

14. Преобразование тепловой энергии океана

14.1. Ресурсы тепловой энергии океана

Мировой океан – крупнейший естественный коллектор солнечного излучения. В нем между теплыми, поглощающими солнечное излучение поверхностными водами и более холодными придонными достигается разность температур в 20 °С. Это обеспечивает непрерывно пополняемый запас тепловой энергии, которая принципиально может быть преобразована в другие виды. Сам термин «преобразование тепловой энергии океана» (ОТЕС) – «ocean thermal energy conversion» – означает преобразование некоторой части этой тепловой энергии в работу и далее в электроэнергию.

Преобразование тепловой энергии, запасенной океаном, в механическую энергию и далее в электроэнергию требует создания тепловой машины, тем или иным способом использующей естественный перепад температур между прогретыми поверхностными и охлажденными глубинными слоями вод. В первом приближении доля преобразуемой энергии может быть определена через КПД термодинамического цикла Карно как $\frac{\Delta T}{T}$, где ΔT – величина перепада температур между нагревателем и холодильником; T – абсолютное значение температуры нагревателя (К). Соответственно для определения реализуемых запасов тепловой энергии необходимы сведения о распределении температур на поверхности океана, толщине прогретого слоя, глубине залегания слоя холодных вод, скорости перемещения водных масс.

Первая такая приближенная оценка была выполнена в 1977 г. Она базировалась на том, что в среднем по Мировому океану разность температур между поверхностью и глубинами примерно в 400 м составляет 12 °С, лишь в некоторых районах вблизи экватора достигая 20°С. Считая в среднем, что разность температур в 12°С сохраняется на всей свободной ото льда поверхности площадью около $3 \cdot 10^{14}$ м² в слое толщиной 100 м, общую тепловую

энергию, присутствующую в океане в любой момент времени, можно оценить как

$$W = \rho v c_p \Delta T, \quad (14.1.1)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³;

v – объем нагретых вод, м³;

c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Полагая $c_p = 4,19$ кДж/(кг·К), величина запасенной энергии $W = 15 \cdot 10^{23}$ Дж.

Более точные оценки требуют знания картины распределения температур. О распределении перепадов температур на поверхности Мирового океана дает представление рис. 14.1.1. Карты показывают, что площадь зоны с постоянным максимальным перепадом температур не так уж велика и составляет примерно 20 млн. км². Ценой снижения КПД идеального цикла на 1 % эту зону возможного размещения тепловых преобразователей можно увеличить примерно в 6–7 раз. Постоянство перепада температур в случае изъятия части энергии должно обеспечиваться притоком энергии за счет перемещения, водных масс и поглощения солнечного излучения.

Определение ресурсов тепловой энергии, связанной с океаном, будет не полным, если не учесть потенциальные возможности еще двух температурных перепадов, существующих между приповерхностными слоями воздуха и поверхностными слоями воды и между придонными водами и породами, слагающими дно. Эти ресурсы пока не оценены, однако уже ведутся работы по созданию действующих моделей преобразователей, использующих первый перепад, который представляет особый интерес для Арктики, где в зимнее время – практически не менее 8 месяцев в году – температуры воздуха лежат ниже -20 °С при относительно постоянных температурах воды подо льдом $+2 - +3$ °С. Расчеты показывают, что при таком перепаде каждый 1 м³ морской воды, будучи пропущен за 1 с через преобразователь, позволяет получить около 10 кВт мощности при КПД установки 5%.

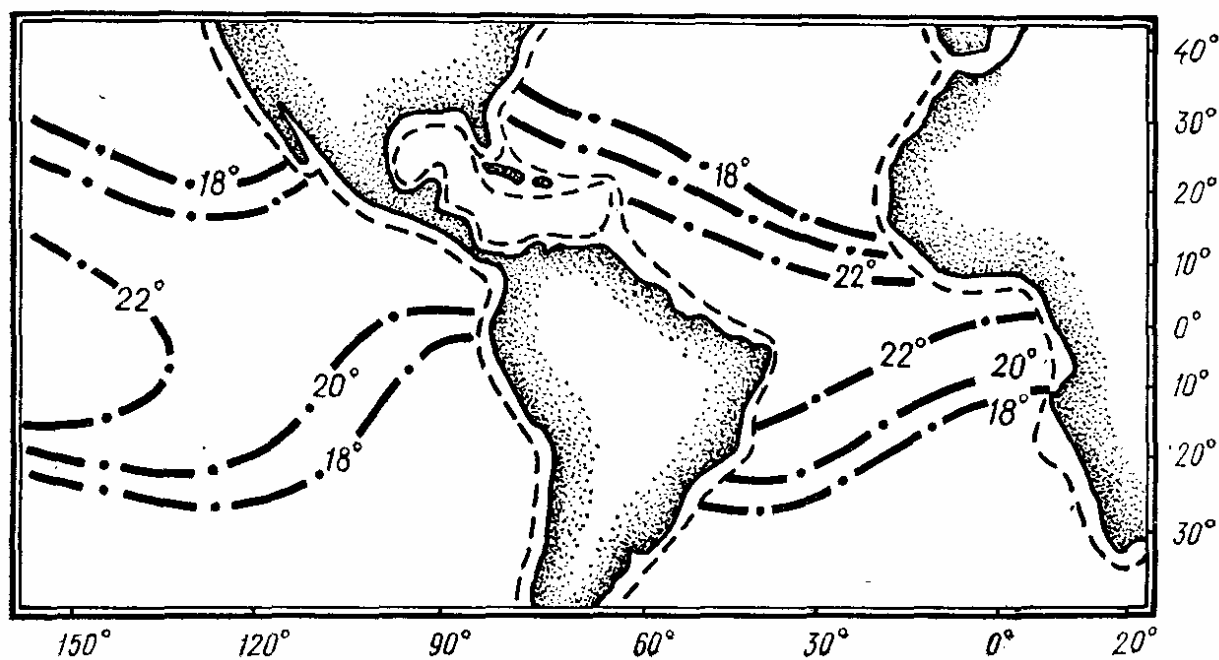
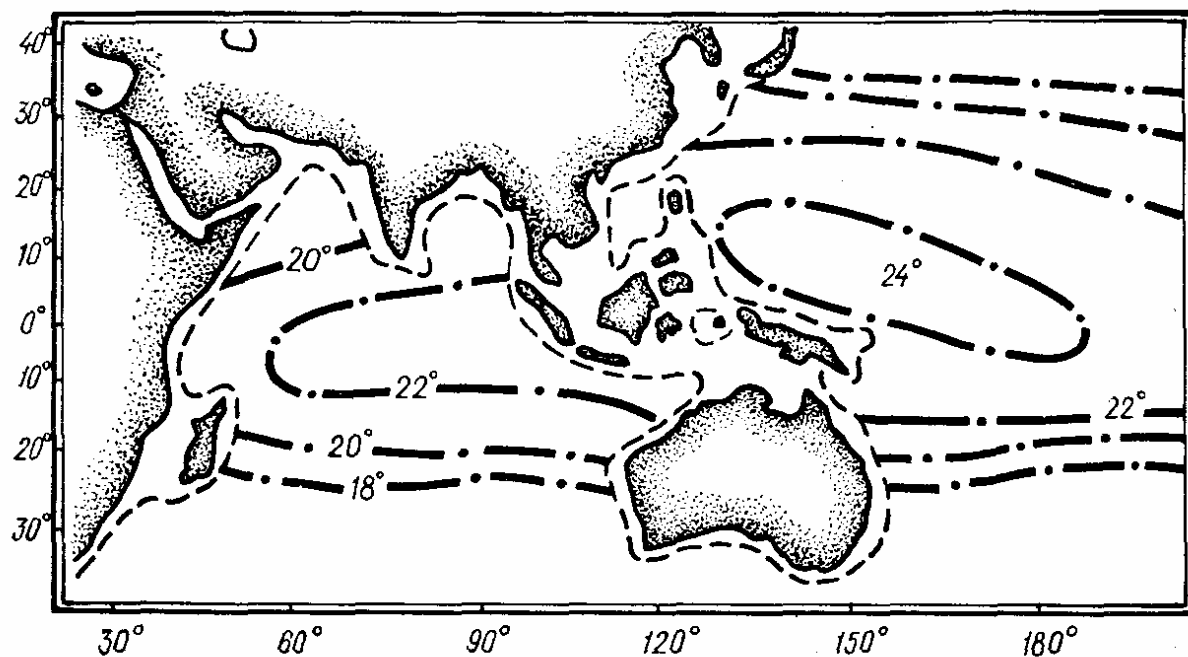


Рис. 14.1.1. Распределение перепадов температур в приэкваториальных зонах Мирового океана (пунктиром отмечены глубины 1000 м)

14.2. Схема ОТЭС, работающей по замкнутому циклу

Схема установки, работающей по замкнутому циклу, приведена на рис. 14.2.1. В такой системе с помощью теплых поверхностных вод, прокачи-

ваемых насосом через теплообменник испарителя, превращают в пар какое-либо подходящее рабочее тело (аммиак, фреон, пропан), создают пар повышенного давления, давая ему возможность расширяться через турбину в холодильник, где пар конденсируется при контакте с охлаждаемыми поверхностями второго теплообменника, омываемого водой, закачиваемой из глубоких слоев океана.

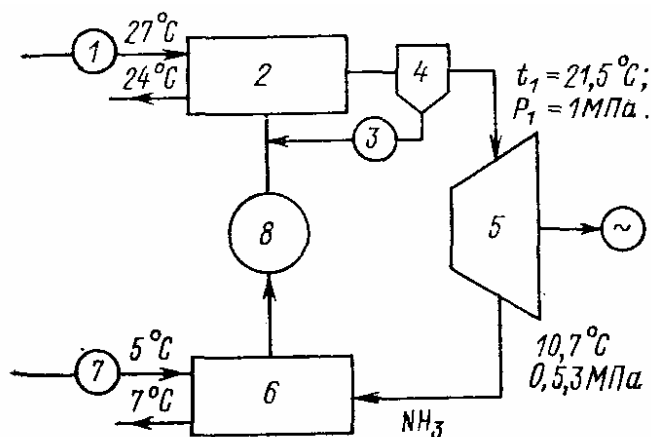


Рис. 14.2.1. Схема термальной установки, работающей по замкнутому циклу:

1 – насос теплой воды; 2 – испаритель; 3 – насос осушителя парообразного рабочего тела; 4 – осушитель; 5 – турбина с электрогенератором; 6 – конденсатор; 7 – насос для забора холодной воды; 8 – насос для подачи рабочего тела.

На рис. 14.2.2 показан термодинамический цикл такой тепловой машины (цикл Ренкина) в координатах абсолютная температура-энтропия. Полезная работа, совершаемая паром в турбине, определяется ветвью 1-2, на участке 2-3 происходит конденсация, затем насосом рабочее тело подается в испаритель 3-4, где нагревается (ветвь 4-5) и испаряется (ветвь 5-1). Таким образом, подвод рабочего тела к системе тепла осуществляется на ветви 3-4-5, а отвод – на ветви 2-3. Дополнительную работу приходится затрачивать на закачку конденсата в испаритель (3-4) и на подачу воды в нагреватель и холодильник.

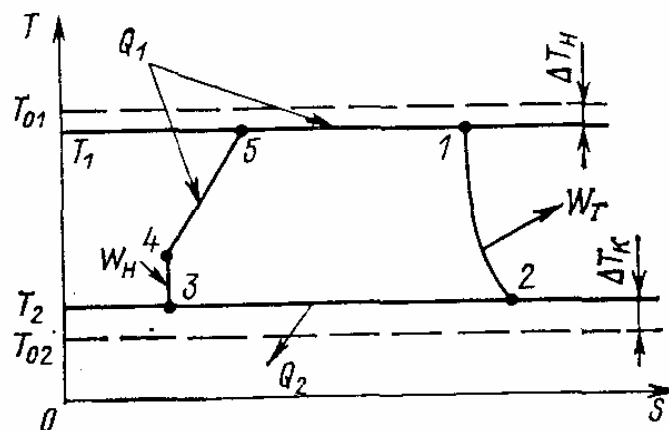


Рис. 14.2.2. Термодинамический цикл ОТЭС (цикл Ренкина).

Максимальный теоретический КПД такой системы определяется разностью температур воды, подаваемой в нагреватель и холодильник, как КПД эквивалентного цикла Карно $\eta_K = \frac{T_{01} - T_{02}}{T_{01}}$. Для перепадов температур между поверхностными и глубинными слоями воды в пределах от 15 до 26 °С он соответственно изменяется в диапазоне от 5 до 9 %. Реальный КПД, как правило, существенно ниже. Это связано с конструктивными ограничениями, не позволяющими в реальной установке довести температуру паров и конденсата до температуры теплых и холодных вод соответственно (на рис. 14.2.2 это подчеркнуто с помощью разностей температур $\Delta T_H = T_{01} - T_1$ и $\Delta T_K = T_2 - T_{02}$. Конкретные температуры приведены на рис. 14.2.1. Можно подсчитать, что при теоретическом КПД, равном 7,3 %, на турбине получаем величину примерно в 2 раза меньшую – 3,6%. Причем она не учитывает еще потерь на собственные нужды станции, которые сведут КПД до величины, меньшей 2,5%. Это, в свою очередь, означает, что для получения 1 МВт «полезной» мощности через теплообменники такой станции должно пройти не менее 40 МВт тепловой мощности. Именно поэтому ОТЭС требуют огромных расходов теплой и холодной воды, измеряемых в тысячах кубометров в секунду.

Для того чтобы представить себе, что же такое реальная промышленная

ОТЭС, достаточно указать такие ориентировочные цифры: станция мощностью 40 МВт (плавучая) должна иметь водоизмещение примерно 70 тыс. т, диаметр трубопровода холодной воды 10 м и рабочую поверхность теплообменника около 45 тыс. м².

14.3. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу

Схема установки, работающей по **открытому циклу Клода**, показана на рис. 14.3.3. В качестве рабочего тела здесь использована морская вода, подаваемая в испаритель через деаэратор, освобождающий воду от растворенных в ней газов. Предварительно из полостей испарителя и конденсатора удаляется воздух, так что давление над поверхностью жидкости определяется только давлением насыщенных паров, которое сильно зависит от температуры. При характерных для ОТЭС температурах этот перепад составляет примерно 1,6 кПа (при замкнутом цикле на аммиаке около 500 кПа), под действием этого перепада пары воды приводят в движение турбину, попадают в конденсатор, где и превращаются в жидкость.

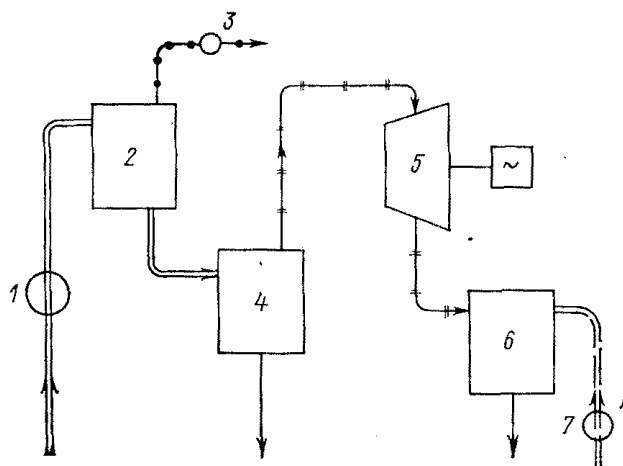


Рис. 14.3.3. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу (цикл Клода): 1 – насос теплой воды; 2 – деаэратор; 3 – вакуумный насос; 4 – испаритель; 5 – турбина с электрогенератором; 6 – конденсатор; 7 – насос для подъема холодной воды.

Основное отличие цикла как раз и состоит в малости перепада давлений, что требует использования соответствующих гигантских турбин диаметром в несколько десятков метров. Это, пожалуй, основной технический недостаток систем открытого цикла. Основное же их достоинство – отсутствие гигантских нетехнологичных теплообменников. Кроме того, при работе систем открытого цикла могут быть получены большие количества пресной воды, что немаловажно в жарком поясе планеты.

14.4. Использование перепада температур океан-атмосфера

Идея использования перепада температур между холодным воздухом и незамерзающей (теплой) водой подо льдом Арктики впервые была высказана во Франции А. Баржо, развившим идею Д'Арсонваля по преобразованию тепловой энергии, запасенной в океане. В нашей стране с ее протяженным арктическим шельфом работы в этой области всегда вызывали интерес. Достаточно указать на проекты Г. Покровского (1901-1979 гг.), на работы, выполненные под руководством В.И. Марочка во Владивостоке, на проведенные там же исследования А.К. Ильина и В.В. Тикменова [1.14].

Особенность работы таких станций – так называемый «треугольный» цикл: нагрев и испарение рабочего тела в результате политропного процесса, адиабатное расширение через турбину, изотермическое сжатие при подаче в испаритель с одновременным отводом избыточного тепла в холодильник. КПД такого цикла, как показано в одной из работ А.К. Ильина, ниже термического КПД цикла Карно примерно в 2 раза. С точностью до 1 % он определяется выражением $\eta = \frac{T_{01} - T_{02}}{2T_{01}}$, где T_{01} – температура теплой подледной воды (275 К); T_{02} – температура охлаждающего воздуха (до 233 К). Значительный перепад температур сможет компенсировать снижение КПД. Теоретическую мощность такой ОТЭС можно оценить с помощью формулы В.А. Акуличева [1.1]

$$P = \rho k c_p u A \eta \frac{(T_{01} - T_{02})^2}{2T_{01}}, \quad (14.4.1)$$

где $k = H/L$ – отношение толщины используемого слоя теплой воды к характерной длине возмущения среды вдоль течения;
 u – скорость течения;
 A – площадь взаимодействия станции с океаном;
 η – коэффициент потерь в агрегатах и системах.

Если положить в этом выражении $k = 1$ и считать механические потери в агрегатах станции пренебрежимо малыми ($\eta_m = 1$), то удельная мощность, получаемая с 1 м^2 площади океана при разности температур воды и воздуха, равной $10 \text{ }^\circ\text{C}$, составляет примерно 18 кВт/м^2 при разности $20 \text{ }^\circ\text{C}$ – 60 кВт/м^2 , а при разности $30 \text{ }^\circ\text{C}$ – 125 кВт/м^2 . В этих оценках величина скорости движения воды принята равной $0,02 \text{ м/с}$ – характерная скорость для прибрежных районов Северного Ледовитого океана [1.14]. Таким образом, при отсутствии ограничений по глубине океана в зоне размещения полярной ОТЭС и мощности в 1 МВт она будет возмущать тепловой режим на площади всего около 20 м^2 .

На рис. 14.4.1 приведена разработанная А.К. Ильиным и В.В. Тикменовым схема АОТЭС с обдуваемыми воздухом теплообменниками. В ней использован дополнительный контур с промежуточным теплоносителем, позволяющий существенно снизить потери энергии на собственные нужды станции.

Схема напоминает обычные тепловые станции с градирнями для охлаждения отработавшей воды, но данные градирни действуют в условиях, когда температура наружного воздуха много ниже нуля, а охлаждаемая жидкость имеет температуру всего на несколько градусов выше. Поэтому в охлаждающем контуре такой станции необходимо использовать рассол с низкой температурой замерзания. В качестве промежуточного теплоносителя применяется водный раствор хлористого кальция с концентрацией не менее

26 кг на 100 кг воды, который достаточно широко используется в холодильной технике. Рабочим телом в основном контуре станции служит фреон-12, пары которого приводят в движение турбину с электрогенератором.

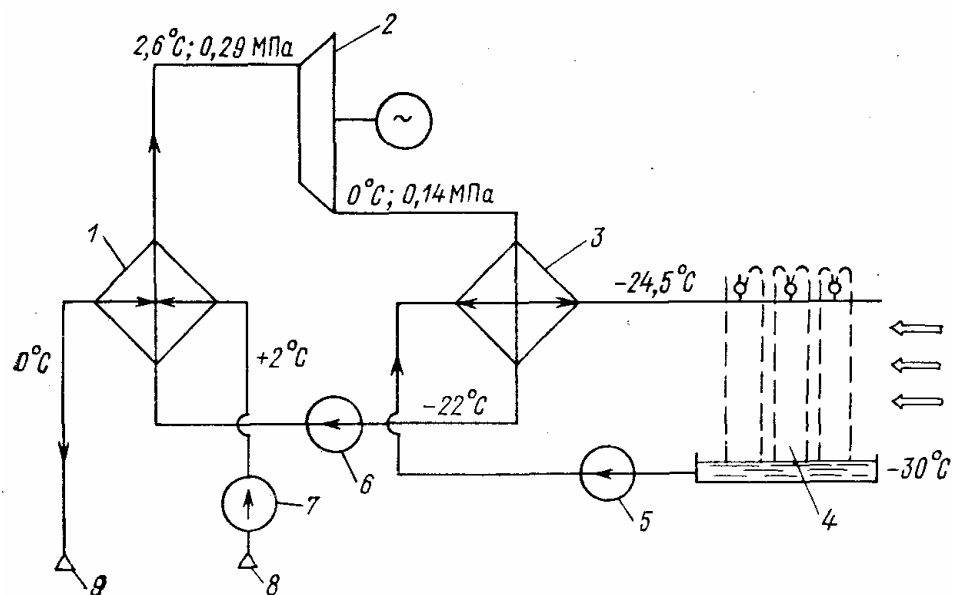


Рис. 14.4.1. Схема арктической ОТЭС на перепаде вода-воздух: 1 – испаритель основного контура; 2 – турбина с электрогенератором; 3 – конденсатор; 4 – теплообменник контура охлаждения промежуточного рабочего тела; 5 – насос для подачи хладагента; 6 – насос для подачи рабочего тела; 7 – насос для подачи морской воды; 8 – водозаборник; 9 – патрубков сброса отработанной воды.

Промежуточный теплоноситель охлаждается путем разбрызгивания через форсунки оросительного охладителя. Причем важно обеспечить определенное распыление, чтобы, с одной стороны, капли теплоносителя не выносились потоком холодного воздуха, а с другой – успевали охладиться во время падения. Для того чтобы капля диаметром 1 мм охладилась на 2 °С при движении в воздухе со средней разностью температур 30 °С ей необходимо пролететь в свободном падении чуть более 3 м. Распыляя таким образом раствор хлористого кальция, можно добиться удельного съема энергии более 230 Вт/(м²К). Такие значения коэффициентов теплоотдачи, конечно, уступают получаемым в настоящее время в конструкциях водо-водяных теплообменников традиционных ОТЭС (до 5 кВт/(м²К)), но превышают примерно в 5 раз характерные величины для простейших воздушных теплообменников

станций без промежуточного теплоносителя. Это позволяет снизить металлоемкость конденсаторов и примерно на 20 % увеличить выработку полезной энергии.

14.5. Прямое преобразование тепловой энергии

Схема ОТЭС на термоэлектрических преобразователях показана на рис. 14.5.1. В основе ее действия – явление Зеебека, заключающееся в возникновении разности потенциалов в электрической цепи, составленной из материалов с различной концентрацией носителей заряда, места соединений которых нагреты до разных температур. Величину этой разности потенциалов можно определить по известной формуле:

$$E = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \Delta T, \quad (14.5.1)$$

где k – постоянная Больцмана;

e – заряд электрона;

n_{01}, n_{02} – концентрации носителей (электронов в проводниках, электронов и дырок в полупроводниках);

ΔT – разность температур между нагреваемыми и охлаждаемыми спаями (соединениями) разнородных электропроводящих материалов.

Действие такой системы полностью описывается законами термодинамики, справедливыми для обычных ОТЭС. КПД такого преобразователя, выполненного на полупроводниковых элементах, достигает 10 %. Это значительно больше, чем у систем, работающих по циклу Ренкина и Клода. Кроме того, в системах таких ОТЭС к минимуму могут быть сведены потери на собственные нужды станции. Величина термо-ЭДС для полупроводниковых пар может достигать нескольких милливольт на градус (для металлических термопар они примерно в 1000 раз ниже). Например, постоянная Зеебека для

кристаллов теллурида висмута с n - и p -проводимостью равна $3,14 \cdot 10^{-4}$ В/К. Другое достоинство полупроводниковых систем – возможность обеспечения достаточно высокой теплоизоляции между нагревателем и холодильником, что сильно влияет на КПД систем.

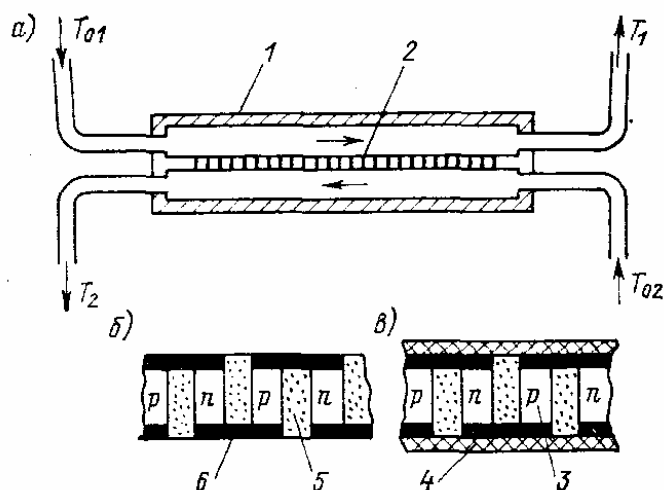


Рис. 14.5.1. Схема ОТЭС с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую: а – устройство отдельного блока; б, в – варианты устройства термоэлектрического преобразователя; 1 – кожух; 2 – термоэлектрический генератор; 3 – полупроводниковые элементы с n - и p -проводимостью; 4 – поверхностное изолирующее покрытие; 5 – изолятор; 6 – соединительные шины.

К недостаткам таких систем относятся достаточно высокая стоимость материалов, из которых изготавливаются элементы, и необходимость изолировать спаи от непосредственного контакта с морской водой – происходит шунтирование через воду соседних элементов, обладающих достаточно высоким собственным сопротивлением, и, следовательно, снижение мощности, выдаваемой в цепь нагрузки. В свою очередь, изолирование спаев приводит к удорожанию преобразователей и ухудшению их показателей. Работы, выполненные группой исследователей из университета Осаки (Япония), показывают, что при отсутствии изолятора в несколько раз увеличивается съем полезной мощности. Однако необходимо иметь в виду, что в опытах японских исследователей в качестве носителя энергии использовалась не сама

морская вода, а фторуглеродистые соединения.

ОТЭС, созданные на описанном принципе, вероятно, можно применить для обеспечения электроэнергией комплексов подводной добычи полезных ископаемых на океанском дне.

Литература

1. Волновые энергетические станции в океане / В.И. Сичкарев, В.А. Акуличев. – М.: Наука, 1989. – 132 с.
2. Коробков В.А. Преобразование энергии океана. – Л.: Судостроение, 1986. – 280 с.
3. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. – М. Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
4. <http://acre.murdoch.edu.au/> – The Australian Renewable Energy Website.

Содержание

14. Энергетические ресурсы океана.....	1
14.1. Ресурсы тепловой энергии океана.....	1
14.2. Схема ОТЭС, работающей по замкнутому циклу	3
14.3. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу.....	6
14.4. Использование перепада температур океан-атмосфера.....	7
14.5. Прямое преобразование тепловой энергии	10
Литература	12