цикла A для $t_1 = 1500$ °С ($\Delta\varphi_{0\text{ЭЛ}} = 0.633$ В) равна 48.6 % от $W_{\text{ТЭ}}$ ($A/W_{\text{ТЭ}} = (W_{\text{ТЭ}} - W_{\text{ЭЛ}}) / W_{\text{ТЭ}} = (1.23 - 0.633) / 1.23$ В = $0.597/1.23 = 0.486$), или 40.34 % от химической энергии $\Delta H = 136.5$ ккал/моль ($0.486 \cdot 0.83 = 0.4034$), т.е. энтальпии реакции рекомбинации газов H_2 и O_2 . Таким образом, для КПД цикла имеем: $\eta_{\text{ц}} = A / (A + Q_2) = 0.4034 / (0.4034 + 0.17) = 0.4034 / 0.5734 = 0.70$, а в итоге получаем, что $\eta_{\text{ц}} = 70$ % для $t_1 = 1500$ °С ($\Delta\varphi_{0\text{ЭЛ}} = 0.633$ В) и $t_2 = 25$ °С ($\Delta\varphi_{0\text{ТЭ}} = 1.23$ В).

В результате анализа получаем, что повышение максимальной температуры электролиза от 1000 °С до 1500 °С не очень значительно влияет на повышение КПД преобразования энергии в электрохимическом цикле (повышение от 64.5 до 70 %).

Автором работы 17 апреля 2007 г. заявлен в Укрпатенте (№ UA a2007 04256) иной способ повышения эффективности преобразования энергии в электрохимическом цикле: это, с одной стороны, снижение давления высокотемпературного электролиза пара, а с другой — повышение давления $p_{\text{ТЭ}}$ процесса ЭХГ в топливном элементе. Увеличение располагаемой энергии Гиббса за счет повышения давления ЭХГ и ее уменьшение за счет понижения давления электролиза $p_{\text{ЭЛ}}$ определяется по формуле Нернста [7, 8]:

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

где

$$\delta G(p) = RT \cdot \ln\{[(P_{\text{H}_2})^2 \cdot P_{\text{O}_2}] / (P_{\text{H}_2\text{O}})^2\}.$$

Расчет повышения эффективности нового цикла по формуле Нернста. В случае $P_{\text{H}_2} = P_{\text{O}_2} = P_{\text{H}_2\text{O}} = p_i/p_0$ имеем

$$\begin{aligned} \delta G(p) &= RT \cdot \ln\{[(P_{\text{H}_2})^2 \cdot P_{\text{O}_2}] / (P_{\text{H}_2\text{O}})^2\} = \\ &= RT \cdot \ln(p/p_0), \end{aligned}$$

где $R = 1.98$ ккал/(К·моль) — универсальная газовая постоянная. Теперь для ТЭ при условии $p = 10$ атм, $p_0 = 1$ атм и $T_0 = 298$ К получаем $\delta G(p) = RT_0 \cdot \ln(p/p_0) = 1.36$ (ккал/моль), а для ЭЛ при $p = 0.1$ атм, $p_0 = 1$ атм и $T \cong 1300$ К получаем $\delta G(p) = RT \cdot \ln(p/p_0) = -5.92$ ккал/моль.

В таком случае прирост располагаемой энергии Гиббса $\Sigma\delta G(p) = 7.28$ ккал/моль, а соответст-

вующее увеличение напряжения на внешней нагрузке R равно 0.079 В, что по отношению к напряжению на R внешней нагрузке 0.43 В (1.23 В – 0.8 В) составляет 18.4 %.

Расчетный термический КПД цикла в этом случае ($64.5 \cdot 1.184 = 76.35\%$) всего на 0.65 % ниже теоретического значения КПД Карно: $\eta_k = 1 - 300/1300 = 1000/1300 = 0.77$ (77 %). Разумеется, КПД 76.35 % не учитывает расход энергии на собственные нужды и необратимые потери в цикле, как механические в детандере, компрессоре, насосе), так и электрические (на активацию электродов и джоулево тепловыделение в электролитах ТЭ и ЭЛ).

ВЫВОДЫ

Минимальным КПД в ОСЭС по проекту Глезера характеризуется процесс преобразования солнечного излучения в электроэнергию, однако хотя ОСЭС с циклами Брайтона, Стирлинга и Ренкина вдвое эффективнее ОСЭС на базе кремниевых ФЭП (~15 %), энергоустановки с тепловыми циклами намного тяжелее ФЭС. Таким образом, именно преобразователь солнечного излучения в электроэнергию — это самое «слабое звено» ОСЭС, а поэтому высокоэффективный электрохимический цикл с легким и компактным преобразователем в блоке с солнечным концентратором позволит создать конструкцию, конкурентоспособную ОСЭС на базе ФЭП.

Повышение давления процесса электрохимической генерации (ЭХГ) в низкотемпературном топливном элементе и снижение давления процесса разложения пара в высокотемпературном электролизере позволяет повысить эффективность электрохимического способа преобразования энергии почти до эффективности цикла Карно, например для $t_1 = 1000$ °С и $t_2 = 300$ К теоретический КПД цикла $\eta_{\text{ц}}$ с $p_1 = 0.1$ атм и $p_2 = 10$ атм составляет 76.35 %, что лишь на 0.65 % ниже предельной эффективности термодинамического цикла Карно η_k (77 %).

1. Варваров Н. А. Космические гелиостанции // Техника молодежи. — 1960. — № 1.
2. Глезер П. Использование солнечной энергии в больших масштабах // Гелиотехника. — 1971. — № 1. — С. 37–41.
3. Грилихес В. А. Солнечные космические энергостанции. — Л.: Наука, 1986. — 182 с.

4. 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.
5. Луданов К. И. Новый способ преобразования энергии солнечного излучения в электричество для энергообеспечения космических станций // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 6. — С. 31–38.
6. Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рэндерс И., Бергенс В. В. ПРЕДЕЛЫ РОСТА. Доклад по проекту римского клуба «Сложное положение человечества». — 2-е изд. — М.: Изд-во МГУ, 1991. — 203 с.
7. Топливные элементы: Пер. с англ. / Под ред. Янга. — М.: Иностран. лит-ра, 1963. — 167 с.
8. Химическая энциклопедия: В 5 т. — М.: БРЭ, 1988 — 1998. — Т. 1–5.
9. Худяков С. А. Космические энергоустановки. — М.: Знание, 1984. — 64 с. — (Сер. Космонавтика, астрономия; № 7).
10. Glaser P. E. Power from the Sun: its future // Science.— 1968. — 168. — P. 857–886.
11. Oman H. L., Gregory D. L. Solar power satellite — heat engines or solar cells? // AIAA Pap. — 1978. — N 78-1684. — 12 p.
12. Pat. 3781647 USA. Method and apparatus for converting solar radiation to electrical power / P. E. Glaser. — Publ. 23.12.73.
13. Patha I. T., Woodcock G. R. Feasibility of largescale orbital solar thermal power generation // Proc. 8th IECEC. N. Y.: AIAA, 1973. — P. 312–319.

Надійшла до редакції 05.05.08

K. I. Ludanov

MODIFICATION OF GLASER PROJECT. NEW THERMAL CYCLE FOR ORBITAL SOLAR ELECTRIC POWER STATION

We propose a new version of orbital solar electric power station with the use of the electrochemical method for the direct heat conversion into electric power in the «concentrator — thermal cycle» block. The calculations of the theoretical efficiency for new cycle at $t_1 = 850$ °С (60 %) and 1500 °С (70 %) under the working medium pressure about 1 atm are presented. We performed the calculation of the efficiency of the new electrochemical cycle modification at $t_1 = 1000$ °С with the steam electrolysis under reduced pressure (0.1 atm) and electrochemical generation under increased pressure (10 atm). It is shown that efficiency of the electrochemical cycle of the direct heat conversion into electric power (76.35 %) is close to the boundary efficiency of the Carno cycle (77 % for 1000 °С). Thus, this radically new method for the energy conversion is more efficiency that the Braiton, Stirling and Renkin cycles and is competitively able to photo conversion in the case of its use in the framework of orbital solar electric power station by the Glaser project.