

THE SOLAR ELECTRIC POWER STATIONS

L. M. DRABKIN

Land-based solar power stations have low efficiency. An alternative solution could be the placing of a solar power station in geocentric orbit with the plane of equator. Coinciding data on modern machine and non-machine methods of solar energy transformation into electrical current as it applies to their use on solar cosmic power stations of large outputs are analyzed in this article.

Наземные солнечные электростанции имеют низкую эффективность. Альтернативным решением могло бы стать размещение солнечной электростанции на геоцентрической орбите, совпадающей с плоскостью экватора. В статье рассмотрены современные машинные и безмашинные методы преобразования солнечной энергии в электричество применительно к использованию их на солнечных космических электростанциях большой мощности.

© Драбкин Л.М., 1999

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Л. М. ДРАБКИН

Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Солнечное излучение — экологически чистый и возобновляемый источник энергии. Запасы солнечной энергии огромны, годовое количество поступающей на Землю энергии составляет $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт · ч, из них $2 \cdot 10^{17}$ кВт · ч приходится на поверхность суши. Из этого количества энергии $1,62 \cdot 10^{16}$ кВт · ч в год могут быть использованы без ущерба для окружающей среды, что эквивалентно сжиганию $2 \cdot 10^{12}$ т условного топлива (т у.т.) в год. Последняя цифра в 60 раз превышает прогнозируемое на 2020 год производство всех видов энергоресурсов на земном шаге (34,2 млрд т у.т.) [1].

Однако использование этой энергии для производства электричества в крупных размерах сопряжено с большими трудностями, главные из которых — низкая плотность солнечной радиации на поверхности земли и прерывистый характер ее поступления (ночное время суток, облачность, пасмурные дни). Известные пути преодоления этих препятствий — создание аккумуляторов энергии и комбинированных солнечно-топливных или солнечно-атомных энергосистем, а также применение концентрирующих солнечную энергию устройств, повышающих ее плотность. К сожалению, эти решения не нашли широкого применения особенно в странах, расположенных в высоких широтах, из-за неконкурентоспособности с традиционными электростанциями.

Совершенно иных результатов можно было бы достичь отказавшись от наземных солнечных электростанций и размещая их на геосинхронной орбите.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Идея солнечной космической электростанции (СКЭС) впервые была сформулирована в США П.Е. Глезером (P.E. Glaser) в 1968 году [2]. Предлагалось разместить на геосинхронной орбите солнечные батареи большой мощности, снабженные преобразователями постоянного тока в сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное излучение. Выбор геосинхронной орбиты (порядка 36 000 км) в качестве места базирования СКЭС обеспечивает зависание станции над определенным пунктом на земной поверхности, а использование направленного пучка электромагнитного излучения позволяет передать энергию со станции на Землю, где она может быть преобразована в электрический ток промышленной частоты. Плоскость геосинхронной орбиты выбиралась совпадающей с экваториальной плоскостью

Земли, наклоненной, как известно, на $23^{\circ}5'$ к плоскости эклиптики (рис. 1), что обеспечивает почти круглогодичную освещенность панелей солнечных батарей. Затенение батарей тенью Земли наблюдается в точках весеннего и осеннего равноденствия и не превышает в общей сложности 1,2 ч.

Учитывая также, что плотность солнечной радиации на геосинхронной орбите составляет $1,4 \text{ кВт/м}^2$, что в 2–2,5 раза больше, чем в среднем на Земле, становятся очевидными преимущества СКЭС перед наземными станциями.

Разумеется, не менее очевидны и трудности, прежде всего экономические, связанные с реализацией этого проекта. Однако известным стимулом для развития работ в данном направлении, помимо создания возобновляемого источника энергии, является решение проблемы сохранения окружающей среды от все более возрастающего теплового загрязнения планеты тепловыми отходами индустриальной цивилизации. Попытки отдельных стран оградить себя от пагубного влияния собственной индустрии, вынося ее за пределы национальной территории, неспособны уже сегодня решить эту глобальную проблему, и предлагаемое писателями-фантастами строительство заводов на околоземных орбитах не представляется предметом отдаленного будущего.

Неудивительно поэтому, что с конца 60-х годов началась интенсивная теоретическая и экспериментальная проработка различных вариантов мощных солнечных станций на геосинхронной орбите и отдельных элементов их конструкции (достаточно подробный обзор этих работ можно найти в [3]).

Одним из важных результатов проведенных в 70-е годы работ явилась осуществленная в 1975 году Лабораторией реактивного движения совместно с Научно-исследовательским центром им. Льюиса (НАСА, США) наземная трансляция 30 кВт СВЧ-мощности на расстояние в 1 милю (1,6 км) применительно к задачам СКЭС [3, 4]. Но это особая тема. Здесь же мы остановимся на вопросах преобразования солнечной энергии в электричество на СКЭС.

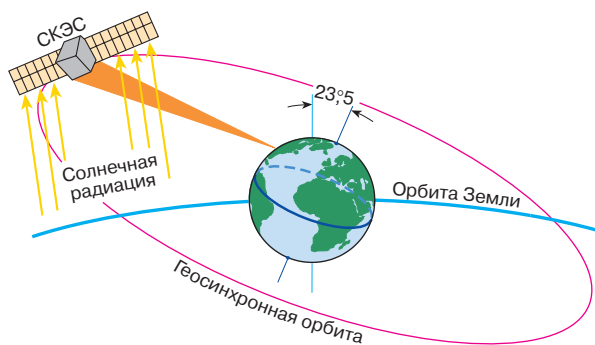


Рис. 1. Принципиальная схема СКЭС

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

К концу XX столетия человечество разработало и освоило ряд принципов преобразования тепловой энергии в электрическую. Их можно условно разделить на машинные и безмашинные методы. Последние часто называют методами прямого преобразования энергии, поскольку в них отсутствует стадия преобразования тепловой энергии в механическую работу.

Машинное преобразование солнечной энергии в электричество

Среди машинных преобразователей наиболее известны паро- и газотурбинные установки, в течение столетия работающие на всех наземных тепловых и атомных электростанциях. Пригодны они и для работы в космосе, но в этом случае необходим специальный теплообменник — излучатель, выполняющий роль конденсатора пара. При этом если в наземной паротурбинной установке теплота конденсации отводится циркулирующей водой, то в условиях космоса отвод тепла отработавшего в турбине пара или газа (если это газовая турбина) возможен только излучением. Поэтому энергоустановка должна быть замкнутой. Принципиальная схема замкнутой газотурбинной установки (ЗГТУ) показана на рис. 2, а. Здесь солнечная радиация, собранная концентратором 1 на поверхности солнечного котла 2, нагревает рабочее тело — инертный газ до температур порядка 1200–1500 К и под давлением, создаваемым компрессором 3, подает горячий газ на лопатки газовой турбины 4, приводящей в действие электрогенератор переменного тока 5. Отработавший в турбине газ поступает сначала в регенератор 6, где подогревает рабочий газ после компрессора, облегчая тем самым работу основного нагревателя — солнечного котла, а затем охлаждается в холодильника-излучателе 7 (примеры конструктивного выполнения отдельных элементов описанной установки можно найти, например, в [5]). Как показали наземные испытания трехкиловаттной газотурбинной установки, проведенные в 1977 году на пятиметровом фасетном параболическом концентраторе в Физико-техническом институте АН Узбекистана, установки такого типа весьма маневренны, выход на номинальные обороты (36 000 об/мин) занимал не более 1 мин с момента наведения солнечного пятна на полость цилиндрического котла [8, 9]. КПД этой установки составил 11%.

Может показаться, что для солнечных энергоустановок, использующих бесплатную энергию, величина КПД не столь существенна, как для традиционных тепловых машин на органическом топливе. Однако это не так, ибо размеры и вес наиболее громоздких и тяжелых частей солнечных космических энергоустановок — концентратора и холодильника-излучателя — зависят прежде всего от КПД установки.

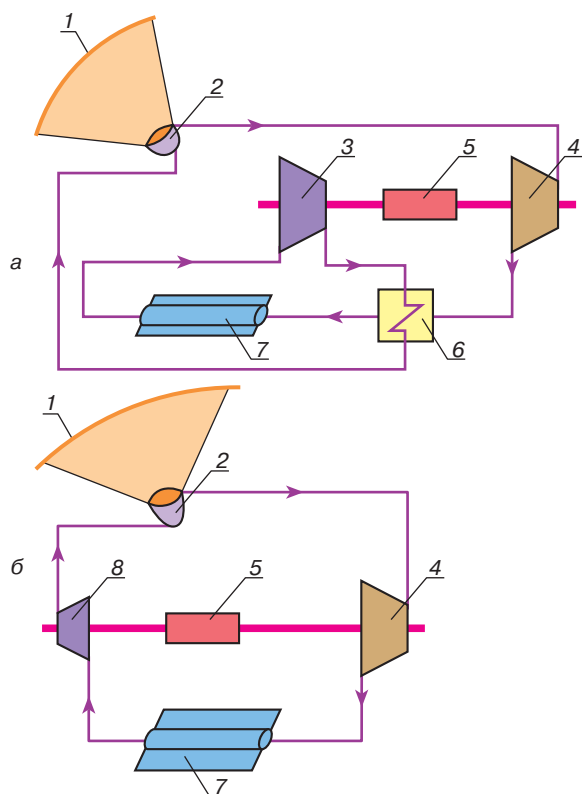


Рис. 2. Принципиальные схемы солнечной газотурбинной (а) и паротурбинной (б) энергоустановок

Возможно создание энергоустановки с паротурбинным преобразователем (рис. 2, б). Здесь собранная концентратором 1 солнечная энергия нагревает в солнечном котле 2 рабочую жидкость, переходящую в насыщенный, а затем и в перегретый пар, который расширяется в турбине 4, соединенной с электрогенератором 5. После конденсации в холодильнике-излучателе 7 отработавшего в турбине пара его конденсат, сжимаемый насосом 8, вновь поступает в котел. Поскольку подвод и отвод тепла в этой установке осуществляются изотермически, средние температуры подвода и отвода оказываются выше, чем в газотурбинной установке (при одинаковых температурах подвода тепла), а удельные площади излучателя и концентратора могут оказаться меньше, чем в ЗГТУ. У описанной в [7] установки, работающей на органическом рабочем теле, КПД составлял 15–20% при сравнительно невысоких температурах подвода тепла – всего 600–650 К.

Аналогичная по назначению американская солнечная паротурбинная установка “Sunflower” имела КПД 12% при удельной площади холодильника-излучателя порядка 1 кВт/м² [5]. При таких характеристиках СКЭС на 10 ГВт (именно такая мощность требуется сегодня крупнейшим мегаполисам мира) потребовался бы холодильник-излучатель с площа-

дью 10 км². Сравнительно менее проработаны экспериментально энергоустановки с поршневыми машинами замкнутого цикла (см. [5]).

Общим же недостатком всех машинных преобразователей является наличие в них вращающихся частей, что создает проблемы с поддержанием неизменной ориентации станции. Кроме того, из-за использования в качестве рабочего тела газа или пара необходима специальная защита излучателя от пробоя метеоритами.

Прямое преобразование солнечной энергии в электричество

От недостатков, присущих машинным преобразователям, в известной степени свободны энергоустановки с так называемыми безмашинными преобразователями: термоэлектрическими, термоэмиссионными и фотоэлектрическими (солнечные батареи), непосредственно преобразующими энергию солнечного излучения в электрический ток.

Термоэлектрический метод

Термоэлектродгенераторы (ТЭГ) основаны на открытом в 1821 году немецким физиком Т.И. Зеебеком термоэлектрическом эффекте, состоящем в возникновении на концах двух разнородных проводников термо-ЭДС, если концы этих проводников находятся при разной температуре.

Открытый эффект первоначально использовался в термометрии для измерения температур. Энергетический КПД таких устройств-термопар, подразумевающий отношение электрической мощности, выделяемой на нагрузку, к подведенному теплу, составлял доли процента. Только после того, как академик А.Ф. Иоффе предложил использовать для изготовления термоэлементов вместо металлов полупроводники, стало возможным энергетическое использование термоэлектрического эффекта, и в 1940–1941 годах в Ленинградском физико-техническом институте был создан первый в мире полупроводниковый термоэлектродгенератор. Трудями А.Ф. Иоффе и его школы в 40–50-е годы была разработана и теория термоэлектрического эффекта в полупроводниках, а также синтезированы весьма эффективные (по сей день) термоэлектрические материалы. Согласно разработанной теории, выражение КПД ТЭГ дает формула

$$\eta = \frac{T_r - T_x}{T_r} \frac{M - 1}{M + T_x/T_r},$$

где

$$M = \sqrt{1 + zT_{cp}}, \quad z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda},$$

z – добротность полупроводникового материала, 1/К; T_r – температура горячего спая термоэлемента, К; T_x – температура холодного спая, К; T_{cp} – средняя температура ветви термоэлемента, К,

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_r + T_x}{2},$$

M – критерий Иоффе, α – приведенная дифференциальная термо-ЭДС ветвей термоэлементов, мкВ/К; σ , λ – приведенные электропроводность и теплопроводность ветвей термоэлементов соответственно в $1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$ и $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Имеет смысл остановиться на приведенной формуле для КПД, поскольку она характеризует эффективность не только термоэлектрогенераторов, но и других устройств прямого преобразования энергии. Обращает на себя внимание тот факт, что КПД ТЭГ зависит от тех же факторов, что КПД любой тепловой машины: термического КПД обратимого цикла Карно (первый множитель в формуле) и коэффициента необратимых потерь энергии (второй множитель). В ТЭГ внутренние необратимые потери связаны главным образом с перетоком тепла по положительной 3 и отрицательной 4 ветвям от горячих 1 (рис. 3, а) к холодным 5 спаям (спаи, выполняемые обычно из меди, отделяют от ветвей антидиффузионными слоями 2 (рис. 3, а)). Как следует из формулы, необратимые потери тем ниже, чем выше добротность используемых материалов. Однако теория и многолетняя практика показали, что величина добротности порядка $3 \cdot 10^{-3}$ 1/град является, видимо, ее предельным значением [6].

Соединяя между собой отдельные термоэлементы, можно создавать достаточно мощные термобатареи, одна из которых показана на рис. 3, б. Батарея размещена в фокальной плоскости концентратора 3; ее горячие спаи 1 непосредственно обогреваются солнечной концентрированной радиацией, а отвод тепла от холодных спаев 2 осуществляется излучением. В [6] приводятся энергетические характеристики космической энергоустановки, подобной показанной на рис. 3, б, но без концентратора. Ожидаемый удельный вес установки до 50 Вт/кг. Это значит, что электростанция мощностью 10 ГВт может весить до 200 тыс. т. Снижение веса энергоустановки напрямую связано с повышением КПД преобразования солнечной энергии в электричество, чего, как видно из приводимой выше формулы, можно достичь двумя путями: увеличением термического КПД преобразователя (КПД цикла Карно) и снижением необратимых потерь энергии во всех элементах энергоустановки. Первый путь в принципе возможен, так как концентрированное излучение позволяет получать очень высокие температуры. Однако при этом весьма возрастают требования к точности систем слежения за Солнцем, что для громадных по размерам концентрирующих систем вряд ли достижимо. Поэтому усилия исследователей неизменно направлялись на снижение необратимых потерь, в первую очередь на уменьшение перетока тепла с горячих спаев на холодные теплопроводностью. Для решения этой задачи требовалось добиться увеличения добротности полупроводниковых материалов.

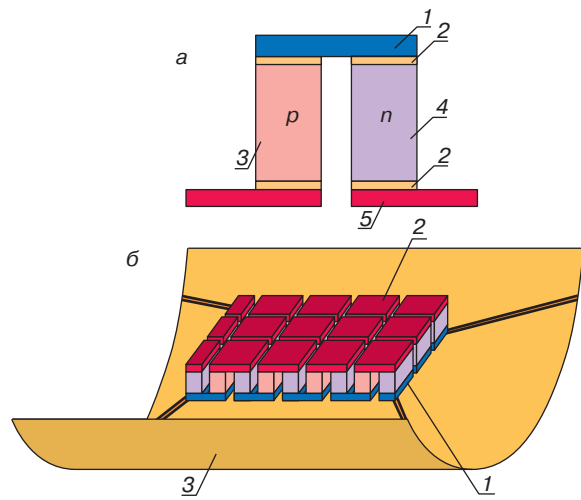


Рис. 3. Схема термоэлектрического преобразователя: а – отдельный термоэлемент, б – термоэлектрический модуль на концентраторе

Однако, как уже говорилось, после многолетних попыток синтезировать полупроводниковые материалы с высокой добротностью стало ясно, что достигнутая величина $(2,5-2,7) \cdot 10^{-3}$ является предельной величиной. Тогда при продолжении поиска новых путей снижения перетока тепла и возникла идея разделить горячий и холодный спаи воздушным промежутком, как это имеет место в двухэлектродной лампе – диоде. Если в такой лампе разогреть один электрод – катод 1 (рис. 4) и при этом охладить другой электрод – анод 2, то во внешней электрической цепи возникнет постоянный ток, что и наблюдал впервые в 1883 году Томас Эдисон.

Термоэмиссионный преобразователь (ТЭП)

Открытое Эдисоном явление получило название термоэлектронной эмиссии. Подобно термоэлектричеству, оно долгое время применялось в технике слабых токов. Позднее ученые обратили внимание

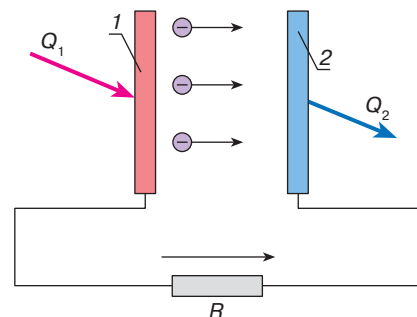


Рис. 4. Принципиальная схема термоэмиссионного преобразователя

на возможности использования метода для преобразования тепла в электричество. И хотя природа у термоэлектричества и термоэлектронной эмиссии разная, но выражения для КПД у них одинаковые:

$$\eta = \eta_k \eta_{\text{необр}},$$

где η_k – КПД обратимого цикла Карно, $\eta_{\text{необр}}$ – коэффициент, учитывающий необратимые потери в термоэмиссионном (термоэлектрическом) преобразователе.

Главные составляющие необратимых потерь в ТЭП связаны с неизотермическим характером подвода и отвода тепла на катоде и аноде, перетоком тепла с катода на анод по элементам конструкции ТЭП, а также с омическими потерями в элементах последовательного соединения отдельных модулей.

Для достижения высоких КПД цикла Карно современные ТЭП создают на рабочие температуры катодов 1700–1900 К, что при температурах охлаждаемых анодов порядка 700 К позволяет получать КПД порядка 10%. Таким образом, благодаря снижению необратимых потерь в самом преобразователе и при одновременном повышении температуры подвода тепла КПД ТЭП оказывается вдвое выше, чем у описанного выше ТЭГ, но при существенно более высоких температурах подвода тепла. Для получения таких температур поверхностей катодов на геосинхронной орбите точность ориентации на Солнце концентратора ТЭП должна находиться в пределах 6°–8°, что при тепловых мощностях СКЭС в 10–20 ГВт и соответствующих площадях концентраторов может стать, как отмечалось выше, серьезной технической проблемой.

Вполне возможно, что отмеченные обстоятельства сыграли не последнюю роль в выборе фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии в бортовых системах электропитания первых и последующих поколений космических аппаратов.

Фотоэлектрический метод преобразования энергии

Солнечная батарея (рис. 5) основана на явлении внешнего фотоэффекта, проявляющегося на $p-n$ -переходе в полупроводнике при освещении его светом. Создают $p-n$ (или $n-p$)-переход введением в монокристаллический полупроводниковый материал-базу примеси с противоположным знаком проводимости. Например, в кремний вводят алюминий или литий. В результате при попадании на $p-n$ -переход солнечного излучения происходит возбуждение электронов валентной зоны и образуется электрический ток во внешней цепи. КПД современных солнечных батарей достигает 13–15%. Наиболее перспективны для создания преобразователей СКЭС ультратонкие солнечные элементы [7], имеющие КПД порядка 15% при удельных характеристиках 1 кВт/м² и 200 Вт/кг. При использовании в качестве преобразователя СКЭС мощностью 10 ГВт этих солнечных батарей их площадь составила бы 50 км² при весе 10 тыс. т.

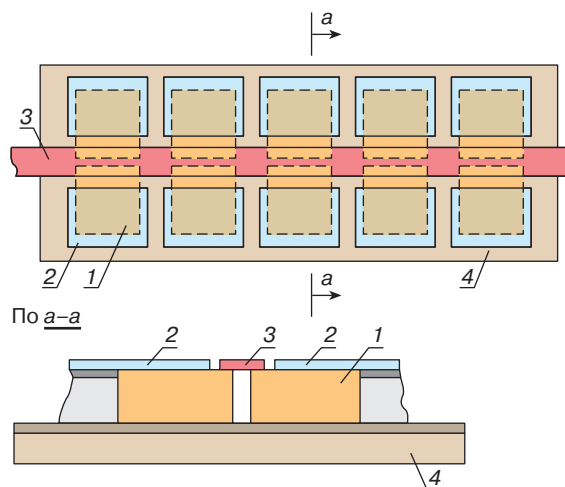


Рис. 5. Схема солнечной батареи: 1 – солнечный элемент, 2 – защитное стекло, 3 – коммутационная шина, 4 – подложка

ЛИТЕРАТУРА

1. Мировая энергетика: Прогноз развития до 2020 года / Под ред. Ю.И. Старшинова. М.: Энергия, 1980. С. 135.
2. Глезер П.Е. // Гелиотехника. 1971. № 1. С. 37.
3. Ванке В.А., Лопухин В.М., Савин В.Л. // Успехи физ. наук. 1977. Т. 123, № 4. С. 633–655.
4. Braun W. von // Pop. Sci. 1975. Vol. 206. P. 70.
5. Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янтовский Е.М. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок. М.: Высш. шк., 1970. С. 485.
6. Охотин А.С., Ефремов А.А., Охотин В.С., Пушкарский А.С. Термоэлектрические генераторы. М.: Атомиздат, 1971. С. 286.
7. Грилихес В.А., Орлов П.П., Ионов Л.Б. Солнечная энергия и космические полеты. М.: Наука, 1984. С. 214.
8. Драбкин Л.М. // Гелиотехника. 1973. № 4. С. 11–21; 1974. № 3. С. 13–22.
9. Драбкин Л.М., Хатамов П.У. // Там же. 1983. № 3. С. 32–34.

* * *

Леонид Меерович Драбкин, кандидат технических наук, доцент Российского государственного открытого технического университета путей сообщения. Область научных интересов – солнечная энергетика и преобразование видов энергии, автоматизированные системы управления теплоэнергетическими процессами. Автор и соавтор около 100 статей (24 работы переведены в США), 22 авторских свидетельств и патента.