



*В. А.
Коробков*

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ОКЕАНА



ЛЕНИНГРАД
«СУДОСТРОЕНИЕ»
1986

ОТ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

В последние годы возрос интерес к Мировому океану как источнику возобновляемых энергетических ресурсов, которые могут иметь большое значение для решения ряда практических задач освоения океанов и морей, а также для энергоснабжения прибрежных районов многих стран.

Формы аккумуляции энергии в океане разнообразны. Энергетические источники океана имеют различные по потенциалу ресурсы, а также характеризуются различным уровнем научной и технической подготовленности для практического применения.

Наибольшие ресурсы заключает в себе тепловая энергия океана. За последние годы во многих странах выполнен большой объем научных исследований и технических разработок, позволяющих подойти к созданию океанских тепловых энергетических станций (ОТЭС) и арктических океанских тепловых электростанций (АОТЭС).

Значительный интерес представляет возможность использования энергии течений и поверхностных волн океана. Уже в настоящее время существуют практические возможности для создания океанских гидродинамических энергетических станций (ОГЭС) и океанских волновых энергетических станций (Волн ЭС) различной мощности, которые могут использоваться для энергообеспечения разнообразных морских установок и устройств.

Значительные энергетические возможности заложены в океане вследствие перепадов солености при впадении пресных рек, а также в местах нахождения ископаемых солевых куполов и рассолов. В нашей стране особый интерес представляет высокий энергетический потенциал природной системы на стыке Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол.

Многие страны мира обладают потенциальными источниками приливной энергии. Опыт создания и эксплуатации приливных электростанций (ПЭС) на р. Ранс во Франции, в Кислой губе в СССР, в бухте Аннаполис-бейсн (вблизи г. Аннаполис Роял, Канада) свидетельствует о реальности современных технических возможностей использования приливной энергии океана. В настоя-

щее время в ряде стран мира разрабатываются проекты, строятся и уже эксплуатируются ПЭС различных мощностей.

Научный и практический интерес представляют исследования биологических энергетических ресурсов океана. В этой области уровень наших исследований и достижений, практических разработок пока значительно ниже нашего понимания потенциальных возможностей этого вида энергетики океана. Весьма интересны работы по горючим нетрадиционным энергетическим ресурсам океана, например, на основе безотходной технологии использования сероводорода в Черном море.

Все возобновляемые энергетические ресурсы океана, кроме приливов, формируются в результате трансформации солнечной энергии. Следует отметить, что солнечная энергия, приходящаяся на Мировой океан, примерно, в 2,5 раза превышает солнечную энергию на суше нашей планеты. Эта величина более чем в тысячу раз превышает мировое энергопотребление в настоящее время. Однако только часть энергетических ресурсов океана может быть использована практически. Основные ограничения обусловлены требованием, чтобы потребление энергии океана не приводило к необратимым изменениям исходного состояния природной среды.

Книга представляет собой обзор современных научных представлений и технических достижений, которые могут быть положены в основу создания систем преобразования различных видов энергии океана. Рассматриваемые в ней вопросы и технические аспекты относятся к самым актуальным в современной проблематике освоения возобновляемых энергетических ресурсов Мирового океана. Однако это не означает, что книга будет интересна только специалистам по энергетике и технике освоения океана. Она должна привлечь внимание специалистов различных направлений науки и техники, которые понимают насущную потребность освоения возобновляемых энергетических ресурсов океана.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Поиск источников энергии — одна из характерных черт индустриального общества. Без преувеличения можно сказать, что энергия в современном мире — важнейшая составляющая социального и технического прогресса: недостаточное производство энергии сдерживает движение вперед развивающихся стран, не безразличны перебои в снабжении энергией и для развитых стран, где даже угроза дефицита топлива вызывает кризисные ситуации.

Не случаен сейчас интерес к возобновляемым самой природой источникам энергии. Возродился он, с одной стороны, в связи с прогнозами достаточно быстрого истощения легко доступных запасов нефти и газа, наиболее широко применяемых в настоящее время в качестве энергоносителей, а с другой — вследствие естественного желания человека привести свои потребности в согласие с природой и сделать энергетику отраслью если и ухудшающей показатели среды, то по крайней мере лишь в допустимой степени. В наше время отрицательное воздействие энергетики на окружающую среду из-за выбросов тепловых электростанций в некоторых районах мира стало чрезмерным.

Основной источник возобновляемой энергии — Солнце. По расчетам специалистов солнечной энергии вполне достаточно, чтобы обеспечить жизнь и деятельность человечества в обозримом будущем. Дело за разработкой достаточно эффективных преобразователей этой энергии, самые существенные недостатки которой с точки зрения энергетиков — низкая плотность естественных потоков излучения и неравномерность распределения этих потоков по поверхности Земли. В этом смысле интересен Мировой океан, являющийся природным концентратором солнечной энергии. К нему приковано сейчас внимание специалистов, заинтересованных в скорейшем получении доступа к возобновляемым источникам энергии.

Зарождающаяся океанская энергетика имеет ярко выраженный комплексный характер. Она непосредственно свя-

зана не только с традиционной энергетикой, но и с технологией освоения океана, с техникой судостроения и подводного строительства. Ее развитие невозможно без создания сложных инженерных сооружений как в прибрежных, так и в удаленных от берега районах океана. Поэтому, работая над книгой, автор прежде всего имел в виду потребности той группы читателей, которая занимается или интересуется разработкой техники для освоения океана. Задачу книги автор видел в том, чтобы обратить внимание на возможность получения энергии для обеспечения различных видов деятельности.

Книга написана в основном по материалам зарубежной печати, носит по большей части информационный характер. Широко использованы издания: ВИНТИ — реферативный журнал «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», экспресс-информация «Подводно-технические, водоплавающие и судоподъемные работы. Гидротехнические сооружения», материалы, периодически выпускаемые Тихоокеанским океанологическим институтом ДВНЦ АН СССР и центром научно-технической информации по энергетике и электрификации «Информэнерго».

В силу ряда причин многие актуальные вопросы в книге только обозначены: частично это связано с ограниченным объемом, частично с тем, что ситуация в океанской энергетике (а такой энергетике в полном смысле пока еще нет!) носит неустойчивый характер и изменяется буквально на глазах. По возможности опущены те вопросы, которые достаточно хорошо освещены в других доступных для широкого читателя изданиях. Это касается, например, описания вариантов приливных электростанций.

Автор приносит благодарность всем, кто так или иначе помогал ему в работе над книгой. Особую признательность он выражает кандидатам биологических наук В. С. Левину и Н. С. Мамушиной, взявшим на себя труд просмотреть и дополнить материалы по биологическим преобразователям энергии и экологии.

Отзывы о книге просим направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».

ЭНЕРГЕТИКА МИРА И РЕСУРСЫ ОКЕАНСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 1.1. Прогнозы энергетической ситуации

Современное потребление всех видов энергии в мире составляет примерно 10 млрд. т у. т./год *. Предполагается, что население Земли к концу XXI в. достигнет примерно 10 млрд. чел., произойдет увеличение энерговооруженности не менее чем в 5 раз (с учетом различных темпов для развитых и развивающихся стран) и потребуются по крайней мере 10-кратное увеличение потребления условного топлива.

В табл. 1.1 приведены два варианта расчета возможного потребления энергии в мире на ближайшее будущее, выполненные

Таблица 1.1

Масштабы современного и прогнозируемого на 2000 г. использования возобновляемых источников энергии в мире ¹

Источник энергии	Современное потребление, млрд. кВт·ч/год	Прогнозируемое потребление, млрд. кВт·ч/год
Излучение Солнца	2—3	2000—5000
Геотермальная энергия	55	1000—5000
Ветер	2	1000—5000
Приливы	0,4	30—60
Волны	0	10
Тепло океанов	0	1000
Биомасса (отходы сельскохозяйственного производства, сточные воды, бытовые отходы)	550—700	2000—5000
Древесное топливо	10 000—12 000	15 000—20 000
Гидроэнергия	1500	3000

¹ Сассин В. Грани перемен.— Курьер ЮНЕСКО, 1981, авг., с. 9—12, 34.

* 1 т у. т. (условного топлива) эквивалентна 7000 ккал или 30 МДж. С учетом среднего КПД современных энергетических установок в результате сжигания 1 т у. т. может быть получено примерно 5000 ккал или 20 МДж энергии.

Международным институтом прикладного системного анализа (МИПСА) и опубликованные в 1981 г. (Лаксенбург, Австрия). Здесь минимальный вариант получен из условия снижения темпов экономического роста, но по другим источникам он может быть реализован за счет экономии, перехода на менее энергоемкие технологии, отказа от расточительных технологий. При расчете максимального варианта занижены возможные темпы развития энергетики в различных регионах, особенно в развивающихся странах. Данные показывают, что в ближайшей перспективе основной упор будет делаться на традиционную энергетику, использующую ископаемое топливо, в том числе и ядерное.

В табл. 1.2 приведены результаты более долгосрочного прогноза, охватывающего следующее столетие. Характерно значи-

Таблица 1.2

Прогноз мирового потребления энергии, млрд. т у. т./год [28]

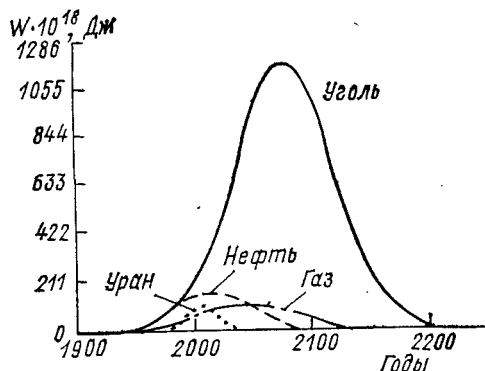
Вид ресурса	Год			Конец XXI в.
	1975	2000	2025	
Уголь	2,86 (32%)	5,6 (31,1 %)	8,7 (29 %)	4,3 (6,6 %)
Нефть, включая синтетическое топливо	3,87 (43,3%)	5,5 (30,5 %)	7,0 (23,3 %)	6,0 (9,2 %)
Газ, включая синтетический	1,56 (17,5%)	3,3 (18,3 %)	3,7 (12,3 %)	1,3 (2,0 %)
Ядерное топливо	0,15 (1,7%)	2,3 (12,8 %)	7,7 (25,7 %)	41,6 (64 %)
Возобновляемые ресурсы	0,49 (5,5 %)	1,3 (7,3 %)	2,9 (9,7 %)	11,8 (18,2 %)
Уголь, идущий на переработку в синтетический газ и жидкое топливо	—	0,25	—	3,2
Всего:	8,93 (100%)	18,0	30,0	65,0
В том числе в странах:				
развитых	7,23	12,5	16,9	19,5
развивающихся	1,7	5,5	13,9	45,5

тельное увеличение доли использования ядерного горючего и доли возобновляемых ресурсов. Такое перенесение акцентов диктуется необходимостью: в настоящее время в мировом балансе энергии 97 % потребностей удовлетворяются за счет невосполнимых ресурсов химического горючего, а его запасы не безграничны. Особенно это касается обычного топлива. По некоторым оценкам (не самым оптимистическим), мировых ресурсов ископаемого топлива даже при условии потребления на уровне 1978 г. хватит: нефти — на 30; природного газа — на 50; угля — на 200 лет.

Несколько лучше дело обстоит с запасами урана (достаточно на 500 лет), но в балансе 1978 г. он занимал всего 0,5 %. Правда,

с ядерным горючим дело обстоит все же лучше, чем с другими видами ископаемого топлива, в связи с тем, что уже известна технология его переработки, позволяющая за счет вовлечения в энергетику урана-238 в реакторах на быстрых нейтронах увеличить энергетический потенциал ядерного горючего. Сейчас же используют изотоп уран-235, запасы которого в 100 раз меньше. Повышения эффективности использования других видов ископаемого топлива более чем на единицы процентов ожидать не приходится.

Рис. 1.1. Прогнозные оценки истощения запасов W ископаемого топлива [35]



Большие надежды связывают с работами в области термоядерной энергетики, но если, предположим, через 20 лет энергию даст первый коммерческий термоядерный реактор, то пройдет еще не менее 20 лет, пока подобные установки начнут вытеснять другие. Кроме того, освоение этого вида ресурсов не только не снимет, но и поставит новые экологические проблемы, возникающие из-за огромных тепловых выбросов в окружающую среду при крупномасштабном развитии термоядерной энергетики. Эти же проблемы встанут и при увеличении доли ядерного горючего в балансе энергии. Кроме того, уже стоят проблемы захоронения отходов существующих атомных станций [35].

О темпах увеличения дефицита ископаемого топлива дает представление рис. 1.1, из которого следует, что необходимо развивать нетрадиционные методы преобразования энергии. К последним относятся термоядерный синтез, использование реакторов на быстрых нейтронах и некоторых преобразователей возобновляемых ресурсов энергии.

В концепции возобновляемых ресурсов энергии нет новизны: она возникла в глубокой древности. В течение последнего столетия возобновляемая энергия была оттеснена на второй план из-за появления более концентрированных природных же носителей энергии, но это не означает, что не происходило совершенствования методов ее использования, что не росли количественно показатели этого использования.

К нетрадиционным среди методов использования возобновляемых источников относится преобразование тепловой, волновой и

солёной энергии океана. Важно отметить, что Мировой океан служит природным посредником в усвоении, аккумулировании и переносе существенной части полученной от солнца энергии, и уже современный уровень развития техники и технологии позволяет принципиально изъять из него количество энергии, эквивалентное почти 100 млрд. т у. т./год, т.е. практически решить только за счет этого источника энергетическую проблему на ближайшее столетие [81].

На практике, конечно, будут изучаться все направления развития энергетики. Это позволит расширить диапазон источников, выбрать для различных районов планеты наиболее органично вписывающиеся и в природную среду, и экономическую структуру типы преобразователей энергии. В прогнозируемом на конец XXI в. энергетическом балансе 18% — это практически столько, сколько сейчас человечество вырабатывает энергии за счет невозобновляемых источников. И вероятно значительную долю этого количества возобновляемой энергии мир будет получать от океанских источников.

§ 1.2. Общий баланс возобновляемой энергии океана

Основная доля энергии, поступающей в Мировой океан — результат поглощения им солнечного излучения. Энергия поступает в океан также в результате гравитационного взаимодействия космических тел и водных масс планеты, создающего приливы, и поступления тепла из глубины планеты. Поверхность Мирового океана занимает около 70% поверхности всей планеты и составляет примерно 360 млн. км². Большая часть этой поверхности постоянно свободна ото льда и хорошо поглощает солнечное излучение. Достаточно сказать, что в видимой части спектра (длины волн от 400 до 700 мкм) коэффициент отражения гладкой водной поверхности меньше 5% при высоте Солнца от вертикали не более 40°, в то время как для поверхности суши и морского льда он равен при той же высоте Солнца 10 и 90% соответственно. Надо иметь в виду, что на видимый свет приходится максимум энергии излучения Солнца. Проникая в толщу океана, солнечное излучение поглощается, за счет чего происходит преобразование энергии излучения в тепловую энергию океана. В океанской воде примерно 65% солнечного излучения поглощается первым метром водной толщи и до 90% — десятиметровым слоем. В дневное время в низких широтах вода прогревается примерно на 10 м и более за счет процессов теплопроводности и турбулентного перемешивания (твёрдая поверхность суши прогревается не более чем на 0,5 м).

Запасённое океаном тепло частично в виде длинноволнового излучения ($\lambda > 10$ мкм) переизлучается, а частично передается в атмосферу теплопроводным пограничным слоем и вследствие испарения. Относительная роль этих процессов различна для раз-

ных районов планеты, но на широтах от 70° с. ш. до 70° ю. ш. характеризуется примерно одинаковыми значениями, % [9]:

Длинноволновое излучение в атмосферу и космическое пространство	41
Передача тепла атмосфере за счет теплопроводности	5
Потери на испарение	54

100

За счет движения воздушных и водных масс запасенная океаном энергия переносится по всей планете, причем в области между экватором и 70° с.ш. в среднем 40 % тепла переносится океанскими течениями, а на 20° с.ш. вклад океана в перенос энергии составляет до 74 %. Ежегодно с поверхности океана испаряется слой воды толщиной примерно 1 м (около $340 \cdot 10^{12}$ т) и около $36 \cdot 10^{12}$ т воды возвращается со стоком рек, ледников и т.п. Кроме того, океан пополняется осадками, выпадающими непосредственно на его поверхность. Обратная связь между океаном и атмосферой происходит не только через осадки, но и путем силового взаимодействия, в результате которого часть тепловой энергии, преобразованная в кинетическую энергию атмосферы, возвращается океану в виде энергии волн и ветровых течений. Существует и обратный тепловой поток от атмосферы к поверхности океана в районах, где температура поверхностных вод оказывается ниже температуры воздушных масс в приповерхностном слое.

Все эти процессы достаточно сложны, носят вероятностный характер, испытывают вековые, годовые, сезонные и суточные колебания. Поэтому при оценке количественных величин, описывающих перераспределения потоков энергии, обычно оперируют осредненными значениями. Оценка планетарного перераспределения первичной энергии, выполненная М. К. Хьюбертом [45], приведена на рис. 1.2, где хорошо прослеживаются процессы отражения солнечного излучения (коротковолновая радиация) и пути его трансформации в длинноволновое тепловое излучение (длинноволновая радиация). Примерно $\frac{2}{3}$ суммарного солнечного излучения испытывают в океане и на поверхности суши различные изменения: преобразуются в тепло, расходуются на испарение, образование осадков, сообщение энергии рекам, ветру, волнам, различным видам течений в океане. Примерно 0,02 % всей энергии воспринятого солнечного излучения идет на образование продукции фотосинтеза и частично на образование ископаемого топлива.

Соизмерим с этой величиной суммарный поток энергии, поступающей из недр Земли и в виде приливной энергии. Выделить из указанных потоков те, что непосредственно имеют отношение только к океану, достаточно трудно. Для этого необходимо использовать определенные допущения, часто довольно грубые, что делает оценки, приводимые различными авторами, противоречи-

выми. Со временем, конечно, надежность методов определения энергетических величин увеличивается, оценки становятся все более объективными. Но для энергетики важны не эти абсолютные

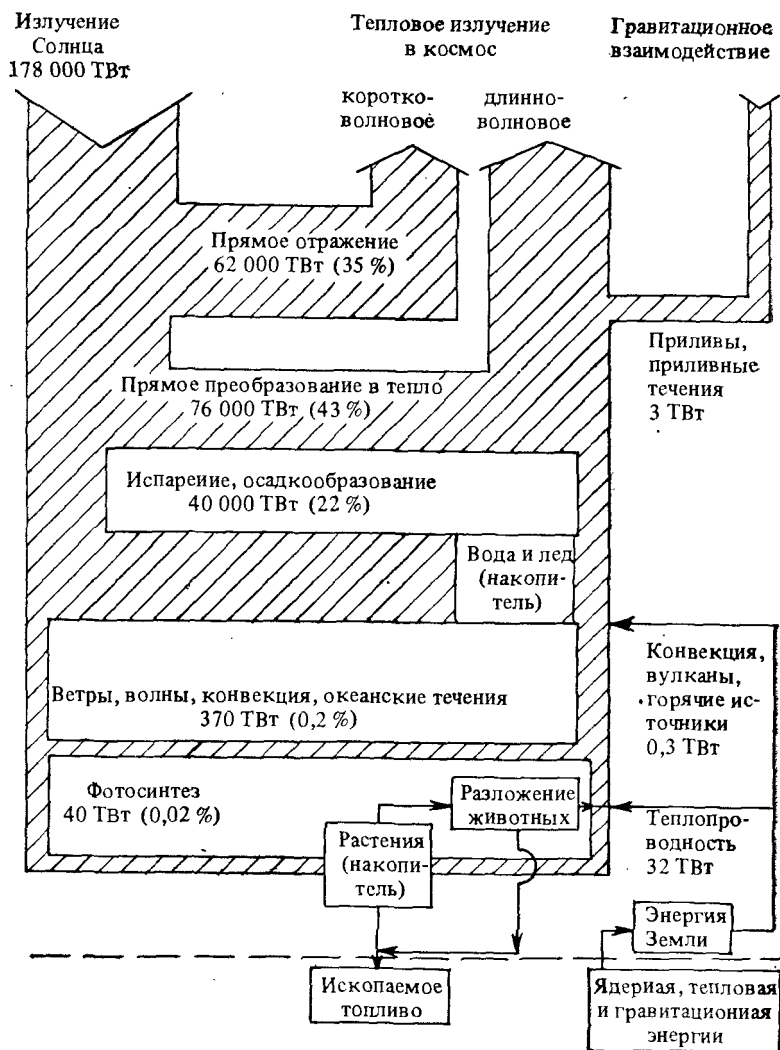


Рис. 1.2. Перераспределение первичной энергии в Мировом океане

величины мощностей различных источников, а лишь та их часть, которую можно преобразовать в требуемые для хозяйственной деятельности виды энергии. К трудностям оценки ресурсов добавляются трудности экологического, технического и экономического планов, социально-политического характера.

Не вдаваясь в детали, покажем только, как изменились оценки суммарных и допустимых для переработки мощностей различных океанических источников энергии, выполненные сотрудниками океанографического института Скриппса (США) за пять лет — с 1977 по 1982 г. Соответствующие данные приведены на диаграммах рис. 1.3, на которых отмечены два уровня — суммарный и допускающий преобразование (заштрихован). Более поздние оценки сделаны с учетом целого ряда технологических и экологических факторов. Они, как правило, в части допустимой к использованию энергии оказались ниже. Интересно отметить то

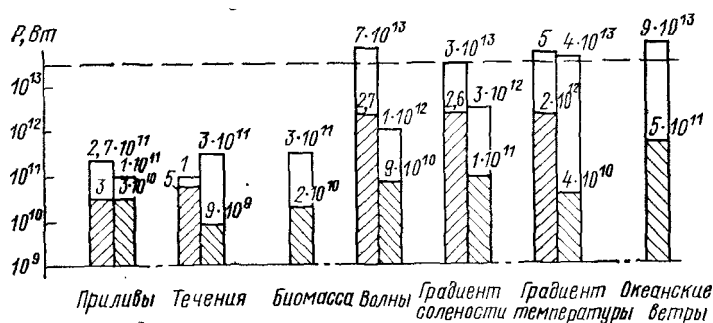


Рис. 1.3. Распределение океанских источников энергии по мощности (правые столбцы — по оценкам 1977 г. [89], левые — по оценкам 1982 г. [81])

обстоятельство, что если на первой диаграмме не рассмотрены океанские ветры и биоресурсы, то на второй они занимают важное место. При оценке возможностей приливной энергетики учтено, что работать на полную мощность ПЭС могут только в течение 30 % времени. Данные по океанским течениям получены с учетом 1 % допустимого замедления скорости течения (на первой диаграмме речь шла о 4 %-ном замедлении, но учитывались только Гольфстрим и Кurocио). При оценке возможностей энергетического использования продукции океанского фотосинтеза приняты во внимание 50 % эффективности преобразования бурых водорослей в метан и возможность размещения соответствующих ферм в 20 % районов естественного апвеллинга*. Для прибрежных волновых генераторов установлены КПД 50 % и время работы 40 % годового бюджета времени. КПД преобразования градиента солености принят равным 3 %, а градиента температур — 5 %, причем в последнем случае считается реальным разместить преобразователи на 2 % поверхности океана в тропической зоне. Для ветровых станций коэффициент преобразования энергии ветра принят равным 60 %, и допустимым уровнем изъятия мощ-

* Апвеллинг — подъем глубинных вод, богатых биогенными веществами, играющими роль удобрений.

ности считают 1 % мощности ветров, дующих на удалении от берега * [81, 89].

Немаловажны и такие «технологические» свойства океанских ресурсов энергии, как плотность энергии и стабильность источника энергии. Эти свойства определяют размеры будущих преобразователей, необходимые установленные мощности, режимы использования энергии. В табл. 1.3 эти величины характеризуются

Таблица 1.3

Сравнительные характеристики океанских источников энергии [4, 21, 81, 89]

Вид источника	Среднегодовая энергия, (кВт·ч/год · 10 ¹² *)		КПД пре- образования	Средняя плотность энергии, м** эквивалентного столба мор- ской воды	Стабильность источника, %
	всего	доступная для переработки			
Течения	40—70	0,4	75	0,01—0,05	75
Волны	600	25	90	1,5—5	35
Приливы	25	0,25	35	6—14	100
Перепады температур	25 · 10 ⁴	400	6	200—300	75
Перепады соленостей	250	20	25	240	100
Водоросли	125	1,25	35	3000	50
Ветер	20 · 10 ³	13	60	5—90	30

* Указано в тепловых единицах, современное потребление около 80 · 10¹² кВт·ч/год.

** Для гидроэлектростанций характерна величина 50—100 м вод. ст.

высотой эквивалентного столба морской воды, обладающего потенциальной энергией, которую может создать 1 кг той же воды [или воздуха для океанских ветроэлектростанций (ОВЭС)], использованный в качестве рабочего тела в преобразователе соответствующего вида ресурса (тепло, соленость, уровень, скоростной напор), и долей времени в процентах, в течение которого мощность источника остается постоянной (осредненные величины). Использование эквивалентного столба жидкости удобно для сравнения океанских преобразователей энергии с традиционными, например гидроэлектростанциями (ГЭС), обычно работающими при напорах 50—100 м (при распределении суммарной мощности ГЭС учитываются и напор, и расход жидкости).

§ 1.3. Ресурсы тепловой энергии

Преобразование тепловой энергии, запасенной океаном, в механическую энергию и далее в электроэнергию требует создания тепловой машины, тем или иным способом использующей естест-

* Приведенные цифры определяются техническими, экономическими и экологическими соображениями, которые для каждого типа преобразователя будут разъяснены в последующих главах.

венный 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 $\Delta T/T$, 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. [89]. Она базировалась на том, что в среднем по Мировому океану разность температур между поверхностью и глубинами примерно в 400 м составляет 12°C , лишь в некоторых районах вблизи экватора достигая 20°C . Считая в среднем, что разность температур в 12°C сохраняется на всей свободной ото льда поверхности площадью около $3 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$ в слое толщиной 100 м, общую тепловую энергию, присутствующую в океане в любой момент времени, можно оценить как $W = \rho v c_p \Delta T$, где ρ — плотность воды, кг/м^3 ; v — объем нагретых вод; c_p — удельная теплоемкость. Полагая $c_p = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, величина запасенной энергии $W = 15 \cdot 10^{23} \text{ Дж}$.

Воды океана находятся в постоянном движении. Средние скорости этого движения невелики и измеряются несколькими сантиметрами в секунду, так что круговорот вод происходит в океане за период, равный 1000 лет. В таком случае, возобновляемая мощность, которая постоянно должна поступать в океан, чтобы сохранить естественный перепад температур, оказывается равной $P = E/t = 50 \text{ ТВт}$. Но так как КПД цикла Карно для перепада 12° при поверхностной температуре 285 К примерно равен 4%, используемая для переработки часть тепловой мощности оказывается равной примерно 2 ТВт (см. рис. 1.3).

Более точные оценки требуют знания картины распределения температур и, вообще говоря, обоснованных технических решений, позволяющих реализовать приемлемые с экономической точки зрения коэффициенты преобразования энергии. Впрочем, при определении потенциальных возможностей теплового источника, вероятно, можно опираться на максимально допустимые значения, даваемые КПД цикла Карно и обеспечиваемые максимальными перепадами температур (около 24°), наблюдаемыми в приэкваториальных районах океана. Такая оценка будет максимальной, так как в ней не учитываются реальные КПД турбин, передаточных механизмов, генераторов, насосов холодной и теплой воды и т. п. [25].

О распределении перепадов температур на поверхности Мирового океана дает представление рис. 1.4. Карты показывают, что площадь зоны с постоянным максимальным перепадом температур не так уж велика и составляет примерно 20 млн. км^2 . 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 пере-

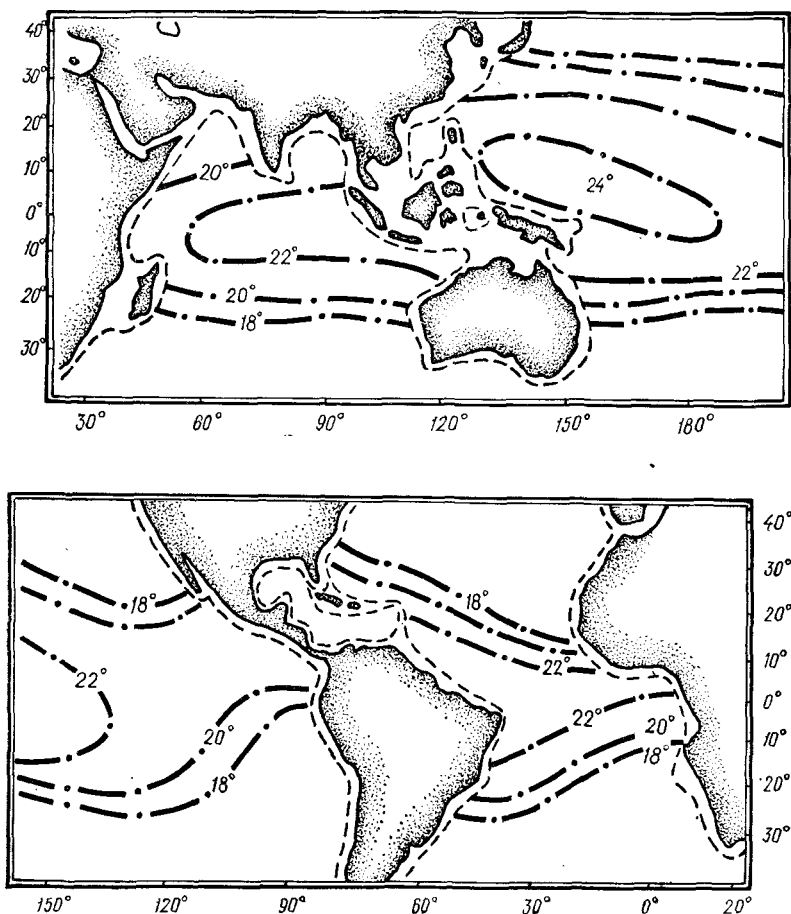


Рис. 1.4. Распределение перепадов температур в приэкваториальных зонах Мирового океана [1] (пунктиром отмечены глубины 1000 м)

мещения водных масс и поглощения солнечного излучения. Рис. 1.5 дает представление о том, какими сложными процессами сопровождается обмен энергией в толще океана. В то же время каждый конкретный преобразователь тепловой энергии «собирает» ее с определенной площади в темпе, обеспечить который могут только течения. В. А. Акуличев [1] приводит формулу для определения мощности единичного преобразователя (с линейным размером вдоль течения L), забирающего воду

с площади S при скорости течения u и необходимой глубине забора холодной воды H :

$$P = \rho c_p \Delta T S H u \eta_k \eta_L. \quad (1.1)$$

В этой формуле помимо КПД идеальной тепловой машины η_k учтен и КПД всех технических систем η_L , «участвующих» в преобразовании энергии, оцениваемый как 0,1—0,5. Вычисления показывают, что даже при минимальном η_k и перепаде температур, равном 10° , между поверхностным слоем и слоем, лежащим на

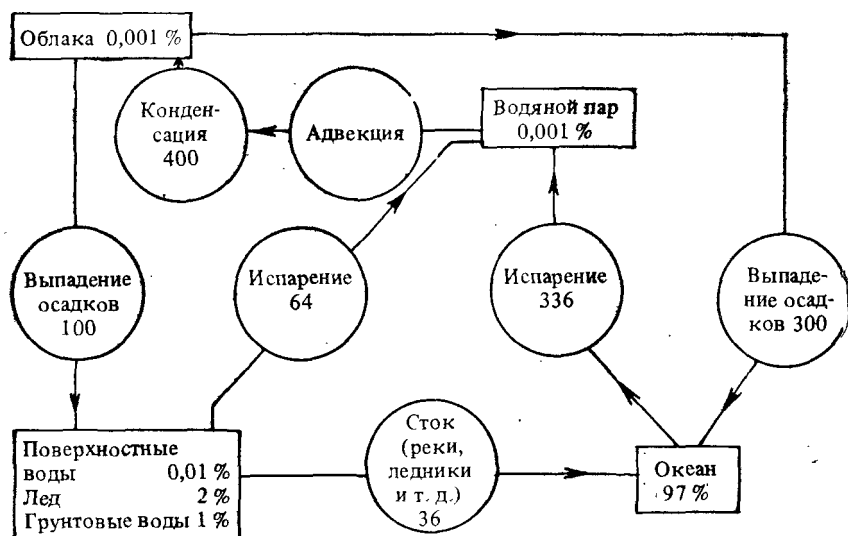


Рис. 1.5. Планетарный круговорот вод (расход в соответствующих процессах указан в 10^{12} т/год) [9]

глубине 1000 м, при $S = 1 \text{ км}^2$ и $u = 0,1 \text{ м/с}$ в принципе можно получить электрическую мощность около 10^3 МВт .

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 мес в году — температуры воздуха лежат ниже -20°C при относительно постоянных температурах воды подо льдом $+2$ — $+3^\circ\text{C}$. Расчеты показывают, что при таком перепаде каждый 1 м^3 морской воды, будучи пропущен за 1 с через преобразователь, позволяет получить около 10 кВт мощности при КПД установки 5 %. Однако нужно оговориться, что стабильность перепада воздух—вода значительно

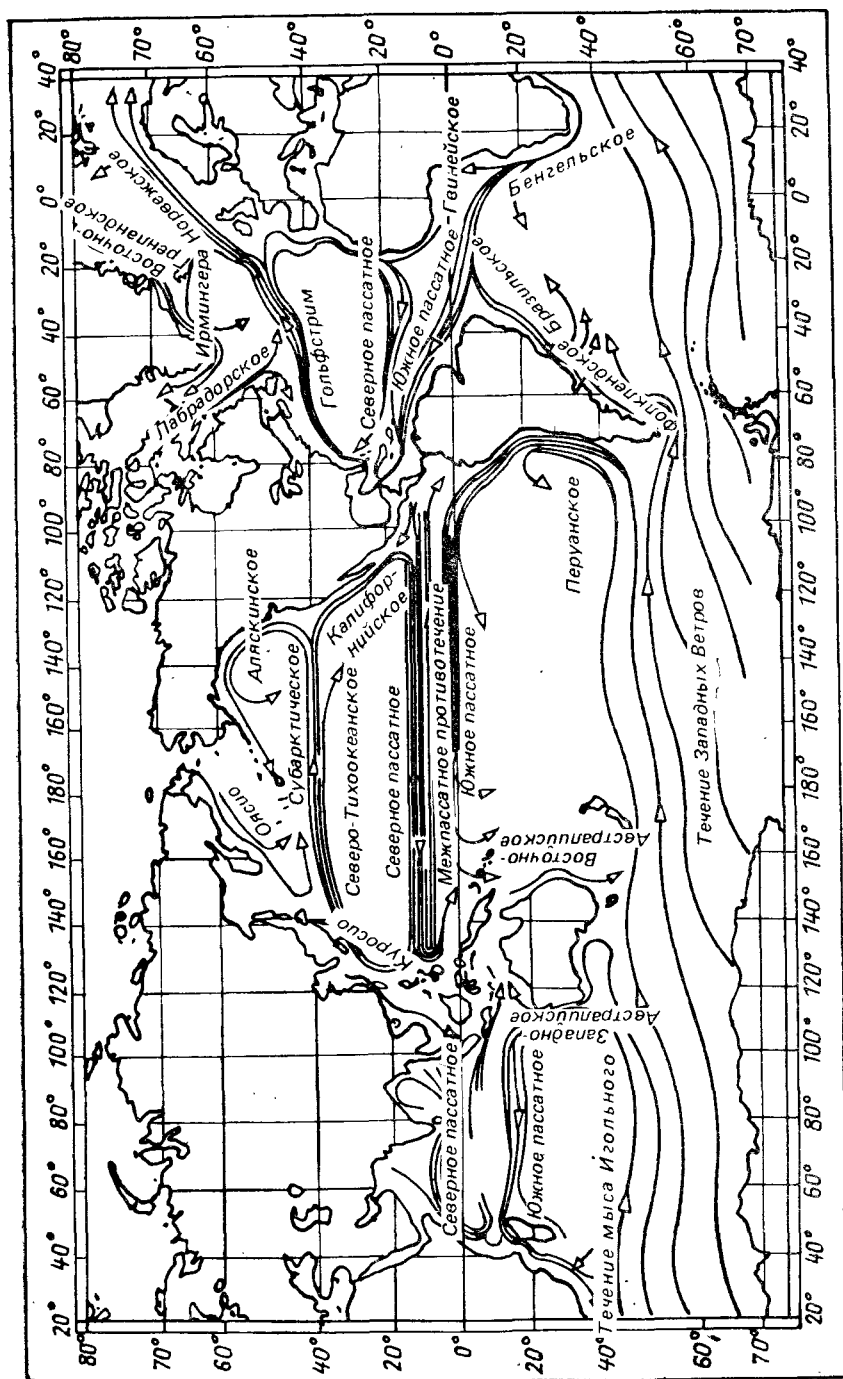
ниже, чем перепада вода—вода и вода—горные породы. Вероятно, последний перепад мог бы в какой-то мере стать эталоном стабильности для природного источника энергии, хотя этот по своей природе геотермальный источник можно отнести к возобновляемым с оговоркой о том, что ресурс геотермальных скважин из-за конечности теплопроводности горных пород ограничен 20—30 годами.

§ 1.4. Энергетический потенциал океанских течений

Из всех океанских источников течения характеризуются самой низкой плотностью энергии (величина эквивалентного их динамическому давлению столба жидкости равна всего 0,05 м при скорости 1 м/с и только 5 м при скорости 10 м/с). Без учета трудностей создания и обслуживания гигантских сооружений в толще океанских вод, необходимых для утилизации их кинетической энергии, они эффективнее, пожалуй, только преобразователей солнечной энергии в умеренных широтах, где с поверхности площадью 1 м² можно получить не более 100 Вт. С такой же площади в поперечном сечении океанского течения, имеющего скорость 1 м/с, можно получить около 600 Вт электрической мощности.

Только 0,02 % солнечной энергии, поступающей в Мировой океан, преобразуется в нем в кинетическую энергию течений, но и это достаточно внушительная величина: при мощности 5—7 ТВт она составляет примерно $60 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год (современное потребление энергии в мире составляет примерно $80 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год). Приблизительно 20 % этой энергии идет на преодоление сил трения, а остальное расходуется на перенос водных масс из одних районов Мирового океана в другие. В процессе этого переноса водные массы перераспределяют по планете избыток тепла, биогенных элементов, уменьшают концентрацию загрязнений в местах их поступления в океан, т.е. обеспечивают океану роль природного демпфера опасных отклонений жизненно важных показателей среды. Этот перенос идет с различными скоростями: от нескольких сантиметров до нескольких метров в секунду. Он происходит и по горизонтали и по вертикали, обеспечивая полный обмен водными массами между различными частями Мирового океана примерно один раз в 1000 лет.

Причины, вызывающие движение водных масс в океанах, различны. Здесь и действие сил, связанных с образованием градиентов давлений, и влияние ветров над океанской поверхностью, и приливы. В результате сложной связи этих факторов между собой, вращения Земли, взаимодействия образующихся потоков с неровностями дна и берегами в океане возникают совершенно удивительные по своим свойствам течения, в которых энергия концентрируется настолько, что становится оправданной разработка технических решений этого направления энергетики.



Если взять за эталон течения со средними скоростями порядка 1 м/с, то можно найти достаточно мест для размещения ОГЭС и в открытом океане, и вблизи берега (рис. 1.6). Особенно интересен в этом плане Атлантический океан (Гольфстрим, Северное пассатное, Бенгельское, Гвинейское, Бразильское течения). Менее интересен Индийский океан, хотя и обладающий большой суммарной кинетической энергией (Сомалийское и мыса Игольного течения, отроги течения Западных Ветров). В Тихом оке-

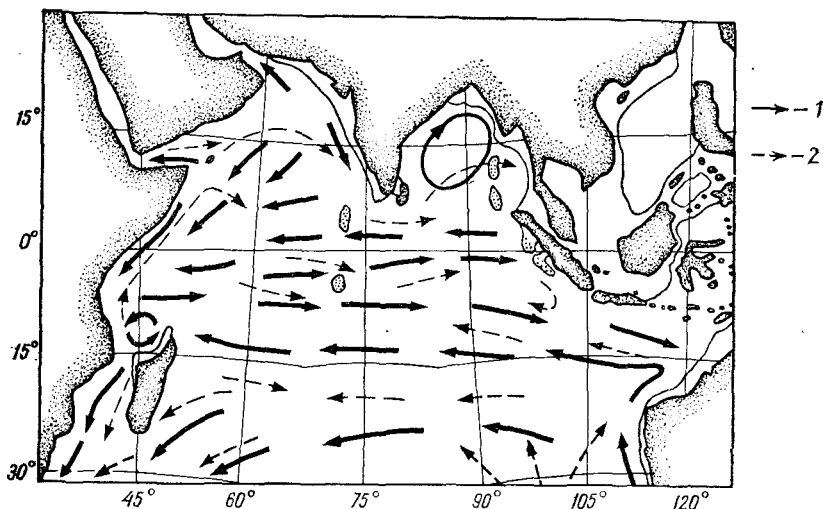


Рис. 1.7. Сезонные изменения направления течений в Индийском океане (по П. Вейлю).

1 — зимой; 2 — летом в северном полушарии

ане внимание привлекают Куро시오 и его ответвления. Надо отметить, что здесь перечислены только некоторые из Великих океанических течений, используя мощь которых принципиально возможно создать достаточно крупные региональные энергетические объекты (суммарная мощность Гольфстрима, например, оценивается в 15 ГВт, а Куро시오 — в 50 ГВт), но существуют еще и течения, вполне подходящие для решения задач местной энергетики. Укажем, например, постоянно действующие течения в Гибралтарском и Баб-эль-Мандебском проливах, приливные течения в Ла-Манше, между рядом островов Курильской гряды и другие течения, где скорости потоков достигают величин порядка 5—8 м/с, и, соответственно, плотности энергии значительно возрастают по сравнению со средними для крупных океанских течений. Причем, в проливах можно использовать для нужд энергетики не только поверхностные, но и глубинные потоки, часто имеющие противоположное поверхностным направление и также обладающие подходящими скоростями*.

* Толмазин Д. Океан в движении. Л., 1976.

Практически все течения подвержены каким-то изменениям. Сезонно и из года в год изменяются скорости, направления, физические параметры вод. Устойчивость потоков будет определять стабильность работы будущих ОГЭС, и для энергетики, вероятно, особенно интересны те течения, устойчивость которых превышает по крайней мере 50 % *. У всех из перечисленных выше течений этот показатель близок к 75 % (рис. 1.7). Исключение составляет Сомалийское течение, в летние месяцы изменяющее направление движения на противоположное. Средние сезонные колебания расхода воды в Гольфстриме, например, составляют 15—20 % от наибольшего значения, правда, иногда отмечаются и большие колебания (величиной до 50 %). Более стабильно Куросио (10—15 % колебаний расхода), но в отдельные годы и в нем наблюдались изменения скорости и расхода воды в 50—60 %.

§ 1.5. Использование энергии ветра и волнения

Возникновение ветров — следствие неравномерности прогрева поверхности океанов и суши. Волны — результат рассеивания части энергии ветров при взаимодействии с океанской поверхностью. Полная кинетическая энергия атмосферы оценивается в 10^{21} Дж, что примерно на два порядка больше, чем такая же суммарная величина для кинетической энергии Мирового океана в целом (см., например, работу [28]). Суммарная мощность этого источника возобновляемой энергии оценивается примерно в 2700 ТВт, причем в приповерхностном слое атмосферы толщиной 100 м сосредоточено лишь 25 % указанного количества. Для поверхности суши с учетом различных видов потерь и реальной возможности размещения ветровых энергоустановок (ВЭУ) указывается цифра 40 ТВт, но даже 10 % этой величины превышает весь гидроэнергетический потенциал суши. Для ветров, дующих в открытом море там, где глубины позволяют размещать ВЭУ, в литературе приводится значение мощности 20 ТВт, почти на $\frac{1}{3}$ увеличивающее общий ветроэнергетический потенциал.

При определении потенциалов конкретных географических районов принято исходить не из общих теоретических оценок, а из данных наблюдений за достаточно длительное время скоростей и направлений преобладающих ветров. Такие оценки для США, например, указывают на возможность выработки ежегодно до 10^{12} кВт·ч электроэнергии (примерно половина выработки по уровню 1980 г.) [3]. Эта величина, вероятно, может быть существенно увеличена, если принять во внимание возможности океанской ветроэнергетики, которая в указанной работе не учитывалась. К такому же эффекту может привести использование в расчетах большей величины толщины «продуктивного» слоя ат-

* Скорость течения и расход воды не падают ниже какой-то средней величины в течение 50 % времени.

мосферы подобно тому, как это сделали наши специалисты при оценке возможностей использования энергии ветра в СССР [20]. Приняв во внимание ряд технических и экологических ограничений, присущих современному уровню развития ветроэнергетики, задавшись толщиной «продуктивного» слоя, равной 500 м, при размещении ВЭУ в узлах сетки 20×20 км, они получили, что среднегодовое количество энергии при этом достигло 3×10^{13} кВт·ч/год при потенциальной мощности ветроэлектростанций в $15 \cdot 10^{12}$ Вт (15 ТВт).

Отмечается, что суммарная мощность ГЭС в нашей стране на конец 1982 г. составила $5,5 \cdot 10^{10}$ Вт при годовой выработке электроэнергии $1,8 \cdot 10^{11}$ кВт·ч/год. Гидравлический потенциал рек СССР оценивается в $2,1 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год, что примерно в 15 раз ниже доступного ветрового потенциала. По оценкам В. И. Сидорова [27] на территории страны могут быть условно выделены три зоны — северная, южная и юго-восточная, где постоянно дующие сильные ветры позволяют рассчитывать на развитие ветроэнергетики. Северная зона, включающая побережье Северного Ледовитого океана от Кольского п-ова до Камчатки площадью 6 млн. км², обладает потенциальной мощностью до 180 кВт и может обеспечить выработку до 540 ТВт·ч/год электроэнергии. Южная (Азово-Черноморская) площадью 0,5 млн. км² — 15 ГВт и 45 ТВт·ч/год, юго-восточная (Аральско-Каспийская) площадью 2 млн. км² — 60 ГВт и 180 ТВт·ч/год соответственно. Эти расчеты выполнены с учетом толщины приземного слоя в 200 м, причем учтена только сотая часть суммарной мощности ветров на площади 8,5 млн. км² (общая мощность ветров составляет 25,5 ТВт в этих зонах). Подобные оценки постоянно уточняют, к потенциальным районам по мере увеличения интереса к ветроэнергетике подключают все новые. Например, энергетики Эстонской ССР считают, что потенциал только прибрежных районов республики и ее островов в Балтийском море составляет несколько миллионов киловатт с возможной годовой выработкой электроэнергии от 17 до 35 ТВт·ч. Применение ВЭУ здесь позволит экономить от 7 до 14 млн. т у. т./год при вполне приемлемой стоимости энергии 0,3—0,4 коп./кВт·ч. Более детальное представление о ветровом потенциале прибрежных районов нашей страны можно получить по работе [12].

Примерно также обстоит дело с оценкой волнового потенциала. Суммарная энергия волн составляет доли процента от энергии ветров. Мощность источника оценивается примерно в 3 ТВт. В Мировом океане участки с достаточно стабильным по мощности волнением встречаются редко. Выполнение оценок для конкретных районов требует длительных наблюдений, в целом по океану этих наблюдений еще не достаточно. Можно сказать, что сейчас наиболее изучено Северное море (в нем ведется интенсивная добыча нефти и газа) и вообще Северная Атлантика. Обычная волна в достаточно бурном Северном море обладает мощностью около 40 кВт на метр гребня в течение 30 % времени существо-

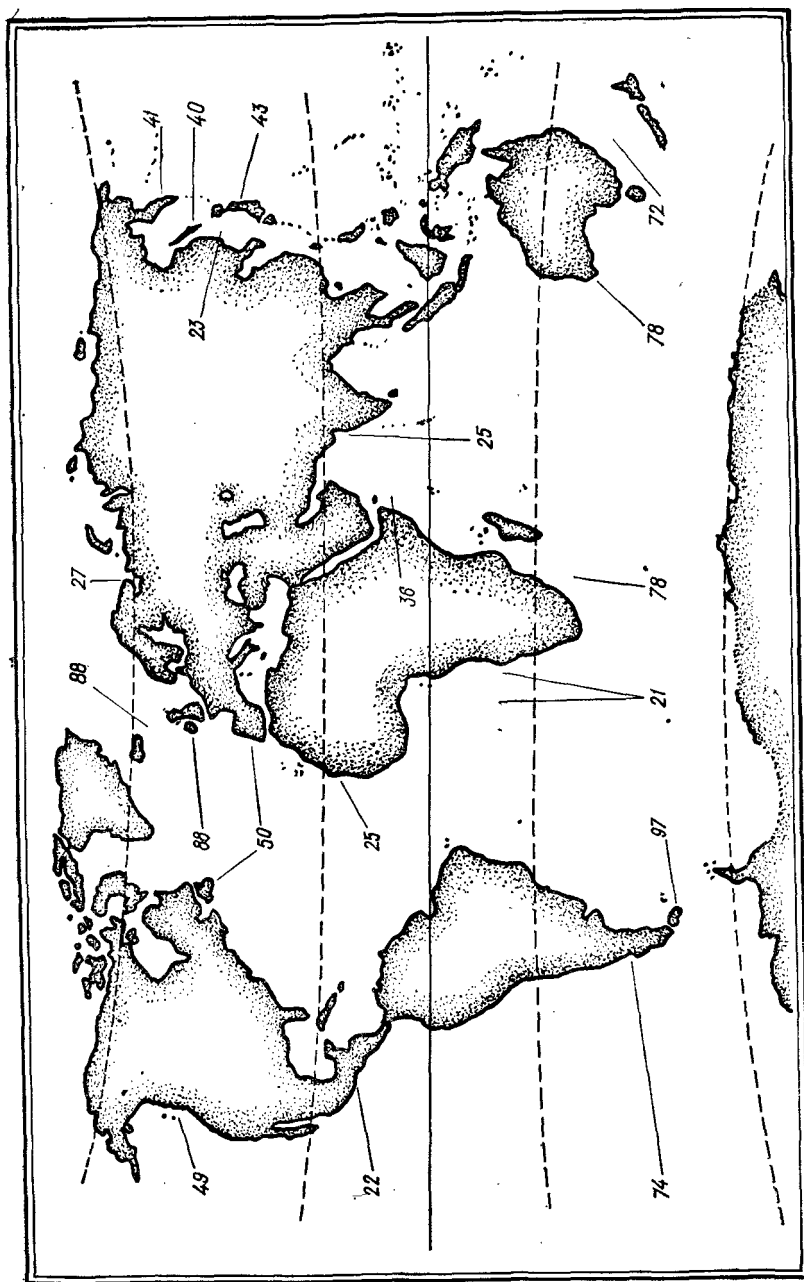


Рис. 1.8. Усредненные потоки волновой энергии в различных районах Мирового океана (указана средняя мощность, приходящаяся на 1 м гребня волны, кВт/м) [15, 45]

вания и примерно 10 кВт/м в остальные 70 % времени. Среднегодовой энергетический потенциал волн Западного побережья Великобритании по результатам обработки данных четырех станций, расположенных в 30—40 км от берега, за период 7—14 лет изменяется в пределах 31—44 кВт/м. Однако для точной оценки потенциала волнения кроме усредненных характеристик мощно-

сти важны еще спектральные и пространственные (направление прихода) характеристики. Поэтому простые оценки с помощью известного соотношения вида

$$P = 0,25 \rho g H^2 u L, \quad (1.2)$$

где H — высота волн; u — скорость распространения; L — характерный горизонтальный размер преобразователя, оказываются лишь примерными, пригодными только для решения вопроса о том, стоит ли в принципе заниматься в изучаемом районе преобразованием энергии волн. Кроме того, подобные удельные характеристики не дают полного представления о возможности получения энергии на всей акватории [21].

Для морей, омывающих берега нашей страны, Г. В. Матушевский методом осреднения элементов волн с учетом обеспеченности по сезонам полу-

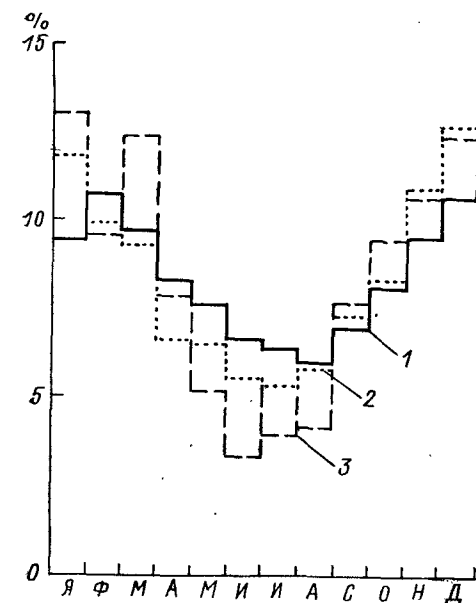


Рис. 1.9. Сопоставление относительных сезонных потребностей (1) в энергии и возможностей океанских источников ветра (2) и волнения (3) для северных районов Великобритании в течение года [66]

чены следующие удельные мощности: Берингово — 15—44, Баренцево — 22—29, Японское — 21—31; Охотское — 12—20, Каспийское — 7—11, Балтийское — 7—8, Черное — 6—8 кВт/м. Эти оценки позволяют сделать вывод о том, что наиболее удобны для развития волновой энергетики в нашей стране Баренцево и Японское моря. Для различных участков Мирового океана усредненные данные по запасам волновой энергии приведены на рис. 1.8.

Определение потенциальных возможностей океанских ветров и волн невозможно без изучения их сезонной и суточной изменчивости. Нестационарность характера таких природных явлений — одно из серьезных препятствий на пути развития системной энергетики, основанной на этих ресурсах. Правда, и это подтверждает рис. 1.9, в ряде случаев по крайней мере сезонные потребности энергосистем и потенциальные возможности источников находятся в достаточно хорошем соответствии.

§ 1.6. Ресурсы приливной энергии

Приливы — результат гравитационного воздействия космических тел на водные массы планеты. Наибольшую роль в этом воздействии играет Луна, менее значительную — Солнце. Соответственно, период колебаний приливной силы, вызывающей наибольшие изменения уровня воды, пропорционален продолжительности периода обращения Луны вокруг Земли, равного примерно 25 ч. На планете наблюдаются полусуточные приливы с периодом около 12 ч 30 мин, суточные приливы, смешанные приливы. Для последних, как и для первых, характерны подъемы воды дважды в сутки, однако величины подъемов значительно отличаются. Океанологи выделяют еще и аномальные приливы, при которых четкое чередование периодов наступления высокой и малой воды нарушается, цикличность становится функцией времени.

Основной фактор, влияющий на величину подъема уровня поверхности воды в океане, — взаимное положение Луны, Солнца и Земли. Сизигийные приливы, возникающие, когда Солнце и Луна находятся на одной прямой с Землей либо с одной стороны от нее, либо по разные стороны, примерно на 20 % превышают норму. Квадратурные приливы, действующие, когда Земля находится в вершине прямого угла между направлениями от Земли на Луну и Солнце, отличаются тем, что они на 20 % ниже обычных. Изменение расстояния между Луной, движущейся по эллиптической траектории, и Землей приводит к тому, что в перигее прилив становится примерно на 20 % выше обычного, а в апогее — совпадение квадратурного и апогейного приливов дает противоположный эффект — полную воду примерно на 40 % ниже нормы. Однако случается такое достаточно редко.

Прилив — волновое явление. Типичный период приливной волны — 12 ч 25 мин. Длина волны зависит от глубины бассейна (длинная волна, амплитуда которой мала по сравнению с длиной) и определяется как $\lambda = c/T$, где $c = (gh)^{0.5}$ — скорость движения волны; T — период; h — средняя глубина бассейна. При средней глубине 4000 м скорость распространения волны оказывается равной 200 м/с, а длина волны — 8600 км. Такая длина волны по порядку величины соответствует расстояниям между континентами, ограничивающими океаны [18]. Однако любой океан не является единым водным бассейном по отношению к происходящим в нем колебательным процессам. Сложный рельеф берегов и подводные хребты разделяют Мировой океан на 45 главных бассейнов, каждый из которых имеет свой собственный период колебаний. Если этот период равен или кратен периоду приливной волны, в бассейне наблюдается усиление приливных колебаний. В противном случае, величины приливов оказываются незначительными. Интересно отметить, что большинство районов, где планируется строительство приливных электростанций, характеризуется почти правильными полусуточными приливами, и основные гармонические составляющие приливооб-

разующих сил проявляются в течение лунного месяца (29,5 суток).

В открытом океане приливы практически не ощущаются. Проявляются они лишь у побережья, где приливная волна выходит на мелководье. Характерными для Атлантического побережья, например, являются подъемы уровня воды на 1—3 м. В узких же морях, в пределах вытянутых эстуариев рек и широких материковых отмелей часто наблюдается значительное увеличение высоты подъема воды, причем последняя увеличивается примерно пропорционально корню четвертой степени из глубины и корню квадратному из ширины бассейна. К повышению высот приводят и локальные резонансы. Совокупность различных причин позволяет наблюдать в некоторых районах приливы величиной до 16 м.

Приливы графически изображаются с помощью котидальных и амплитудных карт. Первые показывают время наступления максимума для каждой приливной волны, их изолинии отмечаются римскими цифрами, соответствующими времени, отсчитываемому в лунных часах от момента прохождения Луны через Гринвичский меридиан. Вторые дают представление о величинах приливов. Часто эти карты совмещают подобно тому, как это сделано на рис. 1.10, характеризующем картину приливов в Ла-Манше и Северном море. Одна из особенностей распространения приливной волны в этом районе — наличие трех амфидромических точек, в которых сходятся котидальные линии и не происходит подъема уровня воды.

Сложность явления, определяемая колебательным характером прилива, астрономическими, географическими, геодезическими факторами, особенностями океанской циркуляции и погодными условиями, затрудняет расчет приливов в конкретных районах. Однако, имея данные наблюдений за 3—5 лет (а для предварительного анализа даже за 14 суток) и воспользовавшись методами гармонического анализа, сведения о времени и величине прилива можно получить с достаточной точностью (см., например, работу [10]).

Данные о величине прилива позволяют оценить энергию, переносимую приливной волной в рассматриваемый район. Строгая периодичность явлений при правильном полусуточном приливе позволила Л. Б. Бернштейну [5] предложить для этого простую и достаточно точную формулу, согласно которой величина приливного потенциала бассейна $W_{\text{пот}}$, кВт·ч в зависимости от его площади A , км² и средней величины прилива $H_{\text{ср}}$, м находится по формуле

$$W_{\text{пот}} = 1,97 \cdot 10^6 H_{\text{ср}}^2 A. \quad (1.3)$$

Для практических оценок более интересна величина так называемого технического потенциала бассейна — той энергии, которая может быть в нем получена в помощью ПЭС конкретного типа. Если в предыдущей формуле заменить численный множи-

тель на $0,64 \cdot 10^6$, то с ее помощью можно определять технический потенциал однобассейновой ПЭС двухстороннего действия при условии работы на максимум выработки энергии и при реальном значении КПД турбин.

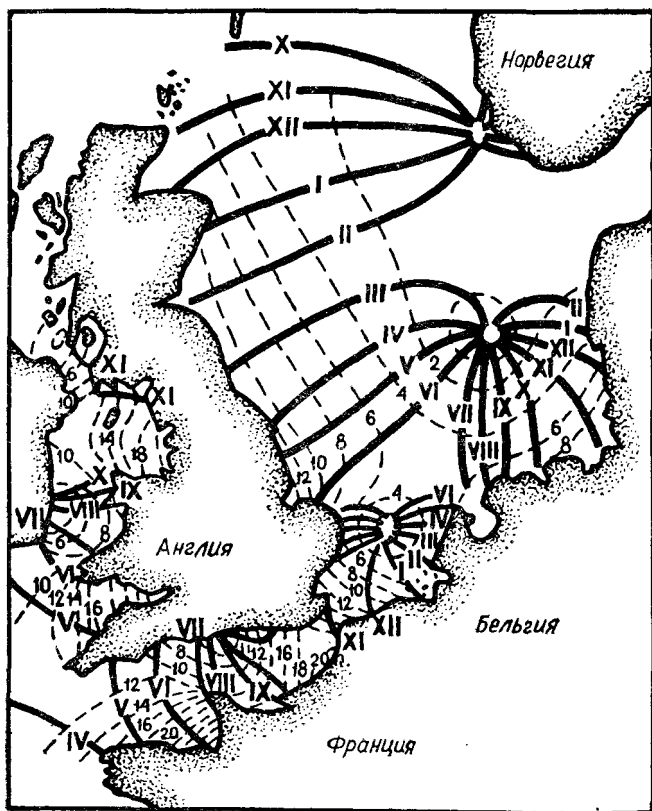


Рис. 1.10. Карта приливов в проливе Ла-Манш и Северном море [18].

— линии в лунных часах (1 лунный час = 1 ч 02 мин солнечного времени), отсчитываемых после момента прохождения Луны через Гринвичский меридиан; --- линии одинаковой амплитуды среднего прилива

Подобные зависимости пригодны только для предварительной оценки возможностей изучаемых районов, так как в них используются средние величины параметров, не учитываются эффекты, связанные с отражением приливной волны от плотины и ряд других обстоятельств.

В ряде случаев бывает интересно оценить мощность приливного течения в достаточно узких проливах. Эта величина P , Вт может быть оценена по формуле

$$P = 0,125 \rho H_{cp}^2 g l (gh)^{0,5}, \quad (1.4)$$

где l — ширина пролива; h — его средняя глубина. Эта же формула справедлива для приближенной оценки мощности течений в достаточно узких заливах, характеризующихся режимом бегущей волны. Например, для приливного течения в Тугурском заливе Охотского моря эта формула дает величину примерно равную 2 МВт, а в Пенжинской губе того же моря — около 14 МВт [1].

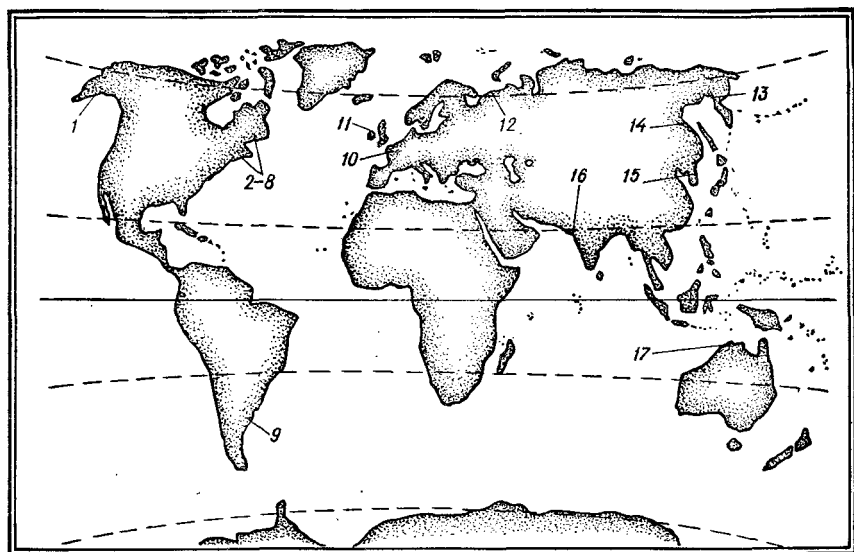


Рис. 1.11. География районов максимальных приливов (наименования см. в табл. 1.4) [21, 41]

Общая мощность Мирового океана может быть оценена по величине рассеяния приливной энергии. Английский геофизик Г. Джеффрис показал, например, что более половины всей их энергии расходуется на трение о дно в мелководных прибрежных морях (в Беринговом море до 70 %). Составляет эта величина примерно $10 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год (10000 ТВт·ч/год) при мощности порядка 1 ТВт. Последняя цифра у разных авторов колеблется в пределах от 1 до 4.

Существуют ограничения в использовании этой энергии. Прежде всего, на планете не так уж много мест, где строительство ПЭС было бы целесообразным. Поэтому суммарная мощность реальных станций оценивается примерно в 200 ГВт при годовой выработке электроэнергии около 700 млрд. кВт·ч/год. По масштабам прогнозируемого в следующем веке потребления энергии (см. табл. 1.1) это всего несколько процентов, но даже такая величина встречает возражения. Дело в том, что приливное трение «отвечает» за постоянное замедление вращения Земли вокруг своей оси. По оценкам, основанным на изучении характерных колец роста кораллов, 400 млн. лет тому назад скорость вра-

Некоторые районы возможного строительства ПЭС [3, 5, 21, 41]

Местонахождение (см. рис. 1.11)	Средняя величина прилива, м	Возможная годовая выработка энергии, ТВт·ч	Местонахождение (см. рис. 1.11)	Средняя величина прилива, м	Возможная годовая выработка энергии, ТВт·ч
Северная Америка (США, Канада):			Европа:		
1. Залив Кука:			10. Шозе (Франция) *	8,4	23,0
Ник Арм	8,4	4,0	Котантен (Франция) *	8,0	120,0
Тэриегейн Арм	8,4	12,5	11. Северн (Великобритания)	9,8	14,7
2. Пассамакводи	5,5	2,1	Солуэй-Ферт (Великобритания)	5,1	10,0
3. Кобсук	5,5	6,3	12. Мезенский залив (СССР)	6,7	50,0
4. Минас—Кобекуид	10,7	50,0	Азия:		
5. Кобекуид	11,8	12,7	13. Пенжинская губа (СССР)	6,2	300,0
6. Шеподи	9,8	5,4	14. Тугурский залив (СССР)	6,0	25,0
7. Камберлейд	10,1	3,4	15. Гароим (Южная Корея)	5,0	3,4
8. Птикодник	10,7	7,0	16. Камбейский залив (Индия)	6,8	15,4
Южная Америка:			Австралия:		
9. Сан-Хосе (Аргентина)	5,9	11,5	17. Сев.-Зап. побережье	7,5	32,0
Нуво—Сан-Хосе *	5,9	9,0			

* По варианту, предложенному Л. Б. Бернштейном.

щения планеты была примерно в 1,1 раза больше, а земной год насчитывал более 400 суток. Увеличение приливного трения за счет значительного использования энергии приливов может привести к существенному изменению скорости вращения Земли в течение недопустимо короткого в геологическом отношении времени. В связи с этим в табл. 1.3 указана примерно в 3 раза уменьшенная величина возможного преобразования приливной энергии. Впрочем, все приводимые здесь оценки продолжают уточняться.

В табл. 1.4 приведены данные по некоторым створам, где возможно строительство ПЭС, а на рис. 1.11 — местоположение этих створов. Интересно отметить, что почти 50 % годовой выработки перечисленных электростанций может быть получено в морях, омывающих берега нашей страны. В настоящее время здесь ведутся изыскания с целью обоснования возможного строительства. Аналогичные работы ведутся почти по всем перечисленным в табл. 1.4 створам.

Вопросам строительства ПЭС самых различных масштабов от гигантов гидроэнергетики (Пенжинская ПЭС) до небольших установок, предназначенных для обеспечения отдельных потребителей, посвящено большое число работ (см., например, [5, 15, 24, 34, 51, 53, 85]). Кроме того, издательство «Энергоатомиздат» выпускает в 1986 г. под редакцией Л. Б. Бернштейна книгу «Приливные электростанции», излагающую современный взгляд на состояние проблемы использования приливной энергии. К указанным работам мы и отсылаем читателей, заинтересовавшихся приливной энергетикой.

§ 1.7. Потенциал энергетики на растворении пресных вод в океане

Этот вид возобновляемых энергетических ресурсов, пожалуй, самый экзотический, и по времени разработки самый молодой: первые технические идеи относятся только к 70-м гг. нашего века. Возобновление этого вида ресурсов связано с преобразованием части тепловой энергии океана при испарении воды с его поверхности. На это, как уже отмечалось, расходуется около 54 % общего баланса энергии, поступающей от Солнца. При попадании пресной воды в виде осадков и речного стока обратно в океан в процессе смещения с солеными водами выделяется энергия, практически пропорциональная величине изменения энтропии системы пресные — океанские воды, являющейся мерой упорядоченности этой системы. Само изменение энтропии — явление ненаблюдаемое, поэтому, например, в устьях рек не происходит заметных проявлений выделения дополнительной энергии. Определить энергию растворения можно, найдя предварительно величину равновесного осмотического давления, возникающего на тонкой пленке, разделяющей пресную и океанскую воды и обладающей способностью пропускать только молекулы воды. Проникновение молекул H_2O продолжается до тех пор, пока давление столба раствора не уравновесит осмотическое давление, в результате чего и установятся равновесные условия между раствором и растворителем.

В случае растворения в объеме V некоторого количества молей вещества (масса m , молекулярная масса μ) равновесное значение осмотического давления определяют из соотношения

$$\Pi = [1 - \alpha(k - 1)] \frac{mRT}{\mu V}, \quad (1.5)$$

где α — степень диссоциации молекул растворимого вещества; k — число ионов, образующихся при диссоциации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура, К. При сложном составе раствора осмотическое давление определяется как сумма парциальных давлений, создаваемых всеми входящими растворимыми компонентами с их собственными μ , k , α .

Величина равновесного осмотического давления характеризует максимальную плотность энергии, соответствующую градиенту концентрации между растворителем и раствором. Для морской воды с соленостью 35 ‰ осмотическое давление оказывается равным примерно $24 \cdot 10^5$ Па (240 м вод. ст.) и по величине близко к средней плотности энергии температурного градиента в океане. В свою очередь, равновесное значение полной энергии растворения, связанной с круговоротом воды в природе, определяется суммарной величиной испаряемой ежегодно и вновь возвращающейся в океан массой воды. Средняя величина мощности источника равна в этом случае произведению среднего осмотического давления ($24 \cdot 10^5$ Па) на среднемассовый расход Q при испарении с океанской поверхности (около $1,2 \cdot 10^7$ м³/с) $P = \Pi \cdot Q = 30$ ТВт. Вероятно, технически может быть использована только часть этой мощности, связанная с речным стоком, составляющим примерно $1,1 \cdot 10^6$ м³/с, что и дает величину 2,6 ТВт, соответствующую таблице, приведенной в работе [89]. Но эта оценка не окончательная. В более поздней работе В. Шмитта [81] указывается цифра в 30 раз меньшая — $9 \cdot 10^9$ Вт. Возможно, такое снижение потенциальной мощности связано с появившимися в литературе оценками КПД преобразования соленостной энергии, лежащими по различным данным в диапазоне от 3 до 20 %. Наибольшая величина относится к тем районам Мирового океана, где существуют водоемы с большими, чем средние, концентрациями солей (Мертвое море, соленость до 260 ‰, зал. Кара-Богаз-Гол, соленость до 300 ‰*), поддерживаемыми за счет усиленного испарения воды с поверхности.

Если со временем окажется рентабельным использовать различные варианты устройств для преобразования энергии растворения, то возможности океанских источников могут быть расширены за счет использования запасов солей в солевых куполах, служащих сейчас естественными хранилищами нефти. Много таких куполов обнаружено, например, вдоль побережья Мексиканского залива, где идет интенсивная добыча нефти в море (рис. 1.12). Оценки, выполненные Г. Виком и Дж. Айзексом [21], показывают, что при среднем содержании соли в куполе примерно $7 \cdot 10^9$ т и при 100 %-ной эффективности преобразования можно рассчитывать на получение количества энергии, эквивалентного переработке 22 млн. т у. т., в то время как запас нефти в таком куполе соответствует примерно 14 млн. т у. т. Таким образом, после исчерпания запасов нефти в подобных структурах человечество может в принципе получить новый и не менее емкий источник энергии.

В нашей стране значительное количество соленостной энергии «бесполезно» выделяется в дельтах ряда рек, впадающих в связанные с океаном моря, например Амур, имеющий средний сток около 11 тыс. м³/с. При использовании 10 % этого стока

* До строительства в 1979 г. плотины, отделяющей залив от Каспийского моря.

и КПД 20 % вырабатываемая энергия эквивалентна энергии электростанции мощностью примерно 2000 МВт. В будущем можно получить и энергию от преобразования стока вод Каспийского моря в залив Кара-Богаз-Гол, где для поддержания естественного режима солености необходим приток солоноватой (около 13‰) морской воды с расходом около 8 тыс. м³/с.

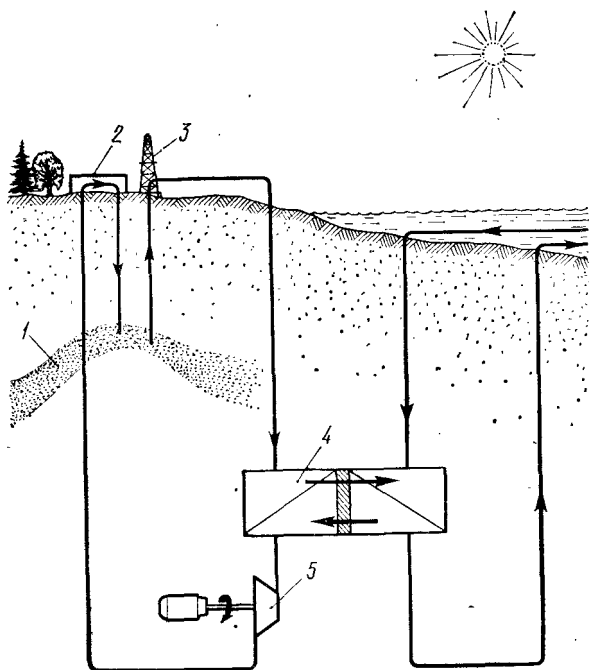


Рис. 1.12. Схема использования энергии солевых куполов [63].

1 — солевой купол; 2, 3 — насосные станции; 4 — осмотический преобразователь; 5 — турбина с электрогенератором

В настоящее время созданы и испытаны лабораторные макеты ряда промышленных энергоустановок, преобразующих градиент солености. С учетом реальных значений коэффициента преобразования энергии градиента солености, который, как уже упоминалось выше, равен примерно 3 %, возможности этого источника энергии оказываются сравнимыми с возможностями теплового градиента океанских вод при примерно равной плотности энергии [21]. Однако техническая проработка различных аспектов проблемы преобразования градиента температур примерно на 10 лет опережает таковую для градиента соленостей. И если ОТЭС в мире находятся уже в стадии промышленного эксперимента, то океанские электростанции на градиенте соленостей (СоленЭС) лишь в стадии лабораторного эксперимента.

§ 1.8. Перспективы использования биомассы

Ежегодно за счет фотосинтеза в природе преобразуется в органическое вещество примерно $8 \cdot 10^{10}$ т углерода, содержащегося в атмосфере и в океане. Это соответствует возможному высвобождению тепловой энергии $3 \cdot 10^{21}$ Дж, что почти в 10 раз выше современного уровня ее потребления. Органическое вещество частично составляет биомассу растений суши, почвенный гумус,

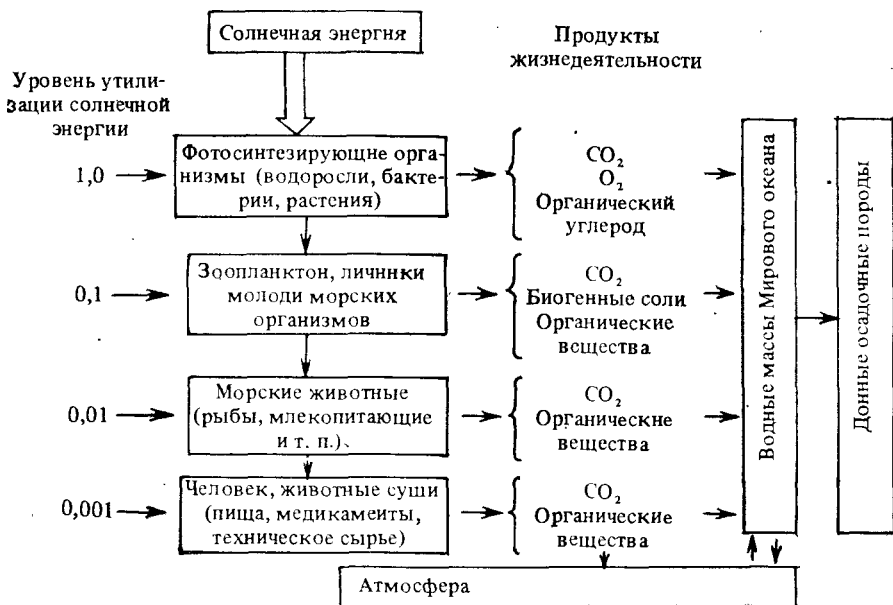


Рис. 1.13. Уровни потребления солнечной энергии в океане (по Э. Х. Да Сильва)

океанскую биомассу. Часть его растворяется в водах Мирового океана, причем, если сравнить количество углерода, содержащегося в разведанных запасах ископаемого топлива и в растворенном органическом веществе, то первенство окажется за последним — $8 \cdot 10^{11}$ и $17 \cdot 10^{11}$ т соответственно. Предполагаемые запасы ископаемого топлива составляют примерно $113 \cdot 10^{11}$ т [31].

Усвоение энергии Солнца биотой — совокупностью организмов, населяющих планету, — идет по примерной схеме, изображенной на рис. 1.13. Причем скорость связывания углерода на суше примерно в 2 раза выше скорости образования органики в океане. В первом случае речь идет примерно о $5 \cdot 10^{10}$ т углерода в год, а во втором — о $3 \cdot 10^{10}$ т/год [31]. Человек и животные суши используют по этой схеме только 0,1 % всей солнечной энергии, поступающей на Землю, и одним из способов увеличения непосред-

ственного усвоения ее можно считать увеличение потребления человеком продукции низших трофических уровней — фито- и зоопланктона. Такая тенденция уже проявляется в расширении переработки в продукты питания антарктического криля — представителя зоопланктона.

200 лет назад человечество полностью удовлетворяло свои энергетические потребности за счет продукции фотосинтеза, не затрагивая запасов ископаемого топлива. Сейчас, на новом витке развития экономики планеты, встает вопрос о биологических источниках энергии как вполне современных, соответствующих уровню развития техники и технологии и вполне приемлемых уже сейчас для ряда районов.

Принципиально, все энергетические потребности человечества на сегодняшний день можно было бы удовлетворить за счет биомассы, получаемой на земных плантациях. Для этого требуется площадь примерно в 5 млн. км² [3]. Причем при этих оценках речь идет о культурах с урожайностью 4,5 т сухой массы с гектара. В то же время известны культуры, урожайность которых может быть доведена до 18 т/га сухой массы. Но где взять соответствующие площади и подходящие климатические условия? Ведь уже сейчас под пашню заняты практически все пригодные земли планеты, и составляет эта «обобщенная» пашня примерно 46 млн. км².

Наиболее реально привлечь для нужд энергетики биоресурсы Мирового океана, тем более что теоретический потенциал годового прироста биомассы в нем по оценкам МИПСА составляет около 40 млрд. т у. т., т. е. около 40 % общего прироста биомассы на планете. По этим же оценкам, на современном уровне технологии из этого количества может быть передано энергетикам до 10 %. Эта величина не так мала, если учесть, что в 1980 г. в мире добывалось нефти всего 5 млрд. т у. т.

Для производства морской биомассы (имеются в виду водоросли и высшие растения) по крайней мере в обозримом будущем практически нет ограничений по площадям. Значительно выше, чем у земных, урожайность водных культур. Если для наиболее продуктивных высших растений суши — кукурузы и сорго она составляет 25—35 т/га сырой массы при максимальном приросте 0,5 т/га в сутки, то урожайность у водорослей в 100 т/га с приростом до 2 т/га в сутки не предел. Например, урожайность такого известного представителя флоры наших дальневосточных морей как морская капуста (ламинария японская) в естественных условиях достигает 1500 т/га [16]. Устойчивые урожаи в 700—1200 т/га дает другой представитель ламинариевых — гигантский тихоокеанский келп (макроцистис). При плановой урожайности в 500 т/га достаточно создать фермы по его выращиванию площадью в 120 тыс. км², чтобы обеспечить примерно 15 % потребностей США в энергию на уровне 2025 г. [65].

В заключении этой главы необходимо отметить, что поскольку при выборе той или иной энергетической технологии мы не исхо-

дим из потенциальных возможностей соответствующих источников, определяемых природными факторами, а лишь учитываем ту часть этой энергии, которая может быть экологически и экономически обосновано переработана в требуемые виды на современных нам уровнях знания о природе и развития техники, то ресурсные оценки не могут быть чем-то раз и навсегда установленным. Они постоянно уточняются, более того, уточняется и само отношение к отдельным видам возобновляемых ресурсов, изменяются их приоритеты по отношению друг к другу и к традиционным видам ресурсов.

ОКЕАНСКАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА: ОТЭС ЗАМКНУТОГО И ОТКРЫТОГО ЦИКЛОВ

§ 2.1. Историческая справка

История развития идей преобразования энергии океанских градиентов температуры восходит к периоду разработки основ термодинамики и создания теории тепловых машин. Таким образом, кроме французского физика д'Арсонваля, опубликовавшего в 1881 г. небольшую статью по основам океанской теплоэнергетики*, к этим идеям прямое отношение имеют основатели термодинамики — С. Карно, Р. Клаузиус, У. Томсон (лорд Кельвин). Эти идеи не могли появиться без сведений, полученных в экспедициях под руководством И. Крузенштейна, О. Коцебу, Уайвала Томсона (знаменитое плавание «Челленджера»), без работ физика Э. Ленца, участника экспедиции О. Коцебу, впервые неопровержимо доказавшего существование холодных слоев на больших глубинах, заложившего основы учения о термоклине и высказавшего гипотезу о характере переноса тепла в океане поверхностными и глубинными течениями.

Д'Арсонваль в своей статье рассмотрел возможность применения для преобразования океанской энергии двух систем — замкнутого цикла с промежуточным рабочим телом (в качестве такового был предложен аммиак) и открытого цикла, работающей непосредственно на морской воде. Идеи ученого почти на 50 лет определили технические возможности человечества. Они были осуществлены лишь в 1928 г. также французом Ж. Клодом, соорудившим опытную установку на берегу зал. Матансас на северном побережье Кубы. Это была вакуумно-водяная ОТЭС, развивавшая примерно 22 кВт электрической мощности и вырабатывавшая пресную воду. Опыты продолжались около двух лет и были прекращены после разрушения 2,5 км трубопровода для подачи холодной воды во время шторма. Клод предпринял еще две попытки создания опытных ОТЭС — на плавучей платформе (перестроенное судно «Тунизи», электрическая мощность 88 кВт) и в Абиджане (Западная Африка). Везде Клод сталкивался с проблемами, обусловленными коррозией испарительной камеры под действием теплой

* D'Arsonval. *Revue scient.* 1881, p. 370—372.

морской воды, и огромными расходами на создание мощного оборудования [52].

Абиджанский вариант ОТЭС разрабатывался и позднее. В 50-х гг. Франция решила построить экспериментальную станцию мощностью 1 МВт. Особенности рельефа дна в Гвинейском заливе позволяют на расстоянии 4 км от берега с глубины 500 м получать охлаждающую воду при температуре 7 °С. В то же время вблизи берега в поверхностных водах лагуны Эбрие можно забирать теплую воду при температуре 28 °С. Было рассчитано, что такого перепада температур окажется вполне достаточно, и с 1952 по 1956 г. велись исследования и подготовительные работы, однако по ряду причин технического и экономического характера они не были завершены.

В 60-е гг. интерес к ОТЭС вновь всколыхнулся после публикации отцом и сыном Андерсонами результатов расчетов плавучей станции, работающей на пропане по замкнутому циклу, показавших, что уровень развития техники уже принципиально позволяет получать таким образом электроэнергию по цене, даже более низкой, чем отпускные цены тепловых станций [51].

В 1979 г. компанией «Локхид оушен системз дивижн» (дочернее предприятие военного концерна «Локхид») был испытан крупномасштабный макет плавучей ОТЭС, который известен в литературе под названием мини-ОТЭС мощностью 50 кВт. Для натурных испытаний компанией «Диллингем» была переоборудована 270-тонная баржа, на которой была размещена энергетическая система, разработанная совместно университетом штата Гавайи (США), компаниями «Альфа-Лаваль» (Швеция) и самой «Локхид». Баржа была установлена примерно в 2 км от м. Кихол (Гавайские острова) с помощью якоря — бетонного блока массой около 23 т, опущенного на глубину 900 м. Пары сжиженного аммиака нагревались в теплообменнике до температуры 26 °С, а охлаждающая вода температурой 4,4 °С подавалась с глубины 670 м по трубопроводу диаметром примерно 600 мм, который одним концом крепился к якорю, а другим — к швартовой бочке, заменяя таким образом якорный трос. Верхний конец трубопровода резиновым шлангом длиной 60 м соединялся с емкостью в средней части баржи, откуда холодная вода поступала в холодильник. Расход холодной воды составлял примерно 11 м³/мин. Станция-макет была оснащена приборами для контроля работы всех систем, потреблявшими практически всю производившуюся электроэнергию [45, 52].

Осенью 1980 г. в 30 км от Коун Кост (Гавайские острова) были проведены испытания агрегата ОТЭС-1, созданного специалистами компании TRW (США). Целью испытаний было исследовать в натуральных условиях работу теплообменных аппаратов, представлявших собой кожухотрубные конструкции длиной 15 и диаметром 3 м из углеродистой стали, с установленной в них системой теплообменных трубок из титана (около 6000 трубок длиной 12,6 м, внешним диаметром 2,54 см с толщиной стенок около

0,7 мм). Теплообменники были рассчитаны на получение электрической мощности 1 МВт, но вместо турбины между нагревателем и конденсатором был установлен редуцирующий клапан — эквивалент механической нагрузки. Внутри трубок подавались нагретая и холодная вода, кожух частично заполнялся аммиаком. Испаритель (нагреватель) отличался от конденсатора (холодильника) тем, что на его трубки было нанесено специальное покрытие для улучшения теплообмена. Общая длина трубок испарителя составляла примерно 140 км.

Энергетическая установка ОТЭС-1 была смонтирована на переоборудованном для испытаний компанией «Глобал марин девелопмент» танкере «Чепачет» с турбоэлектрической двигательной установкой с таким расчетом, чтобы по прибытии на место испытаний использовать последнюю для обеспечения энергией насосов для забора холодной воды и другого оборудования. Перестройке подверглись в основном носовые и кормовые части танкера, где в помещениях, образовавшихся после снятия переборок, и разместились теплообменники. В средней части днища был смонтирован карданный подвес для крепления трубопровода для забора холодной воды, устроенного таким образом, чтобы в случае необходимости (из-за плохих погодных условий, например) судно могло отсоединиться от трубопровода и уйти в защищенное место (рис. 2.1).

За 3 мес до окончания постройки (переоборудования) судна на Гавайях было начато сооружение трубопровода длиной 700 м с эффективным диаметром 1,5 м. Он сваривался из 27-метровых отрезков полиэтиленовых труб диаметром 1 м в три нитки, соединенные бандажами. К верхнему концу трубопровода было прикреплено плавучее кольцо для поддержания его в вертикальном состоянии в толще воды. Масса трубопровода составила 450 т, и для его спуска на воду пришлось изготовить специальную тележку (платформу), которую установили на рельсовом пути, проложенном прямо до воды. Для закрепления трубопровода на морском дне потребовалось почти 50 т балласта. На трубопроводе был установлен буй для его обозначения и подключения к судну, система датчиков линейных перемещений, позволявшая изучать поведение его в процессе эксплуатации. На буксировку, установку и подключение трубопровода к карданову подвесу судна понадобилось 3 дня.

Насосы для подъема холодной воды начали работать 13 декабря 1980 г., 22 декабря началась подача теплой воды, а 31 декабря началось испарение аммиака. Испытания продолжались до 15 апреля 1981 г. За 3 мес. было проведено 95 экспериментов по испытанию испарителя общей продолжительностью 370 ч. Замеренная величина теплопередачи оказалась весьма близкой к расчетной ($2800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$), а падение давления со стороны конденсатора даже на 10 % больше, чем расчетная величина 17 кПа. Кроме теплообмена в нагревателе и конденсаторе исследовались также биологическое обрастание и коррозия элементов

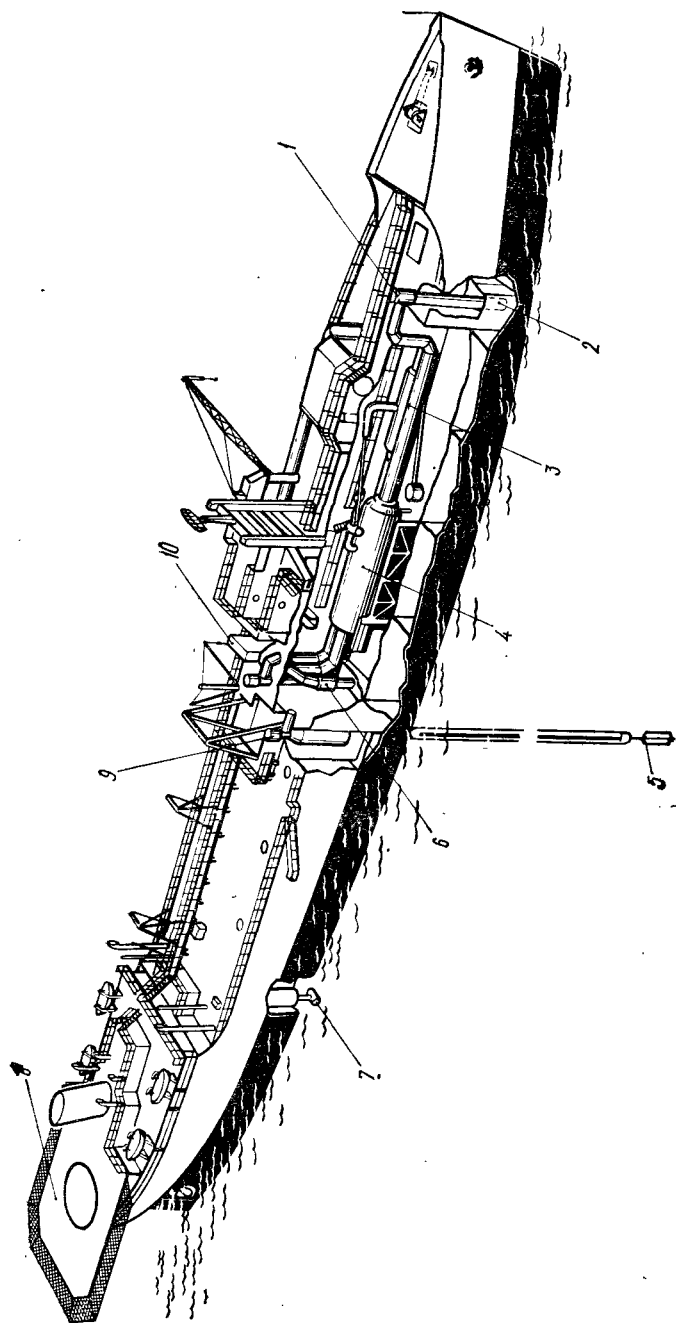


Рис. 2.1. Опытная океанская термальная станция ОТЭС-1, общий вид [78].

1 — насос подачи теплой воды; 2 — выпуск теплой воды; 3 — конденсатор; 4 — испаритель; 5 — трубопровод для подачи холодной воды; 6 — сбор теплой воды; 7 — поддуливающее устройство; 8 — вертолетная палуба; 9 — основной насос холодной воды; 10 — лаборатория контроля биозагрязнений

установки. Для предотвращения обрастания, в частности, каждые 24 ч в магистрали холодной и теплой воды в течение часа подавался хлор в концентрации 0,4 мг/л. Кроме того, в испаритель и конденсатор запускались шарики из губчатой резины с таким расчетом, что через каждую трубку теплообменника такой шарик проходил каждые 15 мин. В течение 35 дн. использовались и шарики и хлорирование, 30 дн. применялось одно хлорирование. Хлор получали электролитическим способом прямо из морской воды на установке «Хлоропак». Испытания дали обнадеживающие результаты по всем показателям работы ОТЭС-1 [45, 78].

Более пяти лет действует японская опытная ОТЭС мощностью 100 кВт на о. Науру в экваториальной части Тихого океана. Станция работает по замкнутому циклу на хладоне R22, имеет двухступенчатую турбину, на вход которой поступает 74 т/ч пара хладона при температуре 24,8 °С. Перепад давлений между испарителем и конденсатором составляет 0,3 МПа (на выходе испарителя 1,04 МПа). Центробежные насосы подают в теплообменные аппараты станции 1450 т/ч теплой морской воды при температуре 29,8 °С и 1410 т/ч холодной воды температурой 7,9 °С с глубины 580 м по полиэтиленовому трубопроводу внутренним диаметром 750 мм и длиной 932 м и соединенному с ним отрезку хлорвинилового трубопровода диаметром 732 мм и длиной 161 м. Общая длина трубопровода 1093 м, толщина стенок 30 (первый участок) и 21 мм (второй участок). Угол наклона в зоне установки станции составляет 45°. Все сооружения размещены на суше. На станции достигнута максимальная мощность 120 кВт (в сеть о. Науру при этом поступает примерно 30 кВт, а около 90 кВт расходуется на собственные нужды). Станция предназначена для изучения всех аспектов преобразования тепловой энергии и демонстрирует возможность эксплуатации такого источника энергии. Правительство Республики Науру серьезно рассматривает возможность перехода к использованию возобновляемых источников энергии.

Здесь приведены сведения лишь о части значительных работ, проведенных к настоящему времени по программам преобразования тепловой энергии океана. Эти работы активно ведутся в США, Японии, Франции и других европейских государствах, объединенных программами «Евроокеан»*. Достаточно сказать, что на исследования и разработки к настоящему моменту затрачено не менее 1 млрд. фр. (США — 800 млн., Япония — 50 млн., Франция — 8 млн.) только государственных средств. В последние годы к этим работам активно подключилась наша страна.

* Эти программы предусматривают изучение и других видов океанских источников энергии.

§ 2.2. Основные принципиальные схемы ОТЭС

Для преобразования энергии перепада температур в океане в настоящее время предложено несколько типов устройств. Наибольший объем исследований ведется по разработке систем, действующих по двухконтурной схеме с промежуточным рабочим телом на основе термодинамического цикла Ренкина, устройств, выполненных по одноконтурной схеме и работающих непосредственно на морской воде (открытый цикл Клода). К основным на

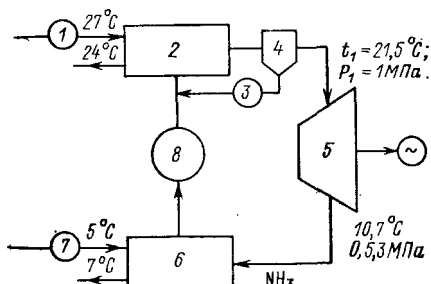


Рис. 2.2. Схема термальной установки, работающей по замкнутому циклу.

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

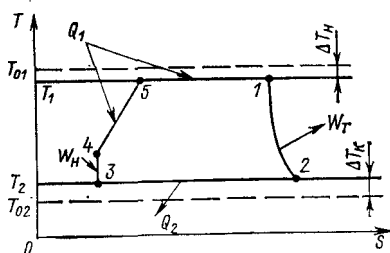


Рис. 2.3. Термодинамический цикл ОТЭС (цикл Ренкина)

сегодняшний день (имеются в виду промышленно разрабатываемые установки) можно причислить и устройства, работающие по одноконтурной схеме, но нагруженные на обычную гидравлическую турбину (цикл Флетковича). Далее следует целый ряд модификаций схем тепловых машин, использующих кроме того и другие перепады температур (воздух—вода, точнее атмосфера—гидросфера, гидросфера—литосфера), а также системы для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую (на них мы остановимся в следующей главе).

Схема установки, работающей по замкнутому циклу, приведена на рис. 2.2. В такой системе с помощью теплых поверхностных вод, прокачиваемых насосом через теплообменник испарителя, превращают в пар какое-либо подходящее рабочее тело (аммиак, фреон, пропан), создают пар повышенного давления, давая ему возможность расшириться через турбину в холодильник, где пар конденсируется при контакте с охлаждаемыми поверхностями второго теплообменника, омываемого водой, закачиваемой из глубинных слоев океана. На рис. 2.3 показан термодинамический цикл такой тепловой машины (цикл Ренкина) в координатах абсолютная температура—энтропия. Полезная работа, совершаемая паром в турбине, определяется ветвью 1—2, на уча-

стке 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.

Максимальный теоретический КПД такой системы определяется разностью температур воды, подаваемой в нагреватель и холодильник, как КПД эквивалентного цикла Карно $\eta_k = (T_{01} - T_{02})/T_{01}$. 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. 2.3 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. 2.2. 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 тепловой и холодной воды, измеряемых в тысячах кубометров в секунду [44].

Для того чтобы представить себе, что же такое реальная промышленная ОТЭС, достаточно указать такие ориентировочные цифры [86]: 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. Соответственно, для станции с полезной мощностью 500 МВт водоизмещение будет составлять примерно 500 тыс. т (водоизмещение современного супертанкера). Трубопровод должен иметь диаметр не менее 30 м, площадь теплообменника будет около $2 \cdot 10^6$ м².

При выборе рабочего тела исходят из его теплофизических, технологических, экологических свойств и стоимости. Все эти характеристики так или иначе влияют на стоимость 1 кВт установленной мощности ОТЭС. Для обеспечения наилучших показателей приходится выбирать между более дешевым и токсичным веществом и более дорогим, но менее технологичным и менее токсичным. Речь идет об аммиаке и хладоне (фреон-22), обладающими достаточно высоким и примерно одинаковым давлением насыщенных паров (10,2 МПа и 10,7 МПа при температуре 25 °С). Аммиак доступен, применяется чрезвычайно широко, его стоимость не превышает примерно 100 руб/т. Он ядовит и пожаро-

опасен, но растворяется в воде в любых пропорциях и его легко обнаружить в случае утечки. Стоимость хладона почти в 20 раз выше, но он малоядовит и не воспламеняется. Хладон не имеет запаха и чрезвычайно текуч, что позволяет ему улетучиваться из сосудов при наличии микротрещин. Слабая токсичность хладона не означает, что он экологически безвреден. Специалисты по охране среды как раз бьют тревогу из-за чрезмерного применения фреонов (хлорфторметаны) в технике и в быту (кроме хладагентов фреоны служат растворителями и основой для различных распыляющихся средств в аэрозольной упаковке). Попадая в стратосферу и разлагаясь под действием ультрафиолетового излучения, они выделяют свободные галогены, играющие роль катализаторов разрушения озона. Это, в свою очередь, становится причиной усиления ультрафиолетовой радиации на поверхности Земли, что опасно для животных и растений.

Интересно, что если оценивать свойства рабочих тел для ОТЭС замкнутого цикла с помощью критерия Клаузиуса с уточнением А. К. Ильина [21]

$$Kl = \frac{r}{2c} \frac{T_2/T_1 + 1}{T_1 - T_2}, \quad (2.1)$$

где r — теплота парообразования; c — теплоемкость жидкой фазы при средней температуре цикла $(T_1 + T_2)/2$, то и в этом случае аммиаку следует отдать предпочтение. Кроме того, сам аммиак может быть продукцией ОТЭС. В дальнейшем его можно использовать в качестве либо химического сырья, либо переносчика водорода, позволяющего транспортировать его наиболее дешевым способом с помощью танкеров. В этом случае говорить об опасности использования аммиака в качестве рабочего тела вообще не приходится на фоне опасностей, возникающих при перегрузке и самой транспортировке. В отличие от аммиака хладон плохо смешивается с водой и при попадании в него последней в системе могут возникнуть ледяные пробки, приводящие к выходу из строя оборудования. Все это вероятно и послужило основанием для выбора аммиака в качестве рабочего тела для основных проектов ОТЭС замкнутого цикла.

Схема установки, работающей по открытому циклу Клода, показана на рис. 2.4. 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 приводятся в движение турбину, попадают в конденсатор, где и превращаются в жидкость. Основное отличие цикла как раз и состоит

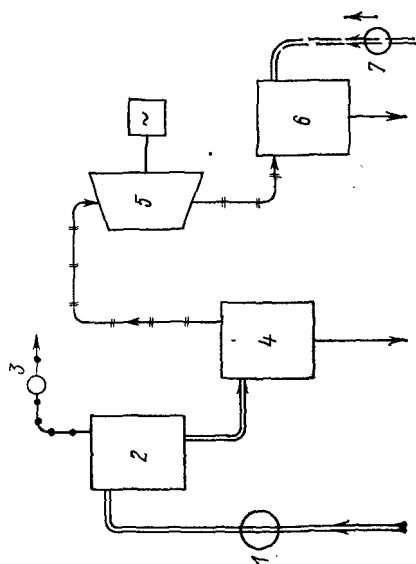


Рис. 2.4. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу (цикл Клода).

1 — насос теплой воды; 2 — деаэрактор; 3 — вакуумный насос; 4 — испаритель; 5 — турбина с электрогенератором; 6 — конденсатор; 7 — насос для подьема холодной воды

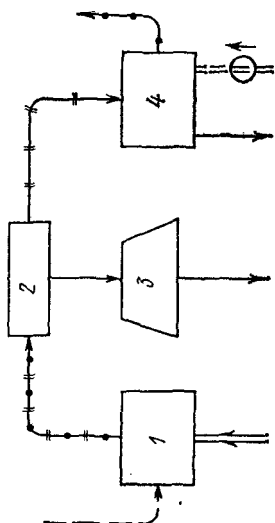


Рис. 2.5. Обобщенная схема двухфазной термознергетической установки (схема Бека).

1 — паробразователь; 2 — накопитель; 3 — гидравлическая турбина; 4 — конденсатор

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.

Схема Клода в дальнейшем была усовершенствована: на ее базе появилось несколько вариантов. Наиболее интересны те из них, в которых происходит испарение с открытой водной поверхности при использовании обычной гидротурбины. В этом случае есть надежды значительно сократить размеры будущих станций и использовать уже существующие конструкции низконапорных гидротурбин, стоимость которых значительно ниже стоимости парогазовых низконапорных гидротурбин.

На рис. 2.5 приведена обобщенная схема, описывающая работу по крайней мере трех устройств, предложенных в 1975—1976 гг. Е. Беком, К. Зенером и Дж. Фетковичем. В основе способа преобразования энергии — подобие существующего в природе круговорота воды под действием солнечной радиации. Подъем воды на требуемый уровень осуществляется путем либо создания в столбе кавитационных пузырьков, либо вспениванием (эффекты аналогичные подъему жидкости с помощью эрлифта), либо созданием разрежения над ее поверхностью за счет образования тумана. Гидротурбина при этом может быть установлена и как показано на рис. 2.5, и непосредственно в трубопроводе теплой воды, забираемой с поверхности.

Более конкретная реализация описанного принципа с использованием парожидкостного тумана, образующегося над поверхностью теплой воды в том случае, когда конденсатор размещен значительно выше, поясняется рис. 2.6 (С. Риджуэй и А. Шомет, Калифорнийский университет). Парожидкостная смесь, с удельным объемом от 200 до 3000 см³/г, содержащая капельки воды размером около 200 мкм, поднимаясь в поле отрицательного градиента температур, выполняет работу по прокачиванию теплой поверхностной воды через турбину. Общая проблема при реализации подобных устройств в промышленных масштабах (лабораторные образцы уже осуществлены) — возможная нестабильность тумана, пены, кавитационных пузырьков [44].

К этому же классу систем относится преобразователь Фетковича*, схема которого поясняется рис. 2.7. Это система периодического действия, основанная на поочередном подключении внутренней полости рабочей камеры к блокам испарения теплой и холодной воды, в результате чего в первой создается разрежение, под действием которого и засасывается заборная вода. После подъема на максимальный уровень вода сбрасывается через турбину. Гидравлическая энергия, получаемая за один цикл, равна

* Патент США № 4083189, 1975 г.

потенциальной энергии объема жидкости, поднятой таким насосом с высоты h_1 до высоты h_2 :

$$W_{\text{пот}} = \rho g \frac{(h_2 - h_1)^2}{2} \frac{\pi D^2}{4}; \quad (2.2)$$

соответственно мощность — $P = W/t$, где t — период цикла. Для характерной разности давлений $2,3 \cdot 10^3$ Па (температуры нагревателя и холодильника 25 и 5 °C) разность высот столбов жидкости

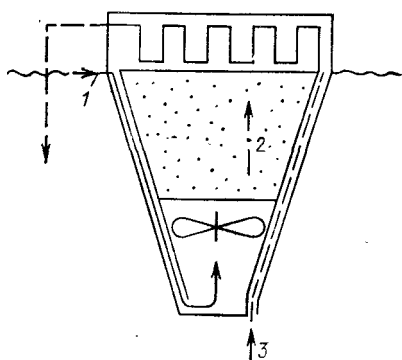


Рис. 2.6. Вариант схемы парожидкостного устройства.

1 — теплая вода; 2 — парожидкостная смесь (туман); 3 — холодная вода

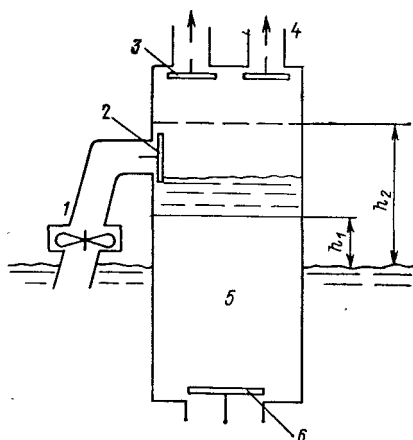


Рис. 2.7. Преобразователь Фетковича.

1 — гидравлическая турбина; 2 — клапан турбины; 3, 4 — клапаны испарителей теплой и холодной воды; 5 — рабочая камера; 6 — обратный клапан рабочей камеры

составляет всего 0,23 м, и чтобы получить мощность порядка 1 МВт при $t=10$ с необходим диаметр рабочей камеры около 200 м (точнее 211 м). Правда, автор считает возможным существенно улучшить показатели системы за счет использования (создания) резонансных условий колебания давлений и столба жидкости в рабочей камере. В этом случае, по его расчетам, для получения суммарной механической мощности в 90 МВт при периоде колебаний 20 с будет достаточным соорудить рабочую камеру диаметром 100 м.

Вне зависимости от выбора типа термодинамического цикла при разработке преобразователей тепловой энергии океана требуется создавать достаточно материалоемкие конструкции, протяженные трубопроводы для забора холодной воды, приходится решать задачи как предохранения от воздействия среды (силовое при штормах, коррозия, обрастание), так и предохранения среды от воздействия реагентов или продукции, вырабатываемой такими устройствами. Поиск оптимальных конструкций и сочетания принципов, обеспечивающих максимальную эффективность таких преобразователей, продолжается.

§ 2.3. Выбор оптимального типа преобразователя

Рассматривая любую из вышеприведенных схем, можно убедиться в том, что отдать предпочтение той или иной системе, базируясь на знании лишь ее термического КПД, определяемого как КПД эквивалентного цикла Карно, невозможно. Это только одна сторона вопроса. Другая — наличие в реальных системах потерь, о которых уже упоминалось, — потерь, связанных с собственными нуждами станции, гидродинамических потерь в трактах теплообменных аппаратов, тепловых и других потерь. Определение последних без действующих опытных устройств, выполненных так, чтобы при переносе на натуру не сказывались масштабные эффекты, довольно затруднительно. На практике приходится рассматривать обе стороны вопроса порознь, исходя или из возможностей насущного момента, или из потребностей отдаленного будущего. Второй подход позволяет выполнить термодинамический анализ циклов работы преобразователей как идеальных, абстрагируясь от потерь в реальных системах и как бы считая их неизбежным злом, успех борьбы с которым определяется уровнем развития техники и технологии. Более того, отстаивая какой-то вариант, можно предполагать, что при его практической реализации будут использованы самые последние достижения техники и за счет этого потери будут сведены к минимуму. В век разделения труда такой подход может быть и оправдан.

Для анализа идеальных циклов воспользуемся термодинамическим КПД, определяемым как эффективность системы на основе второго начала термодинамики. На практике эта величина может быть определена как отношение $\eta_E = W/E$, где W — полезная энергия, вырабатываемая системой; E — эксергия ресурсов, используемых системой. Под эксергией понимаем, как это принято, количество энергии, которое может получить внешний приемник от системы при ее обратимом переходе из данного состояния в состояние полного равновесия с окружающей средой. Таким образом, эксергия — это максимальное количество энергии, которое система может изъять из перепада температур. Соответственно, при $W = E$ термодинамический КПД системы $\eta_E = 1$. Определив величины для различных циклов и выяснив, как эти величины изменяются в диапазоне параметров работы идеальной системы, можно выявить наилучшие.

В первую очередь необходимо найти величину эксергии для исследуемого перепада температур. Для этого рассмотрим принципиальную схему обобщенной ОТЭС, представленную на рис. 2.8. На основе второго начала термодинамики максимальную полезную работу можно получить в такой системе, если полное изменение ее энтропии равно нулю. Достаточно рассмотреть только составляющие, связанные с процессами в нагревателе и в холодильнике, так как сам процесс преобразования мы условились считать идеальным и, следовательно, обратимым. Тогда из

определения энтропии $\Delta S = m \int_{T_{01}}^{T_1} dQ/T$ можно получить выражение для такого «нулевого» изменения энтропии в виде

$$\Delta S = \Delta S_T + \Delta S_X = m_T c_p \ln \frac{T_1}{T_{01}} + m_X c_p \ln \frac{T_2}{T_{02}} = 0, \quad (2.3)$$

где ΔS_T , ΔS_X — изменения энтропии соответственно теплой и холодной воды; m_T , m_X — массы соответственно теплой и холодной воды.

Откуда, введя параметр $r = m_T/m$ ($m = m_T + m_X$), получим выражение, определяющее соотношение температур, соответствующее выработке системой максимальной полезной энергии [58]:

$$m c_p \ln \left(\frac{T_1}{T_{01}} \right)^r \left(\frac{T_2}{T_{02}} \right)^{1-r} = 0. \quad (2.4)$$

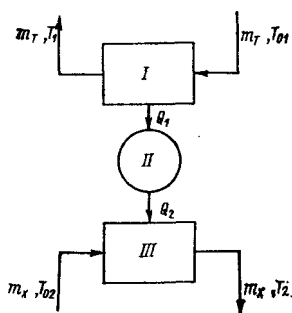


Рис. 2.8. Схема обобщенной тепловой машины.

I — нагреватель; *II* — рабочее тело; *III* — холодильник; m_T и m_X — массы теплой и холодной воды

Полезная работа системы на основе первого начала термодинамики определяется разностью поступающего в нее и отходящего количеств теплоты $W = Q_1 - Q_2$ так, что

$$W = c_p [m_T (T_{01} - T_1) - m_X (T_{02} - T_2)]. \quad (2.5)$$

Подставив в это выражение величины m и r , получим для полезной работы соотношение

$$W = m c_p [r T_{01} + (1 - r) T_{02} - T_2 - r (T_1 - T_2)], \quad (2.6)$$

из которого следует, что максимальной полезная работа становится при $T_1 = T_2 = T_0$. Последнюю величину можно определить из полученного выше выражения для оптимального соотношения температур (2.4) как $T_0 = T_{01} T_{02}^{(1-r)}$, что позволяет переписать выражение для доступной полезной работы в виде

$$W_d = m c_p [r T_{01} + (1 - r) T_{02} - T_{01}^r T_{02}^{1-r}]. \quad (2.7)$$

Полезная работа оказалась, таким образом, нелинейной функцией от r . Если исследовать эту функцию на экстремум, приравняв величину производной по r нулю, то можно отыскать

оптимальное значение $r_{\text{опт}}$, при котором $W_{\text{д max}} = E$. Д. Джонсон предлагает для получения этой производной ввести в предыдущее выражение величину КПД цикла Карно $\eta_{\text{к}} = (T_{01} - T_{02})/T_{01}$. В этом случае

$$W_{\text{д}} = mc_p T_{01} [r + (1 - r)(1 - \eta_{\text{к}}) - (1 - \eta_{\text{к}})^{1-r}]. \quad (2.8)$$

Взяв от $W_{\text{д}}$ производную и приравняв ее нулю

$$dW_{\text{д}}/dr = mc_p T_{01} [\eta_{\text{к}} + (1 - \eta_{\text{к}})^{1-r} \ln(1 - \eta_{\text{к}})] = 0 \quad (2.9)$$

получаем для определения $r_{\text{опт}}$ выражение

$$r_{\text{опт}} = [-\ln \eta_{\text{к}} + \ln(1 - \eta_{\text{к}}) + \ln \ln(1 - \eta_{\text{к}})^{-1}] / \ln(1 - \eta_{\text{к}}). \quad (2.10)$$

Положив в этом выражении $\eta_{\text{к}} \ll 1$, получим

$$r_{\text{опт}} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{12} \eta_{\text{к}} + \dots \right] \approx 1/2. \quad (2.11)$$

Соответственно оптимальная величина для T_0 оказывается равной примерно корню квадратному из произведения температур теплой и холодной воды

$$T_{0\text{опт}} = (T_{01} T_{02})^{0.5}. \quad (2.12)$$

Если теперь допустить, что КПД цикла Карно близок к нулю, то для полезной оптимальной работы получим выражение

$$W_{\text{д}} = mc_p T_{01} r (1 - r)^2 \eta_{\text{к}}^2 / 2, \quad (2.13)$$

а подставив сюда значения $r = 1/2$ — формулу для определения величины эксергии

$$E = W_{\text{д max}} = mc_p T_{01} \eta_{\text{к}}^2 / 8. \quad (2.14)$$

Таким образом, оказывается, как указывает Д. Джонсон, что эксергия зависит от разности температур по закону $(T_{01} - T_{02})^2 / T_{01}$, а не просто от первой степени этой разности*. Последнее особенно ощутимо, если речь идет об оценке флуктуаций мощности природного источника, например вследствие сезонного изменения поверхностных температур.

На рис. 2.9 приведены диаграммы, поясняющие ход различных термодинамических циклов, которые могут быть реализованы в соответствующих преобразователях тепловой энергии. Диаграммы связывают температуры рабочих тел с обобщенным параметром, в качестве которого при известных свойствах рабочего тела используется, например, энтропия. Непрерывные линии на диаграммах относятся к рабочему телу, прерывистые — к морской воде, поступающей в испаритель (верхняя линия) и конденсатор (нижняя). Диаграммы на рис. 2.9, а, б описывают полное использование эксергии в замкнутом и открытом идеальных циклах. Направление линий показывает, в какую сторону происходит из-

* Аналогичный вывод получен Е. И. Янтовым.

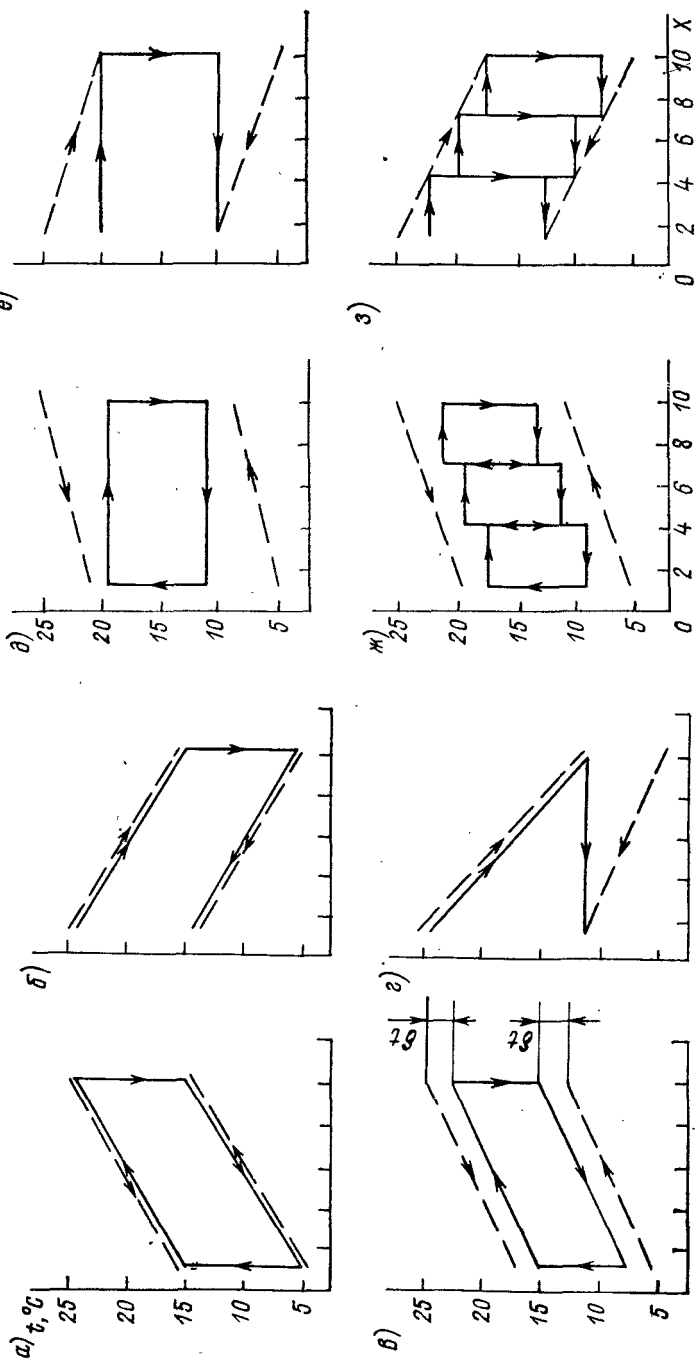


Рис. 2.9. Варианты термодинамических циклов ОТЭС [58]: а, б — замкнутый и открытый идеальные циклы; в — цикл на многокомпонентном рабочем теле; г — цикл Бека; д, е — идеальные циклы Ренкина и Клода; ж, з — многостадийные циклы Ренкина и Клода

менение термодинамических параметров. Процессы отличаются направлением изменения параметров и тем, что в открытом цикле, где рабочим телом является морская вода, приведение рабочего тела в исходное состояние производится не в системе, а в окружающей среде и, следовательно, выполняет эту работу Солнце. Подобны им идеальные циклы Ренкина и Клода, идущие лишь с частичным использованием эксергии, показанные на диаграммах рис. 2.9, *д, е*. Испарение рабочих тел происходит здесь при постоянной температуре, при этом теплая поверхностная вода охлаждается (в открытом цикле это постоянно подаваемая в испаритель теплая вода), а охлаждающая — нагревается.

Рис. 2.9, *ж, з* дает представление о применении способа многостадийного извлечения энергии (идеальный многостадийный цикл Ренкина). Применение нескольких ступеней преобразования энергии, во-первых, позволяет уменьшить различие в температурах между рабочим телом и водой в нагревателе и конденсаторе, а во-вторых, как бы увеличивает суммарное падение температуры при изэнтропическом расширении в турбине. Все это позволяет более полно использовать эксергию и считать многоступенчатый цикл Клода наиболее совершенным термодинамическим процессом.

В цикле на многокомпонентном рабочем теле (рис. 2.9, *в*) приближения к оптимуму достигают, следя за изменением температуры в различных участках испарителя, за счет такого подбора компонентов, при котором смесь переводится в парообразное состояние. Испарение компонентов смеси происходит поэтапно, каждому этапу соответствует своя температура насыщения.

Рис. 2.9, *г* описывает цикл Бека, при котором эксергия перепада температур преобразуется в кинетическую энергию потока рабочего тела, вовлекаемого в движение той его частью, которая превращается в туман, пар, пену. Мы видим здесь, что процесс испарения идет в термодинамическом смысле наилучшим образом: изменение температуры всей массы рабочего тела, преобразуемой в транспортирующую среду, идет одновременно. Процесс этот необратимый, часть энергии, которой обладает охлаждающая вода, не переходит в полезную работу.

Численный анализ показывает, что термодинамической эффективности различные циклы можно расположить следующим образом: многостадийный открытый цикл ($\eta_E=0,75$), цикл на многокомпонентном рабочем теле ($\eta_E=0,64$), цикл Бека ($\eta_E=0,59$), открытый цикл Клода ($\eta_E=0,5$), многоступенчатый замкнутый цикл ($\eta_E=0,48$), замкнутый цикл Ренкина ($\eta_E=0,32$).

Интересно отметить, что основные работы по практическому освоению тепловой энергии океанов идут по линии реализации самых неэффективных в термодинамическом смысле схем, работающих по замкнутому циклу. Именно этот цикл наиболее изучен и реализован в промышленных масштабах, у него на сегодняшний день наилучшие технико-экономические показатели. Остальные циклы не реализованы или реализованы в условиях опытных уста-

новок. Сложившийся отрыв между теорией и практикой свидетельствует о больших резервах океанской теплоэнергетики.

Кроме анализа циклов термодинамический подход позволяет проводить и поиск оптимальных технических решений преобразователей. Такая попытка сделана, например, А. К. Ильиным [21]. Он принимает следующие упрощения: установка работает по циклу Карно, испаритель и конденсатор обладают одинаковыми гидравлическими сопротивлениями и имеют одинаковые изменения температуры морской воды при прохождении через теплообменники (Δp и δT соответственно), конечная температура, уста-

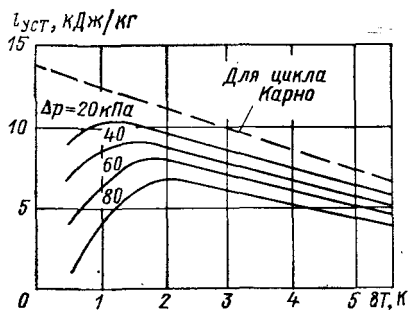


Рис. 2.10. Удельная работа энергетической установки с учетом теоретической работы насосов [21]

навливающаяся в испарителе, равна $T_{01} - \delta T$ и соответствует температуре кипения рабочего тела, а конечная температура в конденсаторе, равная $T_{02} + \delta T$, соответствует температуре конденсации рабочего тела.

Если теперь с учетом указанных допущений представить удельную работу, совершаемую рабочим телом в цикле, в виде

$$l_{\text{ц}} = (i''_{T_{01} - \delta T} - i'_{T_{02} + \delta T}) \left(1 - \frac{T_{02} + \delta T}{T_{01} - \delta T} \right), \quad (2.15)$$

а механическую работу, совершаемую насосами при прокачивании воды через теплообменники, в виде

$$l_{\text{н}} = 2 \frac{i''_{T_{01} - \delta T} - i'_{T_{02} + \delta T}}{c_p \delta T} \frac{1}{\rho} \Delta p, \quad (2.16)$$

где i' и i'' — энтальпии рабочего тела в парообразном и жидком состоянии, то удельную работу установки, функционирующей по циклу Карно, можно оценить из соотношения $l_{\text{уст}} = l_{\text{ц}} - l_{\text{н}}$. Результаты расчета этой величины при $T_{01} = 300$ К и $T_{02} = 280$ К для различных Δp , приведенные на рис. 2.10, свидетельствуют о том, что каждому Δp соответствует оптимальное значение δT . Эту величину можно описать следующей формулой:

$$\delta T = \left(\frac{2 \Delta p T_{01}}{c_p \rho \eta_{\text{н}}} \right)^{0.5}, \quad (2.17)$$

где $\eta_{\text{н}}$ — КПД насосов, равный примерно 85 %. Таким же путем выражение для оптимального перепада температур на теплообменниках получают и для других циклов.

Приведенные выкладки показывают, что термодинамический подход позволяет решать задачи оптимизации на всех этапах разработки ОТЭС. Более подробное изложение соответствующих вопросов заинтересованный читатель может найти в специальной литературе по термодинамике ОТЭС (см., например, работы [21, 25]).

§ 2.4. Проекты ОТЭС замкнутого цикла

В настоящее время в мире разрабатывается несколько проектов электростанций замкнутого цикла для различных районов тропического пояса. В основном речь пока идет о создании опытно-промышленных систем, базирующихся либо на плавучих основаниях, либо на суше и предназначенных как для отработки технологии преобразования энергии, так и для снабжения энергией потребителей. Мощности этих станций лежат в пределах 5—40,0 МВт.

Основные разработки ведутся в США, Японии, Франции. За последние годы к этим странам присоединились Нидерланды, Индонезия и Индия. Например, под эгидой Индийского национального института океанографии и Института технологии разрабатывается проект ОТЭС мощностью 6 МВт для размещения на одном из Лаккадивских островов, расположенных в 300 км от западного побережья Индии. Уже выбрано по крайней мере два района, где в пределах 1 км от берега глубины составляют 1100 м, так что все сооружения станции могут быть размещены на берегу. Экономические расчеты показывают, что система таких станций могла бы производить энергию примерно с той же стоимостью, что и обеспечивающие эти острова сейчас дизельные станции, работающие на привозном топливе (население — около 20 тыс. чел.). Предполагается, что большинство компонентов станции будет изготовлено в самой Индии и только теплообменники и трубы для забора холодной воды — за рубежом.

В совместном голландско-индонезийском проекте ОТЭС для о. Бали речь пока идет о строительстве лишь демонстрационной станции мощностью 100 кВт. Более крупную электростанцию предполагается построить на следующем этапе. При выборе места строительства проектировщики исходили из соображений доступности сообщения побережья с Джакартой и другими индустриальными центрами, учитывали сравнительно неглубокое залегание от поверхности слоев со стабильной температурой 8 °С (500 м на расстоянии 1,5 км от берега), высокую и достаточно стабильную температуру поверхностных вод (около 30 °С практически в течение всего года). Для будущих более мощных станций для забора холодной воды могут быть использованы большие глубины, лежащие здесь на расстоянии не более 3 км от берега. Строительство должно было начаться осенью 1984 г. и завершиться

в 1986 г. Проект финансируется Нидерландами, а само строительство — Индонезией.

Национальный центр использования океана Франции (CNEXO) планирует в 1988 г. сооружение ОТЭС мощностью 5 МВт на о. Таити. Стоимость станции оценивается в 300—400 млн. фр. Уже завершены изыскания и разрабатываются различные варианты технических проектов для окончательного выбора либо замкнутой, либо «традиционной» для Франции открытой схемы Клода.

Одна из особенностей ОТЭС замкнутого цикла для о. Таити — пластиковый водовод, с помощью туннелей пересекающий окружающие остров рифы, среди которых и предполагается разместить здание станции. В основу ОТЭС открытого цикла положена плавающая конструкция в виде поплавка-баржи со стальной или бетонной водозаборной трубой.

Япония, ввозящая около 90 % топлива, ведет работы по использованию термальной энергии океана уже более 15 лет. В настоящее время под руководством Агентства по промышленным и научным исследованиям и технике министерства международной торговли и промышленности в стране ведутся широкие исследования под названием «Саншайн проджект». В плане этих работ уже в 1976 г. был разработан усовершенствованный вариант демонстрационной ОТЭС мощностью 100 МВт, состоящей из четырех модулей по 25 МВт, размещенных в подводном цилиндрическом корпусе. В качестве рабочего тела выбран аммиак. Полезная мощность станции должна составлять примерно 77 % полной. О производительности систем станции дают представление такие цифры: расход холодной (7°C) воды около 800 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, площади поверхностей конденсатора и испарителя 350 и 310 тыс. м^2 , расход теплой воды при температуре 28°C около 970 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$. Платформа станции рассчитана на довольно жесткие условия эксплуатации: скорость ветра до 60 м/с, высота волн до 18,5 м при периоде 16 с, скорость поверхностного течения до 1 м/с.

В работах по проекту «Саншайн проджект» в Японии участвуют крупнейшие фирмы. Среди них, например, «Тосиба корпорейшн» и «Мицубиси хеви индастриз корпорейшн», уже самостоятельно разработавшие проекты геотермальных электростанций мощностью 1 МВт и заинтересованные в сбыте энергетического оборудования. Машиностроительные компании «Исикава-дзима», «Мицубиси», «Симизу констракшн» и другие приняли участие в разработке платформ с использованием судостроительного оборудования. Компания «Токио электрик пауер сервис» разрабатывает наземные сооружения для подсоединения ОТЭС к энергосетям. Тем опытно-промышленным исследованиям, которые ведутся сейчас на трех опытных установках мощностью от 50 кВт (фирма «Мицубиси дзюкогё») до 120 кВт (вышеупомянутая станция в Республике Науру), предшествовал почти двадцатилетний цикл исследовательских работ, выполненных различными научными организациями и в первую очередь группой проф.

Х. Уехары на факультете науки и техники университета в г. Сага. Здесь построена экспериментальная установка, позволяющая изучать весь цикл получения энергии с механической турбиной мощностью 1,3 кВт и генератором мощностью около 500 Вт и дающая возможность проводить изучение самых различных типов теплообменников. На основе экспериментов и моделирования процессов на ЭВМ давно уже разработаны новые типы конденсаторов и испарителей, в частности, пластинчатый испаритель с коэффициентом теплоотдачи $5,8 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (обычные трубчатые испарители обеспечивают около $3,6 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

По проекту «Саншайн проджект» кроме исследования путей преобразования энергии ведется широкий комплекс работ по изучению океанографических факторов, взаимодействия океана и атмосферы, взаимодействия ОТЭС с океаном и атмосферой. Изучаются, например, распространение воды, сбрасываемой будущей станцией, вихреобразование в фотической зоне, где смешение теплых и холодных вод может наиболее сильно повлиять на биологическую продуктивность моря [59]. Для сравнения эффективности различных типов теплообменников фирма «Мицубиси дзюкоге», например, установила в 1982 г. на своей опытной станции Син-Токусима два теплообменных аппарата, выполненных из титана,— кожухотрубный и пластинчатый. В рамках программы в 1985 г. планировался пуск опытной ОТЭС мощностью 1 МВт. В 1990 г. должна быть пущена станция мощностью 10 МВт (опытно-промышленная) и в 1996 г.— промышленная ОТЭС на 100 МВт. Вероятно, станция мощностью 1 МВт будет построена и на о. Науру.

Основные проекты, разрабатываемые на данном этапе развития океанской энергетики в США, также связаны с обеспечением электроэнергией не имеющих собственной топливной базы островов. В соответствии с планами министерства энергетики в первую очередь на возобновляемые источники энергии должны быть переведены штат Гавайи (население около 1 млн. чел.) и о. Гуам (25 тыс. чел.), затем о. Пуэрто-Рико (около 3 млн. чел.). Опубликованные в 1977 г. [44] планы развития океанской термоэнергетики включали на предварительном этапе отработку отдельных принципиальных узлов ОТЭС (теплообменников, трубопроводов холодной воды) с демонстрацией принципов на макете мини-ОТЭС, а затем на опытной установке ОТЭС-1. Следующим этапом должно было быть строительство опытно-промышленной станции ОТЭС-10 мощностью 10 МВт (одного из блоков будущей ОТЭС-40), промышленной станции ОТЭС-100 с четырьмя энергоблоками на 25 МВт каждый и, наконец, промышленной станции ОТЭС-400, которая наряду с ОТЭС-40 может стать серийным объектом. План предусматривал испытания ОТЭС-10 уже в 1984 г. и ОТЭС-100 — в 1985 г. Соответствующими федеральными законами концепция ОТЭС была введена в ранг государственной энергетической политики. Однако финансовые планы уже на 1983 г. не предусматривали государственных субсидий: администрация прекратила фи-

нансирование многих альтернативных программ, сконцентрировав все средства на развитии атомной энергетики.

Следующим шагом в развитии океанской теплоэнергетики может стать создание совершенно автономных станций, размещаемых в открытом океане и обеспечивающих выработку различных энергоносителей (водород, аммиак, окислы урана, литий, тяжелая вода) и других веществ, а также электроэнергии для подводных рудников и ферм для разведения марикультуры. В этом направлении сделано много, плавучие заводы по переработке морской воды и полезных ископаемых уже выпускаются серийно, дело практически за немногим: снабдить эти заводы собственным экономичным источником энергии. Более подробно варианты такого применения ОТЭС и других типов океанских преобразователей энергии будут рассмотрены в гл. 11.

Кроме того, у ученых — энергетиков появилась идея использовать для улучшения показателей станции простейшие солнечные нагреватели, способные превышать температуру воды до 50—60 °С. При этом термический КПД оказывается равным 14 %, соответственно уменьшаются необходимые площади теплообменников и расход воды для обеспечения той же установочной мощности. Такая станция, кроме обслуживания неэнергоемких потребителей может быть использована для утилизации тепла, сбрасываемого в океан при работе атомных и тепловых электростанций.

В нашей стране также разрабатываются несколько преобразователей тепловой энергии океана. Основные разработчики — сотрудники Государственного энергетического института им. Г. М. Кржижановского (Москва), Института теплофизики СО АН СССР (Новосибирск) и Тихоокеанского океанологического института (Владивосток) — предложили варианты проектов демонстрационных ОТЭС мощностью 500 кВт. Данные по владивостокскому проекту опубликованы в 1982 г. [13]. Станция предназначена для работы в центральных районах Тихого океана с температурой воды на поверхности 28 °С и на глубине не более 500 м с температурой не выше 10 °С. В станции замкнутого цикла в качестве рабочего тела использован фреон-22. В районе ее установки скорость течения должна быть не менее 0,1 м/с с тем, чтобы сброс отработанной воды осуществлять по течению. Проектанты показывают, что термический КПД цикла преобразователя будет не ниже 3 %, расход фреонового пара около 118 кг/с, тепловая мощность испарителя примерно 22,9 МВт, а конденсатора — 22,3 МВт. Расход теплой воды составит 2860 кг/с, а холодной — 2790 кг/с.

§ 2.5. ОТЭС с открытым рабочим циклом

Крупные промышленные ОТЭС с открытым рабочим циклом начали разрабатывать одновременно со станциями закрытого цикла, однако последние развивались более быстро, вероятно,

вследствие большей близости их технологии к традиционной технологии преобразования тепловой энергии, несмотря на то, что все надежды на существенное упрощение преобразователей и удешевление энергии связаны с системами открытого цикла.

Таблица 2.1

Сравнительные характеристики ОТЭС с открытым рабочим циклом [83]

Основные элементы и характеристики ОТЭС	Проекты ОТЭС			
	В	КШГД	УМ	Г
Мощность, МВт:				
общая	148	100	100	130
выходная	100	55	59	100
Турбина:				
число	1	8	1	6
внешний диаметр, м	46	20	72	24
КПД	0,82	0,85	0,93	0,84
материал лопастей	Композитный	Сталь	Сталь	Композитный
Испаритель:			Пленочный	
тип	Открытый канал	Пузырьковый		
расход пара, т/с	1,3	1,7	1,1	2,0
расход морской воды, т/с	340	250	120	390
механические потери мощности, МВт	13	14,5	27,6	—
Деаэратор:				
количество удаляемых газов, %	90	80	99,9	10
механические потери мощности, МВт	15	6	0,6	0
Конденсатор:				
тип	Поверхностный	Прямоконтактный	Поверхностный	Прямоконтактный
расход морской воды, т/с	420	190	240	390
паразитная мощность, МВт	20,0	19,4	12,6	—

К 1979 г. предварительные проектные разработки станций открытого цикла были выполнены четырьмя группами американских исследователей: сотрудниками компании «Гидронотикс», университета штата Массачусетс, школы горного дела в Колорадо, компании «Вестингауз». Эти разработки показали (табл. 2.1), что станция мощностью 100 МВт при расходе теплой воды 350 т/с, пара 1,5 т/с (испаряется около 0,5 % теплой воды) и холодной воды 140 т/с тратит более половины вырабатываемой энергии на собственные нужды (14,6 МВт в системе подачи теплой воды, 1,8 МВт на деаэрацию, 31,3 МВт на подачу холодной воды). Обнадеживающим был тот момент, что предварительные исследо-

вания показали возможность такого улучшения теплоотдачи в системах станции, что полезную мощность оказывалось возможным довести до 72 %.

Первые экономические оценки ОТЭС открытого цикла были не в их пользу: если оценки удельных капиталовложений для станций закрытого цикла давали величины примерно 1000 долл./кВт установленной мощности, то первые оценки, полученные фирмой «Вестингауз», составили 1476 долл./кВт, т. е. почти на 30 % больше. Сейчас ситуация изменилась. Прежде всего, создана

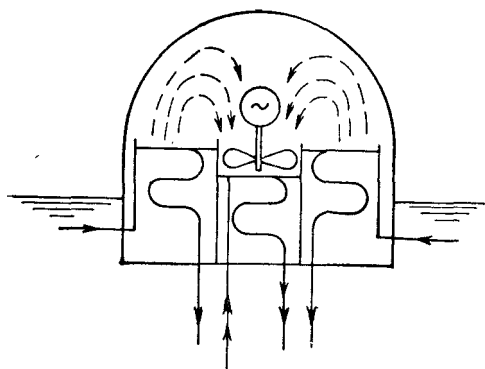


Рис. 2.11. Схема компактной ОТЭС открытого цикла

очень компактная схема компоновки ОТЭС открытого цикла с кольцевым испарителем (она приведена на рис. 2.11); также выяснено, что стоимость может быть снижена примерно на 200 долл./кВт, если вместо поверхностной конденсации, позволяющей, правда, вырабатывать пресную воду, проводить непосредственное охлаждение пара холодной водой. Кроме того, в результате серии исследований, проведенных Научно-исследовательским институтом солнечной энергетики США (SERI), оказалось возможным сильно упростить процедуру деаэрации, если не отказываться от нее вообще (снизить стоимость приблизительно на 200 долл./кВт по оценкам компании «Вестингауз»). Деаэрация необходима в случае полного испарения, если же испаряется лишь часть воды, да при этом еще температура поверхности жидкости падает, то растворимость газов не должна претерпевать существенного изменения. Кроме того, при непосредственном охлаждении отработанного пара холодной водой часть выделившихся газов должна ею поглощаться, что снизит необратимые потери от газовыделения в испарителе. Предварительные результаты исследований, выполненных университетом штата Гавайи, показали, что существенного газовыделения из охлаждающей воды при ее подъеме на поверхность не обнаружено. Это также говорит в пользу систем прямого охлаждения с прокачкой теплой воды через испаритель. В свою очередь, необратимые потери из-за частичного выделения неконденсируемых газов можно компенсировать за счет некоторого увеличения тепловой мощности.

В качестве одного из наиболее существенных недостатков ОТЭС открытого цикла часто называлась необходимость использования турбин низкого давления — анемометрических турбин, как их еще называют. Такие турбины требовали разработки, в то время как для ОТЭС замкнутого цикла принципиально можно использовать стандартные турбины, выпускаемые промышленностью. И этот недостаток можно считать на сегодняшний день устраненным: для блока мощностью 100 МВт компания «Вестингауз» разработала требуемую турбину с диаметром ротора 19,8 м, длиной лопастей 12,2 и частотой вращения 3 Гц. Турбина рассчи-

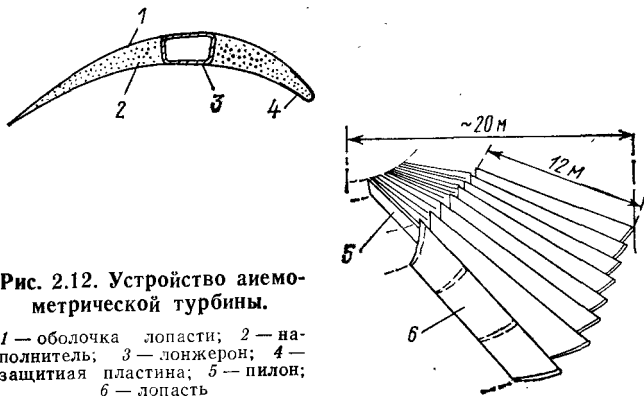


Рис. 2.12. Устройство анемометрической турбины.

1 — оболочка лопасти; 2 — наполнитель; 3 — лонжерон; 4 — защитная пластина; 5 — пилон; 6 — лопасть

тана на работу при температуре насыщенного пара на входе $23,4^{\circ}\text{C}$ при давлении 2850 Па и давлении на выходе 1270 Па. В работах по проектированию турбины участвовали специалисты университета штата Делавэр (США), создавшие аналитическую методику расчета удлиненных облегченных лопастей из композитных материалов. Предварительные результаты оказались неудовлетворительными из-за чрезмерного скручивания лопастей под действием аэродинамических нагрузок. После установки в центральной части лопастей дополнительных лонжеронов они приобрели требуемую жесткость. Лопасть (рис. 2.12) формируется тонкой (толщиной примерно в 1 мм) оболочкой, заполненной пенополиуретаном. Кромка лопасти, воспринимающая наибольшие нагрузки, защищена пластиной из нержавеющей стали толщиной 0,6 мм. Схема крепления лопастей к внутреннему диску показана на рис. 2.12. В настоящее время ведутся отработка технологии изготовления и испытание опытных образцов турбины.

Окончательные выводы об эффективности и работоспособности ОТЭС открытого цикла могут быть сделаны лишь после испытания достаточно крупных опытно-промышленных станций. Это же, впрочем, касается и ОТЭС замкнутого цикла.

ДРУГИЕ ТИПЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

§ 3.1. 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 [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 $\eta = (T_{01} - T_{02}) / (2T_{01})$, где T_{01} — температура теплой подледной воды (275 К); T_{02} — температура охлаждающего воздуха (до 233 К). Значительный перепад температур может компенсировать снижение КПД. Теоретическую мощность такой ОТЭС можно оценить с помощью формулы В. А. Акуличева [1]

$$P = \rho k c_p u A \eta \frac{(T_{01} - T_{02})^2}{2T_{01}}, \quad (3.1)$$

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 м² площади океана при разности температур воды и воздуха, равной 10 °С, составляет примерно 18 кВт/м²,

при разности 20°C — 60 кВт/м^2 , а при разности 30°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 [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 .

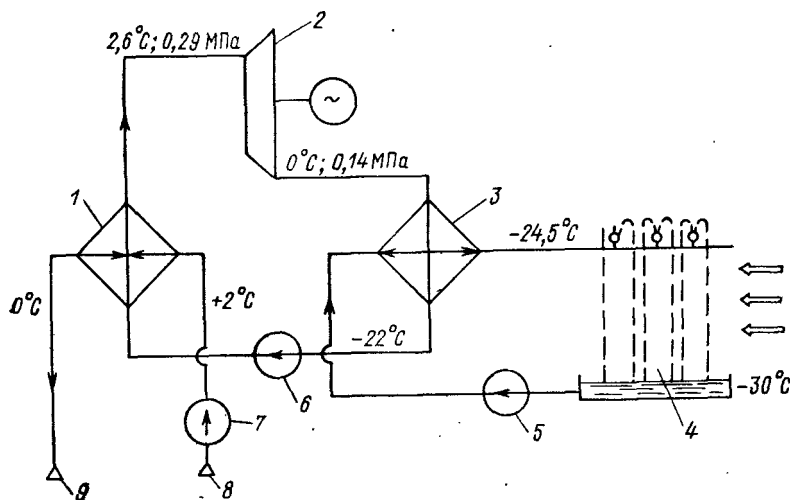


Рис. 3.1. Схема арктической ОТЭС на перепаде вода—воздух [14].

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 — патрубок сброса отработанной воды

Одной из неприятных для энергетиков особенностей такой ОТЭС оказывается то, что ее работа, по крайней мере для тех проектов, что до недавнего времени обсуждались в литературе, носит сезонный характер. Оценивая на основе многолетней климатической информации продолжительность существования в прибрежных районах советского сектора Арктики устойчивой разности температур $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, Ю. П. Доронин с сотрудниками [21] показал, что в среднем на большей части акватории можно рассчитывать на эксплуатацию ОТЭС в течение примерно 180 сут. Таким образом, полярная ОТЭС может рассматриваться как сезонная, и в теплое время года требуется переход на другие источники энергии, например, на запасенный в период работы водород, полученный электролизом.

На рис. 3.1 приведена разработанная А. К. Ильным 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 напо-

минает обычные тепловые станции с градирнями для охлаждения отработавшей воды, но надо иметь в виду, что 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. Авторы предлагают в качестве промежуточного теплоносителя применять 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. 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/(м²·К). Такие значения коэффициентов теплоотдачи, конечно, уступают получаемым в настоящее время в конструкциях водо-водяных теплообменников традиционных ОТЭС [до 5 кВт/(м²·К)], но превышают примерно в 5 раз характерные величины для простейших воздушных теплообменников станций без промежуточного теплоносителя. Это позволяет по расчетам авторов снизить металлоемкость конденсаторов и примерно на 20 % увеличить выработку полезной энергии.

Основные характеристики демонстрационной ОТЭС-01 на разности температур океан—атмосфера, которую предлагается построить и испытать в Арктике *

Расход пара фреона, кг/с	12,38
Тепловая мощность, кВт:	
испарителя	2409
конденсатора	2039
Расход морской воды через испаритель, кг/с	302,3
Поверхность теплообмена испарителя, м ²	427
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	1614
Количество и длина трубок, шт./м	1950/3,9
Скорость воды в трубках, м/с	1,5
Диаметр трубной доски, м	1,2
Гидравлическое сопротивление движению воды, кПа	28,0
Средний диаметр облопачивания турбины, м	0,21
Частота вращения, 1/с	50
Стандартный профиль сопловой решетки	C9015A
Высота лопаток, м	0,0677
Размер трубок испарителя (конденсатора), мм	16/18 (титан)

* Параметры рабочих жидкостей приведены на рис. 3.1.

Вероятно, станцию с такими параметрами можно построить и без второго контура, тем более что последние исследования в области создания воздушных холодильников применительно к задачам обогрева зданий показывают возможность существенного увеличения коэффициентов теплоотдачи от охлаждаемых поверхностей к воздуху за счет размещения труб, увеличивающего турбулентность потока. При этом общий перенос тепла примерно удваивается вследствие оребрения труб, дающего увеличение энергосъема в 5—10 раз при использовании двухфазных потоков (увеличение теплосъема от 2 до 10 раз). Последнее правда, вряд ли найдет применение для условий Арктики, так как в качестве второй фазы в поток обдувающего трубки воздуха предлагается добавлять мелкодисперсные капли воды. Однако еще одним средством усиления теплообмена без применения дополнительных вентиляторов, поглощающих львиную долю вырабатываемой мощности, может оказаться использование концентраторов ветра. П. Ле Гоффом из Лотарингского национального политехнического института Франции показано, например, что с учетом вышесказанного выражение для теплоотдачи к потоку ветра можно применять в виде $\lambda = 20 - 100u^{0.6}$ Вт/(м²·К), где нижнее значение коэффициента как раз соответствует использованному А. К. Ильиным и В. В. Тикменовым.

В пользу применения промежуточного хладагента можно привести еще одно соображение. Авторы проекта не учитывают охлаждения капель вследствие испарения части жидкости, а это немаловажный фактор, который в их конструкции может быть использован для увеличения длительности сезона работы АОТЭС, вероятно, не менее чем на 60 дн. Возможно для этого придется изменять концентрацию хлористого кальция в зависимости от температуры при стабильном увеличении температуры воздуха.

Сделать небольшие поселки в Арктике независимыми от привозного топлива с помощью возобновляемых источников (ОТЭС, ВЭС и др.) — вполне реальная задача. Экономические оценки показывают, что с помощью АОТЭС затраты на установленный киловатт мощности могут быть доведены до 350 руб./кВт (верхняя оценка 1500 руб./кВт), при стоимости вырабатываемой энергии 1,5—4 коп./(кВт·ч) [14].

§ 3.2. Особенности технических решений ОТЭС

В настоящее время рассматривается несколько способов строительства ОТЭС: в прибрежной зоне, на искусственных островах и стационарных платформах, на плавучих заякоренных и дрейфующих основаниях. В каждом случае ОТЭС может быть объединена с заводом по переработке морской воды или другого вида сырья. Основные элементы ОТЭС, вокруг которых идет полемика и на усовершенствовании которых концентрируются усилия разработчиков — собственно энергоблоки станций с теплообменными

аппаратами и турбинами, трубопроводы холодной воды, якорные системы плавучих сооружений, системы для передачи энергии потребителям.

Принято считать, что береговые станции рентабельны, если требуемые глубины с подходящей температурой охлаждающей воды находятся достаточно близко от побережья и длина трубопровода не превышает 1—3 км. Такая ситуация характерна для многих островов тропического пояса, представляющих собой вершины подводных гор и потухших вулканов и не имеющих собственного материкам протяженного шельфа: их берега достаточно круто спускаются по направлению к океанскому ложу. Если берег достаточно удален от зон требуемых глубин (например, на островах, окруженных коралловыми рифами) или отделен полого понижающимся шельфом, то для сокращения длины трубопроводов энергоблоки станций могут быть вынесены на искусственные острова или стационарные платформы — аналоги используемых при морской добыче нефти и газа. Преимущества наземных и даже островных станций в том, что исчезает необходимость в создании и обслуживании дорогостоящих, подвергающихся воздействию открытого океана сооружений — будь то искусственные острова или стационарные основания. Однако два существенных фактора, ограничивающих береговое базирование, все-таки остаются: ограниченность соответствующих островных территорий и необходимость прокладки и защиты трубопроводов.

Техника прокладки подводных трубопроводов диаметром до 2 м достаточно отработана, но при строительстве ОТЭС необходимы трубопроводы значительно большего сечения (до 30 м в диаметре для станции мощностью 400 МВт). Эквивалентное сечение может быть набрано в помощью нескольких ниток труб меньшего диаметра, но в этом случае увеличиваются потери — и гидравлические, и тепловые. При плавном понижении дна наплавным методом можно построить достаточно крупногабаритную конструкцию, частично заглубив ее в грунт в зоне прибоя, или, лучше сказать, в зоне, подверженной воздействию штормов. Сложнее обстоит дело при необходимости опустить конец трубопровода на глубину вдоль вертикальной стенки или стенки со значительными углами падения. Но и здесь конструкторская мысль находит пути решения, позволяющие преодолеть трудности прокладки и обслуживания трубопровода. Разработана конструкция трубопровода для подачи холодной воды* в условиях крутопадающих склонов каналов (рис. 3.2). Способ прокладки основан на технологии проходки параллельных скважин при добыче нефти и газа, отработанной, можно сказать, в совершенстве. Скважины можно проходить вертикально в верхней части и с уклоном в нижней. Количество скважин и расстояние между ними выбирают в зависимости от потребного расхода воды и свойств грунта. Для повышения точности проходки на грунт в основании буровой накладывают кон-

* Патент США № 4397582, 1983 г.

дукторную плиту. После того как скважины пройдены, в них начиная от выходной части закладывают заряды и обрушивают перемычки для создания единого канала, после чего стенки последнего могут быть обработаны, либо внутрь канала может быть введен секционированный трубопровод для уменьшения сопротивления движению воды. Подобная конструкция трубопровода островной ОТЭС позволяет одновременно решить несколько задач,

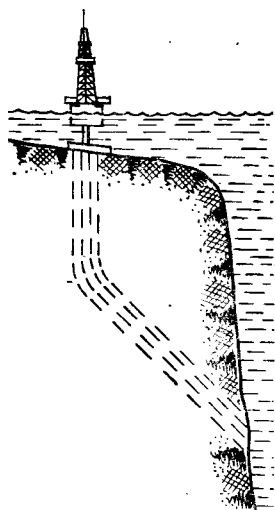


Рис. 3.2. Трубопровод для ОТЭС, проложенный в скальных породах

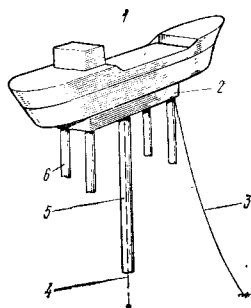
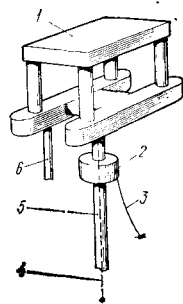


Рис. 3.3. Схема крепления плавучей ОТЭС к трубопроводу с переходной платформой [83].

1 — платформа с агрегатами ОТЭС; 2 — переходная платформа; 3 — якорный трос; 4 — монтажный трос; 5 — трубопровод для подъема холодной воды; 6 — трубопровод для сброса воды



связанных с прокладкой, защитой и обслуживанием системы забора холодной воды. Открываются возможности применения в строительстве ОТЭС и методов проходки тоннелей большого диаметра известными «сухопутными» способами. В этом случае тоннель может быть полностью обустроен практически на всю длину до заполнения водой и лишь после этого подключен: соединен с океаном путем разрушения сравнительно тонкой перемычки, например направленным взрывом.

Проект первой коммерческой ОТЭС, предназначенной для снабжения электроэнергией о. Оаху (США, штат Гавайи), предусматривает использование плавучей заякоренной конструкции, устанавливаемой вблизи берега (глубины здесь позволяют) и передающей электроэнергию с помощью высоковольтного кабеля. Достоинство такой схемы заключается в отсутствии необходимости капитального строительства при прокладке трубопровода, недостаток — в подверженности влиянию погодных условий, из-за чего такую станцию, рассчитанную на работу в течение 30—40 лет, приходится проектировать с учетом экстремальных нагрузок шторма,

происходящего раз в столетие (требование, ограничивающее возможность использования многих типов океанских преобразователей). Это ведет к значительному удорожанию проектов прибрежных станций.

Специалистами компании «Джианотти энд ассошиэйтес» (США) выполнены исследования нового варианта комплекса мореходная платформа—трубопровод холодной воды, отличающегося тем, что в него введен промежуточный элемент — переходная платформа (рис. 3.3), постоянно соединенная с трубопроводом и закрепленная на якорях на океанском дне в толще воды. Мореходная платформа со всем энергетическим оборудованием может отсоединяться от переходной платформы в случае получения штормового предупреждения, либо при необходимости провести ее обследование или ремонт, и уходить в защищенную гавань. При соединении мореходной платформы с переходной происходит не только стыковка трубопровода холодной воды, но и подключение высоковольтного кабеля, который также стационарно соединен с переходной платформой. Последняя после разъединения может быть притоплена на безопасную для нее глубину.

Развязка трубопровода и мореходной поверхностной платформы кроме облегчения условий эксплуатации последней позволяет снизить нагрузки, возникающие в трубопроводе, и повысить срок его службы. Как варианты технической реализации были рассмотрены системы, в которых в качестве надводного средства использованы двухкорпусная платформа-катамаран с переменной осадкой и обычная судовая конструкция, непосредственно стыкующаяся с переходной платформой, причем характеристики надводных средств и переходных платформ определены для гаммы мощностей будущих станций 10, 25, 40, 50, 100, 200 и 400 МВт. Выполненные экспериментальные исследования применительно к эксплуатационным условиям Пуэрто-Рико при двух режимах — эксплуатационном и критическом, — показали техническую приемлемость обоих решений. Вариант судового типа оказался более эффективным для станций небольшой мощности (для обоих вариантов моделировалась мощность 40 МВт, для судового максимальная мощность составляла 240 МВт, а для катамаранного — 460 МВт). Второй вариант показал увеличение остойчивости с увеличением водоизмещения [80].

Другой вариант платформы для плавучей заякоренной станции — цилиндрический погружной буй, связанный с поверхностью башней с размещенной на ее вершине вертолетной площадкой. Такая конструкция позволяет опустить все агрегаты ОТЭС на глубину, где они не подвержены воздействию волн. При этом и сочленение трубопровода и корпуса платформы оказывается защищенным от влияния природных явлений. Такой погружной буй разработан специалистами компании «Локхид» (рис. 3.4, а—б). По периферии цилиндрического корпуса буя, заглубленного примерно на 100 м от поверхности океана, размещены автономные энергетические модули, по первоначальному проекту рассчитанные

на мощность 50 МВт каждый, запитывающиеся холодной водой по общему трубопроводу. Способ крепления станции к океанскому дну показан на рис. 3.4, в, однако такая конструкция может быть и дрейфующей.

Дрейфующие ОТЭС, представляющие собой полностью автономные сооружения и потребляющие производимую ими электроэнергию для обеспечения работы совмещенных с ними заводов по выпуску энергоносителей или энергоемких веществ, позволяют наилучшим образом использовать метеорологические условия на поверхности океана. В зависимости от прогноза теплового режима такие станции могут перемещаться в районы с максимальными перепадами температур, обеспечивая работу установок при наивысших термических КПД. Управлять таким перемещением можно с помощью искусственных спутников Земли, оборудованных соответствующей чувствительной к тепловому излучению океана аппаратурой [50].

Конструкция платформы во многом определяет особенности всей станции. При разработке платформ и общей компоновке ОТЭС можно опираться на ряд критериев, полученных в результате исследований различных специалистов и подытоженных Дж. Вадусом (США, Национальное управление по исследованию атмосферы и океана) [86]:

все необходимое для жизнедеятельности персонала следует размещать выше уровня воды с тем, чтобы обеспечить сохранение здоровья и достаточную безопасность; это же позволяет снизить технические требования к системам регулирования плавучести;

обоснованным является размещение испарителей, конденсаторов и систем преобразования рабочего тела в подводных помещениях вместе с турбинами и генераторами; в то же время системы, позволяющие контролировать работу станции, желательно размещать в надводных помещениях; компоновать оборудование следует так, чтобы максимально снизить потери на транспортировку рабочего тела;

фундаменты платформ и трубопроводов, размещенных на наклонном шельфе, очень чувствительны к возможным смещениям одних частей относительно других;

развертывание и установка платформ и трубопроводов на шельфе — нестандартная инженерная задача;

инспекцию, обслуживание и ремонт следует рассматривать в единой системе с конструктивными особенностями станции на весь период ее работы;

крайне важно определить длину трубопроводов сброса отработанных вод устанавливаемых на шельфе систем с тем, чтобы не снизился КПД из-за смешения вод;

место для установки ОТЭС необходимо выбирать из условий циркуляции и стратификации вод, гарантирующих надежность источника тепловой энергии.

В этих критериях сочетаются требования к конструкциям и размещению станций в среде, причем наиболее чувствительными

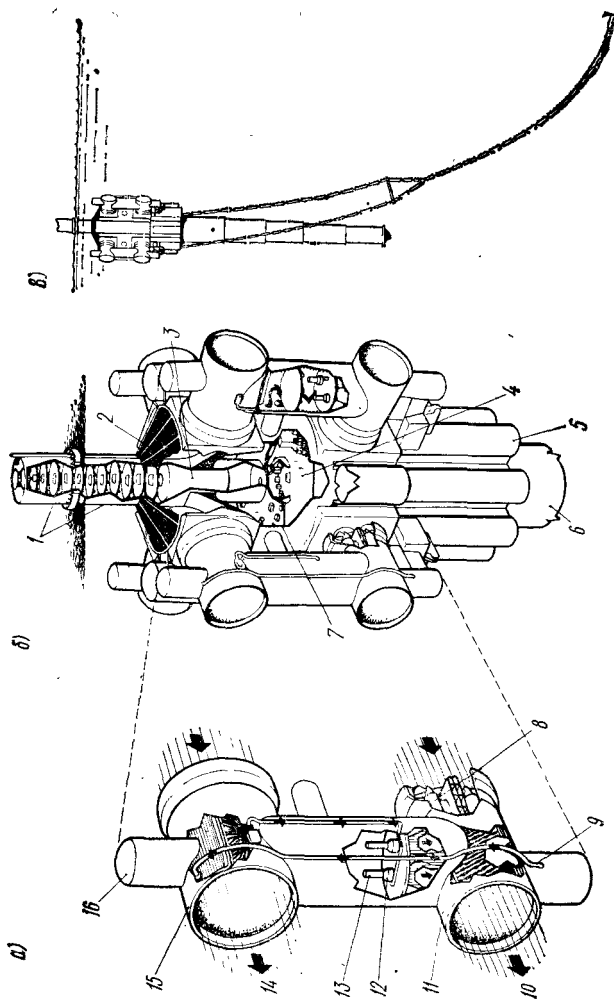


Рис. 3.4. Схема размещения оборудования на стационарной плавучей ОТЭС в виде океанского буйа [1]: а — энергетический модуль; б — общий вид; в — схема крепления ОТЭС к океанскому дну.

1 — помещение для якоря; 2 — вход тепловой поверхности воды; 3 — запасы рабочего тела (аммиак); 4 — зал контроля работы агрегатов; 5 — балластная цистерна; 6 — трубопровод для подъема холодной глубоинной воды; 7 — помещение для электроснабжения; 8 — водяной насос; 9 — трубопровод для подачи рабочего тела; 10 — выход отработанной холодной воды; 11 — конденсатор; 12 — турбина; 13 — электрогенератор; 14 — выход отработанной тепловой воды; 15 — испаритель; 16 — балластная цистерна

к различного рода обстоятельствам оказываются именно ОТЭС, размещаемые на шельфе и выполняемые в виде стационарных платформ. Такие конструкции в сейсмически опасных районах должны выдерживать сейсмические нагрузки. Достаточно богатый опыт эксплуатации в таких районах нефтедобывающих платформ подтверждает возможность создания платформ и для ОТЭС с использованием тех же принципов проектирования. Можно отметить, что платформы, используемые в Северном море, по габаритам и водоизмещению соответствуют конструкциям, требующимся для ОТЭС. Например, платформа «Ниниан» водоизмещением 610 тыс. т по

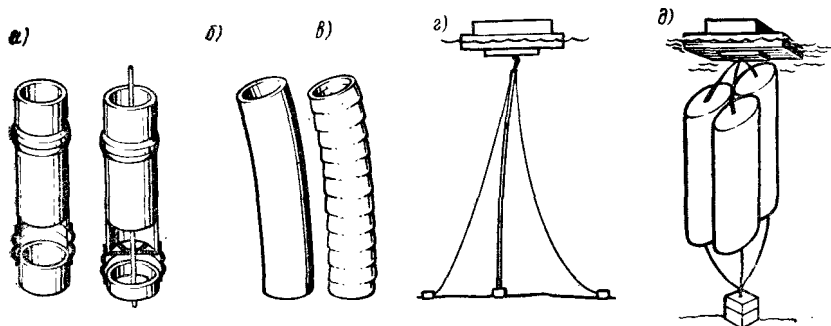


Рис. 3.5. Варианты конструкций трубопроводов ОТЭС океанского базирования [78]: а — жесткий трубопровод с эластичными соединениями; б — эластичный трубопровод; в — трубопровод из армированного пластика; г — трубопровод из плавучего материала с донным грузом; д — многотрубный трубопровод

параметрам соответствует платформе оптимальной по мощности ОТЭС в 400—500 МВт. При создании подобных ОТЭС основные трудности связаны с разработкой надежных систем соединения и отключения трубопроводов холодной воды [50].

Однако в настоящее время именно трубопроводы считают наиболее уязвимым местом ОТЭС. Действительно, трубопровод холодной воды представляет собой довольно грандиозное сооружение. Станции мощностью 40 МВт необходим трубопровод длиной порядка километра и диаметром 10 м. Для станции 400 МВт требуется уже трубопровод диаметром около 30 м. Скорость движения воды в трубопроводах должна быть не менее 2 м/с, чтобы обеспечить на таком пути незначительное повышение температуры. Производительность насосов холодной воды 400 МВт станции составляет примерно 1600 м³/с, что вместе с таким же расходом тепловой воды оказывается примерно равным половине среднегодового расхода такой крупной реки, как Волга.

Трубопроводы не следует жестко крепить к платформам, чтобы не создавать риска аварий [70]. К настоящему времени разработано уже вероятно не менее 100 технических решений, в основе которых лежат различные принципы стыковки, различные материалы, конструктивное исполнение (рис. 3.5, а—д). Рассматри-

ваются возможности использования для трубопроводов стали, бетона, армированных стеклопластиков, нейлона, кевлара и т. п.

Конструкции трубопроводов к элементам для подключения к платформам и для защиты водозаборника от попадания различных предметов и животных рассчитывают на весь срок службы ОТЭС (от 30 до 40 лет). Особенности конструкций и материал определяют стоимость трубопроводов. Экономические расчеты показывают, что наиболее дешев стеклопластиковый трубопровод: его стоимость почти в два раза меньше стоимости аналогичного трубопровода из стали. Работы по проектированию трубопроводов включают исследования условий эксплуатации, изучение возможных нагрузок на трубопровод как в процессе установки, так и при эксплуатации, прочностные расчеты и разработку технологии изготовления и установки. Созданию натурных образцов трубопроводов предшествуют длительные эксперименты на моделях, выполненных в различных масштабах.

Например, в процессе создания трубопровода для ОТЭС-40 проводились испытания его макета в $1/3$ натуральной величины. Трехсотметровый стеклопластиковый трубопровод диаметром 3 м был изготовлен из секций длиной по 12 м, которые сращивались в блоки длиной 24 м. В верхней части трубопровода крепилась стальная переходная секция для подключения к карданову подвесу, присоединенному к днищу испытательной баржи. К каждой секции через 6,1 м прикреплялись кольца жесткости для обеспечения формы канала. К нижней, также стальной, переходной секции крепился груз массой около 82 т для предотвращения раскачивания трубопровода. Сами стеклопластиковые секции были изготовлены из слоев стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. В сечении трубопровод имел два слоя толщиной по 8 мм каждый, между которыми был проложен слой пенопласта толщиной 34 мм. Плотность стеклопластика составляла 1300 кг/м^3 , а прокладки — 657 кг/м^3 . Отрицательная плавучесть трубопровода была равна 90 Н/м . Трубопровод буксировался к месту установки по плану с помощью поплавков в незатопленном состоянии. Нижняя секция и груз транспортировались на барже. На месте установки трубопровод был освобожден от поплавков и плавно с помощью крановых судов опущен в вертикальное положение. Затем его прикрепили к карданову подвесу баржи. В процессе опускания с помощью датчиков велись наблюдения за деформацией секций. Интересно отметить, что эти операции по монтажу и установке трубопроводов в море не были оригинальными: еще за пять лет до этого специалисты по трубопроводам ОТЭС привлекались к созданию также вертикального трубопровода морской биологической фермы Уилкокса для выращивания тихоокеанского келпа (см. гл. 9) [70]. Главными целями натурных испытаний были оценка характеристик трубопровода и проверка расчетной модели, описывающей динамические характеристики комплекса платформа—трубопровод—якорная система. Адекватность такой модели физическим процессам, происходящим в системе, особенно важна при установке натур-

ного трубопровода, когда даже небольшие отклонения в нагрузках от расчетных могут привести к серьезным последствиям.

И наконец, рассмотрим такой важный элемент ОТЭС замкнутого цикла, как теплообменники. Многие исследователи указывают на то, что именно они являются наиболее уязвимыми компонен-

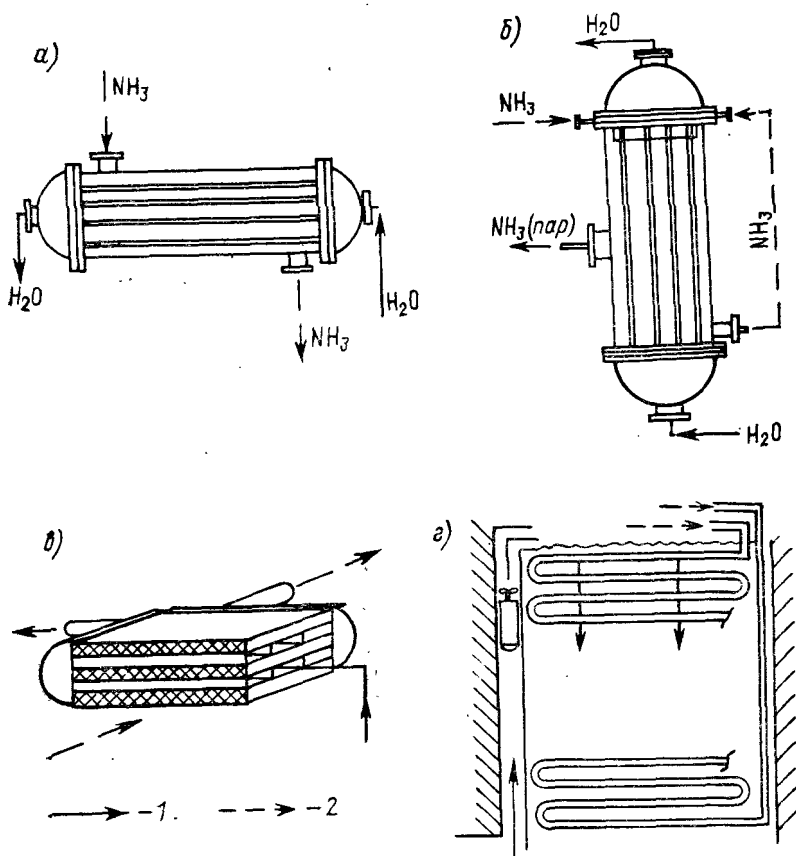


Рис. 3.6. Основные типы теплообменников ОТЭС: а — кожухотрубный; б — вертикально-плочный; в — пластинчатый; г — со змеевиками.
1 — направление движения воды; 2 — направление движения рабочего тела

тами, эффективность которых в конце концов и определит рентабельность этого вида преобразователей. Действительно, оценки специалистов показывают, что стоимость этих элементов составляет до 40 % общей стоимости ОТЭС, а их надежность определяет экономические показатели станций за весь срок службы [78]. Основными на сегодняшний день считаются кожухотрубные и пластинчатые теплообменники, причем первые (рис. 3.6) наиболее технологичны и в смысле сборки, и в смысле эксплуатации. Серийный

крупный современный кожухотрубный теплообменник имеет эффективную поверхность теплообмена около 46 тыс. м², в то время как для ОТЭС мощностью 400 МВт требуется поверхность в 40 раз большая. Для изготовления теплообменников могут использоваться медно-никелевые сплавы, нержавеющая сталь, сплавы алюминия, титан. Медно-никелевые теплообменники хорошо стоят в морской воде, но несовместимы с аммиаком — наиболее перспективным рабочим телом. Сталь наименее технологична, дорога, обладает наиболее низкой теплопроводностью. Наиболее перспективными считают сплавы алюминия и титан, правда, последний примерно в 3 раза дороже, но обладает повышенной коррозионной стойкостью по сравнению с первым.

Одним из этапов государственной программы разработки ОТЭС в США было как раз создание макетных образцов теплообменников мощностью 0,2 МВт и выбор наиболее эффективных систем для закладки их в проект модуля ОТЭС-10. Были привлечены компании «Дженерал электрик», «Си соляр пауэ», «Локхид», «Альфа-Лаваль», TRW, «Линдэ». Проект первых двух компаний был основан на пластинчатом теплообменнике с горизонтальной подачей воды и вертикальной — аммиака. Для защиты теплообменника от обрастания через него должна пропускаться песчаная суспензия. По предварительным оценкам удельная стоимость теплообменника составляет 565 долл./кВт. Аналогичной была конструкция титанового теплообменника компаний «Локхид» и «Альфа-Лаваль», только для борьбы с обрастанием предполагалось использовать специальный раствор. Удельная стоимость его составляла 718 долл./кВт, причем считалось возможным существенно снизить ее за счет использования в качестве материала стали с гальваническим покрытием. Теплообменник же, представленный компаниями TRW и «Линдэ», состоял из полукруглых пластин, выполненных из алюминиевого сплава, с нанесенным на рабочие поверхности специальным покрытием, улучшающим эксплуатационные характеристики. Для борьбы с обрастанием использовались механические средства и хлорирование. Удельная стоимость была оценена в 276 долл./кВт, однако сравнивая эту цифру с предыдущей, надо иметь в виду то обстоятельство, что титановый теплообменник рассчитан на 30 лет службы, а алюминиевый необходимо заменять через 15 лет работы.

Для испытания теплообменников в Аргоннской национальной лаборатории была создана специальная широкодиапазонная автоматизированная установка, аппаратура которой позволяет проводить измерения параметров с высокой точностью. Например, температура воды и аммиака может измеряться кварцевыми термометрами с точностью $\pm 0,01$ °C, давление паров аммиака в испарителе и конденсаторе — с помощью кварцевого кристаллического преобразователя с точностью $\pm 0,3$ Па, различие в давлениях — с помощью калибруемых датчиков с точностью $\pm 0,5$ % барометрического давления. С такой же точностью измеряются датчиками полного напора скорости потоков воды и жидкого аммиака.

С 1977 по 1980 г. в Аргоннской лаборатории испытан 21 теплообменный аппарат. Основные выводы по результатам испытаний заключаются в том, что прежде всего, получаемые параметрические зависимости можно использовать при разработке более мощных теплообменников, далее, «тонкие» способы увеличения теплообмена могут быть в реальных конструкциях блокированы различными загрязнениями, в частности загрязнение аммиака даже 0,1 % воды ухудшает свойства преобразователей. Изучение пленочных испарителей с верхней подачей аммиака показало, что в них достаточно трудно создать равномерную пленку по всей поверхности испарителя, и этому моменту необходимо уделять особое внимание при проектировании. Эффективность пластинчатых теплообменников можно значительно увеличить за счет создания условий двухфазной теплопередачи на стороне аммиака. Испытания теплообменников из сплавов алюминия подтвердили большие перспективы их использования в связи с удачным сочетанием их высокой производительности и низкой стоимости. Вероятно, таким преобразователям будет отдано предпочтение при создании промышленных ОТЭС.

Вопросы, касающиеся способов передачи энергии и использования электроэнергии, получаемой на ОТЭС непосредственно в открытом море, будут рассмотрены в гл. 11, поскольку они имеют отношение практически ко всем типам океанских преобразователей энергии.

§ 3.3. Прямое преобразование тепловой энергии

Прямое преобразование тепловой энергии всегда кажется заманчивым: отпадает необходимость в механических турбинах и электрогенераторах, гигантские испарители и конденсаторы заменяются теплообменными аппаратами, стенками которых служат структуры из термоэлектрических батарей, практически не испытывающих механических нагрузок из-за разности давлений в контурах — она может быть сведена к нулю. Остаются лишь системы подачи теплой и холодной воды да системы для контроля и управления работой ОТЭС. Сводится к минимуму возможность аварийного выброса в среду химических реагентов — они используются лишь для предотвращения обрастания и коррозии, впрочем, вместо биоцидов можно применять физические методы очистки, тем более что такие преобразователи по своей природе обратимы и, периодически изменяя направление тока теплой и холодной воды, можно бороться с теплолюбивыми обрастателями.

Схема ОТЭС на термоэлектрических преобразователях показана на рис. 3.7. 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;

$$E = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \Delta T, \quad (3.2)$$

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

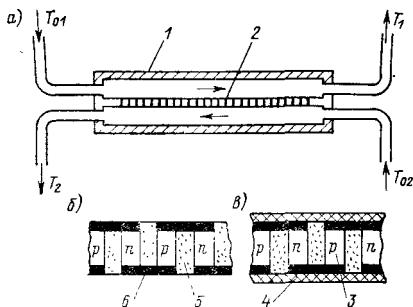


Рис. 3.7. Схема ОТЭС с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую [68]: а — устройство отдельного блока; б, в — варианты устройства термоэлектрического преобразователя.

1 — кожух; 2 — термоэлектрический генератор; 3 — полупроводниковые элементы с n - и p -проводимостью; 4 — поверхность изолирующее покрытие; 5 — изолятор; 6 — соединительные шины

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 термоЭДС 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.

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 съём полезной мощности. Однако при этом необходимо иметь в виду, что в опытах японских исследователей в качестве носителя энергии использовалась не сама мор-

ская вода, а фторуглеродистые соединения. Правда, как отмечают сами исследователи, возможно применение и дистиллированной воды. Таким образом, увеличения сьема энергии достигают за счет введения промежуточного подогрева и охлаждения вспомогательного теплоносителя, а это, в свою очередь, снижает эксплуатационные показатели преобразователя и увеличивает его материалоемкость. На выходные параметры термоэлектрических преобразователей кроме разности температур влияют условия теплообмена [68].

Полезная мощность оказывается такой функцией условий обтекания, что ее максимальная величина $P_{\max} = u_{x,x}^2 / (4NR^*)$, где $u_{x,x}$ — напряжение, развиваемое на разомкнутых электродах (напряжение холостого хода генератора); N — число термоэлектрических элементов в генераторе; R^* — эквивалентное сопротивление отдельного термоэлектрического элемента (точнее, эффективное сопротивление, учитывающее свойства обтекающего спай потока). Введение последней величины позволяет анализировать действие термогенератора в зависимости от условий обтекания. Действительно, японскими исследователями показано, что эта величина описывается соотношением

$$R^* = R + \frac{\alpha^2 (T_{01}\lambda_{э.т} + T_{02}\lambda_{э.х})}{A\lambda_{э.т}\lambda_{э.х} + k(\lambda_{э.т} + \lambda_{э.х})}, \quad (3.3)$$

где R — внутреннее сопротивление отдельного термоэлемента; α — постоянная Зеебека, $\alpha = |\alpha_n| + |\alpha_p|$; $\lambda_{э.т}$ и $\lambda_{э.х}$ — коэффициенты теплоотдачи от теплой воды элементам и от элементов холодной воде; k — теплопроводность через термоэлементы. Таким образом, R^* зависит от условий обтекания (коэффициенты теплоотдачи являются функцией степени турбулентности потока, определяемой характерным числом Рейнольдса Re), от конструктивного выполнения термоэлектрического модуля (коэффициент k учитывает, что часть поверхности теплообмена A занята собственно элементами, а часть — изоляторами, отделяющими термоэлементы друг от друга) и, наконец, от свойств полупроводниковых материалов и температуры спаев.

Графики, приведенные на рис. 3.8, позволяют судить об изменениях напряжения холостого хода, максимальной мощности и мощности, выделявшейся на сопротивлении нагрузки в зависимости от перечисленных величин. Эксперименты, главной целью которых было выявить отличие в работе изолированного и неизолированного от потока термоэлементов, проводились на блоке из 32 пар n - и p -типа теллурида висмута. Каждый кристалл имел площадь $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ и длину $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В качестве изолятора (в опытах с изолированными от потока термоэлементами) использовались акрил-резиновые пластинки толщиной $1,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. На рис. 3.8, а видно, насколько сильно влияет установка защитного слоя. Величины мощности (рис. 3.8, б) рассчитаны по обычному соотношению $P = I^2 R_n$. В работе [68] показано, что экспериментальные и расчетные значения величин совпадают с большой

степенью точности. Графики демонстрируют линейную зависимость ЭДС (напряжение холостого хода) от величины перепада температур ΔT и несколько более сложную зависимость максимальной мощности от числа Рейнольдса Re . Путем интенсификации теплообмена можно повысить выходную мощность термоэлектрического преобразователя почти на порядок. Анализ результатов опытов показывает, что, изменяя толщину изолирующей пластинки, можно, по всей вероятности, также улучшить теплообмен (рис. 3.8, в). Таким образом, в системе термогенератора с изолированными спаями за счет подбора покрытия с хорошими адгезионными

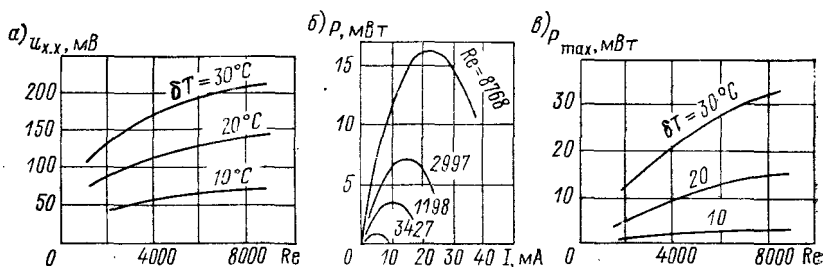


Рис. 3.8. Зависимости некоторых параметров термоэлектрических преобразователей от режимов обтекания и тока нагрузки [68]: а — напряжение холостого хода в зависимости от режима обтекания; б — полезная мощность в зависимости от величины нагрузки; в — максимальная мощность в зависимости от режима обтекания

свойствами при приемлемо малой толщине можно избежать усложнения схемы термоэлектрической ОТЭС.

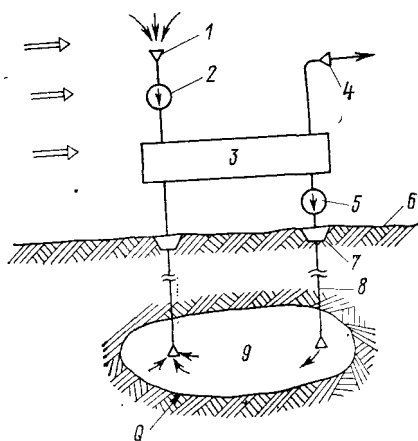
ОТЭС, созданные на описанном принципе, вероятно, можно применить для обеспечения электроэнергией комплексов подводной добычи полезных ископаемых на океанском дне. В этом случае можно объединить известную схему геотермальной электростанции с ОТЭС, заставив циркулировать теплоноситель по замкнутому контуру через толщу пород дна подобно тому, как показано на схеме, приведенной на рис. 3.9. В пользу такого объединения говорят несколько факторов. Прежде всего, в толще морского (океанского) дна породы, обладающие температурами $200\text{--}300^\circ C$, залегают на глубинах, значительно меньших, чем на поверхности суши. Если при бурении геотермальной скважины на суше речь идет о десятках километров, то в океане всего о нескольких километрах от поверхности дна*. Современная технология вполне позволяет пробурить и обустроить такие скважины в толще пород дна, создать каверны необходимого размера и подключить к скважинам заранее смонтированную теплоэнергетическую установку, причем все это может быть сделано дистанционно. В пользу объединения говорит и то обстоятельство, что для наземных

* Григорьев С., Емцев М. Скульптор лика земного. М., 1977.

ГеоТЭС срок службы скважин лежит в пределах 20—30 лет, а это как раз соответствует времени разработки продуктивной толщи рудника с производительностью в несколько миллионов тонн руды в год (речь может идти о добыче конкреций, полисульфидных руд, даже о снабжении энергией подводного перерабатывающего предприятия). В этом случае отпадает необходимость в сложной океанской пространственной системе плавучая электростанция—кабель—донная подстанция, и все электроэнергетические коммуникации будут идти по океанскому дну. Наконец, отпадает необходимость в сооружении вертикальных трубопроводов для

Рис. 3.9. Схема устройства ОТЭС на перепаде температур океан—литосфера.

1 — заборник холодной воды; 2 — насос; 3 — преобразователь; 4 — выход отработанной холодной воды; 5 — насос контура подачи горячей воды; 6 — океанское дно; 7 — устьевое оборудование термальной скважины; 8 — скважина; 9 — система гидродинамических разрывов в толще донных пород



подачи холодной воды, подача которой может быть реализована по горизонтали. При столь высоком перепаде температур сам расход холодной воды должен существенно сократиться.

Сказанное не означает, что у подводной термоэлектрической ОТЭС не будет недостатков и технологических проблем. Они, конечно, есть и первая проблема — отсутствие приемлемых и по стоимости, и по физическим свойствам полупроводниковых материалов в достаточном количестве. В качестве второй можно указать возможность отложения в трубопроводах горячего рассола (или другой технологической жидкости) вымываемых из толщи пород солей. И, пожалуй, самое серьезное ограничение — возможность разрушения скважин в результате тектонической деятельности. Впрочем, все это требует еще детальной проработки и в плане конструкции подводной ОТЭС на перепаде температур океан—литосфера (может быть ее следует сразу и назвать ЛОТЭС?), и в плане размещения такой станции в конкретном районе океанского дна.

§ 3.4. Методы интенсификации работы ОТЭС

Естественное желание разработчиков ОТЭС, подкрепляемое все более ужесточающимися требованиями экономики, — повысить их эффективность. В этих целях проводится проработка и чисто технологических аспектов, и конструкций, применяются последние достижения науки и техники. Все используемые способы можно грубо разделить на улучшающие показатели существующих конструкций и коренным образом изменяющие конструкции (поиск новых технических решений). Что дали первые, показывает хотя бы такой пример. За время проведения работ по программам развития ОТЭС удалось более чем в 2 раза повысить эффективность использования тепловой энергии только за счет увеличения коэффициентов теплопередачи в теплообменниках с 1500—2000 до 5000 Вт/(м²·К). На 20—30 % удалось сократить потери как в трактах турбин, так и в теплообменниках только путем более рациональной компоновки агрегатов станций. Использование различных улучшающих работу «традиционных» схем изобретений — также серьезный источник повышения эффективности разрабатываемых сейчас промышленных вариантов преобразователей.

Более радикален поиск принципиально новых технических решений: не менее чем в 2 раза можно повысить КПД станций за счет использования более выгодных термодинамических циклов тепловых машин, еще большую выгоду может дать искусственное повышение перепада температур, при котором работают тепловые машины. Предложено несколько способов, основанных на физических и физико-химических явлениях. Первыми были предложены способы увеличения перепада температур за счет подогрева воды или в мелководных береговых бассейнах, или даже в открытом океане путем выделения части акватории с помощью сооружений, препятствующих теплообмену от поверхностных слоев воды к глубинным. Более эффективной оказалась концепция солнечных прудов, в которых за счет соленостной стратификации вод могут быть достигнуты еще большие, чем в обычных мелководных бассейнах, температуры (материал о солнечных прудах помещен в гл. 8, где речь идет об использовании градиентов солености). Здесь только скажем, что по ряду причин солнечные пруды имеют ограниченное применение и производительность.

В качестве удачных примеров разработок последнего времени, направленных на увеличение перепада температур, рассмотрим две. Первая, выполненная коллективом советских исследователей под руководством А. М. Архарова [25], обладает повышенной экономичностью (рис. 3.10). Станция выполнена по двухконтурной схеме, но не это дает основное преимущество. Оно обусловлено тем, что для передачи энергии из первичного контура во вторичный (где установлена турбина) использован повышающий термотрансформатор, состоящий из собственного теплообменника и питающихся его энергией волновых резонансных или вихревых труб. Принцип работы волновых резонансных труб основан на создании

в них потоков сверхзвуковых паров рабочего тела первичного контура, которые при торможении дают повышение температуры в 5—6 раз. Получаемое тепло собирается теплообменником вторичного контура. Более высокая, чем в первичном контуре, температура рабочего тела вторичного контура позволяет повысить перепад давлений на турбине и экономичность установки в целом. Вероятно, описанная установка — не последний вариант использования физических эффектов (в этом варианте применен так назы-

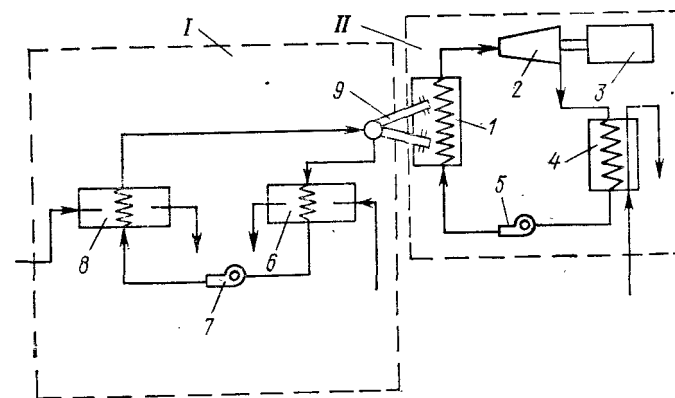


Рис. 3.10. Схема ОТЭС с тепловым трансформатором [25].

I — контур подогрева рабочего тела; II — силовой контур; 1, 8 — испарители; 2 — турбина с электрогенератором; 3 — электрогенератор; 4, 6 — конденсаторы; 5 — насос для подачи рабочего тела; 7 — насос контура подогрева; 9 — газодинамический преобразователь

ваемый термоакустический эффект) для улучшения показателей ОТЭС.

Разрабатываются и методы физико-химического повышения термического КПД за счет использования дополнительной энергии, выделяющейся вследствие экзотермических реакций растворения в воде различных химических веществ с последующей их регенерацией и повторным использованием. Например, американскими исследователями выполнены расчеты для ОТЭС мощностью 100 МВт, использующей теплоту растворения аммиака в морской воде. КПД такой станции оказывается в 2,4 раза выше, чем ОТЭС, непосредственно использующих разность температур поверхностных и глубинных вод, а капитальные вложения выше всего на 25 %.

Более детально остановимся на аналогичном способе, предложенном японскими исследователями [87] и основанном на увеличении КПД за счет использования реакции растворения азотной кислоты в морской воде. При смешении азотной кислоты с водой образуется так называемая азеотропная смесь (неразделяющаяся смесь с одинаковым составом находящихся в равновесии жидкости и паров над ней), разделением которой можно управлять, изменяя давление и температуру. Например, при атмосферных условиях азеотроп концентрацией 68,8 % кипит при температуре 122 °С.

Эксперименты, выполненные в Июкогамском университете показали, что азеотроп, содержащий 65 % азотной кислоты, кипит при 25 °С при давлении $1,2 \cdot 10^2$ Па, в то время как вода при таком давлении вскипает уже при температуре 9,7 °С. Используя смеси, содержащие от 0,4 до 0,8 кг воды на 1 кг 60—65 %-ной азотной кислоты, исследователи показали возможность увеличения температурного перепада на 18—21 °С.

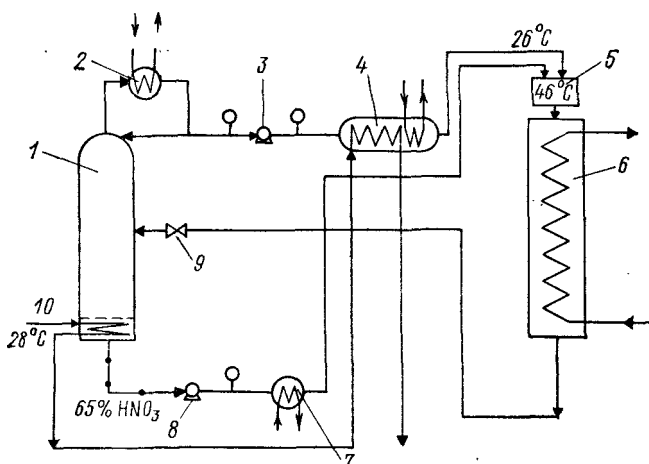


Рис. 3.11. ОТЭС с увеличением перепада температур за счет растворения в воде азотной кислоты [87].

1 — ректификационная колонна; 2 — конденсатор оборотной воды, охлаждаемый холодной водой; 3 — водяной насос; 4 — подогреватель воды; 5 — смеситель воды с раствором кислоты; 6 — теплообменник подогрева рабочего тела ОТЭС (либо азеотропа следующего контура повышения температуры); 7 — подогреватель раствора азотной кислоты; 8 — насос азеотропа; 9 — редуктор для подачи отработанного азеотропа в колонну; 10 — подача тепловой воды

Схема устройства для повышения температурного перепада, работающая по замкнутому циклу, приведена на рис. 3.11. Для разделения фракций воды и азотной кислоты в ней применена ректификационная колонна, получающая энергию от подачи тепловой поверхностной воды и работающая при давлении в ее полости $1,2 \cdot 10^2$ Па. Скапливающаяся внизу колонны азотная кислота с концентрацией около 65 % затем при давлении $70 \cdot 10^2$ Па или выше закачивается в смеситель, куда также подается предварительно подогретая обратная вода из верхней части колонны. Образующаяся высокотемпературная смесь (температура 46 °С) пропускается через теплообменник рабочего контура ОТЭС, действующей, например, по циклу Ренкина. Затем смесь поступает на разделение. Используя последовательность из четырех блоков, можно повысить температуру смеси до 100 °С. Для этого необходимо последовательно пропускать обратную воду и кислоту второго блока через выходной теплообменник третьего, а воду и кислоту третьего через теплообменник четвертого (выходной тепло-

обменник), предварительно подогревая их в собственных выходных теплообменниках. Эффективность извлечения тепла на каждой ступени не снижается и составляет не менее 5 %.

Так же как и в случае «традиционной» схемы ОТЭС, в схемах, использующих энергию смещения, в конечном итоге дополнительный эффект получается за счет извлечения дополнительной мощности из океана.

§ 3.5. Малогабаритные преобразователи

Особое место в ряду рассматриваемых установок занимают термопреобразователи, пригодные в основном для обеспечения энергией маломощных потребителей, например удаленных в море платформ. Американец Д. Спектор разработал установку, использующую перепад температур между воздухом на поверхности и водой*. Она представляет собой замкнутый цилиндр, разделенный на две камеры подвижным поршнем и установленный в слое воды с достаточно низкой температурой. Верхняя камера цилиндра имеет воздушный теплообменник, соединенный с системой подачи теплого воздуха с поверхности, и играет роль приводного цилиндра. Нижняя камера выполняет функции пневмоаккумулятора. Автоматические клапаны так регулируют подачу воздуха в теплообменник, чтобы температура в приводном цилиндре как можно быстрее достигла максимального уровня. Газ при нагревании расширяется и толкает поршень. После прекращения подогрева приводной цилиндр охлаждается за счет теплообмена с окружающей средой, и поршень приходит в исходное положение, после чего цикл повторяется. Поршень соединен с приводом электрогенератора. Время цикла может изменяться в зависимости от состава рабочего газа в камерах, путем ускорения теплообмена или повышения температуры воздуха, например путем использования дополнительного подогревателя, размещенного на палубе платформы и облучаемого Солнцем. Вероятно, такое устройство будет работать и в случае понижения температуры воздуха ниже температуры воды. В конечном счете мощность его будет определяться величиной перепада температур.

На совершенно ином принципе работают термомеханические устройства, действие которых основано на способности изделий из ряда сплавов «запоминать» форму, сообщенную им в процессе термической обработки. В основе термомеханического эффекта — обратимые структурные изменения в материалах при изменении температуры. Если пластину из материала, обладающего эффектом памяти, изогнуть и в таком состоянии нагреть до определенной температуры, а затем охладить и выпрямить, то при повторном нагревании она начнет изгибаться уже без приложения внешних сил. Эффект памяти формы широко применяется в технике при изго-

* Патент США № 4041707, 1977 г.

товлении заклепок, различных деталей, устанавливаемых в труднодоступных полостях, инструмента, противопожарных сигнализаторов.

Впервые на эффект памяти формы обратили внимание наши соотечественники Г. В. Курдюмов и Л. Г. Хандрос в 1949 г. В начале 60-х гг. этот эффект в ярко выраженной форме был обнаружен при нагревании сплавов титана с никелем (никелид титана или нитинол). Это дало толчок к появлению новых технических решений. В процессе исследований оказалось, что КПД преобразования энергии таких устройств может достигать величины 20 %, что сделало возможным всерьез говорить о создании термомеханических моторов, работающих на перепаде температур.

Первый «долгоживущий» образец подобного мотора был создан в университете Беркли (США, Калифорния) под руководством Р. Бенкса в 1973 г. (рис. 3.12). Сердце мотора — система из 24 петель нитиноловой проволоки, подвергнутой термической обработке в распрямленном состоянии. Петли одним концом закреплены на подвижных стержнях, а другим — на ободе рабочего колеса (подвижно). Стоит подогреть воду в одной из камер ванны, в которую опущены петли, как они начинают распрямляться и заставляют колесо поворачиваться. Попад в более холодную воду, петли вновь сжимаются до исходного состояния, после чего цикл повторяется. По словам самого Р. Бенкса, эта модель была далека от совершенства, однако она подтвердила возможность восстановления формы петель в течение нескольких миллионов циклов. Есть сообщения, что уже испытан макет мотора Бенкса мощностью 200 Вт и ведутся работы над более мощным образцом.

Следующее устройство, точнее способ преобразования тепловой энергии, интересно тем, что не требует, по мнению его автора Ж. Буше, насосов для подачи холодной воды, которая приходит в вертикальное движение в результате конвекции *. Схема устройства, в котором может быть реализован способ Буше, показана на рис. 3.13, а. Устройство работает следующим образом. В горизонтальном теплообменнике под действием холодной воды, поднимающейся по вертикальному трубопроводу, внутри которого проходит трубопровод отработавшего рабочего тела, передавая холодной воде часть своего тепла и тем самым поддерживая естественную конвекцию, конденсируется углекислый газ CO_2 (рабочее тело). В вертикальном трубопроводе конденсата давление повышается с увеличением глубины. На восходящей ветви теплообменника конденсат постепенно прогревается вследствие омывания его поверхности теплой водой, закачиваемой через систему концентрически расположенных труб, испаряется и приводит в движение турбину. Далее цикл повторяется. Термодинамику устройства поясняет схема соответствующего термодинамического цикла (рис. 3.13, б).

Ж. Буше предлагает использовать свою разработку комплексно — не только для получения электроэнергии, но и для

* Заявка Франции № 2491156, 1982 г.

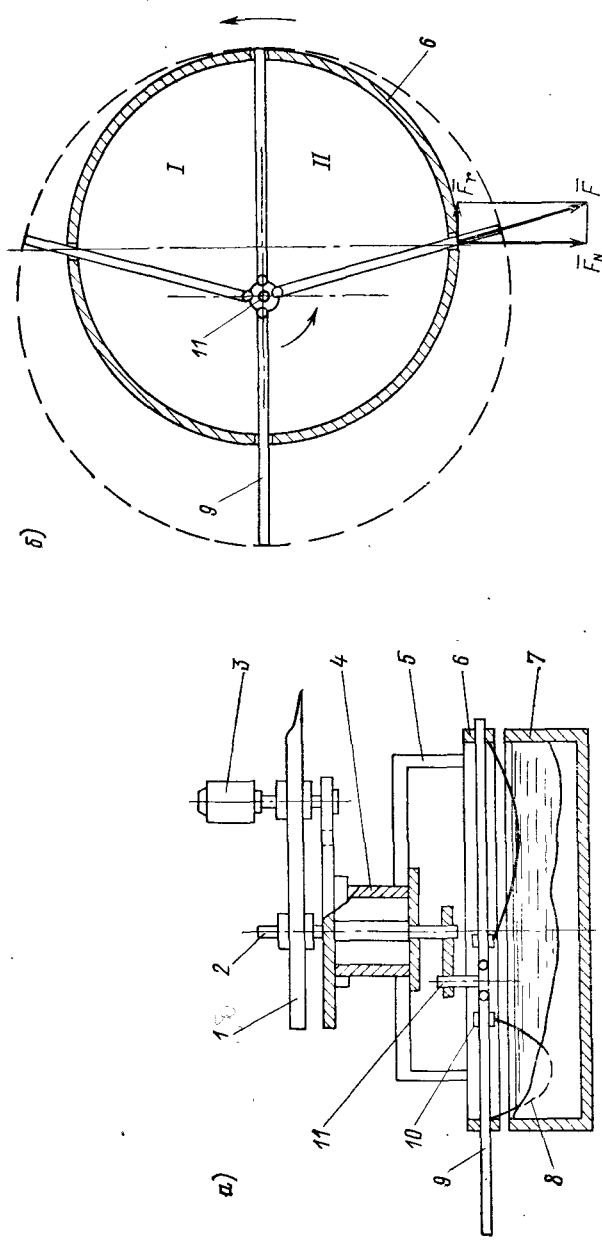


Рис. 3.12. Схема устройства мотора Бенкса: а — принципиальная схема; б — распределение сил.
 1 — основание; 2 — неподвижная ось; 3 — электрогенератор; 4 — вал колеса; 5 — ступица колеса; 6 — обод колеса; 7 — двухкамерная ванна; 8 — нитноловая петля; 9 — подвижный стержень; 10 — упор на стержне; 11 — ось вращения стержней; I и II — камеры с холодной и подогретой водой; \vec{F}_N — сила, действующая на обод колеса со стороны петель; \vec{F}_T — нормальная и касательная составляющие силы \vec{F}

интенсификации роста биомассы в зоне выхода на поверхность глубинных обогащенных биогенами вод (глубина опускания трубопроводов-теплообменников составляет не менее 500 м). Предполагается, что планктон, попадающий в трубопроводы теплой воды, будет оседать и его можно будет откачивать по дополнительному трубопроводу из отстойника. Оседает же в отстойнике биомасса вследствие того, что с повышением давления ее удельный

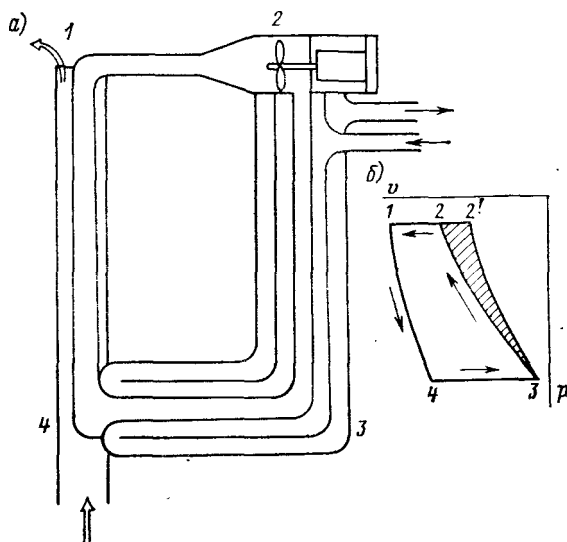


Рис. 3.13. Конвекционный преобразователь Буше:
а — схема преобразователя; б — p - v -диаграмма.

1—4 — охлаждение рабочего тела и повышение давления;
 2—1 — конденсация паров рабочего тела (углекислый газ); 3—2 — испарение рабочего тела (заштрихованная площадь контура 2—3—2' пропорциональна непроизводительным потерям в контуре системы); 4—3 — нагревание рабочего тела при постоянном давлении

вес увеличивается. В качестве преимуществ углекислого газа при использовании в замкнутом цикле выдвигаются его дешевизна, доступность, отсутствие коррозии (в обезвоженном состоянии) и загрязнения океанской среды в случае утечек (CO_2 в огромных количествах растворен в Мировом океане).

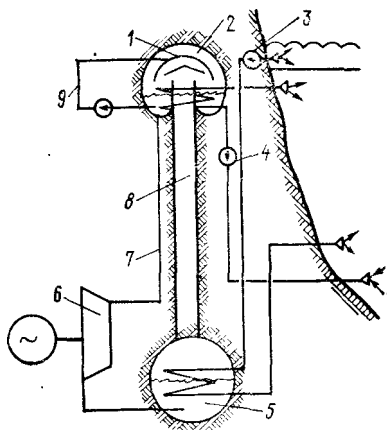
На рис. 3.14 показана схема, позволяющая осуществить следующий способ преобразования разности температур *. ОТЭС размещается в скальном основании с резким нарастанием глубины вод. Турбина станции приводится в движение в результате возникновения тока рабочего тела (например, этанола) под действием разности температур и давлений, возникающих в вертикальном трубопроводе и канале, связывающем две камеры с установлен-

* Патент Норвегии № 145994, 1982 г.

ными в них теплообменниками. Одна из особенностей станции, обеспечивающая направление тока рабочего тела, размещение холодильника в верхней камере, а нагревателя — в нижней. Для исключения потерь рабочего тела через стенки шахты и камер они покрыты изолирующим слоем из торкрет-бетона и облицованы сталью. Теплообменники выполнены в виде спирально закрученных труб с оребрением. В верхней камере имеется дополнительный контур, разбрызгивающий рабочее тело для его охлаждения (для охлаждения используется вода с температурой $+4^{\circ}\text{C}$, для нагревания — $+25^{\circ}\text{C}$).

Рис. 3.14. Двухфазный преобразователь Моу Пера.

1 — разбрызгиватель этанола; 2 — конденсационная камера; 3, 4 — насосы для подачи холодной и теплой воды; 5 — испаритель этанола; 6 — гидравлическая турбина с электрогенератором; 7 — напорный трубопровод; 8 — вертикальная шахта; 9 — контур усиления конденсации этанола



Можно было бы продолжать перечень оригинальных решений ОТЭС достаточно долго, но мы остановимся только на двух схемах, связанных с использованием тепловой энергии для получения холода и пресной воды, которых так недостает во многих странах жаркого пояса планеты. Одна из таких установок, разработанная учеными Одесского технологического института холодильной промышленности, позволяет вырабатывать пресную воду методом вымораживания. Такая вода выгодно отличается от получаемой методом выпаривания, так как сохраняет многие минеральные вещества и обходится по расчетам вдвое дешевле. Основной рабочий орган установки — льдогенератор, выполненный в виде полый бетонной трубы, опускаемой до глубин с постоянной температурой $+6-7^{\circ}\text{C}$. С помощью фреона, хлора и метилхлорида морская вода превращается в пресный лед, который, поднимаясь в накопитель, тает под воздействием поверхностного тепла. Если теплоизолировать накопитель, то потребителю можно поставлять пресный лед — т. е. и питьевую воду, и холод одновременно.

Иначе на проблему смотрит Ж. Коннел (США)*. Зачем получать пресную воду и лед искусственно, если в огромных количествах они производятся в природных «холодильниках» — в Антарк-

* Патент США № 4334873, 1982 г.

тиде и в Гренландии. Предложение Ж. Коннела — один из многих вариантов обеспечения транспортировки айсбергов из высоких широт — для нас интересно тем, что для приведения последних в движение, в частности, предлагается использовать электродвижительную установку, получающую энергию от небольшой ОТЭС, размещенной на самом айсберге и использующей перепад температур талые воды — морская вода.

Интересно отметить, что развитие концепции ОТЭС в ряде случаев может быть полезно для совершенствования тепловых и атомных электростанций (АЭС), позволяя утилизировать тепло сбрасываемых ими вод. Это не только даст возможность повысить КПД систем, но и снизит термические нагрузки на среду. Достаточно сказать, что современные вакуумные конденсаторы ТЭС и АЭС сбрасывают в среднем за год до 20 м³/с охлаждающей воды при температуре 25—30 °С на 1000 МВт установленной мощности. Для крупных ОТЭС этого расхода безусловно недостаточно, но использовать его для подогрева поверхностных вод в системах подачи теплой воды небольших станций, расположенных вблизи береговых ТЭС и АЭС, вполне можно. Одна такая демонстрационная ОТЭС, создающаяся сейчас на шельфе Гавайских островов недалеко от угольной ТЭС, для повышения эффективности будет использовать сбрасываемую ТЭС воду.

233

ОКЕАНСКАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

§ 4.1. Исторический аспект

Использование ветра — один из самых древних видов технологии производства энергии на возобновляемых ресурсах. Первые упоминания о ветровых агрегатах дошли до нас из глубины веков: подобные сооружения использовались в Китае и Японии уже около 2000 лет до н. э. В древней Вавилонии во времена царя Хаммурапи ветровые энергетические установки применяли для осушения болот. Персидские ветряные мельницы VII в. до н. э. имели турбины с вертикальной осью, были оснащены подобиями концентраторов ветра и управляющих щитков. Из истории II в. до н. э. дошли сведения об изобретателях ветровых машин. Герон Александрийский описал, например, машины арабского изобретателя Айтачри (Istachri). Примерно в I в. до н. э. появились ветроагрегаты в Египте и лишь через 12 столетий в европейских странах (первое упоминание о ветряных мельницах содержится во французских летописях, датированных 1105 г.). Вплоть до XIX в. наряду с водяными турбинами ветровые были единственным источником вращательной механической энергии [79]. Ветряные агрегаты разрабатывали лучшие умы эпохи. Первое в Европе издание, специально посвященное строительству ветряных мельниц, появилось в XIII в. Это был «Псалтырь ветряных мельниц» (Windmill Psalter), который содержал рисунок, изображавший турбину с горизонтальной осью. Известны «Диалоги» Леонардо да Винчи о конструкциях ветроагрегатов.

Устройства, использующие энергию пара, быстро вытесняли ветроагрегаты, и лишь успехи аэродинамики, изобретения крылового профиля дали им новую жизнь. Правда, попытка приспособить традиционные ветряные мельницы к новой технологии делались до конца XIX в., когда в Дании на одной из ветряных мельниц был установлен электрогенератор. Новый период расцвета ветроэнергетики относится к середине XX в., когда была доказана возможность строительства не только малых (до 100 кВт) ветровых станций, но и крупных агрегатов мощностью, исчисляющейся в мегаваттах. Первая такая турбина (1,250 МВт) заработала

в начале 1940 г. в штате Вермонт (США) и действовала с перерывами до 1945 г. В нашей стране в конце 30-х гг. на основе успешного опыта работы ветроэлектростанции мощностью 100 кВт в Крыму, в Балаклаве, был создан проект станции мощностью 5 МВт, но осуществить его помешала война.

Теоретическими аспектами ветроэнергетики в эти годы занимались ученики Н. Е. Жуковского — Г. Х. Сабинин и В. П. Ветчинкин. На базе отдела ветродвигателей ЦАГИ был создан Центральный ветроэнергетический институт, разработана и выпущена первая серия ветродвигателей для сельского хозяйства и для Арктики. В 1956 г. было выпущено более 9 тысяч ветродвигателей. Максимальная мощность серийных машин достигала 30 кВт.

В настоящее время число агрегатов, действующих в мире, превышает, вероятно, 10 млн. Это, в основном, небольшие станции, обеспечивающие нужды сельскохозяйственных предприятий. Но уже все большую популярность приобретают и ветряные гиганты с установочной мощностью в несколько мегаватт. Ряд таких станций построен либо находится в стадии строительства.

В начале 30-х гг. по предложению С. М. Кирова для энергосистемы Кольского полуострова, где начинала тогда развиваться отечественная никелевая промышленность, был разработан проект многоагрегатной ветроэнергетической станции (ВЭС), включавшей 500 агрегатов с суммарной установленной мощностью 1 МВт в единой сети с Туломской и Нивской гидроэлектростанциями. В тот же период проектно-конструкторским бюро Наркомата тяжелой промышленности разрабатывалась 2-агрегатная ВЭС мощностью 10 МВт с двумя ветроколесами диаметром 80 м [27]. Вскоре после Великой Отечественной войны академиком А. В. Винтером была обоснована возможность развития у нас в стране системы автономных ВЭУ общей мощностью 20 млн. кВт — эта мощность превышает суммарную мощность Енисейского каскада ГЭС. В обеспечение соответствующей программы исследований была образована Центральная научно-исследовательская лаборатория по ветроэнергетике, разрабатывавшая способы управления ВЭУ, проекты ВЭС и целых систем. Под эгидой лаборатории в Казахстане была построена и эксплуатировалась опытная 12-агрегатная ВЭС суммарной мощностью 400 кВт. В 1975 г. в стране создано научно-производственное объединение по проектированию и производству ВЭУ («Ветроэн»), астраханский завод которого «Ветроэнергомаш» выпускает серийные ВЭУ мощностью 4 кВт. Предполагается выпуск гаммы установок мощностью 16, 30 и 100 кВт.

С 1981 г. к работам в области ветроэнергетики в нашей стране приступили во всесоюзном ордена Ленина проектно-исследовательском и научно-исследовательском институте Гидропроектим. С. Я. Жука. Цель исследований поставлена достаточно жестко: выяснить возможность развития крупномасштабной ветроэнергетики у нас в стране и создать преобразователи, наилучшим образом отвечающие условиям именно нашей страны. Прежде всего

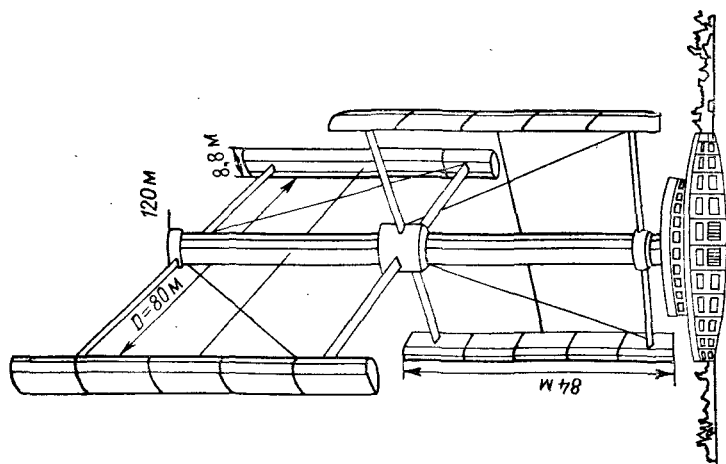


Рис. 4.1. Двухлопастная ВЭУ института Гидропроект [20]

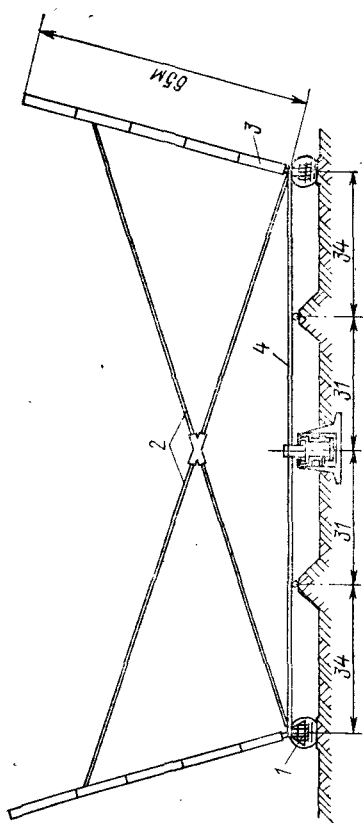


Рис. 4.2. Крыльевая ВЭУ с наклонными лопастями институтом Гидропроект [20].

1 — тележка; 2 — наклонная лопасть; 3, 4 — соединительные элементы

были уточнены оценки ресурсов ветрового источника (они приведены в гл. 1). Затем, под руководством Н. А. Малышева и В. М. Лятхера были выполнены проработки нескольких вариантов преобразователей. В частности, был проведен анализ аэродинамических характеристик и технико-экономических показателей четырех типов установок: крыльчатой ВЭУ с одним ветроколесом, ВЭУ с вертикальной осью и с 2-ярусным ротором (рис. 4.1), 2-лопастной ВЭУ с наклонными лопастями, движущимися на тележках по замкнутому пути (рис. 4.2) и ВЭУ в виде серии тележек с парусом, движущихся по замкнутому пути.

Расчеты показали, что наиболее перспективны турбины с вертикальными и наклонными лопастями. Для установки, приведенной на рис. 4.1, при скорости движения $v = 24 \text{ м/с} = 2,6 v_{\infty}$, условном коэффициенте аэродинамического сопротивления $C_D = 0,015$ и частоте вращения $0,15 \text{ с}^{-1}$ среднегодовая выработка электроэнергии составит 25—35 млн. кВт·ч/год. Выработка энергии турбиной, представленной на рис. 4.2, при установленной мощности 8,2 МВт в зоне с достаточно высокой средней скоростью ветра составит 17,7 млн. кВт·ч/год [20]. В настоящее время уже сделаны шаги к практическому осуществлению проектов таких установок. В 1984 г. начаты натурные испытания модели 2-роторной установки диаметром 4 м. Предварительно ее динамические характеристики изучались в лабораторных условиях. В ближайшее время начнется строительство первой опытной ВЭУ — прообраза мощных станций будущего.

§ 4.2. Классификация ветроэлектрических установок

С учетом развития систем преобразования энергии ветра за последние годы ВЭУ можно разбить на две группы: установки, основанные на преобразовании поступательного движения воздушных масс во вращательное движение турбин и установки, в которых реализуются различные другие принципы. ВЭУ первой группы принято подразделять по взаимному расположению потока и оси вращения турбины (вдоль потока, поперек потока, под углом к потоку) на ветряные мельницы прошлого и современные крыльчатые агрегаты. Об основных типах этих агрегатов можно судить по рис. 4.3, где показаны схемы ВЭУ, с которыми в настоящее время специалисты по океанской ветроэнергетике связывают наибольшие надежды и разработка которых находится в стадии крупномасштабного промышленного экспериментирования.

Ко второй группе можно отнести «качающееся крыло», ВЭУ, в которых реализован принцип вихревого преобразования потоков. Такая экспериментальная установка мощностью 0,1 МВт уже построена вблизи Мадрида. В этой станции имитируется природный циклон: направляющий аппарат 15-метровой башни улавливает ветер и создает внутри нее закрученный поток, который получает дополнительную энергию от нагреваемой солнечными

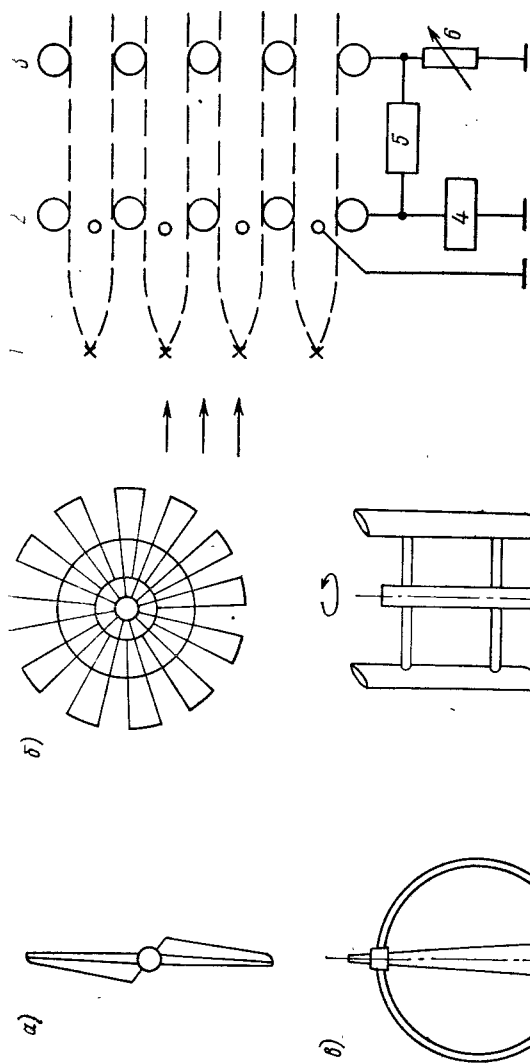


Рис. 4.4. Установка для прямого преобразования энергии ветра в электрическую [7].

1 — источник аэрозоля; 2 — входной электрод с системой зарядки аэрозоля; 3 — собирающий электрод; 4 — высоковольтный источник для зарядки аэрозоля; 5 — система регулирования; 6 — нагрузка

Рис. 4.3. Схемы рабочих колес перспективных морских ВЭУ: а — быстросходное двухлопастное ветроколесо; б — многолопастное колесо; в — ветроколесо с вертикальной осью (роторы Дарье и Масагрюва); г — ветроколесо с наклонной осью

лучами поверхности и, ускоряясь, движется вверх, приводя в движение установленную вблизи выходного сечения турбину. Изобретатель станции, испанский инженер Х. Сапата, считает, что аналогичную башенную установку высотой 250 м по производительности можно сравнить со средней тепловых электростанцией.

Отметим еще две экспериментальные установки второй группы: аэроупругие системы (используют аэроупругую неустойчивость, называемую авиаторами флаттером), преобразующие кинетическую энергию потоков в колебания, передаваемые пьезоэлектрическим преобразователям, и системы прямого преобразования энергии ветра в электрическую путем переноса потоком заряженных аэрозолей. Сообщение об исследовании последнего типа преобразователя было сделано, например, на конференции по перспективам энергетики и развития цивилизации в Лос-Анджелесе в 1982 г. (рис. 4.4). Для создания аэрозольных частиц использовались микроструйные форсунки с отверстиями диаметром 25—100 мкм, через которые жидкость под давлением подавалась в воздушный поток. На основе полученных данных по электрическим и гидравлическим характеристикам единичных форсунок различного диаметра был проведен расчет ВЭУ мощностью 40 МВт. Оказалось, что для реализации такой станции необходима перфорированная поверхность площадью 10^5 м², на каждом метре которой необходимо сделать 3600 отверстий диаметром 35 мкм [7].

Говоря о ветроэнергетике, мы все время подразумевали выработку электроэнергии. Однако нельзя обойти молчанием и традиционное использование энергии ветра при морских перевозках. Возрождение парусника — интересное в энергетическом плане направление современного судостроения. Действительно, транспортному судну водоизмещением 10 тыс. т для поддержания скорости в 16 уз (30 км/ч) требуется двигатель мощностью 7,5 МВт. Компенсация даже части этой мощности за счет ветра оказывается экономически выгодной. Первенец современного парусного флота, японский танкер «Шин Айтоку мару» дедвейтом 1600 т с дизельным двигателем мощностью 1,2 МВт и двумя вспомогательными парусами, управляемыми ЭВМ, экономит при перевозках от 10 до 15 % топлива. Одним из лучших считается проект грузового парусника «Динашифф» (автор проекта — немецкий инженер В. Пролз). Это судно водоизмещением 17 тыс. т и длиной 160 м будет иметь шесть поворотных мачт высотой 64 м. 9100 м² дакроновых парусов, автоматически убираемых в полости мачт, обеспечат паруснику даже при угле 35° относительно ветра развивать скорость до 8 уз (15 км/ч). Такую же скорость ему позволит сохранить при полном безветрии активный руль, приводимый двумя газовыми турбинами мощностью по 450 кВт. Предполагается, что парусником сможет управлять команда из 20 чел., причем прокладку оптимального по отношению к ветру курса будет вести ЭВМ, постоянно обрабатывающая метеорологические данные, поступающие от наземных станций

погоды или прямо с метеорологических спутников. Существуют и другие проекты современных парусных судов, в том числе и отечественные.

Парусные суда заинтересовали и специалистов по возобновляемым ресурсам энергии. В одном из патентов США описывается, например, энергетическая установка, выполненная в виде судна-катамарана, приводимого в движение треугольным парусом, удерживаемым на высоте аэростатом. Движение судна вызывает вращение винта, размещенного ниже ватерлинии, и действие электрогенератора. Нагрузкой генератора предлагается сделать электролизер, разлагающий воду на водород и кислород, причем водород запасается на борту судна в виде гидридов — соединений с металлами — и хранится в контейнерах. Часть водорода можно использовать в случае необходимости в качестве топлива в резервной энергетической установке*.

Варианты парусных ВЭУ не ограничиваются конструкциями типа судов. К этому «тяговому» типу установок относятся и сухопутные «парусники», выполненные в виде тележек с парусом, катящихся по замкнутому пути. Анализируя обобщенные данные проектов различных типов ВЭУ, автор одной из методик проектирования таких установок приходит даже к выводу о том, что по такому параметру, как отношение годовой выработки электроэнергии к массе, парусная тяговая установка может быть значительно эффективнее обычной крыльчатой. Основной вариант рассматриваемой станции состоял из 2190 тележек, движущихся по рельсовому пути длиной 7,6 км с радиусом закругления 762 м, на каждой из которых было установлено по три (как и на яхте) паруса. Общая масса системы — 13 700 т. Площадь отчуждения около 1 км². На участке со среднегодовой скоростью ветра 4,4 м/с выработка электроэнергии может составлять 78 млн. кВт·ч/год, а на участке со скоростью ветра 6,7 м/с она почти в 2 раза больше. Чтобы получить такую же выработку с помощью крыльчатой ВЭУ типа МОД-2, необходимо установить 15 таких станций которые займут площадь около 12 км². Для рассмотренной выше «тяговой» установки отношение годовой выработки к массе составит 10 Вт·ч/год, что в 2—4 раза меньше, чем для мощных крыльчатых ВЭУ.

К «тяговым» ВЭУ относятся и установки с вертикальным вращающимся ротором, использующим эффект Магнуса, суть которого в том, что при набегании ветрового потока на вращающийся цилиндр, на последний действует сила, перпендикулярная к направлению потока. В университете г. Дейтона (США) разработан проект станции, состоящей из 228 таких установок, каждая из которых представляет собой тележку длиной 19 м с поставленным на нее цилиндром диаметром 4,9 и высотой 39 м, приводимым во вращение реверсивным электродвигателем мощностью 450 кВт с частотой вращения 3 с⁻¹. Колеса тележек, снабженные

* Патент США № 4335093, 1982 г.

токосъемниками для отвода и подвода электроэнергии, соединены с четырьмя электрогенераторами общей мощностью 1000 кВт. Тележки движутся либо по круговой трассе диаметром 1,4 км, либо по замкнутой трассе с прямолинейными участками длиной по 3—19 км. Экономический анализ проекта показал, что такая ВЭС может конкурировать со станциями крыльчатого типа [15].

Подобные ВЭУ могут быть размещены на эстакадах вдали от берега. Опыт морского использования такого активного тяготоружения уже имеется. Примером могут служить построенные по проекту А. Флетнера суда с роторными движителями «Букау» и «Барбара» или «Алкион» Ж. И. Кусто.

Крыльчатые системы — один из наиболее интересных объектов для дальнейшего усовершенствования конструкций ВЭУ. Могут, например, быть эффективно использованы методы управления циркуляцией потока вокруг профиля, позволяющие существенно повысить подъемную силу и, соответственно, вращающий момент, развиваемый крылом. Один из вариантов такого управления — использование эффекта Коанда, состоящего в том, что изгибаемая на обтекаемой поверхности струя жидкости или газа способна засасывать из среды массу, в двадцать раз превышающую расход в самой струе, и за счет этого в несколько раз повысить удельную подъемную силу.

Другой вариант дальнейшей рационализации крыла — применение так называемого эжекторного крыла, управление циркуляцией потока вокруг которого осуществляется путем вдува газа в эжектор, размещенный на задней кромке. Увеличение циркуляции, которое дает вдув газа в эжектор (суперциркуляция), позволяет увеличить подъемную силу на 20—30 %. Но, пожалуй, главное достоинство такого реактивного крыла — возможность создать сравнительно легко запускаемые и останавливаемые либо использующие резервный запас сжатого воздуха турбины либо турбины, оснащенные компрессорами, питаемыми от аккумуляторов или от электросети. Более того, принципы управляемой циркуляции в сочетании с принципом действия ветроколеса с вертикальной осью заставляют по-новому относиться к некоторым ранее отвергнутым решениям. Здесь имеется в виду принцип, на котором основана работа ВЭУ Андро, представляющей собой крыльчатый ветроагрегат с горизонтальной осью, в котором передача механической энергии от ветроколеса к генератору осуществляется воздушным потоком, засасываемым через канал в опорной мачте лопастями, играющими в этом случае роль центробежного воздушного насоса. Две таких установки мощностью по 100 кВт были построены в Великобритании и в Алжире в 1950 г. Дальнейшего распространения эти ВЭУ не получили, так как эксплуатация их показала, что высокие гидродинамические потери в каналах лопастей, башни, впускных фильтров не компенсируются отсутствием механической трансмиссии.

В установке, в основу которой положены два принципа (Дарье и Андро) роль привода по-прежнему могут выполнять лопасти,

но собственно ускорение воздушного потока будет происходить в патрубках, скрытых внутри элементов крепления вертикально установленных крыльев. Для уменьшения аэродинамического сопротивления последним придают оптимальную форму. Внутреннее сопротивление можно снизить за счет выбора сечения и формы воздухопроводов.

Первые турбины с вертикальной осью не имели механизмов для управления лопастями. Сейчас разработаны конструкции, в которых положение лопастей или их частей по отношению к потоку регулируется с тем, чтобы поддерживать оптимальный режим работы ВЭУ. Применение современных материалов позволяет использовать для такого управления принцип, лежащий в основе адаптивного крыла, геометрия которого может изменяться в зависимости от скорости набегающего потока.

§ 4.3. Основные соотношения для расчета ветроустановок

Мощность, извлекаемую из потока газа или жидкости, можно определить следующим образом. Если обозначить: v_∞ — скорость потока на достаточном удалении от ветроколеса (перед колесом); u — скорость в зоне действия ветроколеса; u_1 — скорость на некотором удалении от ветроколеса (за ним); M — масса жидкости (газа), протекающей через площадь сечения ветроколеса A в единицу времени, то изменение количества движения этой массы $M(v_\infty - u_1)$ будет равно результирующей силе, действующей на ветроколесо. Извлекаемая мощность соответственно будет $M(v_\infty - u_1)u$. Выражение для величины u получим из закона сохранения энергии Q

$$M(v_\infty - u_1)u = 0,5M(v_\infty^2 - u_1^2), \quad (4.1)$$

откуда $u = 0,5(v_\infty + u_1)$.

Теперь легко получить выражение для мощности, извлекаемой турбиной, в удобном для вычислений и анализа виде:

$$\begin{aligned} P &= M(v_\infty - u_1)u = \rho A u (v_\infty - u_1)u = \rho A \frac{(v_\infty - u_1)^2}{2} (v_\infty - u_1) = \\ &= \rho \frac{Av_\infty^3}{4} [(1 + \alpha)(1 - \alpha^2)], \end{aligned} \quad (4.2)$$

где $\alpha = u_1/v_\infty$. Величина P немонотонно зависит от скорости. Если последнее выражение продифференцировать, можно видеть, что максимальная мощность достигается при $\alpha = 1/3$, т.е. $P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A v_\infty^3$. Сопоставим теперь величины максимально извлекаемой мощности P_{\max} и мощности потока $P_\infty = \rho A v_\infty^3/2$. Получаем, что идеальная турбина в потоке жидкости или газа способна извлекать $16/27$ его мощности. У нас в стране этот численный множитель называют коэффициентом Жуковского. В зарубежной литературе его часто именуют коэффициентом Бетца в честь немецкого ученого А. Бетца, также исследовавшего ветроколесо, но

получившего основные результаты на 10 лет позднее Н. Е. Жуковского. По физическому смыслу коэффициент Жуковского — это максимальное значение коэффициента мощности вращающегося крыльевого преобразователя энергии, определяемого как $\eta = P_{в.к}/P_{\infty}$ и устанавливающего ту предельную величину энергии, которая может быть подобным преобразователем отобрана у движущегося потока.

Исследования ветроколес различного типа показывают, что величины η сильно зависят от конструктивных особенностей и

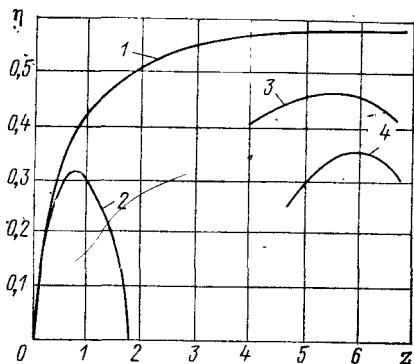


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента преобразования энергии ветра от быстроходности рабочих колес ВЭУ различного типа [92].

1 — теоретическая кривая для идеального колеса; 2 — многолопастное колесо; 3 — быстходное двухлопастное рабочее колесо; 4 — ротор Дарье

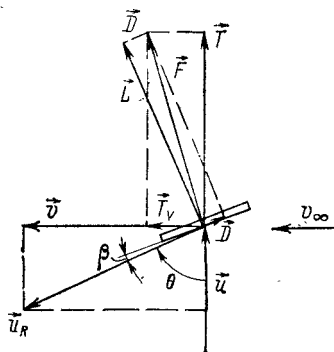


Рис. 4.6. Распределение сил, действующих на элемент профиля в потоке [52]

скоростей движения крыльев преобразователей. На рис. 4.5 приведена зависимость коэффициентов использования энергии для различных ветроколес в зависимости от быстроходности (отношение скорости движения концов крыльев к скорости потока). Видно, что для высокоскоростных турбин η приближается к максимально возможному значению [92].

Если ветроколесо нагружается каким-то устройством, например энергогенератором, то суммарное количество энергии, извлекаемой из потока оказывается ниже того значения, которое можно было бы вычислить, используя величину η свободного ветроколеса. В этом случае вводят понятие обобщенного коэффициента использования энергии потока и понятие КПД ВЭУ, учитывающего все потери, связанные с передачей энергии от ветроколеса электрогенератору (см., например, работу [33]).

Рассмотрим взаимодействие потока и крылового профиля в наиболее простом случае плоской пластины [52]. Пусть u — скорость потока при взаимодействии с пластиной, расположенной под углом к потоку θ (в идеальном случае $u = \frac{2}{3} v_{\infty}$, скорости выше — по потоку) (рис. 4.6). Под действием потока по-

верхность крыла движется со скоростью v в направлении, перпендикулярном к u . Причем относительная скорость ветра u_R определяется как векторная разность u и v и имеет по отношению к профилю небольшой угол β , называемый углом атаки. Сила F , действующая на поверхность крыла, имеет два компонента: «подъемную» силу L , перпендикулярную к относительной скорости u_R , и силу «лобового сопротивления» D , параллельную u_R . Последняя сила препятствует движению крыла в потоке, рассеивая энергию в вихре. Сила же L обеспечивает движение крыла. Профиль крыла выбирают таким, чтобы отношение L/D было максимальным (порядка 50—100).

Введем понятие давления относительного ветра на поверхность крыла площадью A и через составляющие L и D запишем это давление в виде

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho A u_R^2; \quad D = C_D \frac{1}{2} \rho A u_R^2, \quad (4.3)$$

где C_L и C_D — соответствующие коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления. Эти коэффициенты обычно определяют экспериментально (они изменяются с изменением формы профиля и угла атаки θ). Можно рассмотреть другую пару сил, также составляющих силы давления на поверхность крыла — T_u и T_v . Первая из них действует в направлении вектора u , а вторая — в направлении движения поверхности. Если через k обозначить D/L , то для этих составляющих можно получить выражения вида

$$\left. \begin{aligned} T_u &= L \sin \theta [1 + k \operatorname{ctg} \theta]; \\ T_v &= L \cos \theta [1 - k \operatorname{tg} \theta]. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Полезная мощность, сообщаемая турбине, равна произведению T_v , в то время как мощность, передаваемая в осевом направлении и рассеиваемая профилем и элементами конструкции, равна T_u . Отношение этих величин характеризует эффективность машины, преобразующей энергию ветра. С учетом того, что $v \cos \theta = u \sin \theta$, эффективность

$$\eta = \frac{T_v v}{T_u u} = \frac{1 - k \operatorname{tg} \theta}{1 + k \operatorname{ctg} \theta} = \frac{1 - k \frac{v}{u}}{1 + k \frac{u}{v}}. \quad (4.5)$$

Графики, приведенные на рис. 4.5, показывают, что даже при эффективности преобразования 100 % достижения максимального значения величины η проблематично, хотя быстроходные ветроколеса и приближаются к этому показателю достаточно близко. Интересно отметить, что быстроходность сильно зависит от заполнения площади ветроколес $[\sigma = Lnc/(\pi l^2)$ для обычного ветроколеса с горизонтальной осью и $\sigma = Lnc/(LR)$ для ветроколеса с вертикальной осью и прямым крылом]. Оказывается, что для самых быстроходных колес оно минимально. Это подтверждает график, приведенный на рис. 4.7.

Несколько слов об особенностях ветроколес с вертикальной осью. Патент на ВЭУ с вертикально установленным ветроколесом выдан Г. Дарье в 1931 г.— через 11 лет после того, как изобретатель предложил новую конструкцию. Еще 40 лет прошло прежде чем турбина, получившая имя изобретателя, привлекла внимание разработчиков.

По сравнению с крыльчатым ветроколесом ротор Дарье обладает определенными преимуществами [79]:

вертикальная симметрия делает его безразличным к направлению ветра, и отпадает необходимость в механизмах поворота;

силовой привод установки с таким ротором монтируется на уровне земли;

более технологично и относительно дешево в изготовлении крыло ротора, имеющее постоянный нескрученный профиль;

конструкция ротора этого типа принципиально не требует регулирования положения крыла относительно направления ветра;

управление установкой с таким ротором достаточно просто;

проста конструкция опоры установки.

Но нельзя не отметить и недостатков ветрокоlesa Дарье при сравнении с крыльчатым ветроколесом:

ротор Дарье отличается более низким теоретическим коэффициентом преобразования энергии ветрового потока;

он практически не имеет собственного пускового момента (из-за симметрии профилей) и требует дополнительного запускаящего привода;

заполнение плоскости ротора как правило выше, чем у скоростных высокооборотных ветроколес и, следовательно, на изготовление крыла идет больше материалов;

ротору Дарье присущи колебания вращательного момента, связанные с различием в положении профилей по отношению к ветру.

Наиболее серьезный недостаток среди перечисленных — необходимость внешнего источника энергии для запуска ВЭУ с ротором Дарье. Попытки совместить такой ротор с различными «пусковыми» ветродвигателями оказались неэффективными, так как работающие при более низких скоростных отношениях пусковые ветродвигатели (для ротора Дарье $z = 5 \div 6$) при выходе на режим основного начинают оказывать тормозящее действие. Использование же систем автоматического отключения пускателей значительно усложняет конструкцию. Вопрос сравнительно просто решается за счет применения электромашин, способных работать в режимах двигателя — генератора при работе ВЭУ в энергосистемах. Одиночные же установки всегда требуют специальных пусковых устройств.

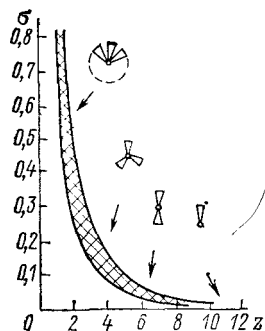


Рис. 4.7. Связь между заполнением плоскости ротора и скоростным отношением для различных типов ветроколес [92]

На рис. 4.8 показаны характерные для ротора Дарье зависимости вращательного момента от угла поворота и коэффициента мощности от скоростного отношения. Видно, что вращающий момент ротора не постоянен и на начальном участке приобретает даже отрицательное значение. Отрицательное значение принимает и величина η удаленного по потоку профиля. Для уменьшения пульсаций использовалось, например, увеличение числа лопастей, однако это приводило к снижению быстротходности вследствие увеличения заполнения плоскости ротора. Оригинально в этом

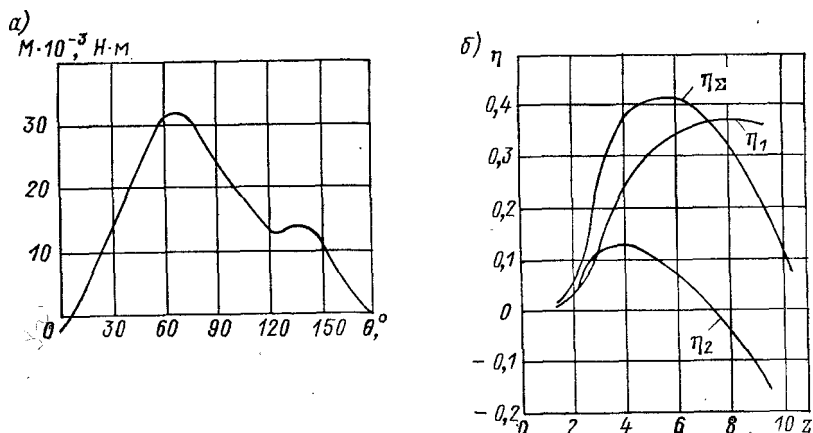


Рис. 4.8. Типичные характеристики ротора типа Дарье с кольцевым крылом: а — изменение вращающего момента в зависимости от угла поворота; б — зависимость коэффициента мощности от скоростного отношения $\eta_{\Sigma} = \eta_1 + \eta_2$, где слагаемые — соответствующие коэффициенты мощности переднего (по потоку) и заднего профилей

смысле техническое решение, разработанное в институте Гидропроект (см. рис. 4.1). Прямокрылый ротор как бы разрезан на две равные части горизонтальной плоскостью и части эти развернуты на 90° друг относительно друга. При том же заполнении плоскости удалось существенно снизить колебания момента на валу ВЭУ.

При разработке роторов с прямым крылом важно то обстоятельство, что изгибающие усилия для их крыла выше, чем для О-образного крыла. Поэтому при выборе размеров установок желательно добиться такого соотношения между моделями и натурой, при котором изгибающие усилия в крыльях оставались бы неизменными. Оказывается, если допустить, что скорость движения крыла должна быть функцией от скорости потока в соответствии с определенным скоростным соотношением, а пограничный слой изменяется с увеличением размеров линейно, то указанное соотношение получается при линейном изменении размеров. В качестве характерного размера при моделировании в таком случае выбирают длину крыла L и тогда все характерные конструктив-

ные параметры оказываются пропорциональными какой-то определенной степени L :

Момент инерции относительно центра хорды	L^4
Масса крыла	L^3
Центробежное ускорение	L^{-1}
Подъемная сила	L^3
Максимальный изгибающий момент	L^3
Изгибающее усилие	1

Равенство единице изгибающего усилия — следствие того, что по определению оно равно частному от деления произведения максимального момента на длину крыла на момент инерции [79].

§ 4.4. Ветровые установки в открытом море

Вынесение ветровых электростанций в открытое море считается за рубежом сейчас одним из перспективных направлений ветроэнергетики. Это связано по крайней мере с тремя причинами. Первая — возможность получения больших, чем на суше, удельных мощностей с 1 м² площади, ометаемой рабочим колесом, вследствие того, что по мере удаления от побережья средние годовые скорости ветров увеличиваются. Так, удаление от берега на 40 км дает приращение скорости на 20—25 %, что при тех же размерах турбин позволяет увеличить среднегодовую выработку электроэнергии почти в 2 раза. Это увеличение в скорости обнаруживается на высоте 10 и 100 м от морской поверхности [88]. Причина увеличения — существенное снижение трения о водную поверхность по сравнению с трением о поверхность суши и уменьшение пограничного слоя, в котором это трение проявляется, с десятков метров примерно на порядок. В обзоре [8] есть ссылка на оценки, согласно которым энергия ветрового потока над прибрежными водами шириной в 5,5 км примерно вдвое больше, чем над прибрежным участком суши той же ширины. Такое локальное увеличение энергии может объясняться, например, сильными неровностями побережья. Здесь же необходимо отметить, что детально в энергетическом плане ветры над морем еще не исследованы, и если для ветра над сушей мы знаем, например, закон изменения с высотой (степенной закон с показателем примерно 0,143), то для ветра над морем такой четкой зависимости пока нет. Все полученные к настоящему времени данные базируются на измерениях, проводившихся в разное время с судов, и более систематических наблюдений, которые проводятся лишь в нескольких точках планеты.

Вторая причина — дефицит земель, которые требуется отводить под мощные (порядка и более 100 МВт) ВЭС на суше. Впрочем, английские специалисты, например, подсчитали, что земли некоторых малорентабельных ферм гораздо выгоднее занять ветроэнергетическими установками, чем выращивать на них зерновые культуры.

Третья причина — возможность с помощью ВЭУ обеспечивать электроснабжение удаленных от побережья промышленных (в том числе искусственных) островов и добывающих платформ. Кстати говоря, многие из платформ Северного моря уже оборудованы ветрогенераторами, позволяющими существенно экономить на доставке моторного топлива. Снабжение промышленных островов энергией от подобных автономных источников избавляет, в частности, нетрадиционную энергетику от необходимости передачи электроэнергии на большие расстояния, что ведет к существенному удорожанию стоимости строительства и эксплуатации электростанций.

Выделение океанской ветроэнергетики в самостоятельную отрасль кажется несколько условным. Однако это не так: океанской ветроэнергетике свойственны свои особенные технические проблемы и возможности решения таких задач, «сухопутная» постановка которых просто невозможна. Здесь, так же как и на суше, могут использоваться практически все виды разработанных к настоящему времени преобразователей энергии — ветровых турбин. Так же как и на суше, выбор типа турбины определяется в основном экономическими соображениями, однако большую роль начинают играть такие технические моменты, как эксплуатационная надежность, коррозионная стойкость, минимальный уровень вибраций, передаваемых фундаменту, и минимальный опрокидывающий момент. Последние факторы особенно важны для ВЭС, размещаемых на глубоководных стационарных платформах, где из-за создающих усталостные напряжения знакопеременных нагрузок возможны аварии с тяжелыми последствиями. Достаточно вспомнить аварию платформы «А. Киланд» («A. Kielland») в Северном море, произошедшую, по мнению специалистов, из-за напряжений, причиной которых была вибрация своевременно не демонтированной буровой вышки (платформа использовалась в качестве гостиницы). Опрокидывающие моменты и парусность очень важны для расчета систем удержания, если электростанция размещается на плавучих основаниях.

При разработке достаточно мощных (100 кВт и более) ОВЭС предпочтение можно отдать, в частности, безбашенным быстроходным турбинам Дарье, одним из важных отличительных качеств которых является независимость от направления ветра. Впрочем, в литературе имеется сообщение о разработке и испытании в открытом море и однолопастной турбины, втулка которой расположена на уровне основания, а ось вращения наклонена под углом 50° [8]. Уже испытывается прототип такой турбины мощностью 250 кВт, имеющий лопасть длиной 25 м, наклоненную к оси под углом 45° , так что при движении она описывает коническую поверхность. Для установки на побережье больше всего в настоящее время отработывается быстроходных крыльчатых турбин. В 1982 г. в мире уже действовало ВЭУ мощностью 100 кВт и выше суммарной установленной мощностью около 40 МВт; из них 32 крыльчатого типа и 8 Дарье. Шесть уста-

новок мощностью выше 2000 кВт имели США, две — Швеция, по одной Дания и ФРГ. На долю этих станций приходилось около 75 % всей мощности действующих ВЭУ.

Изучение возможности крупномасштабного получения электроэнергии на удалении от берега с помощью ВЭУ ведется в Швеции, ФРГ, Великобритании, Нидерландах, США. Основное внимание уделяется разработке конструкции башен (опор), выбору типов оснований, якорных систем (речь идет о глубинах до 450 м), определению взаимного влияния турбин, проблемам передачи энергии при работе системы из нескольких ВЭУ. В выполненном Международным энергетическим агентством обзоре [88] указывается, что по сравнению с сухопутными предпочтительны более крупные океанские станции из-за высоких относительных транспортных расходов при установке, причем для единичных блоков указывается оптимальная мощность 5 МВт. Особые требования выдвигаются при выборе материалов крыльев и других открытых элементов, подверженных воздействию среды. Для транспортировки энергии на берег применяют электрический кабель (в первых проектах предполагалась выработка водорода и его транспортировка на берег по трубопроводам).

Одна из существенных особенностей ветроэнергетики — необходимость тем или иным способом компенсировать нестабильность ветра. В области долгосрочного прогноза ветровой обстановки все складывается более или менее удачно (см., например, рис. 1.9). Основную же трудность представляет краткосрочное прогнозирование ветра, скорость которого описывается всегда случайной функцией времени. Из-за этого ветер не может быть единственным источником энергии. В случае работы ВЭУ в единой энергосистеме колебания мощности компенсируются за счет других источников (ВЭС + ГЭС; ВЭС + ТЭС и др.). В случае автономных установок их приходится объединять либо с другими преобразователями возобновляемых ресурсов (ВЭУ + волновой преобразователь, например), либо с традиционным источником на жидком топливе. Другой вариант — установка аккумулятора энергии, заряжающегося за счет избытка вырабатываемой мощности. Это обстоятельство — общая трудность в эксплуатации автономных ВЭУ в морских и сухопутных условиях вдали от стабильных, не зависящих от природных условий источников энергии.

С нестабильностью ветра связана и другая особенность ВЭУ — необходимость регулирования в процессе работы. Цель регулирования — обеспечить нормальный режим работы генератора. Регулирование частоты выходного напряжения осуществляют несколькими способами. Основные — регулирование скорости вращения турбины за счет угла постановки лопастей, либо использование редукторов с вариаторами скоростей и применение электронных схем для управления частотой выходного напряжения. В последнем случае турбина приводит в действие генератор постоянного тока, а затем постоянное напряжение преобразуется в переменный ток промышленной частоты. Разработан целый ряд

различных устройств для этой цели; более подробно они описаны, например, в книгах [7, 33].

Планы энергетических компаний прибрежных штатов США, основанные на положительном опыте эксплуатации в энергосистемах как единичных ВЭУ мощностью до 2,5 МВт, так и первой группы из трех ВЭУ мощностью 7,5 МВт, связаны с широким внедрением ветровых электростанций в практику энергетики. Например, «Саутен Калифорния Эдисон компании» планирует уже к 1990 г. довести суммарную мощность группы ВЭУ до 350 МВт, «Гавайан электрик компани» — до 80 МВт, «Пасифик гэз» — до 92 МВт. Правда, последняя компания ориентируется не на мегаваттные гиганты, а на установки с единичной мощностью до 100 кВт, такие установки кажутся более надежными с эксплуатационной точки зрения. Однако, компании — производители ветрогенераторов продолжают наращивать единичные мощности. Сообщается, например, что в США продолжается работа над установкой мощностью 6,2 МВт ($MOD = 5A$) с ветроколесом диаметром 122 м.

В Швеции, энергетика которой основана, в основном, на импортируемых нефтепродуктах (до 70 % энергопотребления покрывается за счет привозной нефти), очень серьезно рассматривается вопрос о создании энергосистемы, в которой до 4000 МВт будет вырабатываться с помощью ветроустановок. Крупные агрегаты по этому проекту могут быть размещены в двух приморских районах страны, удаленных друг от друга на 500 км. Тем самым, путем компенсации колебаний скорости ветра, можно повысить надежность работы энергосистемы в целом. Пиковые мощности и компенсацию колебаний вырабатываемой ВЭУ электроэнергии возьмут на себя гидроэлектростанции, развитая сеть которых уже построена, и атомные станции, мощность которых при наличии в системе ВЭУ окажется возможным значительно снизить. На северо-западном побережье Балтийского моря, в г. Треллеборг, уже поставлена на промышленные испытания одна из крупнейших в Европе установка мощностью 3 МВт. Ее турбина массой 175 т установлена на башне высотой 81 м. Диапазон рабочих скоростей ветра — от 6 до 21 м/с. На о. Готланд в Балтийском море идут испытания другой станции, оснащенной 2-лопастной турбиной мощностью 2 МВт.

В Дании для исследования технических и экономических сторон проблемы создания национальной ветроэнергетики уже построены две ВЭУ мощностью 630 кВт каждая. Они оснащены трехлопастными ветроколесами диаметром 40 м, установленными на высоте 45 м. Расчетная скорость ветра принята 13 м/с при минимальной 6 и максимальной рабочей 25 м/с. Станции снабжены системой останова, выводящей лопасти из любого рабочего положения в нерабочее за 15 с с частотой до 3 раз в час. Генератор станции, размещенный в поворотной головке, 6-киловольтным кабелем связан с выключателем, находящимся в основании башни, причем гибкий кабель имеет возможность скручиваться

на 2,5 оборота. Вероятно, от успешного испытания этих генераторов зависит принятие решения о частичном переводе на ветроэнергетическое снабжение ряда приморских городов. Существует, например, проект установки 150 агрегатов в районе побережья бухты города Эбельгофт и на островке Хьельм. Эти агрегаты будут вырабатывать около 36 млн. кВт·ч электроэнергии в год и покрывать до 70 % потребностей города в энергии. Предполагается, что затраты на сооружение системы могут окупиться менее чем за 20 лет. Датские специалисты считают, что уже в ближайшее время до 10 % потребностей страны могут удовлетворяться за счет ветроэнергетики. Обсуждается возможность создания целого комплекса плавучих ВЭУ у побережья полуострова Ютландия, омываемого водами Северного моря, известного своими постоянно дующими ветрами.

С 1978 г. эксплуатируется ВЭС «Твинд» мощностью 2 МВт, имеющая трехлопастное ветроколесо диаметром 54 м, установленное на цилиндрической бетонной башне высотой 53 м. Ветроколесо находится за опорой, а для того, чтобы снизить влияние башни на ветровой поток верхняя ее секция сделана меньшего диаметра [8].

Для океанской энергетики большой интерес имеют установки, работающие на плаву. Один из первых проектов такого рода — предложение профессора Массачусетского университета У. Херонимаса установить в 80 км от побережья США на плавучих основаниях 80 ВЭУ с диаметром колеса 46 м, т.е. мощностью 1—2 МВт каждая, и использовать их энергию для получения водорода и кислорода.

Наибольших успехов в создании плавучих ВЭУ достигла к настоящему времени ФРГ. Работы ведутся в нескольких направлениях. В 1981 г. вблизи Гамбурга демонстрировалась опытная плавучая ВЭС (см. схему рис. 4.3, г) мощностью 250 кВт, установленная на судне водоизмещением 160 т. Турбина и генератор электростанции смонтированы прямо на палубе. Вал турбины расположен под углом 55° к горизонту, а две лопасти турбины, имеющие одинаковую массу, но различную длину, вращаются вокруг него, описывая коническую поверхность. Ориентация установки по ветру осуществляется автоматическим разворотом самого судна, установленного на якорях и связанного с береговыми потребителями кабелем, проложенным по дну моря. В стадии разработки находится двухлопастная станция такого же типа мощностью 7 МВт для установки на судне длиной 80—90 м. О размерах установки можно судить по ее лопастям, которые должны иметь массу по 60 т каждая и длину 120 и 60 м. При усилении ветра до скорости 24 м/с короткая лопасть — противосвес — будет устанавливаться вертикально, а длинная — горизонтально вдоль палубы. Стоимость вырабатываемой энергии оценивается в 10 пф./кВт·ч.

В Швеции разрабатывается проект морской ВЭС мощностью 6,5—14 МВт из нескольких агрегатов, размещенных на площади

3300 км². Там же выполнена эскизная проработка ВЭУ «Посейдон» мощностью 20 МВт с двухлопастным ротором Дарье диаметром 180 м и массой 3500 т. Созданию этой установки должно будет предшествовать создание прототипа мощностью 2 МВт с диаметром ротора около 60 м [8]. Интересны оценки зарубежных специалистов по структуре стоимости таких станций: рассчитано, что стоимость ВЭУ будет составлять около 54 %, а стоимость оснований — примерно 36 % общей стоимости ВЭС, остальное, вероятно, будет приходиться на систему транспортирования энергии.

Для прибрежных районов Нидерландов сделанные по результатам почти пятилетних наблюдений расчеты показывают, что во многих местах среднегодовые скорости ветра составляют 5,5—7,4 м/с. В таких условиях ВЭУ, подобная станция «Гровиан-1» (ФРГ), обеспечит выработку ежегодно от 9 до 13 млн. кВт·ч. Подсчитано, что для получения за счет энергии ветра 15 % общего производства электроэнергии необходимо установить на побережье не менее 900 таких станций. Работая в единой сети с тепловыми станциями, ВЭУ позволят обеспечить существенную экономию топлива и будут иметь важное значение для энергетики страны в целом.

В Великобритании ветер считают наиболее вероятным источником возобновляемой энергии недалекого будущего. На Оркнейских островах, омываемых с запада Атлантическим океаном, а с востока — Северным морем, уже построена опытная станция мощностью 250 кВт. По заданию министерства энергетики предполагается в ближайшее время построить крыльчатую ВЭУ мощностью 3 МВт с ветроколесом диаметром 60 м, которая будет иметь расчетную скорость ветра 17 м/с (начальная — 7, максимальная — 27 м/с) и регулироваться поворотом концов лопастей. Планируется довести годовую выработку электроэнергии на Оркнейских островах за счет ветра до 12 млн. кВт·ч/год, что покроет 1/6 потребностей острова в электроэнергии. На этих ВЭУ предполагается провести большой объем исследований. А в случае их удачи — построить ВЭС из десяти подобных станций.

Выполненные к настоящему времени оценки экономической эффективности размещения ВЭУ в прибрежных водах обнадеживают, правда, строительство последних предполагается начать не ранее 1995 г. Под эгидой министерства энергетики Великобритании кроме проектов крупных станций разрабатываются небольшие автономные установки из ветрогенераторов и аккумуляторных батарей для снабжения отдаленных районов и, в том числе, небольших островов.

Практически все страны «Общего рынка» в той или иной мере проявляют интерес к ветроэнергетике. В целом для них установлено, что за счет ветра можно получить в 3 раза больше электроэнергии, чем потребляется в настоящее время. Определено, что в этих странах имеется около 400 тыс. участков, во всех отношениях подходящих для строительства ВЭУ большой мощности.

Специальной комиссией ЕЭС по энергетике разработана программа работ по технической и экономической оценке возможностей ветроэнергетики, предусматривающей, в частности, определение ветроэнергетического потенциала более чем в 11 тыс. пунктах со среднегодовыми скоростями ветра до 7 м/с на побережье и в 17 тыс. пунктов в прибрежных водах для строительства крупных ВЭУ. Под наблюдением комиссии находятся все крупные (мощностью более 55 кВт) ВЭУ, опыт работы которых постоянно изучается. Только на 1983—1985 гг. было намечено строительство 40 ВЭУ единичной мощностью 250 кВт и рассматривались проекты крупных ВЭС суммарной мощностью 10 МВт из группы установок мощностью 100—400 кВт с диаметром ветроколеса 20—30 м. Комиссия наметила издать атлас ветроэнергетических ресурсов изучаемых участков, пригодных для строительства ВЭУ.

В смысле обобщения результатов исследований по развитию ветровой энергетики в открытом море, выполненных специалистами различных государственных и частных учреждений США, интересна работа Л. Килара и др. [60]. В этой работе дается достаточно подробный анализ факторов, без учета которых развитие океанской ветроэнергетики невозможно. Рассматриваются природные условия, приемлемые типы инженерных решений, стоимость разработки, установки, обслуживания ОВЭС. В качестве выводов указывается на принципиальную возможность размещать ветровые установки на искусственных основаниях во многих районах вблизи побережья США при глубинах менее 500 м, определяются районы с минимальной стоимостью вырабатываемой энергии, для которых стоимость 1 кВт·ч превысит стоимость для базируемых на суше станций не более чем в 2 раза, на нерентабельность использования большей части прибрежных вод США из-за больших глубин, подвижных льдов, вулканической деятельности, малых ветровых ресурсов. Расстояние до берега играет сравнительно малую роль при определении стоимости затрат на строительство (затраты на платформы и ВЭУ составляют 80—90 % суммы затрат).

На рис. 4.9 приведены характерные типы платформ, анализировавшихся в качестве поддерживающих структур для установки океанских ВЭУ в открытом море. Если для платформ, установленных на морском дне, основным фактором, определяющим стоимость сооружения, является вертикальная нагрузка, то для плавучих конструкций — основной в этом смысле фактор — опрокидывающий момент, причем зависимость стоимости, например, плавучего стального буя от величины опрокидывающего момента долл., определяется выражением

$$c = K(0,0487M_i^{0,837} + 0,136) \cdot 10^6, \quad (4.6)$$

где K — коэффициент, учитывающий прочие факторы; M_i — опрокидывающий момент, зависящий как от природных условий, так и от особенностей конструкции буя.

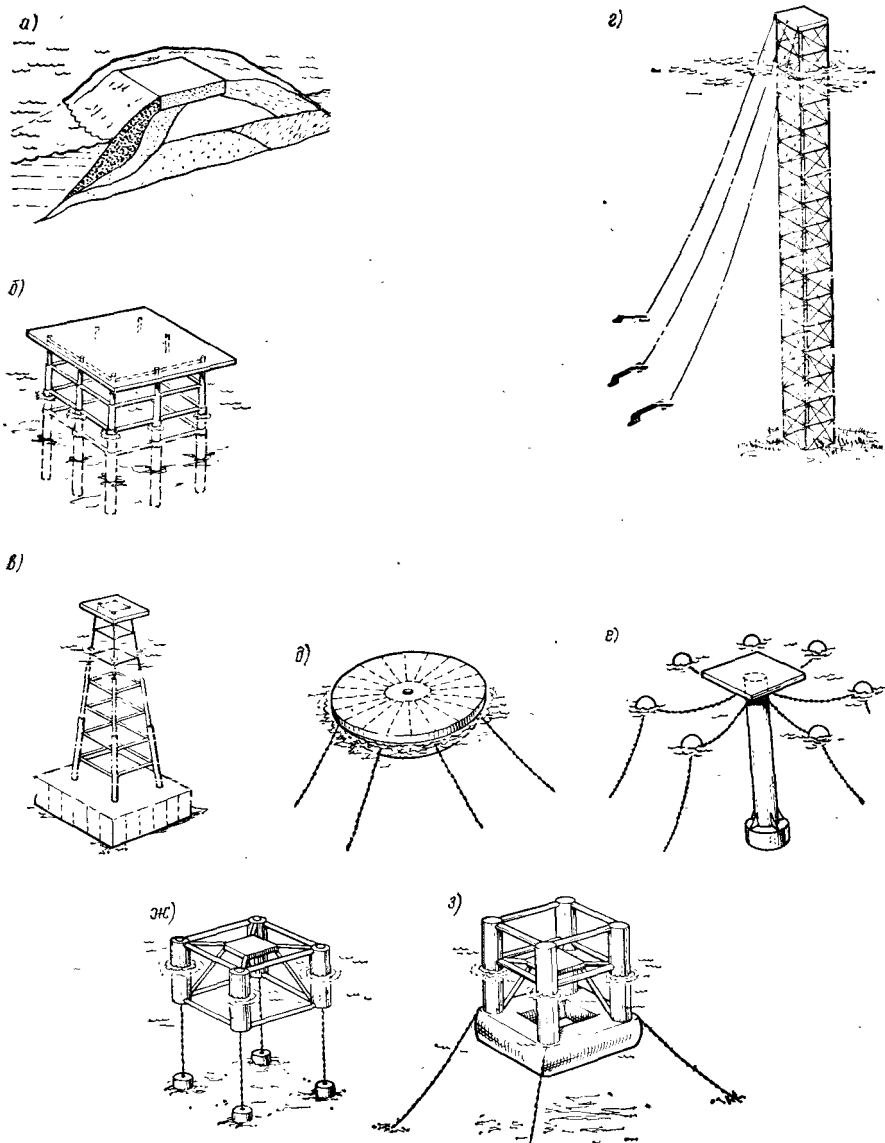


Рис. 4.9. Типы платформ для устройства ОВЭС [61]:
 а — искусственный остров; б — свайное основание;
 в — гравитационное основание; г — башня на рас-
 тяжках; д — плавающий диск; е — плавающая заякорен-
 ная башня; ж—з — варианты плавучих платформ

На рис. 4.10, также заимствованном из работы Килара и др., показывается зависимость стоимости платформ для ВЭУ от глубины установки при определенных осредненных погодных условиях. Данные получены на основании обобщения результатов,

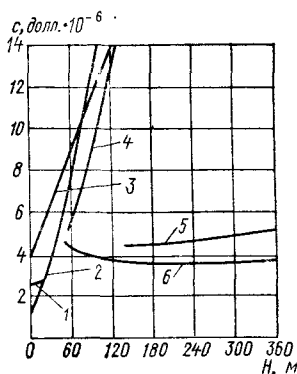


Рис. 4.10. Зависимость стоимости создания платформ от глубины моря в районе установки [61].

1 — бетонная свайная; 2 — стальная гравитационная; 3 — стальная свайная; 4 — бетонная гравитационная; 5 — в виде буя; 6 — напряженно-закоренная

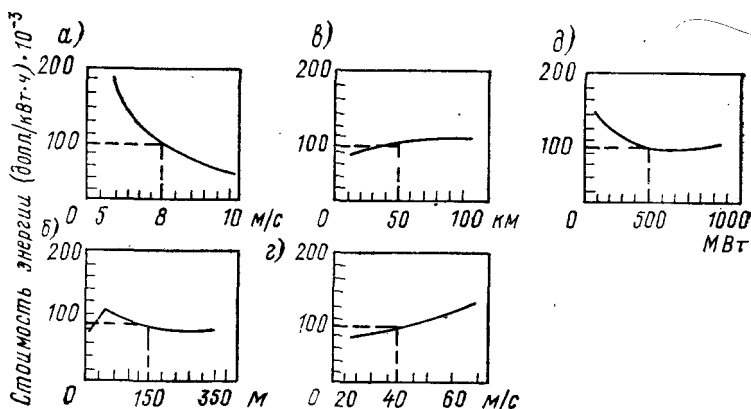


Рис. 4.11. Зависимость стоимости энергии, вырабатываемой ОВЭС, от характерных параметров [61]: а — от средней скорости ветра; б — от глубины моря; в — от расстояния до берега; г — от максимальной скорости ветра; д — от величины передаваемой на берег мощности (см. табл. 4.1)

имеющихся для разведочных и добывающих платформ, используемых при разработке морских месторождений нефти и газа. Стоимость платформ составляет примерно 30 % общей стоимости ОВЭС (ВЭУ — 54 %, кабель — 13 %, автоматика — 3 %). Кривые на рис. 4.11 характеризуют стоимость энергии, вырабатываемой прибрежной станцией, в зависимости от изменения основных параметров. Авторы предупреждают о возможности резкого возрастания стоимости особенно в случае сложения эффектов от нескольких факторов.

В табл. 4.1 приведены варианты результатов расчета стоимости первого блока ОВЭС с ВЭУ двух типов при установке на мелководье и при достаточной глубине моря. Значения основных

Таблица 4.1

Стоимость ОВЭС морского базирования (первый блок) в зависимости от конструкции турбины и глубины моря [81]

Параметр	Мелководный район		Глубоководный район	
	ГТ	ВТ	ГТ	ВТ
Диаметр ротора, м	300	250	350	250
Годовая выработка, кВт·ч·10 ⁶	22,4	14,54	27,83	14,54
Установленная мощность, МВт	10,0	10,0	10,0	10,0
Опрокидывающий момент, (Н·м·10 ⁶)	2335	560	3644	560
Горизонтальное усиление, Н·10 ⁶	3,23	3,4	4,24	3,4
Частота вращения, с ⁻¹	0,46	0,41	0,36	0,41
Эффективность, %	25,6	16,6	31,7	16,6
Стоимость, долл.·10 ⁶	4,45	5,68	6,06	5,68

Примечание. ГТ — турбина с горизонтальной осью, ВТ — с вертикальной. За основной вариант приняты следующие значения параметров: средняя скорость ветра — 8 м/с и глубина — 150 м; максимальные скорость ветра 40 м/с и высота волн — 30 м; максимальная скорость течения — 2 м/с. Расстояние от берега — 200 км, район базирования — Атлантическое побережье.

параметров отмечены там же. Расчеты показывают, что для оптимального варианта станции общей мощностью 550 МВт, состоящей из 55 плавучих блоков и подающих энергию на общий береговой терминал (подстанцию), затраты на 1 кВт установленной мощности вместе с передачей на берег оказываются равными 1377 долл.

При базовых значениях параметров себестоимость 1 кВт·ч оказывается равной $87,9 \cdot 10^{-3}$ долл. без применения аккумулирующих устройств. В качестве основного способа передачи энергии рассматривается именно передача по кабелю, так как выполненные оценки показывают, что потери при переработке электроэнергии в водород пока еще велики и составляют от 52 до 66 %.

Как будет развиваться ветроэнергетика в ближайшем будущем? Каким типам преобразователей отдадут предпочтение? Этим вопросам посвящены сейчас не только многочисленные исследования, но и практическая реализация самых разнообразных проектов. Исследуются преобразователи сами по себе, их взаимодействия между собой, возможность работы преобразователей в сетях и т.п. В разработке участвуют такие гиганты капиталистической индустрии, как «Боинг», «Груман аэрспейс», «Вестингауз» (США), «Мессершмидт-Бельков-Блюм» (ФРГ) и др. Речь идет об огромных возможных заказах в случае удачной реализа-

ции проектов. Сейчас ветроэнергетика и у нас в стране, и за рубежом находится в стадии технического эксперимента, который должен показать, какому направлению отдать предпочтение в будущем и какие типы оборудования более перспективны. Пока однозначного мнения по этим вопросам еще нет. Английские специалисты, например, утверждают, что возможно более целесообразно строить ВЭУ средней мощности (до нескольких сотен кВт), чем вкладывать средства в гиганты мощностью порядка и более 1 МВт. В качестве достоинств таких станций указываются их более высокая эксплуатационная надежность, меньшие потери в случае отказов и аварий; сравнительная простота выполнения ремонта. Ими выполнены расчеты, которые показывают, что стоимость вырабатываемой такими средними станциями энергии не будет превышать стоимости отпуска энергии в существующих энергосетях.

Имеющиеся пока результаты испытания мегаваттных ВЭУ крыльчатого типа, хотя и оцениваются в целом как удовлетворительные (все установки вышли на расчетные режимы), но не позволяют пока гарантировать требуемую надежность.

Развитие же океанской ветроэнергетики в большой мере будет зависеть от успехов работ, которые сейчас ведутся на суше.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ОКЕАНСКИХ ТЕЧЕНИЙ

§ 5.1. Общие сведения об ОГЭС

Механическая мощность, которую можно извлечь из океанского течения, определяется тем же соотношением, которое используется для оценки этой величины в ветроэнергетике:

$$P = \eta A \frac{\rho v^3}{2}, \quad (5.1)$$

где ρ — плотность воды. Коэффициент преобразования энергии, зависящий от типа турбины, для выполнения приближенных расчетов можно принять равным 0,6 для свободно вращающегося рабочего колеса и 0,75 для того же колеса в насадке. Это соотношение в какой-то мере позволяет проанализировать технические особенности ОГЭС по сравнению с ВЭС, от которых они конструктивно мало отличаются. Так, для турбины в насадке установочной мощностью 40 МВт в водной среде понадобится рабочее колесо диаметром 200 м при средней скорости течения 1,5 м/с. Для станции той же мощности, приводимой в движение ветром, скорость потока при таком же диаметре рабочего колеса должна быть примерно в 10 раз большей. Однако строительство столь крупных ветровых турбин практически невозможно из-за ограничений, связанных с прочностью материалов и массовыми характеристиками подобных устройств.

Для турбин, работающих в морской среде, массовые ограничения менее существенны из-за действия на элементы конструкций силы Архимеда. Повышенная плотность воды позволяет, кроме того, уменьшить столь существенное для воздушных турбин воздействие вибраций, вызывающих усталостное разрушение материалов.

Важное достоинство океанских течений в качестве источников энергии по сравнению с ветровыми потоками — отсутствие резких изменений скорости (сравните с изменениями скорости при порывах ветра, при ураганах и т.п.). При достаточном заглублении в толщу воды турбины ОГЭС надежно защищены от волн и штормов на поверхности. Для эффективного использования течений в энергетике необходимо, чтобы они обладали определенными

характеристиками. В частности, требуются достаточно высокие скорости потоков, устойчивость по скорости и направлению (см. гл. 1, § 1.4), удобная для строительства и обслуживания география дна и побережья. Удаленность от побережья влечет удорожание транспортировки энергии и обслуживания этих станций, как, впрочем, и любых других. Большие глубины требуют увеличения затрат на сооружение и обслуживание якорных систем, малые — создают помехи судоходству. Именно географические факторы не позволяют сейчас говорить о строительстве ОГЭС в открытом океане, где несут свои воды наиболее мощные течения. При средних и малых глубинах, особенно в местах образования приливных течений, которые заманчиво использовать для решения задач местной энергетики, важную роль играет топография дна. Интересно отметить, что именно строя энергетические объекты на приливных течениях, человек и начал использовать кинетическую энергию океана. Первые мельницы и лесопилки на приливных течениях появились на побережье Англии и Франции в X—XI вв., их аналоги сохранились до наших дней, а в XVI—XVII вв. подобные устройства успешно работали на Белом море в проливах Соловецких островов.

В качестве недостатков энергопреобразователей течений обычно отмечают необходимость создавать и обслуживать гигантские конструкции в морской воде, подверженность этих конструкций обрастанию и коррозии, трудности передачи энергии [45]. К основным недостаткам энергетики на океанских течениях относятся прежде всего ограниченная величина общих ресурсов и высокая стоимость изготовления и обслуживания сооружений [64]. Сама возможность строительства ОГЭС никем не отрицается, однако, как пишет, например, Ж. Констанс — один из сотрудников Ж. И. Кусто, необходимо затратить массу усилий, прежде чем техническая и экономическая эффективность проектов гигантских подводных турбин будет окончательно выяснена и подтверждена на практике. В этом плане еще необходимы фундаментальные исследования, и сейчас сомнительно, чтобы на существенном уровне проработки какое-нибудь правительство или другой институт решились бы организовать полномасштабную программу в этом направлении.

И сторонники, и противники ОГЭС сходятся на том, что океанские течения — один из возможных источников возобновляемой энергии, если не для глобальной, то для региональной энергетики, что настало время создавать соответствующие преобразователи энергии. Оптимисты называют годом появления первых коммерческих станций — 1990 г., а более осторожные прогнозисты — 2020 г. Относительно местоположения первой станции споров нет — все называют Флоридский пролив: на разработку ОГЭС для этого района уже затрачено немало средств. Впрочем, ведутся разработки проектов ОГЭС и для других районов Мирового океана.

§ 5.2. Общая характеристика технических решений

По аналогии с ВЭУ существующие преобразователи энергии течений можно условно разделить на две группы. К первой целесообразно отнести те из них, в основу которых положен принцип преобразования скоростного напора во вращательное движение турбин. Ко второй, менее многочисленной, группе относят преобразователи, основанные на других физических принципах (объ-

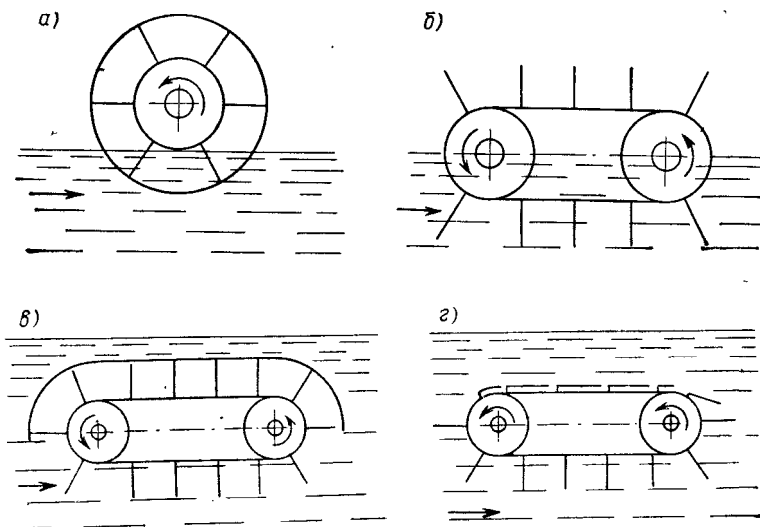


Рис. 5.1. Эволюция водяного колеса: а — колесо-прототип; б — ленточное колесо на плавучем основании; в — ленточное колесо в толще потока; г — ленточное колесо со складными лопастями

емные насосы, упругие преобразователи и др.). Для характеристики схем установки преобразователей можно выделить две основные схемы — сооружений, закрепляемых на морском дне, и сооружений, плавающих в толще воды и заякоренных к дну [45]. Иногда первую группу преобразователей энергии течений подразделяют по масштабу переработки ресурсов еще на две подгруппы — небольшие, для решения задач местного энергоснабжения, и крупные, размещаемые в толще океанских течений и предназначенные для решения задач регионального энергоснабжения.

Родоначальником устройств первой группы по праву считают водяное колесо (рис. 5.1, а). До последнего времени создаются все новые модификации этого прародителя водной энергетики на возобновляемых ресурсах. В совершенствовании водяного колеса наблюдаются две основные тенденции. Одна — собственно улучшение показателей колеса (за счет оптимизации конструкции ферм, лопастей, механизмов передачи энергии, расположения по отношению к потоку, применения современных материалов и т. п.), другая — принципиальное изменение представлений о колесе.

«Редуцированное» водяное колесо — транспортер (рис. 5.1, б) оказывается более компактным, требует меньше материалов, менее подвержено воздействию атмосферы — ветровым нагрузкам, в частности. Подобное устройство может быть установлено в потоке на понтонах с таким расчетом, чтобы нижние лопасти входили в воду, а верхние оставались «сухими». То, что сразу несколько лопастей оказываются под воздействием потока, позволяет повысить эффективность преобразования скоростного напора. Для уменьшения сопротивления, возникающего при входе лопастей в воду и при выходе из воды, их можно снабдить клапанами, работающими под действием самого потока. Однако необходимо

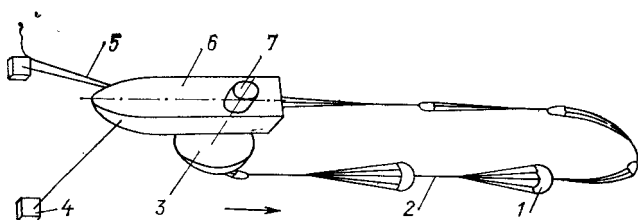


Рис. 5.2. Парашютный преобразователь Стилмена.

1 — парашют; 2 — трос; 3 — приводное колесо; 4 — гравитационный якорь; 5 — силовой кабель; 6 — бочка; 7 — электрогенератор

оговориться, что простое увеличение числа лопастей ленточного колеса не приведет к существенному увеличению момента на валах: чтобы каждая лопасть получала максимально возможную энергию, необходимо увеличить расстояние между ними для исключения взаимного влияния. Но с увеличением расстояния между лопастями не только растут общая длина ленты и требуемое количество материалов, но и увеличивается общее сопротивление движению. Даже поверхностный анализ показывает, что существуют какие-то оптимальные параметры ленточного колеса, при которых его использование оказывается наиболее рентабельным. Ленточное колесо вряд ли может стать основой для получения больших установленных мощностей.

На базе ленточного колеса созданы устройства, полностью погружаемые в толщу потоков (рис. 5.1, в, г). Для таких устройств предлагается несколько способов уменьшения сопротивления движению ленты во время холостого хода. Это и сооружение воздушной камеры над колесом и применение различных вариантов механизмов складывания лопастей. Можно вообще отказаться от ленты и сравнительно сложных узлов крепления лопастей. В этом убеждает предположение американского изобретателя Г. Стилмена, создавшего парашютный вариант ленточного колеса (рис. 5.2). В отличие от жестких лопастей, которые принудительно ориентируются в потоке, в этом преобразователе использованы парашюты, автоматически открывающиеся при попадании на ра-

бочую ветвь непрерывно движущегося троса. У такого устройства есть еще одно достоинство по сравнению с ленточным колесом: воздействие парашютов друг на друга может в какой-то мере компенсироваться величиной их раскрытия. Системы с жесткими лопастями, чтобы получить такой эффект, пришлось бы специально дополнять механизмами для изменения площади лопастей. Кроме того, парашют создает очень высокий коэффициент преобразования энергии: 1,35 вместо 0,8 для плоской лопасти, обладает сравнительно низкой материалоемкостью, низкой величиной сопротивления движению в воде троса по сравнению с транспортером ленточного колеса.

Г. Стилмен построил модель своего преобразователя и испытал ее впервые на ручье, протекающем через его ферму. Это было одно из первых устройств, предложенных для установки во Флоридском течении. Оно привлекло внимание своей кажущейся простотой (всего одно рабочее колесо и никаких поддерживающих систему парашютов в воде связанных с поверхностью или с грунтом элементов!). Результаты испытаний, проведенных в 1976 и 1980 гг. у побережья Флориды, подтвердили перспективность и практическую возможность применения данной схемы при минимальной скорости течения 0,9 м/с. Стоимость одного 1 кВт·ч полученной электроэнергии оценена в 1 цент, что значительно ниже средних показателей. Стоимость 1 кВт установленной мощности определена в размере 481 долл. из расчета на установку мощностью 5 МВт, работающую при средней скорости течения примерно 1 м/с, что также ниже средних величин, определенных для других типов океанских преобразователей.

Есть, однако, серьезные сомнения в том, что подобное устройство окажется конкурентоспособным при выборе варианта преобразователя для промышленного производства энергии. Прежде всего, подобное крупномасштабное устройство не так-то просто будет установить и запустить в открытом море на течении. Далее, даже при сравнительно небольших возмущениях потока в системе могут возникнуть нежелательные колебания. Причиной колебаний может оказаться и периодическое появление отклоняющей силы в месте расположения петли, где парашюты должны складываться. Во время испытаний в ограниченном потоке и на малоразмерных моделях эти эффекты могли не проявляться. Парашюты могут обрывать, подвергаться порче морскими животными, в них могут попадать инородные предметы, ухудшающие гидродинамические свойства и т.п. Наконец, из-за асимметрии приложения усилия к тросу последний при достаточной длине может смещаться от направления строго по потоку, что создаст помехи для других преобразователей или для различных видов деятельности в районе установки электростанции. Такой преобразователь можно для обеспечения надежности дополнить вторым колесом в месте разворота троса, но тогда возникнут трудности с созданием достаточно жесткой пространственной системы для крепления всей установки.

В преобразователе, схематично изображенном на рис. 5.3, работают уже все лопасти, а поплавок и якорь поддерживают конструкцию строго вертикально. В потоке она ориентируется стенками кожуха или специальным стабилизатором*. Известны и другие варианты колесных устройств, особенно предназначенных для «малой» энергетики. Представление о них дает обширная патентная литература по этому вопросу (см., например, обзор [15]).

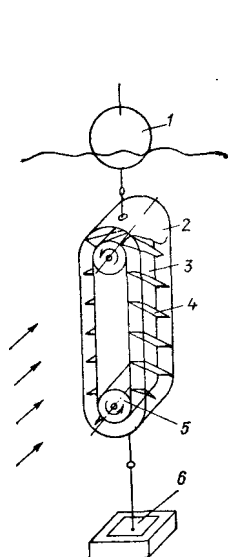


Рис. 5.3. Вертикальное ленточное колесо.

1 — поддерживающий буй; 2 — кожух; 3 — подвижная лента; 4 — лопасти; 5 — электрогенератор; 6 — якорь

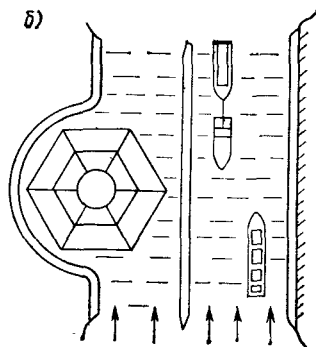
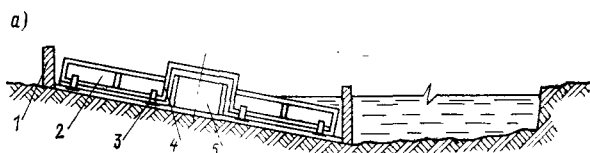


Рис. 5.4. Схема устройства ГЭС с наклонным колесом: а — вид в разрезе; б — вид в плане.

1 — бетонный корпус; 2 — лопасть; 3 — опорный подшипник; 4 — ступица; 5 — электрогенератор

Справедливости ради надо отметить, что и само традиционное водяное колесо еще не отошло в область преданий и в своем первоизданном виде борется за право на существование. На рис. 5.4, а—б приведен вариант колесной электростанции, предложенной коллективом ленинградцев во главе с О. И. Калининым. Выполнена эта проработка применительно к условиям рек с достаточно большими скоростями течений, но вероятно может быть использована и в узких проливах с подходящими рельефом дна и скоростями течений. Основное достоинство подобной станции — отсутствие дорогостоящих плотин, полностью перекрывающих течение и препятствующих судоходству и миграции животных. При

* Заявка ФРГ № 2529534, 1977 г.

угле наклона плоскости колеса 10° и диаметре 200 м обеспечивается почти полное погружение в воду лопасти высотой 17 м. Применение опорных катков вместо традиционного осевого подшипника позволяет выполнить все колесо столь большого размера из сравнительно легких ферм и преодолеть известное противоречие между желанием получить большой вращательный момент и невозможностью создать для требуемого колеса—гиганта подходящую конструкцию опоры. С одного подобного агрегата авторы надеются получать до нескольких сотен киловатт*.

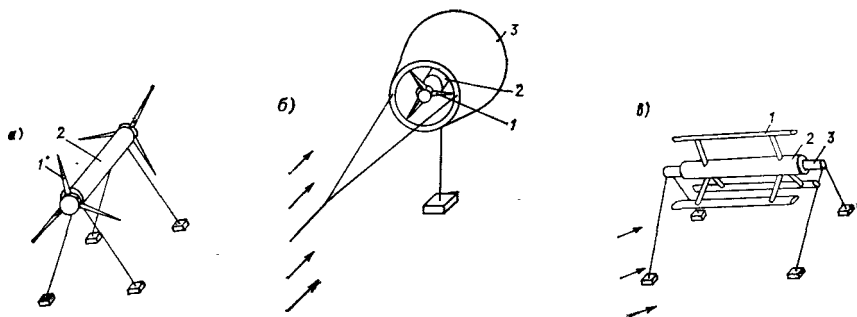


Рис. 5.5. Варианты схем перспективных турбин для ОГЭС: а — свободный ротор; б — ротор в насадке; в — ротор, устанавливаемый поперек потока

Но наибольшие надежды гидроэнергетики, занимающиеся разработкой преобразователей энергии океанских течений, связывают с агрегатами, с помощью которых могут быть получены значительные единичные мощности. В качестве вариантов таких устройств рассматриваются рабочее колесо в виде свободного пропеллера, пропеллера в насадке, водяной аналог турбины Дарье, системы с управляемым крылом (рис. 5.5, а—в). Во всех этих конструкциях, так же как и у перспективных ветровых турбин, главный преобразующий элемент — крыловой профиль, обтекание которого потоком создает гидродинамическую силу, заставляющую турбины вращаться.

Рассмотрим преобразователи энергии потоков, относящиеся по нашей классификации ко второй группе, и, прежде всего, устройства типа объемного насоса. На рис. 5.6 изображена одна из схем такого устройства, в основе которого — неподвижно закрепленное в потоке сопло Вентури. В пережатом сечении сопла из-за увеличения скорости жидкости происходит падение статического давления, которое может быть использовано, например, для засасывания воздуха с поверхности. В выходном сечении уже сжатый воздух вытесняется из потока в напорную камеру, откуда поступает в воздухопровод турбины, соединенной с электрогенератором. При умеренных степенях пережатия потока работа такого

* А. с. № 889787 (СССР), 1981 г.

устройства может быть описана с помощью уравнения Бернулли. В этом случае перепад давлений, который создается насосом,

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 0,5\rho v^2 [(A_1/A_2)^2 - 1], \quad (5.2)$$

где A_1/A_2 — отношение площадей входного и минимального сечений конфузора. При скорости потока 1 м/с в идеальном насосе можно рассчитывать на величину перепада давлений около 10^3 Па, но уже при скорости 0,6 м/с она превышает $5 \cdot 10^4$ Па. Производительность такого насоса зависит от расхода жидкости через сечение насоса и может быть доведена примерно до 20 % объемного

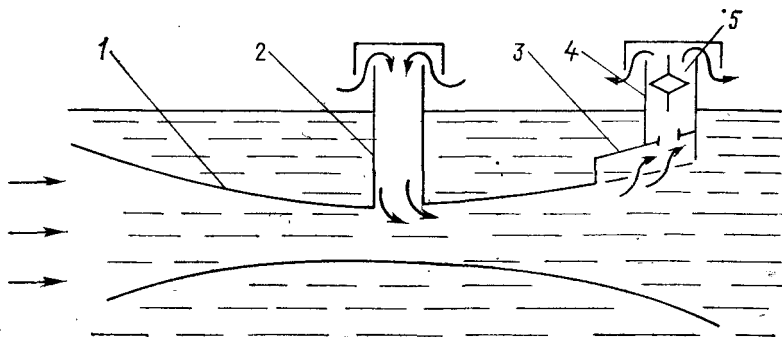


Рис. 5.6. Схема объемного насоса.

1 — профилированный корпус; 2 — шахта воздухозаборника; 3 — воздухосборник; 4 — выпускная шахта; 5 — воздушная турбина с электрогенератором

расхода. Эжекционные свойства сильно зависят от способа ввода в поток подсосываемого газа. Более интересной может оказаться схема с камерой внезапного расширения цилиндрической части и с горизонтальным подведением газа. На эффективность работы насоса влияют различные факторы. Здесь и организация входа в сопло, где при наличии больших градиентов скорости могут возникнуть колебания, увеличивающие сопротивление движению жидкости и приводящие к потерям скоростного напора, и неоднородности на поверхности, и концевые эффекты на выходе из сопла.

Однако неустойчивость потока может приносить и пользу. В одном из вариантов объемного насоса, предложенного французскими изобретателями*, используются пульсации давления, возникающие вблизи выходного сечения сопла в результате искусственного создания гидродинамической неустойчивости потока в пережатом сечении, где поток наиболее чувствителен к возникновению такого рода неустойчивостей из-за максимальной скорости. С помощью подпружиненных клапанов вблизи выходного сечения часть расхода жидкости перегоняется в напорный трубо-

* Заявка Францин № 7835517, 1980 г.

провод и далее используется в качестве рабочего тела во второй ступени преобразователя.

Гидродинамические пульсации в потоках жидкости — очень интересное явление, рациональное использование которого может привести к значительному увеличению производительности насоса, описанного выше. Кстати говоря, пульсации же, только другого характера — кавитационные, являются фактором, ограничивающим скорости течения в пережатом сечении из-за возможностей быстрого разрушения под их влиянием материалов стенок. Применение подобных насосов рационально при больших скоростях течения, которые наблюдаются лишь в проливах под действием приливно-отливных волн. Было бы интересно попытаться для таких районов сделать подобные устройства реверсивными.

Существуют и другие устройства, основанные на использовании гидродинамической неустойчивости. Речь идет о неустойчивости упругой пластины, помещенной под некоторым углом в даже сравнительно медленный поток. Это устройство аналогично соответствующему типу преобразователей энергии ветра, работающих на принципе аэроупругой неустойчивости. Колебания пластин в обоих случаях передаются валам генераторов или поршням компрессоров.

Перечень различных вариантов преобразователей можно было бы продолжить, но важно отметить, что со временем могут быть открыты как более эффективные способы преобразования энергии потоков в океане, так и новые гидродинамические явления, которые потребуют принципиально новых разработок. Уже сейчас можно отметить, например, энергию океанских противотечений, скрытых толщей поверхностных вод и часто лишь достаточно тонкими пограничными слоями отделенных от поверхностных, энергию различных вихрей, возникающих в открытом океане под воздействием метеорологических возмущений и крупномасштабной гидродинамической неустойчивости в океанах. Известны даже постоянно действующие вихри. Один из них находится в 400 км от Огасавары (Япония) в Тихом океане. Он представляет собой водоворот диаметром около 200 км, поднимающийся с глубины 3 км почти до самой поверхности. Примечательна одна из особенностей водоворота — примерно через каждые 100 дн. он изменяет направление вращения на обратное. По оценкам японских ученых удельные энергетические характеристики этого водоворота значительно выше, чем у ряда океанских течений.

§ 5.3. Вантовая турбина Д. Бейли и турбина А. Ниши

Вантовую турбину предложил американский инженер Д. Бейли (рис. 5.7). Крыловые профили этой турбины расположены вдоль натянутых тросов вместе с жесткими кольцевыми элементами, образующими пространственную конструкцию, вращающуюся под действием течения между двумя устоями. Кольцевые элементы

не только обеспечивают жесткость конструкции, но и передают энергию вращения турбины электрогенераторам, установленным в теле поплавков, поддерживающих систему в толще воды. Расстояние между кольцевыми элементами и натяжение тросов подбирают таким образом, чтобы обеспечить необходимое положение крыльев в вертикальной плоскости.

Изменить ориентацию турбины по отношению к течению практически невозможно: это настолько бы усложнило систему креп-

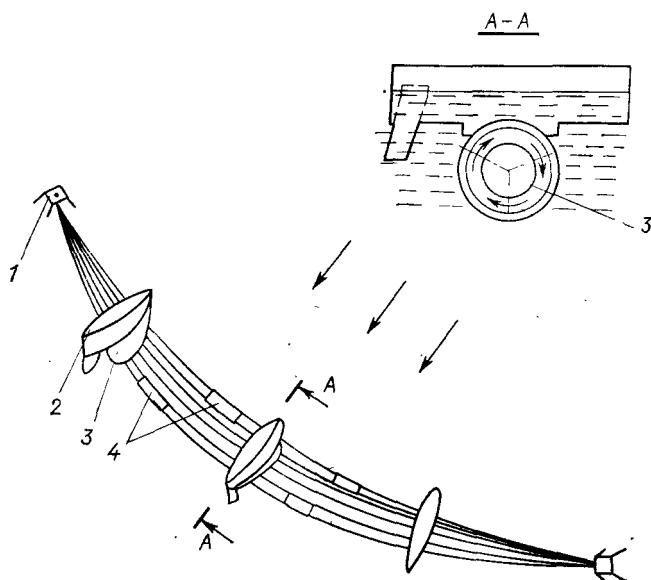


Рис. 5.7. Вантовая ОГЭС Бейли.

1 — опора; 2 — плавающая опора с электрогенератором; 3 — приводное колесо; 4 — крыловые профили

ления, что свело бы все достоинства по материалоемкости на нет. Однако система, подобно турбине Дарье, может работать на реверсивных течениях. Достаточно изменить положение закрылков, чтобы изменить направление действия результирующей силы на крыле на обратное, сохранив при изменении направления течения направление вращения турбины. Эта особенность турбины Бейли позволяет применять ее в местах сильных приливо-отливных течений, возникающих в проливах. Вполне возможно, что такие турбины найдут применение и в районах, где в зависимости от сезона направление течения изменяется на противоположное (например, Сомалийское течение).

К достоинствам турбины относится и достаточно высокая технологичность ее монтажа, требующего предварительного строительства лишь устоев, которое в ряде случаев может быть выполнено вблизи побережья. Кроме того, у турбин Бейли в отличие от крыльчатых турбин в насадках отсутствуют большие обтекаемые водой поверхности и, следовательно, они будут менее

подвергаться обрастанию и потребуют меньших эксплуатационных расходов на удаление последнего.

К недостаткам турбины следует отнести то, что она, находясь в приповерхностном слое, создает значительные трудности для судоходства, рыболовства, отдыха на воде. Впрочем, по мнению автора, этот самый серьезный недостаток обращается в достоинство, если использовать вращающуюся вантовую конструкцию в качестве искусственной границы морской фермы для раз-

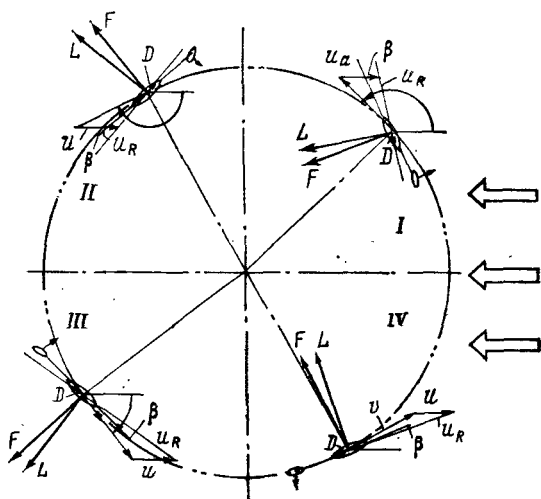


Рис. 5.8. Диаграмма сил, действующих на крыло ОГС Бейли

ведения рыбы. Турбины в этом случае вероятно смогут защитить обитателей фермы от таких крупных хищников, как дельфины и акулы.

Изменение сил, действующих на крыло турбины Бейли, иллюстрирует рис. 5.8, векторные диаграммы которого получены с учетом изменения положения закрылков, выполняемого автоматически. Применение управляемого крыла позволяет создать необходимый пусковой момент и обеспечить более равномерный момент на приводном колесе в процессе работы. В отличие от турбины Дарье турбину Бейли не надо приводить в движение с помощью стороннего источника энергии. Сила, действующая на крыло, определяется выражением

$$\vec{F} = \frac{\rho u_R^2}{2} bc (C_D \vec{i}_R + C_L \vec{i}_L), \quad (5.3)$$

где u_R — относительная скорость; b — длина крыла; c — хорда крыла; C_D и C_L — коэффициенты подъемной силы и сопротивления; \vec{i}_R и \vec{i}_L — соответствующие ортогональные векторы. Расчет системы, который подробно изложен в работе [40], строится на до-

пущении о том, что она приобретает в потоке форму цепной линии с малым по сравнению с радиусом кольца прогибом в направлении движения воды. Коэффициент натяжения в центре пролета определяют из условий, что длины тросов в каждом пролете равны и кольца расположены параллельно друг другу.

Для Флоридского течения был разработан вариант ОГЭС с турбинами Бейли мощностью 10 тыс. МВт. Выполненные прочностные расчеты показали, что толщина тросов, поддерживающих такую турбину, будет не большей, чем у современных висячих мостов.

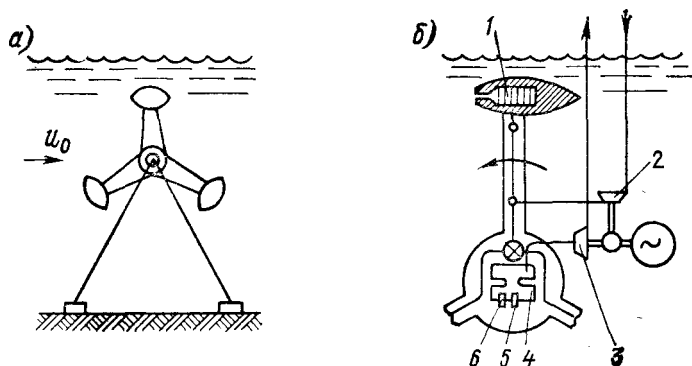


Рис. 5.9. Схема преобразователя Ниши: а — размещение в потоке; б — внутреннее устройство.

1 — воздушные меха; 2 — входной компрессор; 3 — выходная турбина с электрогенератором; 4 — камера сгорания; 5 — зажигание; 6 — подача топлива

К крыльевым системам относится и установка, разработанная А. Ниши (университет г. Миядзак, Япония) [73], схема которой приведена на рис. 5.9. У этой установки можно отметить две важные отличительные черты. Прежде всего, она основана на принципе турбины с прямым крылом, ось которого расположена в горизонтальной плоскости перпендикулярно к потоку. Вторая особенность — комплексное использование свойств океанской среды: кроме поля скоростей, убывающих в потоке по мере удаления от поверхности, установка использует еще и поле давлений. При диаметре турбины 100 м перепад давлений между верхним и нижним положениями крыла в среде составит около 10^6 Па. Это позволяет на базе такой турбины создать воздушный компрессор и отказаться от механической передачи энергии. Более того, предложено разработать на базе такого компрессора новый тип двигателя внутреннего сгорания, в котором на долю океанского течения приходилась бы работа по сжатию смеси (точнее: по сжатию газа для образования горючей смеси после впрыска жидкого топлива). Подобный «гибридный» мотор по расчетам изобретателя позволяет экономить не менее 30 % топлива при достаточно высокой полноте сгорания.

На рис. 5.10 приведены гидродинамические характеристики турбины, полученные с помощью простой моментной теории. В зависимости от скоростного отношения и заполнения профиля получены величины коэффициентов преобразования энергии потока η и сопротивления турбины C_D для двух направлений вращения

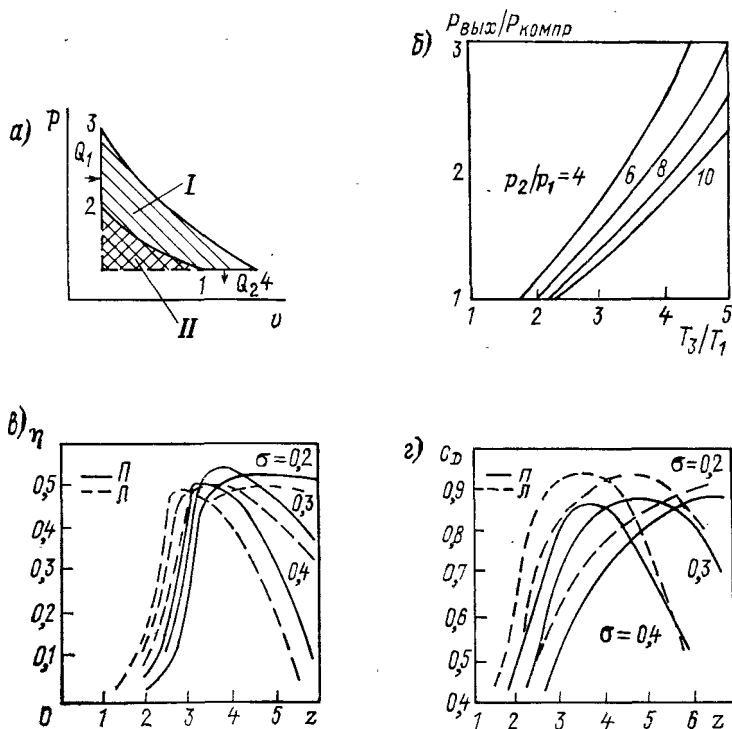


Рис. 5.10. Характеристики турбины Ниши [73]: а — термодинамический цикл; б — выходная характеристика (отношение полезной мощности к мощности, затрачиваемой на сжатие воздуха за счет океанского течения); в, г — зависимости коэффициентов преобразования энергии потока и сопротивления в потоке от направления вращения (п — правое и л — левое), от заполнения профиля и от скоростного отношения.

I — полная работа; II — работа сжатия воздуха

щения. Знание последнего коэффициента особенно важно при расчете якорной системы. Расчет силового воздействия на крыло в потоке при скорости последнего 1 м/с дает максимальную величину около 6000 Па, соответствующую давлению на крыло широкофюзеляжного самолета. Это, по словам А. Ниши, показывает, что никакой специальной техники и новых материалов для создания таких крыльев не потребуется.

На рис. 5.10, а показан термодинамический цикл, описывающий работу предлагаемого двигателя. Это цикл Хольтцвагена, описывающий работу газовой турбины при постоянном объеме сго-

рания. Термическая эффективность такой турбины очень высока при вполне достижимых перепадах давлений. Выходная характеристика турбины показывает, что теоретически выходная мощность двигателя внутреннего сгорания может быть в 2 раза и более выше мощности, изымаемой из течения турбиной.

§ 5.4. Турбина в насадке

Как уже упоминалось, наилучшим показателем обладает турбина, выполненная в виде рабочего колеса с горизонтальной осью (импеллера, крыльчатки, вертушки) в насадке. Это объясняется тем, что такое рабочее колесо меньше возмущает поток, не так сильно, как свободное, вовлекая жидкость во вращательное движение. Насадок как бы отделяет возмущенную часть потока от невозмущенной и в то же время обеспечивает некоторую концентрацию энергии. Будучи выполненным в виде водоизмещающей конструкции, он может обеспечивать плавучесть всего сооружения, при этом в его полостях могут быть размещены необходимые для обслуживания турбины и генератора материалы и инструменты (см. рис. 5.5, б), через эти полости можно проникать к основному оборудованию.

Форму насадок выбирают из такого расчета, чтобы обеспечить плавное безотрывное течение потока на подходе к турбине, сделать всю систему устойчивой на потоке, максимально снизить завихренность потока на выходе из нее, что необходимо как для снижения потерь давления на насадке, так и для снижения уровня колебаний, передаваемых вверх по течению на само рабочее колесо. Кроме того, таким путем снижается уровень возмущений в среде за преобразователем, где могут быть размещены однотипные устройства.

Увеличения мощности одного такого агрегата можно достигнуть за счет удлинения крыла. По сравнению с ветровыми преобразователями океанские турбины в этом плане имеют преимущество: критический размер крыла, при котором в нем достигается предел прочности материалов для такой турбины выше. Но есть ограничения и в воде: при слишком большой длине крыла на смену изгибающим моментам, создаваемым под воздействием силы тяжести, приходят моменты, создаваемые силой давления потока.

Другое ограничение диаметра рабочего колеса связано с технологическими трудностями при постройке и установке столь громоздких сооружений в океане. Специалисты сходятся во мнении, что диаметр турбин в насадках вряд ли превысит 200 м (по габаритам подобное сооружение напоминает крытый стадион на 20 тысяч зрителей). Накопленный к настоящему времени опыт строительства эксплуатационных платформ для добычи нефти и газа водоизмещением в сотни тысяч тонн показывает, что такие объекты могут быть созданы. Около десяти лет тому назад по

заданию министерства энергетики США был разработан проект ОГЭС для установки во Флоридском проливе. Проект предусматривал установку 242 агрегатов в насадках диаметром 168 м с генераторами мощностью по 83 МВт. Стоимость одного агрегата в серийном производстве оценивалась в 80 млн. долл., а стоимость всего сооружения — 20 млрд. долл., что соизмеримо со стоимостью строительства аналогичной по мощности ТЭС, однако позволяет покрыть 10 % потребностей штата Флорида и экономить до 20 тыс. т нефти ежегодно при установленной мощности станции

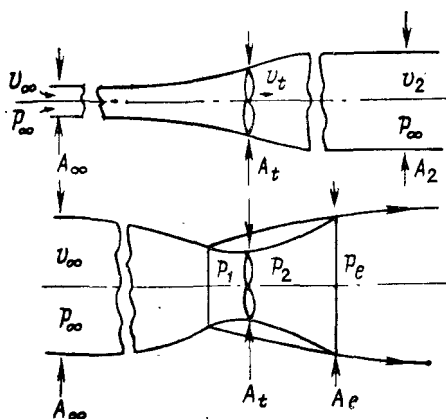


Рис. 5.11. Поля течений для свободного рабочего колеса и колеса в насадке [55]

10 млн. кВт. В 1980 г. предполагалось испытать модельную установку с рабочим колесом диаметром 12 м мощностью генератора 400 кВт, а первую промышленную турбину запустить в 1984 г., однако сообщений на этот счет не поступало [15].

Комплексное исследование турбин в насадке было выполнено О. Игрой [55] применительно к ветроэнергетике в предположении о том, что поле потока внутри его может быть описано как одномерное поле течения несжимаемой жидкости с осевой симметрией, а потери от концевых эффектов на входе и выходе из насадка пренебрежимо малы. Общее отличие полей течений в случае свободного рабочего колеса и колеса в насадке иллюстрирует рис. 5.11. В такой постановке основными параметрами, которые связаны с работой насадка, являются следующие:

$$\eta = (p_1 - p_2) / (0,5 \rho v_t^2); \quad (5.4)$$

коэффициент эффективности восстановления полного давления в диффузоре насадка

$$C_{pr} = (p_e - p_2) / (0,5 \rho v_t^2); \quad (5.5)$$

безразмерное давление на входе насадка

$$C_{pe} = (p_e - p_\infty) / (0,5 \rho v_\infty^2). \quad (5.6)$$

В качестве характеристики насадка может быть использован коэффициент усиления r , определяемый как отношение мощности, выделяющейся в турбине с насадком, к мощности идеальной турбины, имеющей тот же диаметр рабочего колеса и работающей при тех же условиях в свободном потоке, что и турбина в насадке:

$$r = (\Delta p_t Q) / (0,593/2) \rho v_\infty^3 A_t, \quad (5.7)$$

где Δp_t — падение давления на турбине внутри насадка; Q — объемный расход жидкости через насадок. Для чисто осевого потока Δp_t можно заменить на $p_1 - p_2$, а Q на $v_t A_t$. Соответственно выражение (5.7) преобразуется к виду

$$r = (\eta/0,593) (v_t/v_\infty)^3 \quad (5.8)$$

или, с использованием соотношения между площадями в невозмущенном потоке и в сечении установки турбины,

$$r = (\eta/0,593) (A_\infty/A_t)^3. \quad (5.9)$$

Если записать выражение для мощности, выделяющейся на турбине через величины расхода и коэффициента нагрузки, в виде

$$P = 0,5 \rho v_t^2 \eta Q, \quad (5.10)$$

то простые рассуждения о характере изменения этой величины в зависимости от η и Q показывают, что существует какое-то оптимальное значение η для каждого типа насадка. В рамках одномерной модели потока можно попытаться найти выражение для оптимального значения η через отношение площадей, коэффициент восстановления давления C_{pr} и безразмерное давление на входе насадка C_{pe} . Подстановкой выражений для p_e из уравнения (5.5) и для p_2 из уравнения (5.4) в выражение для C_{pe} (5.6) получим

$$C_{pe} = (0,5 \rho v_t^2 C_{pr} + p_1 - 0,5 \rho v_t^2 \eta - p_\infty) / (0,5 \rho v_\infty^2). \quad (5.11)$$

Учитывая допущение о малом возмущении исходного потока на входе в конфузор насадки для потока перед турбиной можно записать уравнение Бернулли в виде

$$p_1 - p_\infty = 0,5 \rho (v_\infty^2 - v_t^2) \quad (5.12)$$

и, подставив полученное выражение для разности давлений в уравнение (5.11), получить для определения C_{pe} формулу

$$C_{pe} = (C_{pr} - \eta) \left(\frac{v_t}{v_\infty} \right)^2 + 1 - \left(\frac{v_t}{v_\infty} \right)^2. \quad (5.13)$$

Теперь выразим отсюда v_t/v_∞ и подставим соответствующее выражение в уравнение для коэффициента усиления насадка (5.8). В результате чего получим выражение

$$r = \frac{\eta}{0,593} \left(\frac{1 - C_{pe}}{1 + \eta - C_{pe}} \right)^{3/2}, \quad (5.14)$$

Считая η не зависящим от величин C_{pr} и C_{pe} , взяв производную от r по η и приравняв ее к нулю, получим выражение для оптимального η

$$\eta_{\text{опт}} = 2(1 - C_{pr}) \quad (5.15)$$

и, соответственно, выражение для максимального коэффициента усиления

$$r_{\text{max}} = 0,649 \left[\frac{(1 - C_{pe})^3}{1 - C_{pr}} \right]^{0,5} \quad (5.16)$$

Если выразить коэффициент восстановления давления в диффузоре через КПД диффузора $\eta_D = C_{pr}/C_{prid}$, где $C_{prid} = 1 - (A_t/A_\infty)^2$, то для коэффициента усиления оптимального насадка получим выражение

$$r_{\text{max}} = 0,649 \left\{ \frac{(1 - C_{pe})^3}{1 - \eta_D [1 - (A_t/A_e)^2]} \right\}^{0,5} \quad (5.17)$$

Анализ последнего выражения показывает, что для обеспечения максимального улучшения свойств турбины в насадке необходимо соблюдать следующие условия:

выходное давление в насадке должно быть как можно ниже (C_{pe} — значительная отрицательная величина); физически это означает, что полное восстановление давления происходит в свободном пространстве за турбиной и достигается за счет подбора формы насадка, представляющего собой цилиндрическое крыло и изменяющего поле давления вокруг турбины, в то время как для турбины без насадка поле давления во всем объеме течения сохраняется;

для заданного у диффузора отношения площадей A_t/A_e величина КПД η должна быть как можно выше, что достигается, например, удлинением диффузора; последнее не всегда выгодно с экономической точки зрения, поэтому либо отыскивается компромисс, либо применяются способы управления пограничным слоем в диффузоре;

для заданной величины η отношение площадей должно быть по возможности большим.

Управление пограничным слоем в диффузоре можно осуществлять с помощью кольцевых щелей, через которые наружный поток будет подмешиваться в пограничный слой на внутренней поверхности диффузора, с помощью различных способов создания условий для резкого расширения потока в кормовой части диффузора. В цитируемой работе [55], например, показано, что с помощью единственного кольцевого профилированного открылка, установленного на некотором расстоянии от выходного сечения диффузора, можно увеличить мощность, вырабатываемую турбиной, на величину до 80 %, в то время как за счет подмешивания через кольцевые щели можно получить не более 25 % прироста выходной мощности.

На рис. 5.12 приведены зависимости C_{pe} и r от величины отношения площадей для турбины в насадке, полученные для различных профилей (см. модели 1—3 в табл. 5.1), обеспечивающих при одинаковой величине входного отверстия различные величины отношений A_e/A_t .

Характерно, что кривые насадков без открьлка не могут быть экстраполированы для описания тех же зависимостей для насадков с открьлком. Это объясняется тем, что во втором случае тече-

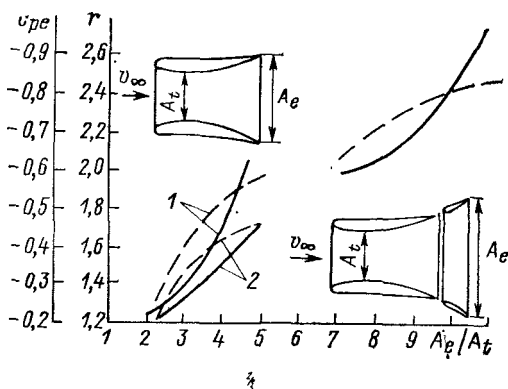


Рис. 5.12. Изменение характерных параметров рабочего колеса в насадке в зависимости от конструкции последнего [55].

1 — с насадком; 2 — без насадк.
----- C_{pe} ; ——— r

ние в насадке становится существенно неоднородным из-за потока, проникающего во внутренний пограничный слой из внешнего потока. Интересно также отметить, что вклад поддува через кольцевые каналы в насадке для больших отношений A_e/A_t достаточно резко возрастает. Это объясняется более сильным влиянием на пограничный слой управляющих целей при увеличении раскрыва диффузора. Применение кольцевых открьлков, таким образом, позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики турбин в насадках и делает их еще более привлекательными в качестве преобразователей энергии течений.

Таблица 5.1

Основные характеристики турбин в насадке

Модуль	Характерные коэффициенты						
	A_e/A_t	C_{pe}	C_{pr}	r	$\eta_{\text{опт}}$	r_{max}	$\kappa = r/r_{\text{max}}, \%$
1	2,4	—0,235	0,550	1,24	0,900	1,329	93,3
2	3,5	—0,381	0,531	1,42	0,938	1,539	92,3
3	4,5	—0,406	0,594	1,63	0,812	1,700	95,9

Если только применение насадка позволило увеличить эффективность преобразования энергии в 1,25 раза, то последние до-

стижения в области гидродинамики за счет управления пограничным слоем дали возможность повысить ее уже в 2,8 раза. Для этого понадобилось около 15 лет работы исследователей. Эти изыскания не прекращены и сегодня.

§ 5.5. Гидроэнергетические узлы в проливах

Если в предыдущих параграфах обсуждались технические решения, связанные лишь с частичным использованием энергии океанских течений, то здесь речь идет о таком направлении в океанском гидротехническом строительстве, которое предполагает серьезное вторжение в динамику океанских вод, влекущее за собой изменения в природе как отдельных регионов, так и планеты в целом.

За последние сто лет было выдвинуто не менее двадцати проектов перестройки климата планеты за счет изменения динамики вод океанов, но мы остановимся только на одном из них, интерес к которому и сейчас достаточно велик. Это проект советского инженера П. М. Борисова цель которого — создав теплое течение в Арктике («полярный Гольфстрим»), обеспечить таяние арктических льдов, увеличить тем самым поглощение поверхностью Ледовитого океана солнечного излучения и повысить среднюю температуру воздуха, существенно улучшив климатические условия в северных районах СССР, США и Канады. Последнее должно привести к возникновению новых сельскохозяйственных районов, облегчить доступ к полезным ископаемым, улучшить условия жизни.

По проекту П. М. Борисова предлагается создать теплое течение вдоль северного побережья нашей страны за счет перекачки поверхностных вод из Чукотского моря в Берингово. Для этого необходимо перегородить плотиной Берингов пролив и установить в ней насосные агрегаты общей мощностью около 20 000 МВт, способные ежегодно перекачивать до 140 000 км³ воды. Протяженность плотины равняется примерно 80 км, высота, определяемая средней глубиной пролива, — 50 м. Предполагается, что тело плотины будет покоиться на свайном основании, а обтекаемая форма ее верхней части позволит пропускать по всему сечению паковые льды толщиной до 13 м. Мощность насосов и объем перекачиваемой воды определены из условия получения устойчивого изменения климата в течение трех лет с момента пуска сооружения*. Предполагается, что такой проект может быть реализован совместными усилиями СССР, США и Канады и что энергию, необходимую для работы насосных агрегатов, можно будет получать от энергосистем советского Дальнего Востока и Аляски. Нежелательные последствия для климата в бассейнах Охотского и Японского морей, которые могут возникнуть в течение первых двух

* Борисов П. М. Может ли человек изменить климат. М., 1970.

лет работы гидроузла из-за поступления холодных вод и льда в Берингово море, по оценкам автора не выйдут за пределы встречающихся в природе кратковременных похолоданий.

Однако проект П. М. Борисова, по всей вероятности, не свободен от экологических недостатков, и в случае его реализации seriously отрицательному воздействию подвергнется весь животный мир Арктики.

Проект этот интересен, сулит определенные выгоды, но его эффективность еще требует доказательства, а практические воз-

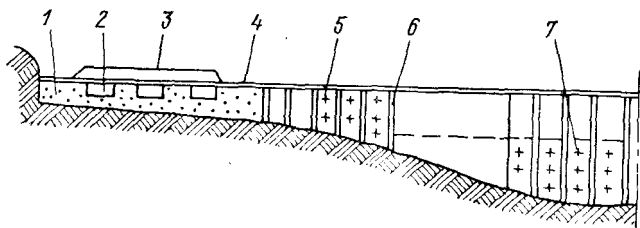


Рис. 5.13. Схема ОГЭС в Гибралтарском проливе.

1 — плотина; 2 — каналы для прохода судов; 3 — ферма моста; 4 — автострада; 5 — гидроагрегаты, приводимые в действие потоком вод Атлантического океана; 6 — бетонные опоры; 7 — агрегаты, приводимые в действие глубинными водами Средиземного моря, поступающими в Атлантический океан

можности для его реализации вряд ли появятся ранее середины следующего века. Проект требует гигантских энергетических затрат, а человечество пока занято поиском средств устранения дефицита энергии в ближайшем будущем. Поэтому сейчас большой популярностью пользуются идеи, связанные с достаточно быстрым наращиванием энергетических мощностей, нежели с увеличением расходования энергии.

К таким идеям относится проект создания ОГЭС в Гибралтарском проливе, предложенный испанским инженером Ф. К. Гурьеро (рис. 5.13). Им рассмотрена возможность использования течения в этом проливе, расход в котором составляет 20—40 тыс. м³/с для получения ежегодно до 150 млрд. кВт·ч электроэнергии. Проект предусматривает строительство в проливе плотины со шлюзами для пропускания судов (до 150 ежедневно!) и с размещенными на опорах в проливе гидроэлектроагрегатами. Требуемый напор должно обеспечить некоторое понижение уровня Средиземного моря вследствие уменьшения поступления вод из Атлантического океана. Дефицит имеется уже и сейчас: через пролив втекает в среднем 55 тыс. км³ атлантических вод, а вытекает — 52. Причем в проливе, ширина которого в самом узком месте составляет 14 км, а глубины изменяются от 53 до 1180 м, существуют два противотечения — поверхностное (из океана) и глубинное (обратно в океан). От океана пролив отделен скальным порогом, в зоне которого глубина не превышает 350 м, так что решение инженерной задачи строительства плотины смот-

рится вполне допустимым. Однако возможность серьезных нарушений в экологии уникального Средиземного моря и необходимые затраты (ориентировочная стоимость всех работ 20 млрд. долл.) отодвигают сроки реализации проекта на неопределенное время [8].

Более реальным кажется создание ГЭС в искусственном проливе, который может быть проложен из Средиземного моря во впадину Каттара, расположенную в Ливийской пустыне (Египет). Дно впадины лежит на 135 м ниже уровня моря, ее площадь составляет свыше 20 тыс. км². В проливе (точнее на канале) может быть построена ГЭС. Даже части перепада уровней достаточно для работы мощной электростанции, причем выполненные уже расчеты показывают, что режим ее работы можно подобрать таким образом, что испарение вод с поверхности искусственного моря будет при определенной площади затопления полностью компенсироваться притоком воды через турбины. Осуществление проекта сулит возможность получения электроэнергии и обводнения значительных массивов ныне пустынных земель, что приведет к существенному увлажнению климата. Сейчас в Египте ведутся работы по технической и экологической проработке проекта, осуществление которого связано не только с большой затратой средств, но и с серьезными последствиями для природы всего северо-запада Африки.

ПРОЕКТЫ ВОЛНОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

§ 6.1. Исторический аспект

Если судить по мировой патентной литературе, то первый пик интереса к созданию технических устройств для преобразования энергии волн в практически приемлемую форму приходится на начало нашего века — с 1900 по 1930 гг. В этот же период появились и первые действующие устройства: в 1910 г. вблизи г. Бордо демонстрировалась волновая установка мощностью 1 кВт [8]. Сейчас патентными ведомствами различных стран зарегистрировано несколько сотен оригинальных технических решений волновых преобразователей — больше, чем любых других видов преобразователей энергии океана. Вероятно, волны — этот неременный атрибут поверхности любого водоема — сильнее всего побуждают к массовому техническому творчеству.

Однако из сотен предложений, которыми богата мировая патентная библиотека, приемлемыми для практической реализации оказываются лишь десятки. Причина этого, по словам Ж. Констанса в том, что многие технические идеи рождаются без учета основного фактора — специфики морской среды. До недавнего времени от 70 до 90 % усилий в области разработки волновых преобразователей тратились на техническую сторону проектов и только 10—30 % — на изучение характеристик морского волнения. Сейчас, когда эйфория с новым «открытием» волновой энергии прошла, ситуация резко изменилась: оптимизация конструкций, доведение их до уровня, соответствующего промышленному внедрению, потребовали изменения акцентов [45]. В этом смысле отечественная волновая энергетика на сегодняшний день оказалась в выигрышном положении: начавшиеся у нас в последние годы разработки уже базируются на достаточно серьезном знании природы волнения.

Последнее вовсе не означает, что в нашей стране интерес к волновым преобразователям возник только сейчас, следуя мировой моде. Подобные работы велись у нас и в 20 и 30-е гг. В 1935 г., например, наш великий соотечественник К. Э. Циолковский опубликовал статью «Волнолом и извлечение энергии из морских волн»*, в которой описал принципиальные схемы

* Циолковский К. Э. Собр. соч., т. 4, М., 1964, с. 362—364.

трех типов устройств и в настоящее время относящихся к разряду наиболее перспективных. Эти схемы приведены на рис. 6.1. В них мы без труда узнаем аналоги будущих устройств Масуды, Кайзера, Коккерелла. Сам К. Э. Циолковский считал, что первые две системы не оригинальны, но относительно новизны последней — контурного плота — не сомневался.

Указанная статья была адресована массовому читателю и вводила в проблематику комплексного освоения нового в то время вида энергетических ресурсов: «Извлекая через посредство машин энергию движения из волн, мы ослабляем их колебания и тем самым отчасти укрощаем. Ряд таких машин, следующих одно за другой, могут совсем укротить волнение. Эти двигатели

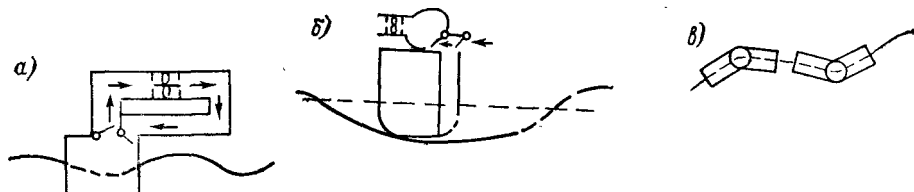


Рис. 6.1. Варианты преобразователей энергии волн, описанные К. Э. Циолковским: а, б — пневматические; в — контурный плот

могут заменить мол и явиться искусственной гаванью там, где ее нет». Статья была откликом талантливого изобретателя на идеи в области поиска источников энергии для развивавшейся индустрии, волновавшие в то время нашу страну. Прошло всего 50 лет, и мы видим уже техническую реализацию этих идей, правда, выполненную на базе детального изучения природы волновых явлений, детального изучения взаимодействия волн с различными механическими системами, создания соответствующего математического аппарата.

Не последнюю роль в становлении знаний о природе волн сыграли за эти годы работы наших исследователей. Здесь необходимо отметить труды Н. Е. Кочина, В. В. Шулейкина, Л. Н. Сренского и многих других. Но природа волн такова, что несмотря на развитую общую теорию до сих пор при разработке проектов волновых преобразователей для конкретных районов инженерам недостает сведений, необходимых для оценки запасов энергии и выбора наилучшего конструктивного решения. Элемент случайности, присущий волновым явлениям, заставляет для каждого района предполагаемой установки волновых преобразователей проводить длительный цикл экспериментального исследования волнообразования, не ограничиваясь только теоретическими оценками.

Наибольшую заинтересованность в разработке ресурсов волновой энергии проявляют Великобритания, Норвегия, Япония. По оценкам специалистов первые две страны могут полностью обеспечить себя электроэнергией с помощью волновых электростан-

ций на уровне потребления 2000 г. Ведутся работы по созданию волновых преобразователей энергии у нас в стране, в США, во Франции и ряде других стран. К этим работам, например, подключилась Социалистическая Республика Румыния с ее относительно спокойным Черноморским побережьем. Румынские инженеры рассчитывают с помощью 200-километровой цепи волновых преобразователей, расположенных в 3—5 км от берега, получать до 2 млрд. кВт·ч электроэнергии в год.

Отношение к ресурсам волновой энергии в мире постоянно изменяется, как бы отслеживая уровень технических разработок и уровень знаний о природе волн. Например, в США первоначально подходящими для размещения волновых электростанций считались лишь районы северного побережья залива Мэн и побережье штата Вашингтон. Позже, после выполнения соответствующих исследований, рентабельным стало казаться использовать вообще всю зону на расстоянии 40 км от побережья страны [64]. Если в Японии первоначально волновую энергетику считали пригодной только для обеспечения питания автономных буев, то сейчас уже реализован первый крупномасштабный вариант плавучей волновой установки и т. д.

Как и всем возобновляемым океанским ресурсам энергии, волновым присущи свойства, ограничивающие полет фантазии разработчиков. Простое перечисление этих свойств демонстрирует некоторые отрицательные стороны волновой энергии. Это и сравнительно низкая концентрация энергии, и относительное непостоянство в пространстве и во времени, и широкий спектр колебаний, и отсутствие корреляции между изменяющимися потребностями в энергии и мощностью источника в данный момент времени.

Перечисленные свойства создают необходимость при разработке волновых преобразователей удовлетворять целому ряду противоречивых требований. Так, низкая концентрация энергии требует создания либо крупномасштабных преобразователей большой единичной мощности, либо соответствующего количества рассредоточенных на большой площади сравнительно небольших устройств. В первом случае приходится использовать массивные подвижные элементы или гигантские пассивные концентраторы волновой энергии, причем речь может идти только об использовании низкочастотных составляющих волнения и о практической невозможности перестраивать системы при изменении параметров волн. Для малогабаритных установок возможность перестройки на оптимальную частоту становится реальной, но увеличивается общая материалоемкость, возрастает стоимость обслуживания. В то же время при настройке волнового преобразователя на оптимальную частоту с целью увеличения эффективности преобразования энергии оказывается возможным использовать лишь часть суммарной энергии волн, обычно распределенной в достаточно широком спектральном диапазоне. Именно поэтому устройства, хорошо зарекомендовавшие себя в лабораторных условиях, часто оказываются малоэффективными при установке в море [64].

В случае непосредственного использования электроэнергии, вырабатываемой волновой станцией, для хозяйственных нужд ее нельзя рассматривать как самостоятельный источник. Непостоянство во времени и пространстве, сезонный характер самого ресурса требуют иметь в резерве какой-то дополнительный источник электроэнергии, либо подключать волновую электростанцию к энергосети, позволяющей за счет сторонних источников компенсировать снижение мощности из-за уменьшения волнения, либо, наконец, использовать аккумулирование энергии.

Еще одна трудность при создании волновых преобразователей — обеспечение их живучести в случае экстремальных волновых нагрузок, значительно превышающих расчетные режимы эксплуатации. Например, если среднее значение мощности, приходящейся на единицу длины гребня волны, для Северной Атлантики составляет примерно 50 кВт/м, то во время сильного шторма эта величина может достичь значения 2 МВт/м при высоте волн 15 м. А наблюдавшиеся в этом же районе максимальные волны (так называемые «пятидесятилетние волны») имели высоту до 34 м. Для этого района считается целесообразным разрабатывать устройства, рассчитанные на нормальную работу в диапазоне мощностей 50—150 кВт/м. Таким образом, чтобы противостоять штормам средней силы преобразователи энергии волн должны иметь установленную мощность, значительно превышающую среднюю. Это не спасает их от сильных штормов. Здесь предложено несколько вариантов защиты. Например, в случае такого шторма преобразователь может быть затоплен. Другой вариант — так рассчитывать преобразователи, чтобы с увеличением волнения выше оптимального их эффективность падала. Однако в любом случае возникают серьезные трудности при обслуживании, передаче энергии, удержании на якоре. Возникают даже совершенно новые проблемы. Например, срыв с якоря одного из точечных преобразователей может привести к разрушению соседних с ним устройств. Выбрасывание же на берег аварийных устройств может привести к опасности разрушения береговых сооружений.

Трудности создания энергетики на преобразовании энергии волн достаточно велики. Их преодоление потребует еще многих усилий разработчиков и ученых. В настоящее время в мире уже эксплуатируется около 400 автономных навигационных буев, использующих энергию воды. Однако уже в этом столетии прогнозируется возможное получение от океанских волн мощности не менее 10 ГВт (мощность Красноярской ГЭС около 12 ГВт).

Сильная связь со средой — этот наиболее существенный признак именно волновых преобразователей — заставляет при их разработке обращаться к алгоритму, сходному с представленным на рис. 6.2.

Эта схема показывает, как путем последовательных приближений удастся оптимальным образом увязать свойства реальной среды с особенностями конструкций преобразователей, имея при этом в виду не только наилучший КПД превращения

энергии, но и приемлемую стоимость будущего сооружения — волновой электростанции [45].

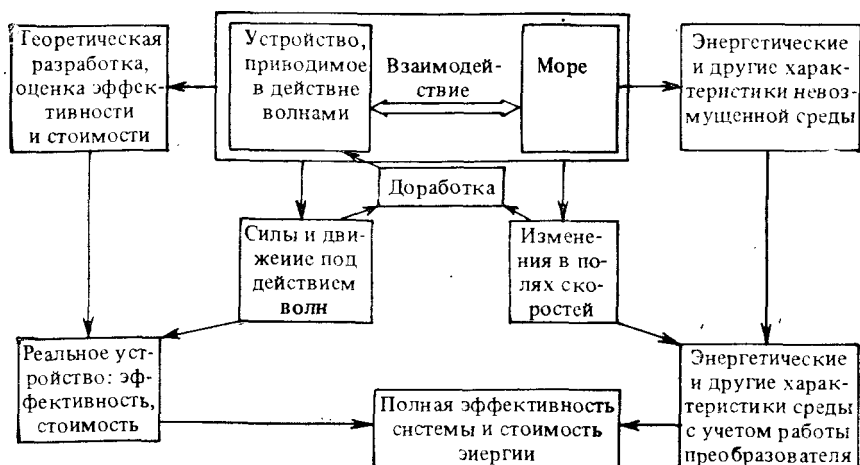


Рис. 6.2. Алгоритм согласования волнового преобразователя со средой [45]

§ 6.2. Классификация волновых преобразователей

Обилие схем преобразователей энергии волн породило несколько вариантов классификации, в основе которых лежат различные принципы. Можно, например, выделить два класса преобразователей — активные и пассивные. К первому относятся все устройства, имеющие перемещающиеся под действием колебаний водных масс элементы, ко второму — устройства лишь направляющие движение вод с целью концентрации энергии волн. В основу классификации иногда кладут наиболее характерные особенности природы волновых явлений и тогда выделяют три характерных признака:

- подъем волновой поверхности и изменение ее наклона;
- подповерхностное движение частиц жидкости и изменение давления;
- преобразование волн при подходе к естественным или искусственным препятствиям.

При такой классификации под первый признак попадают различные типы активных устройств — буюв, колеблющихся тел, преобразователей волнового движения в изменение воздушного давления и т. п. Под второй признак попадают также активные устройства, например поглощающие волновую энергию оболочки и устройства с колеблющимися и вращающимися элементами. Под третью — различные концентраторы энергии пассивного типа [79]. Такая классификация также не позволяет выявить всего многообразия принципов и мало отличается от первой.

Не универсальна и классификация, предложенная У. Экнером [47] и основанная на выявлении общих механических признаков различных устройств (рис. 6.3). Формализация изображений делает эту схему наглядной, но при изобретении какого-нибудь принципиально нового устройства она требует пересмотра и введения нового класса.

Наиболее удачным кажется метод классификации, идущий от природы волновых явлений, но дающий им большую детализацию (см., например, статью В. И. Сичкарева и А. С. Шпака [15]). В соответствии с этой классификацией конструкции волновых преобразователей делятся на использующие следующие физические факторы:

разность фаз колебаний в пространственно разнесенных точках;

изменение уровня моря относительно стационарно размещенного тела;

разность фаз колебаний уровня давления воды в пространственно разнесенных точках;

периодичность колебаний суммарного давления относительно стабилизированного уровня;

периодическое изменение наклона волновой поверхности;

концентрацию волновой энергии по фронту или по глубине;

скоростной напор жидкости;

комбинацию эффектов.

Классификация позволяет анализировать возможность использования тех или иных устройств применительно к конкретным условиям. Например, относительно преобразователей второй группы можно сказать, что если они используют жесткое закрепление на грунте, то в зоне действия приливов неприемлемы. В то же время такое ограничение не распространяется на аналогичные устройства, в которых перемещение поплавка происходит относительно инерционной платформы или динамического якоря (см. § 6.4). Конструкции, использующие разность фаз колебаний уровня (первая группа), вряд ли могут иметь значительные единичные мощности из-за прочностных характеристик передаточных пространственных механизмов. Устройства третьей группы имеют ограничение по глубинам установки. То же можно сказать о преобразователях предпоследней группы. На них, как и вообще на устройства, размещаемые под поверхностью водоема и на дне, действует еще одно ограничение: быстрое затухание волнового возмущения с глубиной. Для скорости движения частиц жидкости такое затухание, например, происходит по экспоненциальному закону. Кроме того, любые устанавливаемые на дне устройства находятся в какой-то мере под угрозой заноса осадочными материалами.

Большие единичные мощности — необходимое условие крупномасштабной энергетики — позволяют получить либо устройства, концентрирующие волновую энергию по фронту и по глубине, либо объединенные в сети преобразователи, работающие на об-

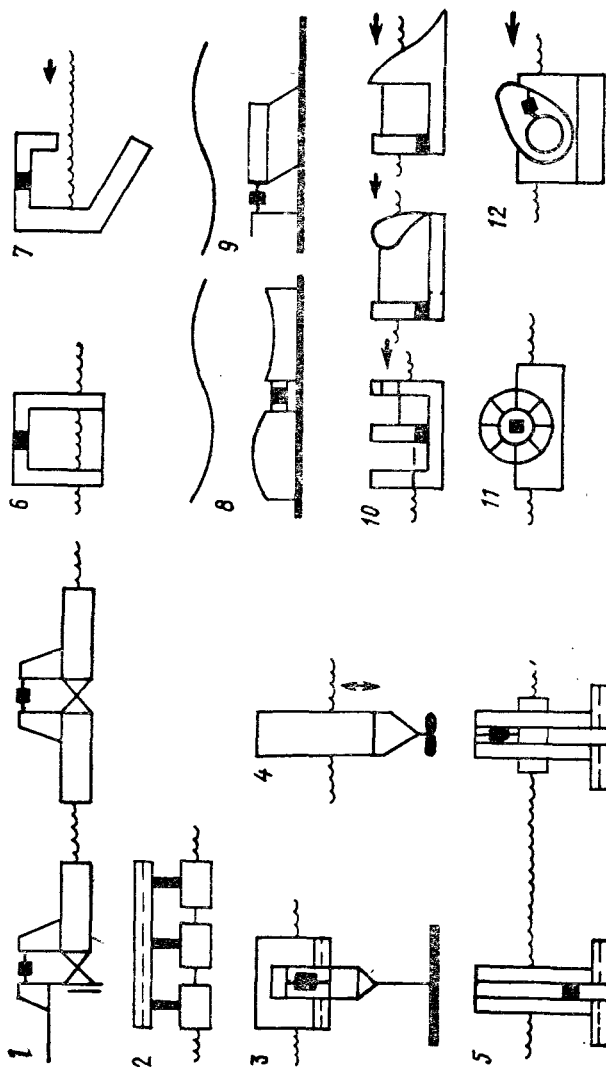


Рис. 6.3. Классификация волновых преобразователей [47].

1 — платформы, колеблющиеся относительно неподвижной опоры или друг относительно друга; 2 — плиты, перемещающиеся вертикально относительно общей рамы; 3 — точечный буй, жестко связанный с якорем либо с заглубленной пластиной; 4 — резонансный буй с рабочим колесом, приводимым в движение взаимным перемещением буй и воды; 5 — полупогруженные плавучие системы с колеблющимися колышущимися столбом или поплавком; 6 — пневмобуи с вертикальным перемещением уровня жидкости; 7 — пневмобуи (или волнобуи) с горизонтальным перемещением жидкости; 8 — деформируемая пневмооболочка; 9 — колеблющаяся в воде подвешенное тело; 10 — варианты накопителей жидкости («выпрямители») с жалюзи, с упорной и наклонной стенками; 11 — колесно-волновой привод; 12 — вращающийся поплавок на полупогруженной платформе

щую нагрузку. При таком объединении размещают отдельные блоки или вдоль фронта волн (терминаторы), или поперек фронта (аттенюаторные устройства). В роли и аттенюаторов, и терминаторов могут выступать устройства различных групп.

В настоящее время разрабатываются варианты преобразователей практически всех групп. Многие из них реализованы и испытаны в лабораторных условиях волновых бассейнов, ряд испытан в условиях моря. Но до сего дня нельзя выделить какое-то одно или даже несколько устройств, которые были бы приемлемы для всех случаев, удовлетворяли бы всем противоречивым требованиям, предъявляемым потребителями.

§ 6.3. Преобразователи с качающимися элементами

В этом классе преобразователей волновой энергии прежде всего остановимся на знаменитой «солтерской утке» (рис. 6.4), названной так в честь ее создателя, профессора Эдинбургского

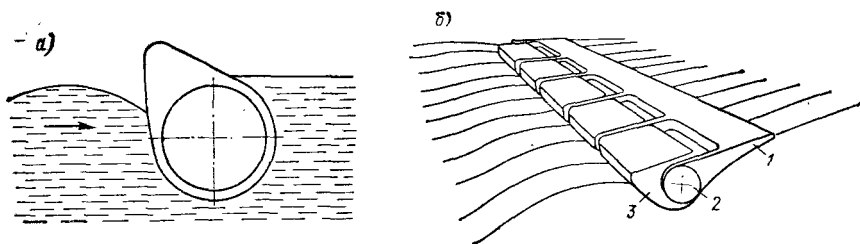


Рис. 6.4. «Утка» Солтера: а — схема преобразования энергии волн; б — вариант конструкции преобразователя.

1 — плавучая платформа; 2 — цилиндрическая опора с размещаемыми в ней приводами и электрогенераторами; 3 — асимметричный поплавок

университета С. Солтера. Техническое название такого преобразователя — колеблющееся крыло. Его основная особенность — чрезвычайно высокая эффективность преобразования энергии волн. Правда, чтобы реализовать эту возможность, приходится достаточно жестко закреплять ось крыла-поплавка. Сделать это можно, установив, например, крыло в теле волнолома. Однако стационарный волнолом — сооружение мелководное, а на мелководье значительная часть энергии волн теряется вследствие трения о дно. Другой недостаток — стационарный волнолом не может отслеживать изменение направления прихода волн, а в зависимости от этого параметра волнения эффективность крыла как преобразователя сильно зависит. Было предложено устанавливать ряд самостоятельно колеблющихся крыльев в теле плота, положение которого в пространстве могло бы изменяться с помощью системы якорных тросов, однако, теоретические расчеты показывают, что изолированная «утка» с фиксированным цент-

ром вращения в реальном море из-за раскачивания остова в продольном и поперечном направлениях должна также показывать снижение эффективности преобразования.

Основная удача конструктора «утки» — оптимальная форма. Когда «утка» раскачивается относительно центра вращения, ее носовая часть практически точно отслеживает движение набегающей волны. В то же время кормовая поверхность, имеющая цилиндрическую форму, при движении относительно того же центра практически не производит перемещений жидкости и, следовательно, не может образовать волну, уносящую часть воспринятой энергии. Физическую сущность высокой эффективности «утки» поясняет рис. 6.4, а, позволяющий проследить процесс взаимодействия с ней падающей волны. За счет интерференции отраженной неподвижной «уткой» волны и излученной движущейся (правая половина поля) практически гасится волна, распространяющаяся навстречу падающей. Такой же процесс происходит за «уткой», где гашение распространяющейся влево волны происходит в результате взаимодействия дифрагировавшей на «утке» и излученной ею вправо волн.

Первоначально Солтером был создан макет достаточно узкополосного по частоте устройства. В волновом бассейне оно поглощало до 90 % падающей энергии. Более поздние эксперименты и расчеты показали возможность создать за счет рационального управления распределения масс в поплавке конструкцию, обеспечивающую КПД не хуже 80 % при ширине полосы частот более 50 %. Кроме того, было показано, что для условий Северной Атлантики могут быть созданы достаточно эффективные преобразователи диаметром 10—15 м [51].

Первые испытания в условиях, близких к морским, были проведены в мае 1977 г. на оз. Лох-Несс. 50-метровая гирлянда из 20-метровых «уток» общей массой 16 т была спущена на воду и испытывалась и исследовалась в течение 4 мес при различных волновых условиях (пережила даже сильный шторм). Изучались механические характеристики, швартовочные нагрузки. В декабре того же года эта модель в 1/10 будущей величины океанского преобразователя была вновь спущена на воду и дала первый ток. В течение 3 мес одного из самых суровых зимних периодов модель первой английской волновой электростанции работала с КПД около 50 %.

Несмотря на относительную простоту системы и высокую эффективность преобразования существуют серьезные препятствия на пути ее внедрения [45]:

система оказалась настолько чувствительна к направлению волн, что для получения сравнительно высокого КПД преобразования необходимо отслеживать изменение направления;

достаточно сложна и ненадежна гидромашина, приводимая в действие поплавком;

сложность формы поверхности «утки» создает затруднения при ее сборке и монтаже;

специфика распределения массы создает трудности при установке и перевозке преобразователей;

сборка нескольких преобразователей в протяженную конструкцию может привести к усложнению постановки и удержания на якоре;

при сборке возникают проблемы надежного уплотнения кольцевого зазора большого диаметра.

В настоящее время ведутся работы по устранению этих недостатков.

Другой вариант достаточно эффективного волнового преобразователя с качающимся элементом — контурный плот Коккерелла (У. Коккерелл известен как один из удачливых изобретателей

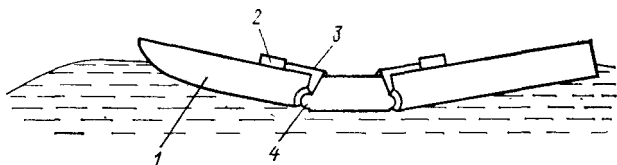


Рис. 6.5. Вариант выполнения контурного плота Коккерелла.

1 — колеблющаяся секция; 2 — преобразователь; 3 — тяга; 4 — шарнир

судна на воздушной подушке). Его модель также в 1/10 величины испытывалась в том же году в проливе Солент вблизи г. Саутгемптона. Контурный плот — многозвенная система из шарнирно соединенных секций (рис. 6.5). Как и «утка», он устанавливается перпендикулярно к фронту волны и отслеживает ее профиль. К настоящему времени разработано несколько модификаций плота. В более ранних публикациях говорится о плотах из четырех-пяти секций длиной примерно 1/4 каждая. В более поздних — о трехзвенном и даже о двухзвенном плоте с секциями различного размера: головная, установленная мористее, воспринимает основную энергию волны и примерно в два раза короче кормовой. Вероятно, последняя конструкция более широкополосна, если иметь в виду волну не конкретной длины, а спектр длин волн.

Детальные лабораторные испытания модели плота в масштабе 1/100 показали, что его эффективность составляет около 45 %. Это ниже, чем у «утки» Солтера (но плот привлекает другим достоинством: близость конструкции к традиционным судостроительным). Изготовление таких плотов не потребует создания новых промышленных предприятий и позволит поднять занятость в судостроительной промышленности.

Была начата разработка проекта волновой электростанции на базе преобразователя типа плота. В качестве места для ее размещения было выбрано западное побережье Гебридских островов, где имеется подходящий участок морского дна протяженностью около 150 км вдоль береговой линии с глубинами около

50 м. Скальный грунт позволяет в качестве якорей использовать забуренные в него сваи с высокой горизонтальной и вертикальной удерживающей способностью (во время штормов плоты будут испытывать дополнительные нагрузки до 20 МН). Для удержания плотов разрабатывались специальные тросы, усиленные эластичными полимерами, с допустимым удлинением до 30 %. Последняя величина определена из расчета давать плотам возможность перемещаться при шторме на расстояние до 30 м от первоначального положения.

Предполагалось, что такая станция будет состоять из 1500 плотов шириной 50 и длиной 100 м, установленных на расстоянии 50 м друг от друга. В качестве материала для корпусов был выбран армированный железобетон, обладающий стойкостью по отношению к циклическим нагрузкам и коррозии. Расчетная долговечность корпусов из бетона по аналогии с долговечностью железобетонных платформ Северного моря принималась равной 25 годам. За этот период преобразователи должны выдержать примерно 10^8 циклов волнового нагружения различной интенсивности. Предполагалось, что масса корпуса одного сооружения составит 13 500 т, мощность генератора — примерно 2000 кВт. Для нормального темпа ввода такой станции в эксплуатацию необходимо было бы выпускать в год не менее 60 плотов. Сейчас работы над проектом прекращены: он признан неэффективным.

Аналогом системы С. Солтера является преобразователь типа «моллюск». Длинная горизонтальная ось «утки» заменена в «моллюске» прямоугольной секцией, в которой под действием волн колеблются вертикально установленные пластины, сжимающие гибкий рукав, заполненный воздухом. Сжатый воздух приводит в движение турбину, размещенную внутри конструкции. КПД преобразования таких вращающихся пластин определен теоретически и составляет 50 % [49]. Именно этот тип преобразователя выдвинули сейчас на одно из первых мест.

Если «утка» и плот относятся к преобразователям, использующим изменение наклона волновой поверхности, то преобразователь типа «бристольский цилиндр» — скорее к группе устройств, работающих под действием скоростного напора в волне. В этом преобразователе цилиндрическое тело, имеющее среднюю плотность $0,6\text{--}0,8\text{ т/м}^3$, колеблется в волне, совершая движение по эллиптической траектории и приводя в действие гидравлические насосы. Одно из преимуществ идеи «бристольского цилиндра» то, что после настройки на оптимальную частоту он не отражает энергию других частот, а дает ей возможность распространяться далее, где ее могут поглотить другие преобразователи, например цилиндры с другой частотой [49].

Из других преобразователей с качающимся элементом (элементами) необходимо отметить различные варианты аттенуаторов типа «гибкий рукав», устанавливаемых таким образом, чтобы энергия волны передавалась к упругим элементам устройств по мере прохождения волны. Одним из наиболее известных устройств

этого типа является «гибкий рукав», разработанный профессором Ланкастерского университета М. Д. Френчем. В этом рукаве энергия накапливается вдоль него за счет деформации гибких резиновых секций, последовательно перекачивающих воздух в турбину, размещенную в центре. Такие устройства могут оказаться наиболее широкополосными, причем полоса рабочих частот увеличивается с увеличением длины, если только в конструкцию не заложено каких-либо ограничений движения.

Отечественная конструкция такого типа разработана, например И. И. Пятницким*. Она представляет собой гибкий металлический рукав из отдельных секций, выполненных из сильфонов, наполовину заполненных трансформаторным маслом, со встроенными турбинами, подключенными к электрогенераторам. При изменении положения гибких секций масло перетекает из верхних в нижние, приводя в движение турбины.

§ 6.4. Точечные преобразователи

Для того чтобы считать устройство точечным преобразователем, вовсе не важно, какой принцип лежит в основе его работы. Достаточно, чтобы длина и ширина устройства были значительно меньше длины волны и чтобы эффективность работы его либо принципиально не зависела от направления движения волн, либо устройство могло самостоятельно отслеживать изменение этого направления и переориентироваться в пространстве. Особенный интерес к точечным преобразователям связан с тем, что они не только могут обладать достаточно высокими КПД преобразования, использоваться как в одиночку, так и совместно, образуя целые энергосистемы, но и с тем, что они собирают энергию с участка фронта волны, превышающего их линейные размеры и могут применяться в качестве волнозащитных устройств.

Чтобы точечный преобразователь был достаточно эффективным, движение его поглощающего элемента должно быть согласовано с движением водной поверхности. Этот элемент должен быть непременно подключен к демпфирующей системе, извлекающей полезную мощность, а механические характеристики устройства должны перестраиваться при изменении волновых условий [43].

В общем случае для системы типа точечного цилиндрического буя уравнение движения может быть записано в виде

$$(m + a)\ddot{z} + (b_r + b_v + b_e + b_c)\dot{z} + \rho g \frac{\pi D^2}{4} z = F(t), \quad (6.1)$$

где a — присоединенная масса жидкости, кг; D — диаметр; $F(t)$ — сила, создаваемая волнами; g — гравитационная постоянная; m — масса; b_e — потери энергии на преобразование в полезную; b_r —

* А. с. № 859670 (СССР), 1981 г.

потери на отражение; b_v — потери на вязкое трение; b_c — потери на тепло, выделяющееся в электрической цепи; z, \dot{z}, \ddot{z} — перемещение в волне, скорость и ускорение соответственно; ρ — плотность морской воды [69]. В этом выражении коэффициенты, описывающие различные потери энергии, являются функциями частоты колебаний.

Если для простоты заменить такой буй эквивалентным электрическим генератором с нагрузкой, то об оптимизации его характеристик можно говорить в случае равенства внутреннего сопротивления такого генератора внешнему сопротивлению сети,

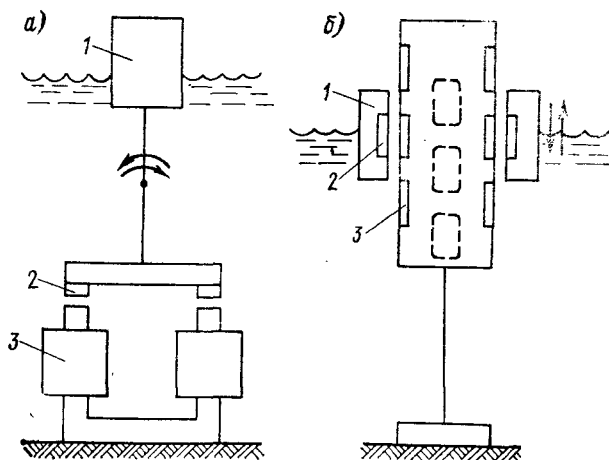


Рис. 6.6. Индукционные волновые генераторы в виде точечных буев: а — качающийся буй; б — неподвижный буй с линейным индукционным генератором.

1 — поплавок; 2 — постоянный магнит; 3 — катушка

в которой расходуется производимая энергия. Так как полезная мощность, вырабатываемая устройством, есть не что иное как $\langle P_e \rangle = b_c \langle \dot{z}^2 \rangle$ (здесь $\langle \rangle$ — означает усреднение по времени), то условием выработки максимальной полезной мощности будет выражение

$$b_e = b_r + b_v + b_c. \quad (6.2)$$

Причем, как показано в указанной выше работе на примере линейного индуктивного генератора (рис. 6.6), имеющего N витков провода в катушках, магнитную индукцию B , полную длину провода l и полное сопротивление электрической цепи R_t , при полной электрической мощности

$$\langle P_e \rangle = N^2 B^2 l^2 \langle \dot{z}^2 \rangle / R_t, \quad (6.3)$$

полное сопротивление цепи R_t может быть найдено как

$$R_t = (b_r + b_v + b_c) / (N^2 B^2 l^2), \quad (6.4)$$

а собственное сопротивление цепи генератора $R_c = (N^2 B^2 l^2) / b_c$.

Обычно точечные преобразователи являются устройствами, имеющими характерные рабочие частоты. Если такое устройство рассчитано для работы при определенной доминирующей частоте волн, то эффективность его падает при изменении волновых условий. При настройке в резонанс с падающей волной, наоборот, происходит увеличение волновой энергии, выделяющейся на преобразователе. Такая настройка производится за счет изменения механических (воздействие на величину b_r) и электрических характеристик b_c . В первом случае для устройств, колеблющихся вдоль вертикальной оси (различного вида буй), рекомендуют изменение массы за счет заполнения балластных цистерн, а для устройств с вращающимися элементами («утка», плот) — моментов инерции путем изменения распределения масс. В последнем случае может, кроме того, быть изменено передаточное число привода электрогенератора, индуктивность, емкость и сопротивление электрических цепей генераторов. А. А. Сидоренко [21], например, выведено следующее условие резонанса для преобразователя типа плота с качающейся секцией (см. рис. 6.6, а):

$$\frac{64H^2}{\lambda^2 T^2} = \frac{\varphi_m^2}{k^2 \pi^2} \left[\frac{1}{LC} + \left(\frac{N\Phi k}{\varphi_m} \right)^2 \frac{1}{IL} - \frac{R^2}{4L^2} \right]. \quad (6.5)$$

Это выражение связывает высоту волны H , ее длину λ и период T с максимальным углом поворота воспринимающей энергию волн секции φ_m ее моментом инерции I , передаточным числом редуктора k и параметрами генератора — числом витков обмотки N , индуктивностью L , емкостью C , величиной максимального магнитного потока через сечение обмотки Φ и полным сопротивлением электрической цепи R .

Варьируя емкость, сопротивлением и моментом инерции, в такой системе можно добиться выделения максимальной мощности на нагрузке при изменении параметров волн в определенном диапазоне. Такой же принцип регулирования параметров позволяет вывести систему из резонанса (снизить добротность колебательного контура) в случае превышения расчетного значения энергии волн.

К вопросу об оптимизации точечного преобразователя можно подойти и с другой стороны. Будал и Фолнс [43] считают, например, что наиболее эффективно для преобразователя типа сферического поплавка использовать принцип управляемого движения. Они исходят из того, что абсорбция энергии бумом полностью определяется параметрами волн и движением самого бую. Предоставленный сам себе (неуправляемый) буй из-за инерционности колеблется с некоторым запаздыванием по фазе относительно волны. В идеальном случае (для извлечения максимальной мощности из волны) он должен бы был иметь закон движения, показанный на рис. 6.7, с максимумом смещения, соответствующим наибольшей скорости перемещения волновой поверхности. Вследствие несогласованности движений свободно плавающего тела с движением

волновой поверхности волна как бы сама уменьшает амплитуду его колебаний. Будал и Фолнс предложили чрезвычайно простой способ управления движением: принудительно останавливать подъем и опускание буя в определенные моменты движения. В этом случае удастся получить практически полное согласование периода движения волны и периода колебаний буя. Кривая 3 на рис. 6.7 описывает такое движение с фиксацией в течение управляемого интервала времени. В этом случае сила, действующая на

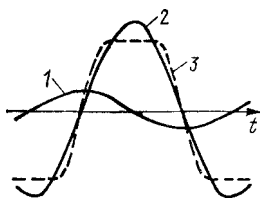


Рис. 6.7. Оптимизация движения вертикально колеблющегося поплавка.

1 — перемещение водной поверхности; 2 — перемещение свободного поплавка; 3 — перемещение управляемого поплавка

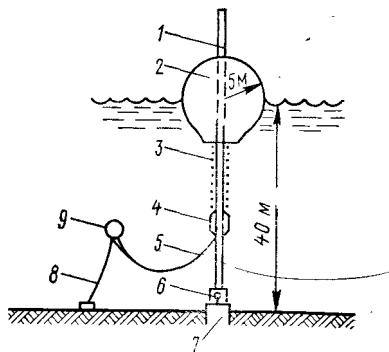


Рис. 6.8. Вариант конструкции точечного буя Будала—Фолнса [43].

1 — направляющая штанга; 2 — поплавок с механизмами преобразования энергии колебаний в электрическую; 3 — подвижный кабель; 4 — соединительная коробка; 5 — кабельная петля; 6 — поддерживающий поплавок; 7 — якорь-свая; 8 — якорный трос вспомогательного поплавка; 9 — вспомогательный поплавок

тело, всегда оказывается в фазе с волной, поэтому буй только получает энергию от волны во все время движения.

Вариант конструкции буя, в котором реализован описанный принцип, приведен на рис. 6.8. В основе преобразователя — свободно плавающий на поверхности сферический поплавок, движущийся относительно штанги, закрепленной на дне с помощью универсального шарнира. С помощью управляемого захвата на поплавке в определенные моменты времени, устанавливаемые микропроцессором в зависимости от сигнала датчика давления, поплавок фиксируется на штанге. Демпфирование движения буя и преобразование энергии осуществляются за счет работы воздушного насоса внутри полости буя, приводимого в действие колеблющимся столбом жидкости. Регулирование движения газа через турбину, имеющую перестраиваемый угол атаки крыльев, достигается с помощью клапанов.

Наиболее уязвимый элемент преобразователя — захват, который должен выдерживать в среднем до $6 \cdot 10^6$ срабатываний в год.

Но без управления движением мощность, поглощаемая буюм, снижается примерно в 5 раз. Поэтому авторы устройства считают, что имеет смысл преодолеть технические трудности и создать долгоживущий захват.

Испытания преобразователя были выполнены на модели в масштабе 1:10 на нерегулярных волнах. Испытания дали довольно хорошие результаты, хотя из-за несовершенства системы управления в некоторых случаях фазы колебаний бую и волн несколько отличались. В настоящее время разрабатывается полноразмерная модель бую и проектируется воздушная турбина, рассчитанная на вращение с частотой вращения 50 с^{-1} и непосредственно связанная с асинхронным трехфазным электрогенератором установленной мощностью 400 кВт.

В случае сильного шторма достаточно отключить автоматику захвата этого преобразователя, чтобы, снизив его эффективность, предохранить от разрушения.

Несмотря на достоинства, описанная выше система не свободна от недостатков. Наиболее серьезные из них — наличие «мертвого» достаточно массивного якоря, сложного узла универсального шарнира, работающего под водой в условиях знакопеременных нагрузок, наличие прочной штанги, которая должна выдерживать значительные напряжения при верхнем положении бую. Вообще, и это отмечают многие исследователи, якорные устройства плавучих волновых преобразователей — элемент, надежность работы которого зачастую определяет саму возможность применения некоторых из них. В этой связи большое значение приобретают поиски технических решений, позволяющих упростить якорные устройства, снизить их массу и требуемую прочность тросов.

К таким решениям относятся конструкции самопозиционирующихся преобразователей, снабженные заглубленными платформами, относительно которых происходит перемещение плавучих буюв, либо даже динамическими якорями и не требующие значительных усилий для удержания.

Теоретически работа таких устройств рассмотрена, например, авторами работы [36]. Для схемы, приведенной на рис. 6.9, с использованием теории Ньюмена ими решено уравнение, описывающее относительное движение бую и платформы, получено выражение для относительного перемещения, дан анализ эффективности. Показано, что последняя характеризуется коэффициентом преобразования энергии η , равным отношению мощности P_L , генерируемой в преобразующем элементе, связывающем бую с платформой, к допустимой средней мощности в волне на единицу длины гребня P_w :

$$\eta = \frac{P_L}{P_w} = \frac{\frac{1}{2} C_L \omega^2 |z_{12}|^2}{\frac{1}{4} \frac{\rho g^2 H^2}{\omega}} = \left(\frac{2\omega^3}{\rho g^2} \right) C_L |z_{12}|^2, \quad (6.6)$$

где C_L — коэффициент нагрузки в связи буй—платформа; H — амплитуда волны; $|z_{12}|$ — модуль амплитуды взаимного перемещения буя и платформы. В работе исследованы также динамические свойства системы, ее реакция на различные способы управления и выяснено, что наилучший и наиболее легко осуществимый — управление нагрузочным сопротивлением по линейному закону вида $C_L = 550 + 750(\omega - 0,8)$. Изучено, в частности, поведение системы из буя с вытесняющим объемом около 190 м^3 и платформы массой 190 т , связанных между собой нагрузочным

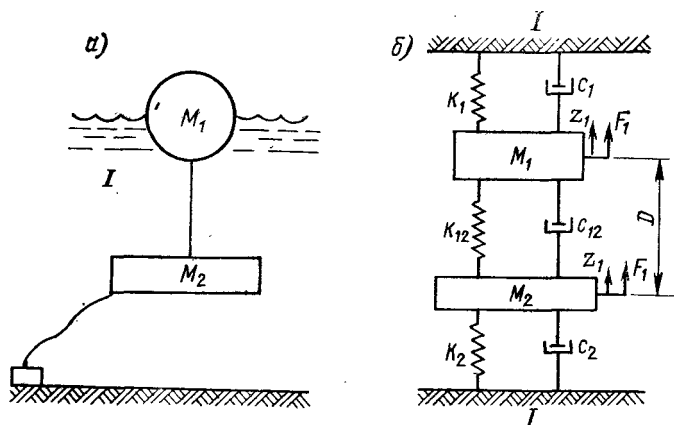


Рис. 6.9. Самопозиционирующий преобразователь [36]:
а — схема устройства; б — расчетная схема.

I — водная среда

элементом, в котором и осуществляется преобразование взаимного перемещения буя и платформы. Расчет выполнен для «глубокого» моря (глубина больше половины длины волны), причем платформа была заглублена таким образом, чтобы можно было пренебречь гидродинамическим взаимодействием между элементами системы (вероятно, на глубине $10\text{--}15 \text{ м}$). Интересно сравнить полученные в расчетах перемещения буя и платформы. При смещении буя по вертикали на величину $0,7$ амплитуды волны при угловой частоте волн $\omega = 1,2 \text{ с}^{-1}$ смещение платформы составляло $0,05 \text{ Н}$, а при частоте $0,8 \text{ с}^{-1}$ — $0,22 \text{ Н}$. Эффективность преобразования соответственно изменялась от 45 до 28% .

Изучение динамики системы из двух масс показало, что нагрузка может быть подобрана таким образом, что преобразование энергии будет достаточно эффективным во всем диапазоне расчетных волновых условий, и тогда необходимость в управлении вообще отпадает.

К достоинствам систем с динамическим удержанием относится еще и возможность использовать их в условиях действия приливов и длиннопериодных волн зыби. В этом случае они как бы ис-

полняют роль низкочастотных фильтров, не реагирующих на медленное изменение возбуждающей колебания силы.

Динамическое удержание можно обеспечить как за счет использования инерционной массы платформы, так и за счет применения динамического якоря, представляющего собой достаточно жесткий плоский элемент, сопротивление которого при ускорении в воде возрастает за счет присоединенной массы. Этот эффект исследований учтен авторами цитировавшейся выше статьи. На его использовании строится ряд отечественных разработок.

Интересная особенность систем с динамическими якорями — снижение их поглощающей энергию способности начиная с некоторой величины длины волны за счет того, что с ростом ее в движение начинают вовлекаться все более заглубленные слои жидкости. Динамические устройства хорошо зарекомендовали себя как защитные элементы якорных систем океанских буев, предохраняя якорные тросы и цепи от динамических нагрузок и тем самым повышая их живучесть. Принципы расчета динамических якорей изложены в курсах гидродинамики.

§ 6.5. Гидропневматические преобразователи

По приведенной выше классификации этот вид преобразователей относится ко второму классу. Наиболее современный прото-

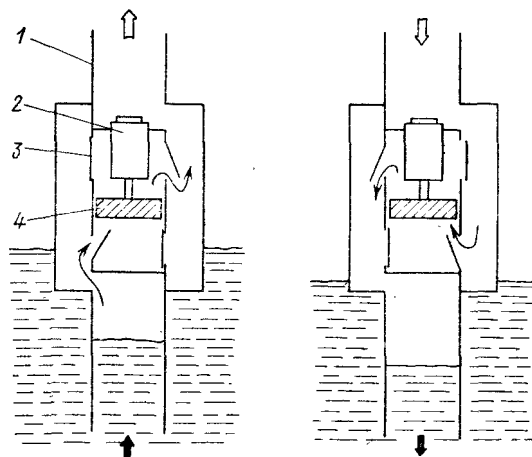


Рис. 6.10. Пневмобуй Масуды [66].

1 — корпус; 2 — электрогенератор; 3 — клапан; 4 — воздушная турбина

тип практически всех разрабатываемых в настоящее время конструкций — буй Масуды (рис. 6.10) [66]. О некоторых возможных вариантах гидропневматических преобразователей дает представление рис. 6.11, где технические решения представлены схе-

матично. В основе этих устройств — принцип колебаний столба воды в трубе с открытым снизу концом. За счет пульсаций гидростатического давления в нижнем сечении при прохождении волн (масса трубы такова, что она остается практически неподвижной) водяной столб резонирует на частоте, примерно равной $(g/l)^{0,5}$, где l — высота столба. Столб воды играет роль жидкого

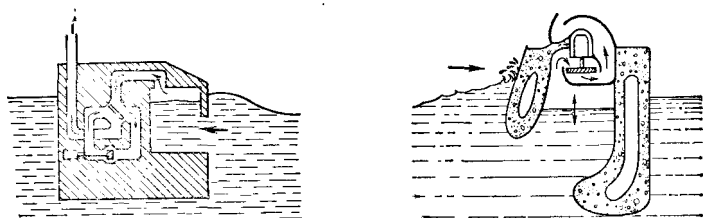


Рис. 6.11. Варианты гидропневматических преобразователей

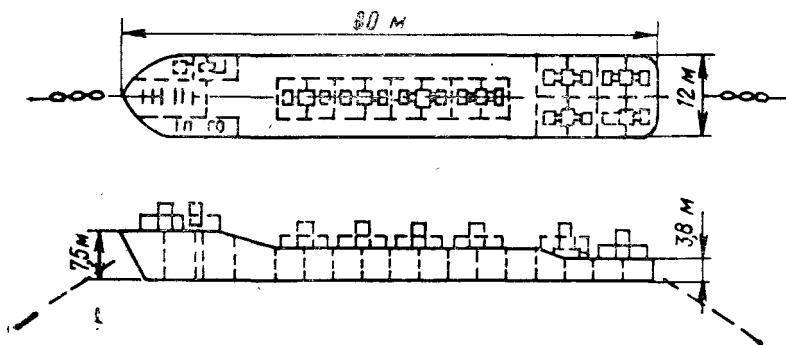


Рис. 6.12. Морская баржа «Каймэй» с пневмопреобразователями [71]

поршня, сжимающего воздух, расположенный над ним. В свою очередь, воздух приводит в действие пневмотурбину. Система клапанов обеспечивает постоянство направления вращения турбины и определенный закон демпфирования движения водяного столба, последнее позволяет подстраивать буй в случае изменения частоты вынуждающих волн. Для обеспечения постоянства скорости вращения пневмотурбины и соединенного с ней электрогенератора могут быть использованы системы регулирования угла установки лопастей турбины, управляемые микропроцессором.

На базе однокамерной системы Масуды Морской научно-технический центр Японии с 1976 г. ведет разработки многокамерных систем. После ряда модельных испытаний была спроектирована и построена морская баржа «Каймэй» длиной 80, шириной 12 м, высотой в носовой части 7 и в кормовой 3,5 м (рис. 6.12). Баржа имеет 22 отдельных воздушных камеры, открытых снизу, причем каждая пара камер работает на одну общую турбину. Четыре

герметичных отсека обеспечивают барже постоянную плавучесть. «Каймэй» представляет собой полноразмерную морскую энергетическую установку для Японского моря. Для условий Атлантики такая баржа должна быть примерно вдвое больше (длина 180, ширина 24, высота борта 8—10 м). Первый этап испытаний системы был начат в августе 1978 г. Испытывались системы удержания баржи в открытом море, работа преобразователей и генераторов. Исследовалась эффективность преобразования энергии волн при различных схемах клапанных систем — двухклапанной и четырехклапанной.

Сопоставление результатов показало, что при большой длине волны четырехклапанная система, в воздушной камере которой поочередно используется подъем и опускание уровня воды, оказалась эффективнее двухклапанной, где на один генератор работают две камеры с различным направлением движения воды. Для обеспечения такого увеличения эффективности оказалось необходимым применить аккумуляторы давления, в качестве которых использовались бортовые отсеки плавучести. При коротких волнах эффективности систем были примерно одинаковы. В шести энергоблоках каждая турбина работала на свой генератор, развивавший мощность 125 кВт при частоте вращения 14 с⁻¹. Вырабатываемая мощность гасилась на балластных сопротивлениях и колебалась в соответствии с изменением давления воздуха.

На втором этапе испытаний, проходившем с августа 1979 г., в системе было задействовано уже восемь турбогенераторов, из которых три работали по двухклапанной схеме, а остальные — по четырехклапанной. Максимальная мощность, развиваемая одним генератором, достигала примерно 300 кВт. От одного генератора энергия подавалась на берег по специальному морскому нескручиваемому кабелю, проложенному под водой с помощью системы грузов и буйков, 82 различных датчика, установленных на барже, позволяли фиксировать погодные условия, измерять волнение, перемещение баржи, нагрузки на якорные цепи, давление воздуха в камерах преобразователей и изменение уровня воды в них, перепад давлений на турбинах, частоты их вращения, параметры вырабатываемого генераторами тока. Информация по радиоканалу передавалась на береговую станцию и вводилась в ЭВМ. Интересно, что максимальное натяжение якорной цепи, зафиксированное во время испытаний, оказалось равным примерно 0,84 МН при скорости ветра около 30 м/с и высоте волн около 9 м. Расчетная величина предельно допустимого натяжения составляла 0,87 МН. Причем в расчет были заложены максимальная скорость ветра 185 км/ч (51 м/с), скорость течения 1,5 м/с, высота волн 8 м при периоде волнения 10 с.

Предварительные итоги испытаний не выявили каких-либо сложных проблем и показали, что для промышленного освоения подобных систем необходимо усовершенствование воздушных турбин, способ сглаживания пульсаций давления и выходной мощности и ряд вспомогательного оборудования [71].

Одна из гидропневматических систем разработана Национальной инженерной лабораторией Великобритании (см. рис. 6.11) и представляет собой асимметричный бетонный волнолом с достаточно большой воздушной камерой (или несколькими камерами), работающей на единую мощную турбину с электрогенератором. Чтобы создавать избыточное давление порядка $1,5 \cdot 10^5$ Па, устройство должно быть достаточно громоздким. Достаточно сказать, что высота водного столба в камере должна быть не менее 13 м, чтобы представить его общие размеры и те затраты, которые необходимо сделать для обеспечения необходимой прочности конструкции.

Из других устройств, использующих идею колебаний водяного столба, обычно выделяют системы, разрабатываемые фирмой «Виккерс» (Великобритания). Схемы устройств этой фирмы приведены на рис. 6.13, а, б. Это аттенюатор длиной 160 и высотой 10 м, имеющий восемь ячеек, с помощью общей клапанной коробки подключающихся к пневмотурбогенератору, расположенному в центральной камере шириной 6 м через 2-метровые вводы. Устройство предназначено для установки в сравнительно мелких районах и рассчитано на то, что практически все волны будут приходить с направлений $\pm 15^\circ$ от нормали к нему. Естественная защита района установки должна предотвратить воздействие на преобразователи сильных штормов. Основной объем устройства располагается на 5 м ниже уровня воды, что снижает воздействие на него усилий от разбивающихся волн, а машинный зал несколько приподнят над водой для удобства обслуживания. Для снижения взаимного воздействия друг на друга отдельные агрегаты устанавливаются в 100 м друг от друга.

Расчетное значение эффективности преобразования энергии устройствами фирмы «Виккерс» составляет до 60 % и при изменении высоты волн от одного метра до четырех снижается до 30 %. Устройство достаточно широкополосно по частоте: в диапазоне периодов колебаний волн от 7 до 12 с оно имеет некоторое подобие плато на зависимости эффективности от частоты. При изменении углов прихода волн от 0 до 45° эффективность преобразования на оптимальной частоте снижается примерно в 3 раза.

Фирмой «Виккерс» разрабатываются и терминаторные устройства на аналогичном принципе (рис. 6.13, б). Исследования в бассейне на модели в 1/100 показали большую эффективность терминаторных устройств, на оптимальной частоте, достигавшую 80 %, однако эти устройства менее широкополосны: зависимость их эффективности от частоты не имеет плато. Кроме того, вытянутые вдоль волнового фронта терминаторы испытывают более значительные волновые нагрузки. Окончательно о достоинствах устройств можно судить лишь после испытания полноразмерных образцов. Разрабатываемые фирмой устройства могут быть выполнены из бетона. Устанавливать их предполагается на сваях при глубине моря до 25 м [46].

Среди гидропневматических преобразователей есть не только устройства второго класса, но и других классов. Показателен в этом смысле преобразователь «упругая оболочка» М. Френча

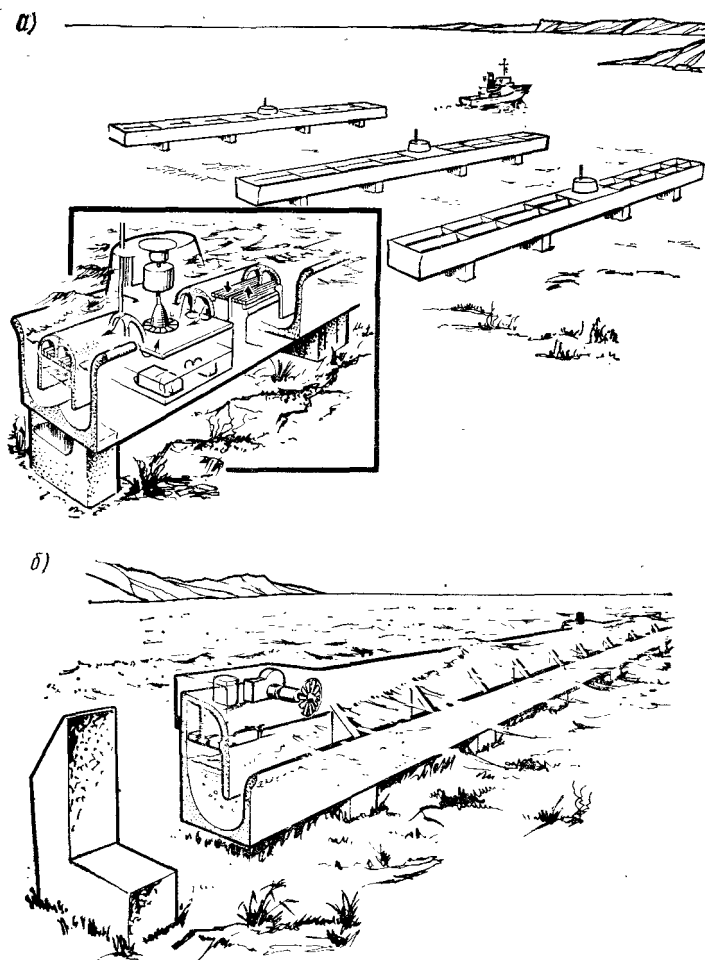


Рис. 6.13. Схемы пневмопреобразователей фирмы «Виккерс» [46]: а — аттенуатор; б — терминатор

(Великобритания). Принцип действия «упругой оболочки» поясняет рис. 6.14. Состоит она из отдельных секций, последовательно воспринимающих энергию волны (аттенуатор), причем секции изменяют объем не только под действием вертикальной составляющей гидростатического давления, но реагируют и на колебания скоростного напора в горизонтальном направлении. Такая «трехмерность» делает «упругую оболочку» достаточно эффективным преобразователем. Испытания отдельной секции, выпол-

ненной в масштабах 1/40 и 1/20, продемонстрировали значения эффективности, близкие к 80 % (см., например, [8]).

«Упругая оболочка» создана в Ланкастерском университете и поэтому ее часто называют ланкастерской оболочкой. Полно-

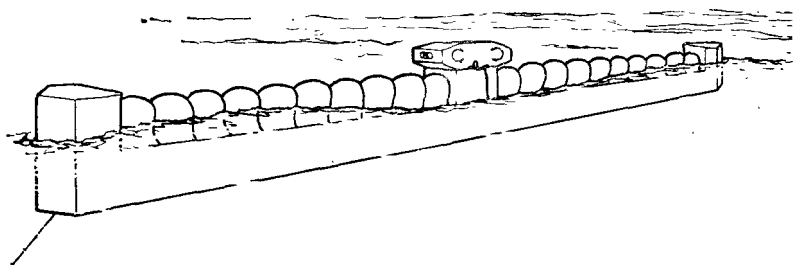


Рис. 6.14. Один из вариантов пневмопреобразователя «упругая оболочка» [8]

размерная оболочка должна иметь длину не менее 200 м при ширине 6,5 и высоте 14 м. В нижнем основании оболочки — погруженный в воду бетонный ложемент. В качестве материала собственно оболочки возможно использование

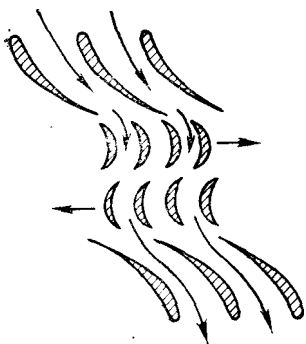


Рис. 6.15. Принципиальная схема воздушной турбины Мак-Кормика

армированной кордом резины, либо другого полимерного материала. В район работы установку доставляют на плаву, после чего ее затопливают примерно на 80 % и ориентируют перпендикулярно к направлению приходящих волн. Секции оболочки коммутированы таким образом, чтобы по мере прохождения волн воздух перегонялся из одной секции в другую до машинного отсека с установленным в нем турбогенератором.

Существенным недостатком систем с колеблющимся столбом была необходимость в клапанной коробке — самом ненадежном элементе конструкции. Этот недостаток был устранен профессором

США М. Мак-Кормиком [19], предложившим использовать воздушную турбину, нечувствительную к направлению движения воздушного потока. Один из вариантов такой турбины схематично изображен на рис. 6.15. Она состоит из двух зеркально расположенных и вращающихся в разные стороны рабочих колес с 60 лопатками каждое и двух также зеркальных направляющих систем лопаток (по 30 в каждой). Движение колес передается с помощью зубчатых передач валу генератора, при этом частота вращения повышается в отношении 1:2, так что при расчетной частоте вращения колес 10 с^{-1} вал генератора вращается с частотой 20 с^{-1} . Эти конкретные цифры относятся к си-

стеме турбина—генератор выходной электрической мощностью 125 кВт, разработанной для установки на японской плавучей опытной станции «Каймэй». Сама эта станция рассчитана на работу в оптимальном режиме при высоте волн 3 м и периоде 7 с. Ширина камеры, которую предполагалось занять проектировавшейся в США энергетической установкой, равна 6 м, так что средняя энергия, которая могла бы сниматься с нее, равняется примерно 360 кВт. Таким образом, предполагалось использовать только 35 % возможной мощности волн. Это было связано с тем, что используемый объем воздуха, пропускаемого через турбину, мог оказаться примерно на 1/3 меньше расчетного из-за уменьшения колебаний водяного столба в шахте до 2 м вследствие компрессии (такой эффект используют, например, для снижения колебаний уровня в шахтах для подъема на борт обеспечивающего судна подводного аппарата).

До создания полноразмерной модели все характеристики системы отрабатывались на образце выходной мощностью 0,976 кВт. Размеры и мощность опытного образца системы были выбраны на основании теории размерности, чтобы удовлетворить соотношению

$$P_m = n^{1/2} P_n, \quad (6.7)$$

где $n = L_m/L_n$ — отношение характерных размеров модели и натуре. Всесторонние испытания показали работоспособность системы и подтвердили, что эффективность преобразования энергии в ней не менее 50 %. Полноразмерная система должна была быть установлена на «Каймэй» в 1979 и 1980 гг., но из-за технических трудностей эти испытания тогда не состоялись.

Для повышения эффективности водяного столба преобразователи рассчитывают как резонансные системы для какого-то преимущественного волнения, учитывая при этом эффекты сжимаемости воздуха. Соответствующая оптимальная частота определяется по формуле

$$\omega_n = 2\pi f_n = \frac{2\pi}{T} \left[\frac{\rho g \pi D^2/4 + k_c}{\rho \pi D^2/4 (L_w + L')} \right]^{1/2}, \quad (6.8)$$

где D — диаметр водяного столба; k_c — коэффициент, учитывающий сжимаемость воздуха в камере сжатия; L_w — перемещение водяного столба; L' — эффективное перемещение с учетом присоединенной массы жидкости, связанной с диаметром столба и волновым числом $k = 2\pi/\lambda$ соотношением, полученным Мак-Кормиком [76]:

$$L' = \frac{4D}{3\pi} \left(1 - \frac{1,3k^2 D^2}{15} + \frac{k^4 D^4}{525} \dots \right). \quad (6.9)$$

Движение водяного столба описывается выражением

$$\frac{\rho \pi D^2}{4} (L_w + L') \ddot{z} + (b_e + b_r + b_v) \dot{z} + \left(\frac{\rho g \pi D^2}{4} + k_c \right) z = F(t), \quad (6.10)$$

где L_w — перемещение столба в камере.

Описание работы преобразователя, качество которого зависит от множества факторов, связанных между собой, достаточно сложно. Это позволяет утверждать, что предварительные расчеты и испытания на мелкомасштабных моделях дают для преобразователей такого типа только ориентировочные значения параметров. Окончательное решение об эффективности того или иного преобразователя может быть сделано только после всесторонних испытаний полноразмерного устройства. Но и это еще не все: такой даже физически эффективный преобразователь должен удовлетворять экономическим требованиям.

§ 6.6. Волновые насосы

К точечным системам преобразователей энергии волн относятся и различные типы волновых насосов, на вопросах разработки которых хотелось бы остановиться несколько подробнее, так как возможности их применения выходят за рамки только электроэнергетики.

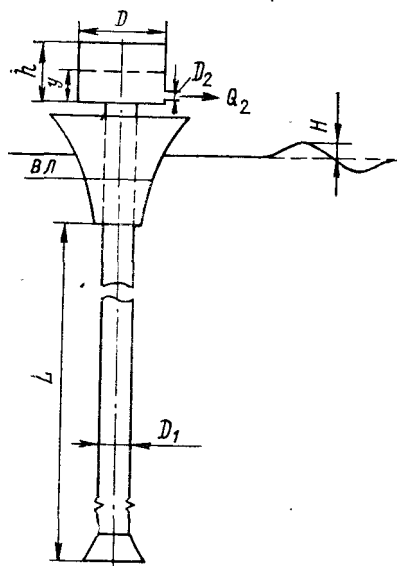


Рис. 6.16. Волновой насос Айзекса
[56]

В § 6.4 такой тип преобразователя уже упоминался. Здесь речь пойдет прежде всего о наиболее известном устройстве — так называемом насосе Айзекса, схема которого приведена на рис. 6.16. Достоинства такого насоса — его простота, независимость работы от направления прихода волн, широкий спектральный диапазон волнения. Основной недостаток, по словам самого Дж. Айзекса, — возможность эффективной эксплуатации лишь на достаточно больших глубинах, т. е. вдали от берега. Впрочем, этот недостаток обращается в достоинство, когда речь идет о необходимости снабжать энергией автономный удаленный от берега объект либо подавать на морскую ферму глубинные воды.

Принцип действия такого насоса основан на неразрывности столба жидкости в трубе, вертикальное движение которой сообщается колебаниями поверхности. Чтобы такая труба стала насосом, ее нижний конец необходимо опустить в невозмущенные поверхностным волнением слои жидкости, а саму трубу снабдить клапаном, препятствующим вытеканию порции воды, попавшей в трубу во время хода вниз. Насос можно использовать как для

подъема воды в резервуар, размещенный над водой, так и для закачки ее в танк с противодавлением, величина которого примерно пропорциональна скорости перемещения трубы.

Первый образец такого насоса был испытан в 1972—1973 гг. в заливе Консепсион острова Сан-Клементе. Модель была разработана в океанологическом институте Скриппса, имела трубу диаметром 20 см и длиной 61 м, причем клапан был установлен на глубине 6,1 м. На волне высотой 2 м насос развивал избыточное давление около $5 \cdot 10^4$ Па при периоде колебаний 6—8 с. Аккумуляторный танк насоса имел отверстие диаметром 1,3 см. Экспериментальные результаты полностью подтвердили данные предварительных расчетов, выполненных по методике, изложенной ниже. В 1975 г. были проведены испытания аналогичного устройства, но с трубой диаметром 5 см длиной 92 м. Для удержания трубы использовался поплавок с переменным течением, обеспечивающим нелинейное изменение выталкивающей силы. Поверхность поплавка имела экспоненциальный профиль с радиусом, изменяющимся по закону

$$R = R_0 + \alpha e^{y/\beta}. \quad (6.11)$$

Система оказалась чрезвычайно эффективной и дала давление в аккумулирующем танке около $2 \cdot 10^5$ Па при высоте волн всего 0,6 м. Оценка эффективности показала величину 30 %. Здесь R_0 , α и β наилучшим образом подобранные постоянные. Остальные обозначения см. на рис. 6.16.

Уравнение движения поплавка с трубой имеет вид

$$M_1 \frac{d^2 z}{dt^2} = -F_b - p_a A_1 - bz + M_a \ddot{y} + F_{T_1}, \quad (6.12)$$

для трубы с открытым клапаном и

$$M_2 \frac{d^2 z}{dt^2} = -F_b - bz + M_a \ddot{y} + F_{T_2}, \quad (6.13)$$

для трубы с закрытым клапаном

С учетом формы внешней поверхности поплавка величина выталкивающей силы, действующей на него, равна

$$F_b = \rho g \left[R_0^2 y - 2\alpha\beta R_0 (e^{y/\beta} - 1) + \frac{\alpha\beta^2}{2} (e^{2y/\beta} - 1) \right]. \quad (6.14)$$

В этих выражениях величина $p_a A_1$ — дополнительная ускоряющая сила, действующая на систему при открытом клапане; M_a — присоединенная масса жидкости; b — коэффициент потерь в трубе.

F_{T_1} и F_{T_2} — силы тяжести, действующие на систему при открытом и закрытом клапане, $F_{T_2} = F_{T_1} + \rho A_1 L g(\theta)$, где функция $g(\theta)$ принимает значение 0 или 1 в зависимости от того, открыт или закрыт клапан.

После соответствующих преобразований для величины ускорения системы получаются выражения

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} &= -\frac{1}{M_1} (F_b + p_a A_1 + b\dot{z} - F_{T_1} - M_a \ddot{y}) - \text{клапан открыт;} \\ \ddot{z} &= -\frac{1}{M_2} (F_b + b\dot{z} - F_{T_2} - M_a \ddot{y}) - \text{клапан закрыт.} \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

Выражение для описания движения столба жидкости в трубе представляется в следующем виде:

$$LA_1 \rho g \ddot{\varphi} = p_a A_1 + y \rho g A_1 - \rho g (L + z) A_1 + L \rho g A_1 - F_{\text{тр}}, \quad (6.16)$$

где $\ddot{\varphi}$ — ускорение столба жидкости; $F_{\text{тр}}$ — сила трения, определяемая как $F_{\text{тр}} = [f L \dot{\varphi} | \dot{\varphi} | \rho A_1 / (D 2g)]$. Значение величины f определяется в зависимости от числа Рейнольдса потока:

$$f = 64/\text{Re} \quad (\text{Re} \leq 1000), \quad f = 0,316/\text{Re}^{0,25} \quad (\text{Re} > 1000). \quad (6.17)$$

Так как давление в аккумуляирующем танке начинает увеличиваться только после поступления в него какого-то количества жидкости, величину избыточного давления в нем определяют соотношением

$$p_a = \frac{p_0}{1 - y/h} - p_0. \quad (6.18)$$

Уравнение неразрывности для жидкости в танке имеет вид

$$y = y_0 + \int_t \frac{Q_1}{A_1} dt - \int_t \frac{Q_2}{A_2} dt, \quad (6.19)$$

где $y = y_0$ при $t = 0$, приток $Q_1 = A_1 v$ и расход $Q_2 = A_2 u$, откуда следует для скорости изменения уровня жидкости в танке

$$\dot{y} = \frac{\pi}{4A} (D_1^2 v - D_2^2 u) \quad (6.20)$$

и, наконец, выражение для вырабатываемой насосом мощности

$$P = p_a Q_2. \quad (6.21)$$

Результаты решения приведенной системы уравнений показаны на рис. 6.17. Для наглядности расчеты выполнены для случая синусоидальной волны. Приведены графики перемещения, скорости и ускорения самого преобразователя, водяного столба, изменения давления в аккумуляирующем танке, закрытия и открытия клапана. Пульсации клапана объясняются появлениями отрицательных ускорений в относительном движении трубы и водяного столба и могут быть устранены с помощью демпфирующего элемента. Подробный анализ результатов приведен в работе Дж. Айзекса [56].

Идея волнового насоса не изжила себя: нет-нет да и появятся в печати сообщения о новых конструкциях. Так, компанией «Свенска варв» (Швеция) ведутся разработки волновых генера-

торов на основе так называемой петропомпы, созданной Я. Перссоном и П. Трофтенем (название устройства включает первые слоги фамилий авторов). Петропомпа, так же как и насос Айзекса, имеет поплавков и присоединенную к нему трубу, но в отличие от насоса, труба эта сделана из резинового шланга, армированного

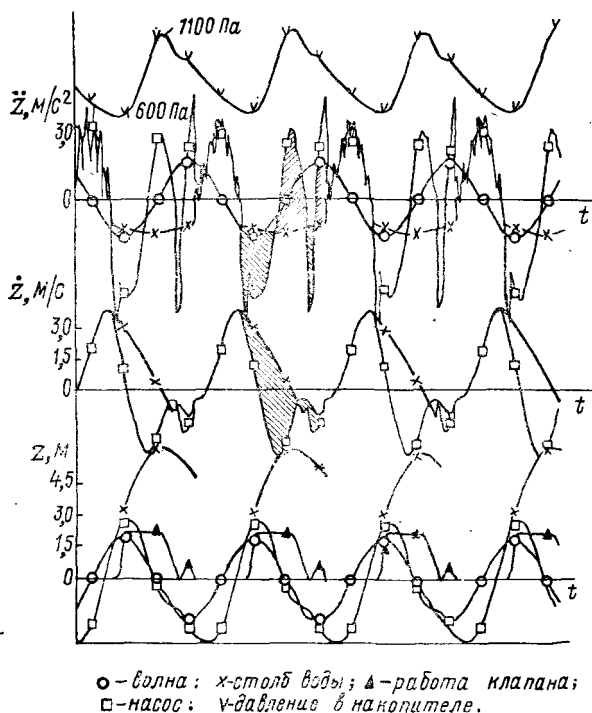


Рис. 6.17. Характеристики волнового насоса [56]

стальной спиралью и прикрепленного нижним концом к мертвому якорю. Вертикальное движение поплавка заставляет шланг изменять свой внутренний объем и используется для засасывания воды через нижний конец, снабженный клапаном, и выхлопа ее через верхний, также закрытый невозвратным клапаном. Далее жидкость, как и в случае насоса Айзекса, может быть подана на турбину либо в аккумулирующий танк. Компания «Свенска варв» уже использует петропомпу в качестве надежного насоса при сооружении колодцев. Надежность устройства определяется, с одной стороны, отсутствием обычного у подобных устройств колодезных насосов штока, а с другой — появлением высококачественных армированных шлангов. Последние уже выпускаются в двух модификациях — один диаметром несколько десятков сантиметров, а другой — с наружным диаметром 28 и внутренним 21 см. Инте-

ресная особенность петропомпы — возможность использовать ее в сравнительно мелких водах.

У создателей петропомпы есть последователи*. Они устранили в своем изобретении главный недостаток и насоса Айзекса и петропомпы — возможность засорения клапанов и обрастания внутренних поверхностей труб за счет применения специальной рабочей жидкости, циркулирующей внутри эластичного насоса, соединенного с аккумулятором давления, гидравлической турбиной и резервуаром низкого давления для приема «отработавшей» жидкости. Аккумулятор давления располагается внутри поплавка. Механизм регулирования направления течения жидкости (клапанная коробка) поочередно подключает сосуды высокого и низкого давления к объемному насосу, обеспечивая устойчивую циркуляцию рабочей жидкости в системе.

Достоинства волновых насосов, общие для многих точечных преобразователей, — простота конструкций, отсутствие необходимости постоянного наблюдения за работой и ухода, возможность строить волновые электростанции из таких устройств, постепенно наращивая количество отдельных сравнительно недорогих сооружений — привлекают к ним внимание энергетиков.

§ 6.7. Концентраторы волновой энергии

Использование концентраторов волновой энергии — один из способов увеличения единичных мощностей океанских преобразователей. Просматриваются два характерных направления в этой области. Первое — фокусировка волновой энергии с большей площади на меньшую с тем, чтобы необходимым образом увеличить энергию колебаний. Для этого могут быть использованы известные физические принципы, основанные на особенностях распространения волн в среде и при взаимодействии с препятствиями. Речь идет о дифракционных и рефракционных явлениях. Принцип действия таких устройств поясняет рис. 6.18. В качестве устройств для реализации этих явлений могут быть использованы системы плавучих пассивных буев. Пока такие системы находятся в числе гипотетических, однако способы управления волнами с помощью «искусственных сред» в виде систем рассеивающих энергию буев пристально изучаются разработчиками [19, 56, 64].

Второе направление — концентрация волновой энергии путем сбора ее со значительной площади и использование для создания перепада давлений, на котором может работать обычная низконапорная гидравлическая турбина. Работы в этом направлении ведутся уже 30 лет. Вероятно исторически первым был проект инженера-гидротехника У. Ботта, занимавшегося проектированием гидроэлектростанций в Шотландии еще в 30-х гг. Это был проект волновой электростанции для о. Маврикий в Индийском

* Заявка Франции № 2511734, 1983 г.

океане. В основе проекта — идея создания искусственной лагуны, в которой за счет перекачивающихся через пологую в сторону океана дамбу волн создавался бы повышенный уровень воды. Проект подробно описан в книге Д. Росса *, и мы не будем на нем

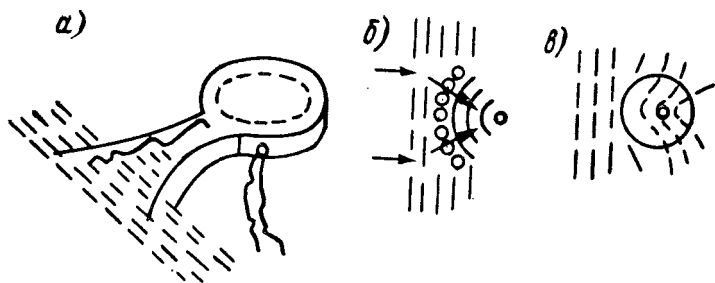


Рис. 6.18. Варианты концентраторов волновой энергии [63]: а — конфузорный откос; б — дифракционная система; в — рефракционная система

останавливаться. Скажем только, что проект не снят с повестки дня, во всяком случае судя по сообщениям в печати (см. ссылки в книге [8]). По современному варианту эта станция будет иметь мощность до 20 МВт, от океана ее бассейн будет отделен дамбой длиной 4,9 км. При высоте характерных для этого района волн

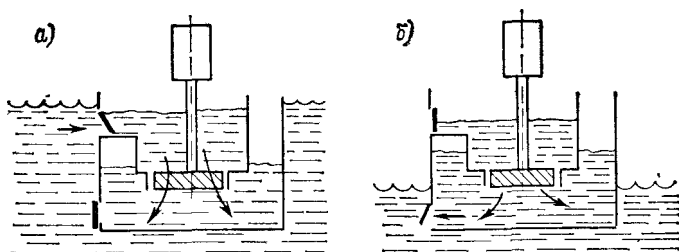


Рис. 6.19. «Выпрямитель» Рассела: а — верхнее положение уровня воды; б — нижнее положение

от 1,2 до 2,4 м с периодом от 6 до 10 с расчетный напор в бассейне должен быть равен 2,3 м.

Исследования по маврикийскому проекту проводились на Гидрологической исследовательской станции (Уоллингфорд, Великобритания), где впоследствии под руководством директора станции Р. Рассела был создан проект так называемого «выпрямителя», как и предыдущая система использующего принцип заполнение бассейна за счет энергии волн. Это устройство (рис. 6.19) более компактно. Одно из его достоинств — выпуск воды, прошед-

* Росс Д. Энергия волн. Л., 1981.

шей через турбину, у подошвы набегающей волны, что обеспечивает повышение производительности. Этот проект также рассматривается как возможный вариант конструкций будущих электростанций, но уступает другим устройствам по материалоемкости. Кроме того, выражаются опасения, что подобные сооружения будут плохо противостоять штормовым нагрузкам. Поэтому устройства, аналогичные маврикийскому проекту, так сказать, в чистом виде, кажутся многим более перспективными, особенно в тех районах, где позволяют естественные условия.

Одно из таких технических решений — «конфузорный откос». Его рабочая поверхность выполняется в виде наклонного, сужаю-

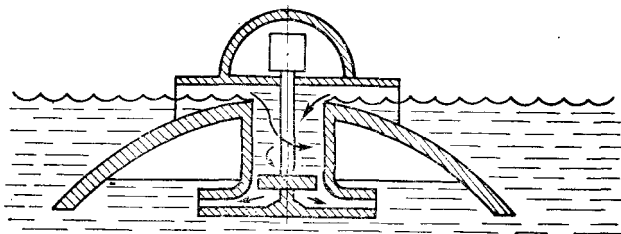


Рис. 6.20. Концентратор волновой энергии для открытого моря «дамба-атолл» [8]

щегося кверху лотка (см. рис. 6.18, а). Морская волна высотой 1,1 м с волновым фронтом длиной 350 м при 30-кратном сужении в лотке может дать примерно 15-кратное увеличение амплитуды. Если установка с простым подъемом воды на наклонной плоскости с углом подъема 30° обеспечивает поднятие уровня всего на 2,5 м при средней высоте волн 1,5 м, то на «конфузорном откосе» это даст подъем уровня примерно на 20 м. При таком перепаде высот в накопителе-водохранилище уже можно использовать более производительные высоконапорные гидроагрегаты для выработки электроэнергии. Общая производительность «конфузорного откоса» будет примерно такой же, как и простого откоса, и составит около 50 МВт·ч в год на 1 м длины наклонной стенки. Одно из больших достоинств «конфузорного откоса» — возможность монтировать все его основные узлы на берегу, что делает его наиболее надежным из всех волновых преобразователей в эксплуатации [8, 64]. Опытный образец такой станции мощностью 350 кВт строится сейчас в Норвегии.

В качестве концентратора волновой энергии для условий открытого моря пока разработано единственное устройство. Это «дамбы-атоллы» инженера фирмы «Локхид» Ле-Вирта (рис. 6.20). Поверхность выпуклого линзообразного купола круглого сечения фокусирует и направляет в центральную часть волны, имеющие расчетную частоту и малые амплитуды. Что касается волн большой амплитуды, то они полностью разрушаются на соответствующей

шей глубине. Важные достоинства такого концентратора — сравнительно высокая широкополосность и независимость от направления прихода волн. Принцип действия концентратора поясняет рис. 6.21. Набегающая на сферическую поверхность волна из-за перестройки профиля, связанного с изменением фазовой скорости, как бы охватывает купол, достигая размещенного в его вершине направляющего аппарата. Последний снабжен криволинейными лопатками, закручивающими поток в одну сторону и сообщаящими ему свойство вращающегося инерционного компонен-

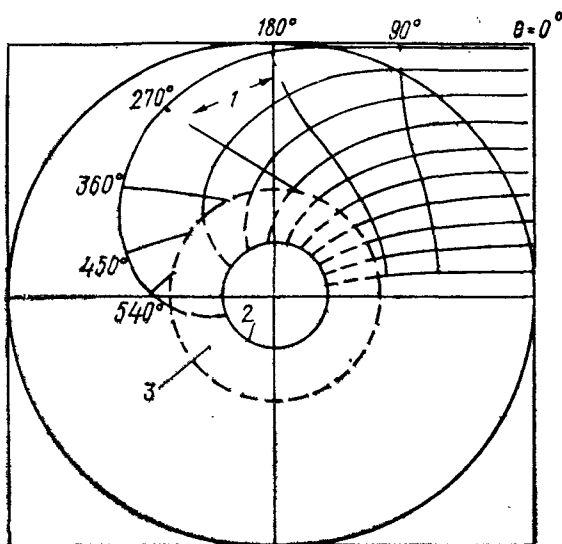


Рис. 6.21. Принцип действия «дамбы-атолла» [56].

1 — фазовый угол; 2 — нулевая глубина; 3 — область бурунов

сатора колебаний волновой мощности. Двигаясь вниз по сужающемуся водоводу поток еще сильнее закручивается и попадает на колесо турбогенератора [56]. КПД такой установки — около 50 %.

Уже разработан проект «дамбы-атолла» диаметром до 100 и высотой до 30 м с водоводом диаметром до 18 м. Около десяти лет ведутся лабораторные испытания на модели, выполненной в масштабе 1:100. В ближайшее время фирма «Локхид» намеревается создать модель вдвое большего размера. Первая модель рассчитана на получение полезной мощности от 20 до 40 кВт. Реальную установку планируется снабдить турбиной мощностью до нескольких мегаватт. Выпускаемый из турбины поток будет проходить через диффузор для снижения остаточного напора. Для предотвращения обрастания купола, направляющих лопаток и диффузора предлагается снабдить их открывками из синтетического материала, постоянное движение которых в потоке будет препятствовать прикреплению организмов-обрастателей к выполненным из бетона элементам концентратора.

Принцип «дамбы-атолла» может быть с успехом использован при строительстве искусственных гаваней в открытом море. Такое устройство может по замыслу конструкторов стать и эффективным средством для очистки поверхности воды от нефтепродуктов, которые в закручивающемся потоке его водовода будут сепарироваться и могут извлекаться практически без дополнительной затраты энергии.

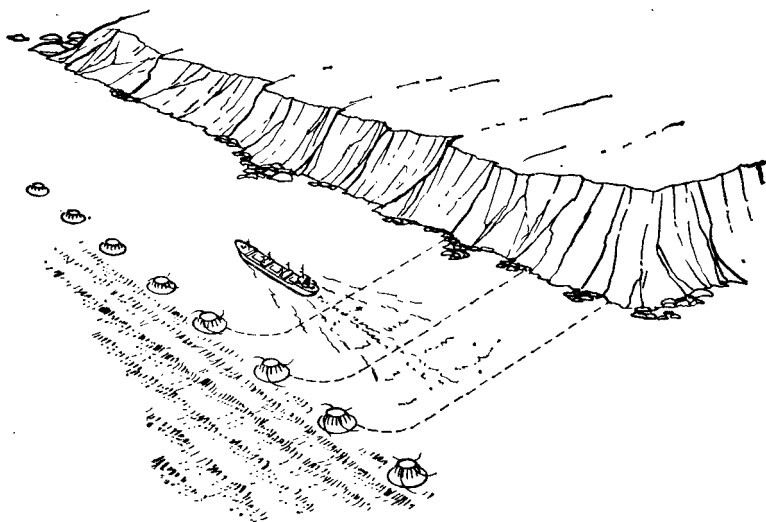


Рис. 6.22. Размещение преобразователей волновой энергии вдоль побережья

На рис. 6.22 показан вариант возможного морского пейзажа недалекого будущего с волновыми преобразователями энергии на переднем плане. Вполне вероятно, что подобные установки вскоре станут непрямым элементом морских ландшафтов.

ЭНЕРГЕТИКА НА ПЕРЕПАДАХ СОЛЕННОСТИ

§ 7.1. Взгляд на проблему

Возможности энергетики на градиентах солености (соленостная энергия, энергия смешения растворов с различной концентрацией, осмотическая энергия) впечатляют: при смешении потока с расходом всего $1 \text{ м}^3/\text{с}$ пресной воды с морской водой с соленостью около 35 ‰ может быть получена мощность более 2 МВт. Точнее, конечно, сказать, что такая мощность выделяется вне зависимости от того, хотим мы или нет ее получить. А вот сколько энергии может быть преобразовано в «полезную» энергию — это вопрос и теоретический, и инженерный. Особенность современного этапа освоения этого вида ресурса в том, что несмотря на высокую плотность энергии ($P_{\text{эkv}} = 220 \div 240 \text{ м}$) пока не удалось с 1 м^2 площади мембранного преобразователя получить более 10 Вт мощности, т. е. примерно столько же сколько и для устройств прямого преобразования солнечной энергии в электрическую. В то же время с 1 м^2 площади океанских течений уже получены мощности более 250 Вт, хотя плотности энергии здесь несравненно ниже. Вероятно, сложившаяся к настоящему моменту ситуация связана не с принципиальными ограничениями, а лишь с недостаточной проработанностью решений. Последнее можно объяснить тем, что идея СоленЭС находится в наиболее ранней стадии развития по сравнению с другими океанскими технологиями [64].

Багаж разработчиков СоленЭС насчитывает десятки вариантов технических решений, среди которых принято выделять шесть основных типов преобразователей [21]:

гидроосмотические устройства, основанные на использовании разности давлений между растворами с различной концентрацией; устройства на принципе обратного электродиализа или, вернее, на диалитическом принципе, также основанном на различии проницаемости мембран для молекул и ионов разных типов;

устройства прямого преобразования разности электрохимических потенциалов с помощью ионообменных мембран в электрический ток;

устройства на «механохимическом» принципе, основанные на

использовании свойства некоторых полимеров испытывать различные по величине деформации в растворах с различной концентрацией;

устройства, основанные на разности давлений паров растворов с различной концентрацией;

устройства, использующие различие в температурах замерзания растворов с различной концентрацией солей.

Все эти типы устройств находятся в стадии лабораторных исследований, и обнадеживающие результаты получены пока, пожалуй, только для схем, использующих разность паров растворов. Наибольшее количество проработок связано с устройствами первых трех типов, так что при оценке эффективности переработки энергии градиента солености обычно ориентируются на них. Пока эти оценки не утешительны: предсказываемая стоимость энергии в среднем значительно превышает обычную: стоимость энергии гидроосмотических преобразователей — в 3—7, диалитических — в 50—60 раз. В литературе встречаются и противоречивые оценки, согласно которым диалитические батареи способны обеспечить уже на сегодняшний день отпуск энергии по цене, примерно равной той, по которой она отпускается из энергосистем в настоящее время [45]. Вероятно, это же касается оценок устройств «механохимического» типа, для которых также приводятся явно заниженные величины капитальных вложений.

Последние оценки были выполнены группой шведских исследователей для двух типов полимеров с коротким (3 с) и длинным (30 с) циклами растяжение—сжатие. В первом случае полимер, помещенный в рабочий цилиндр, шток поршня которого вращает генератор, способен развивать удельную мощность 0,5 Вт/г. Для рабочего цилиндра, представляющего собой отдельную ячейку более мощного агрегата, оказалась, вероятно, по технологическим соображениям, приемлемой мощность 1,25 кВт (длина цилиндра около 250, диаметр — 50 мм). Таким образом, чтобы получить установленную мощность 100 МВт необходимо 80 тыс. таких цилиндров с генераторами объединить в единую систему — это чем-то напоминает предложение создавать достаточно мощные станции на энергии волн из большого количества маломощных устройств, каждое из которых работает самостоятельно. Правда, в последнем случае такая станция будет находиться в более тяжелых эксплуатационных условиях, чем размещенная стационарно на берегу СоленЭС. Для полимера с длинным циклом можно получить мощность, в 10 раз меньшую при расходе воды 390 м³/с, чем для полимера с коротким циклом. Соответственно, для 100 МВт станции понадобится объединить уже 800 тыс. отдельных блоков. Интересно, что расход воды в такой станции оказывается ниже, чем в ОТЭС (1600 м³/с на 100 МВт). Последняя публикация о «механическом» преобразователе относится к 1979 г. [45]. Это дает основание полагать, что были приведены результаты предварительной проработки, а в дальнейшем эффективность системы не подтвердилась, и исследования прекратились.

На уровне идеи, вероятно, остался метод, предложенный Дж. Айзексом и В. Шмитом [21] в 1979 г. и основанный на понижении температуры замерзания растворов при повышении концентрации: используя рассол (морскую воду) можно с его помощью замораживать пресную воду в гидроцилиндре. Создаваемое при этом высокое давление, возникающее из-за различия объемов льда и воды, может совершать полезную работу. Фактически в таком процессе утилизируется не соленостная энергия, а тепловая энергия воды. Однако, как указывают В. А. Акуличев и В. В. Княжев [21], возможен и такой вариант организации процесса смещения пресной и соленой воды, при котором соленостная энергия будет использована наряду с тепловой. Одновременно, особенно в зимнее время в Арктических районах, можно использовать и разность температур между водой и окружающим воздухом — таким образом, речь может идти о создании комплексных устройств, использующих не один, а несколько характерных градиентов.

Оценивая в общем состояние развития этого вида энергетической технологии можно присоединиться к авторам, выражающим сомнение в возможности создания сколь-нибудь крупных соленостных установок в ближайшее время [45, 63]. Однако учитывая возможный прогресс химии полимеров и энергетического машиностроения в области создания теплообменных аппаратов и турбин низкого давления в связи со строительством ОТЭС, нельзя сбрасывать этот вид ресурсов со счета.

§ 7.2. Основные соотношения для расчета преобразователей соленостной энергии

Интересно попытаться оценить полезную мощность, которую можно извлечь в процессе разбавления раствора с помощью различных типов преобразователей.

Для гидроосмотических устройств это наиболее наглядно продемонстрировали Г. Желлинек и Х. Масуда [57], предположившие, что само разбавление пренебрежимо мало и производится добавлением малого объема пресной воды к значительно большему объему раствора. Пусть в правой половине замкнутого сосуда (рис. 7.1), в котором мембраной разделены раствор (справа) и растворитель (слева), устанавливается равновесное значение осмотического давления Π . В этом случае раствор под каким-то давлением p_1 истекает из сосуда через сопло в среду с давлением p_2 со скоростью u_2 , определяемой соотношением

$$u_2 = [2V'(p_1 - p_2)]^{1/2}, \quad (7.1)$$

где V' — удельный объем раствора, пренебрежимо мало отличающийся от такового для чистой воды, $V' = 1/\rho = 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$. Так как атмосферное давление действует одновременно и на поверхность

растворителя — чистой воды, то выражение для скорости истечения упрощается и приобретает вид

$$u_2 = (2V' p_1)^{1/2}, \quad (7.2)$$

соответственно, массовый расход через сопло

$$\dot{m}_2 = u_2 A_2 \rho = (2V' p_1)^{1/2} A_2 \rho, \quad (7.3)$$

где A_2 — площадь сечения сопла (A_1 — площадь мембраны; u_1 — скорость потока растворителя через мембрану). Вода практически несжимаема, массовые расходы через сечение струи и мембрану одинаковы ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$), причем массовый расход через мембрану пропорционален ее пропускной способности, определяемой коэф-

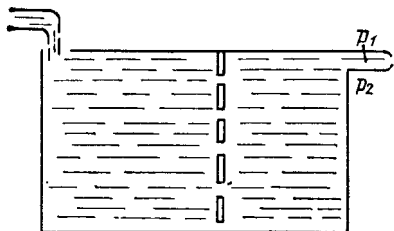


Рис. 7.1. К расчету соле-
ного преобразова-
теля давления [57]

фициентом диффузии D , $\text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}$, и разностью давлений на мембране $\Pi - p_1$, где p_1 играет роль гидростатического давления в жидкости. Таким образом, этот расход

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = D (\Pi - p_1) A_1 \rho = \dot{m}_2. \quad (7.4)$$

Полученное выражение позволяет вычислить механическую мощность струи, которая с небольшими потерями может быть преобразована в электрическую. Эта мощность

$$P_k = \dot{m}_1 \frac{u_1^2}{2} = \dot{m}_2 \frac{u_2^2}{2} = D A_1 \rho V' (\Pi - p_1) p_1. \quad (7.5)$$

Взяв производную от этого выражения по p_1 и приравняв ее к нулю, легко показать, что величина полезной мощности достигает максимума при $p_1 = \Pi/2$, так что

$$P_{k \max} = D A_1 \Pi^2 / 4. \quad (7.6)$$

Этот же подход позволяет определить мощность преобразователей, в которых энергия смещения преобразуется не в кинетическую энергию струи, как показано на рис. 7.1, а в потенциальную энергию столба раствора. В этом случае преобразователь действует следующим образом: жидкости в правой части дают возможность свободно подниматься до какого-то оптимального уровня, после чего она по трубопроводу падает вниз на колесо турбины. Потенциальную выходную мощность такого устройства определяют по формуле

$$P_{\pi} = \dot{m}_1 g h, \quad (7.7)$$

или, используя полученные выше выражения для массового расхода через мембрану и считая, что высота подъема раствора $h = (p_h/\Pi)h_0$, где h_0 — равновесная высота столба для раствора с осмотическим давлением Π , а p_h — давление, создаваемое столбом раствора высотой h

$$P_{\Pi} = D\rho g A_1 (\Pi - p_h) \frac{p_h}{\Pi} h_0. \quad (7.8)$$

Такая же процедура отыскания максимума, как и в первом случае, приводит в конце концов для устройств, использующих повышение гидростатического давления, к аналогичному выражению $P_{\Pi \max} = D A_1 \Pi^2 / 4$. Последнее выражение показывает, что при условии выработки максимальной мощности устройства, в которых реализуется принцип постоянства градиента концентрации на мембране, обладают теоретическим коэффициентом преобразования соленостной энергии 25 %.

Общая величина энергии, выделяющаяся при смешении растворов, может быть определена методами термодинамики (см., например, статью В. А. Акуличева и В. В. Княжева в книге [21]). Выделившаяся энергия оказывается максимальной, если процесс смешения идет равновесно. В природных условиях он протекает обычно при постоянном давлении и постоянной температуре (температура раствора не изменяется, так как энергия, необходимая для изменения концентрации, достаточно мала, особенно когда речь идет о разбавлении растворов малой концентрации). Поэтому основной прирост энергии связан с изменением энтропии системы. В этом случае $W = TdS$, dS для 1 моля растворенного вещества (адиабатно-изобарно-изотермический процесс) находят по формуле

$$dS = R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{\tilde{V}_0 + V_0}{\tilde{V}_0}, \quad (7.9)$$

где V_1 и V_2 — начальный и конечный объемы раствора, равные соответственно V_0 и $\tilde{V}_0 + V_0$, причем, как это уже принято, $\tilde{V}_0 \gg V_0$.

Для n молей растворимого вещества суммарная энергия

$$W = nRT \ln \frac{\tilde{V}_0 + V_0}{\tilde{V}_0}, \quad (7.10)$$

а так как величина nRT есть не что иное, как $\Pi \tilde{V}_0$, то выражение для энергии приобретает вид

$$W = \Pi \tilde{V}_0 \ln \frac{\tilde{V}_0 + V_0}{\tilde{V}_0}. \quad (7.11)$$

Температура морской воды здесь учтена в выражении для Π , а температура речной воды по условию считается равной первой. Если это равенство не соблюдается, в формулу для энергии может быть введен поправочный коэффициент, равный, как показано

В. Д. Лисицей [27], отношении температур пресной и морской воды. В этом случае выражение для энергии, теоретически доступной для преобразования, принимает вид

$$W_{\text{дост}} = \Pi \tilde{V}_0 \frac{T_0}{\tilde{T}_0} \ln \frac{\tilde{V}_0 + V_0}{\tilde{V}_0}. \quad (7.12)$$

Здесь же можно добавить, что для расчета величины Π в зависимости от концентрации хлора и температуры существует простое параметрическое уравнение, которым удобно пользоваться, когда неизвестен точный солевой состав. Оно имеет вид

$$\Pi = -12,08 (-9,66 \cdot 10^{-2} \text{Cl} - 5,2 \cdot 10^{-6} \text{Cl}^3) \frac{273 + t}{t}, \quad (7.13)$$

где Cl — концентрация хлора, г/кг; t — температура, °C.

§ 7.3. Гидроосмотические системы

Первую конструкцию промышленной СоленЭС на принципе использования гидравлического напора предложили профессора

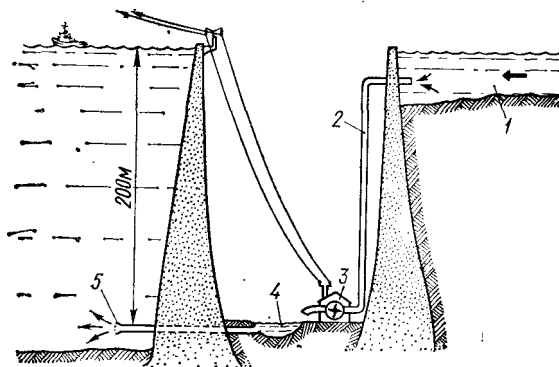


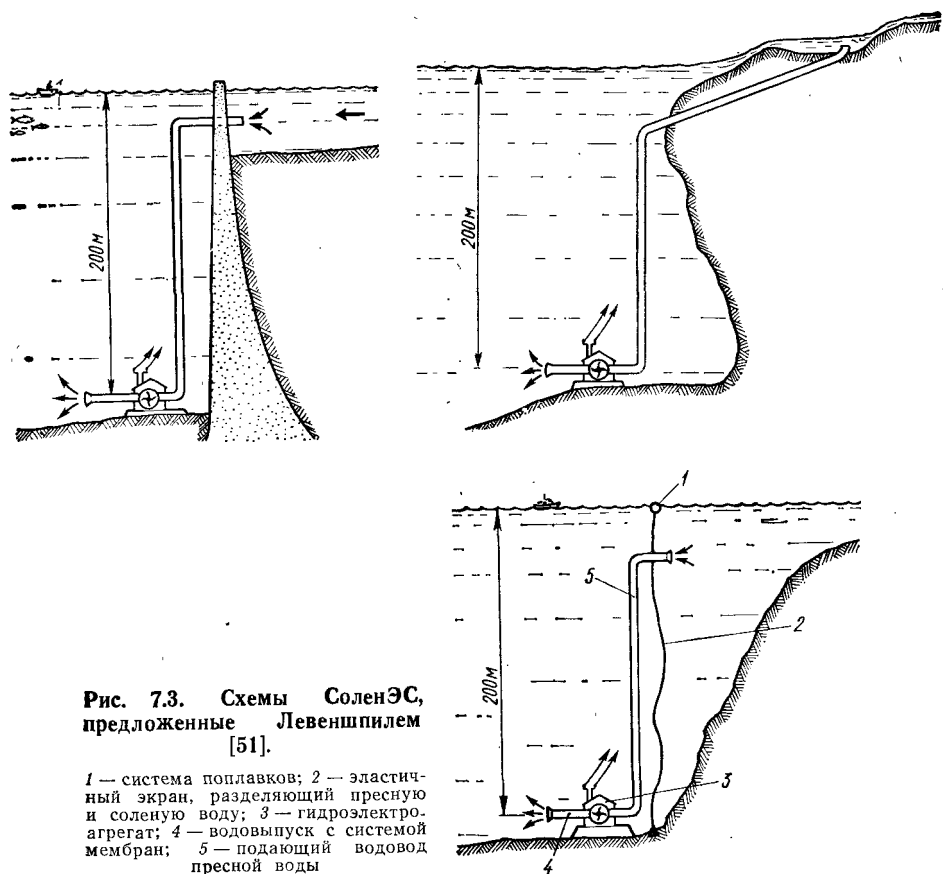
Рис. 7.2. Схема СоленЭС Уика и Айзекса [51].

1 — река; 2 — водовод; 3 — гидроагрегат с электрогенератором; 4 — буферный бассейн пресной воды; 5 — водовыпуск с системой мембран

Д. Уик и Д. Айзекс из океанологического института Скриппса в 1978 г. Особенность их системы — наличие двух ступеней преобразования энергии: на первой ступени станция работает как обычная ГЭС с высотной плотиной, разделяющей верхний и нижний бассейны, на второй — пресная вода нижнего бассейна откачивается в море против градиента солености через осмотические мембраны осмонасосом (рис. 7.2). Нижний бассейн образован двумя дамбами, построенными в устье реки. Уровень воды в нем примерно на 100 м ниже, чем и в реке, и в море. Речная вода попадает в нижний бассейн через высоконапорную гидротурбину,

а удаляется из него осмонасосом, представляющим собой разветвленную сеть мембран.

Столь грандиозное гидротехническое сооружение может быть упрощено по крайней мере двумя способами. Первый — использование принципов подводной технологии с размещением гидро-



турбин с генераторами непосредственно в толще воды. Эволюция такого подхода, предложенного профессором О. Левеншпилом из Орегонского университета в Корвалисе (США), показана на рис. 7.3. Этот подход позволил принципиально отказаться от гигантских плотин, свести дело к одной дамбе, затем просто к пластиковому экрану, разделяющему пресные и соленые воды, и, наконец, к трубопроводу пресной воды, подающему ее на требуемую глубину на достаточном расстоянии от эстуария, где за счет естественных факторов обеспечивается определенный перепад соленостей. Мембраны этих систем — это все те же разветвленные сети мембран, что требуются для реализации первой схемы

(см. рис. 7.2) и вообще всех схем, основанных на использовании полупроницаемых мембран.

Существует и второй способ упрощения гидротехнических сооружений. Этот способ подачи жидкости основан на подкачке соленого раствора в камеру высокого давления, из которой разбавленный раствор выбрасывается через турбину. Противодействие, равное половине осмотического давления, необходимо, как показано в предыдущем параграфе, для обеспечения максималь-

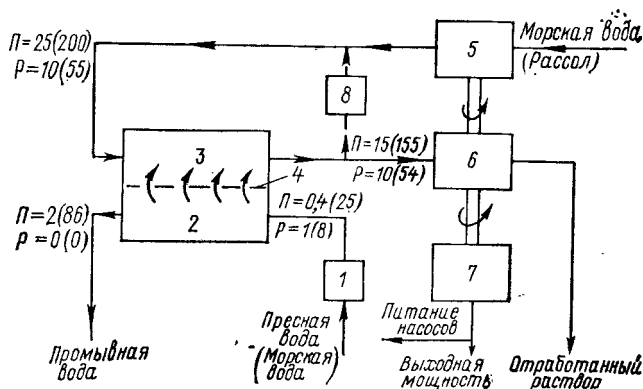


Рис. 7.4. Схема преобразователя Луба с противодавлением для различных пар растворов: речная вода — морская вода и морская вода Средиземного моря — вода Мертвого моря (для второго случая значения параметров приведены в скобках) [21].

1 — насос пресной воды; 2 — отсек, отдающий воду; 3 — отсек, принимающий воду; 4 — мембрана; 5 — насос концентрированного раствора; 6 — турбина; 7 — электрогенератор

ной мощности преобразования соленостной энергии. Полезная работа при такой схеме получается за счет дополнительного объема пресной воды, проникающей через систему мембран [21, 51].

На рис. 7.4 приведена схема электростанции, использующей искусственно создаваемое противодействие, для двух пар растворов — речная вода — морская вода и морская вода — концентрированный рассол. При использовании второй пары приходится применять дополнительный насос, обеспечивающий разбавление исходного концентрированного рассола. Здесь необходимо оговориться, что проект Луба рассчитан на использование градиента соленостей, который может быть получен при смешении вод Средиземного и Мертвого морей, что требует строительства примерно 40 км трубопровода. Схема может быть применена и для реализации потенциала соленостной энергии залежей ископаемой соли. В этом случае часть смешанного раствора может быть использована для ее растворения. Схема была исследована экспериментально. В качестве мембраны применены полые волокна из арома-

тического полиамида, выдерживающие требуемый перепад давлений. Менее концентрированный раствор или морская вода подавались внутрь волокон, снаружи они омывались более концентрированным рассолом. Речная или морская вода предварительно фильтровались. Эксперименты показали принципиальную работоспособность схемы, однако исследователи отметили, что в настоящее время использование высоких осмотических давлений, которые можно получить с помощью концентрированных растворов, на практике невозможно из-за недостатков современных мембран. При гидростатических давлениях выше 10^7 Па последние уплотняются и перестают «работать», аналогичным образом на них действуют и высокие концентрации солей. При экспериментах с рассолом Мертвого моря исследователям пришлось вдвое разбавлять его, чтобы получить приемлемую концентрацию. И такие исследования приносят все новые очень ценные с практической точки зрения результаты.

Например, в публикации Г. Джеллинека и Х. Масуды [57] описана опытная установка, позволившая еще более детально изучить работу гидроосмотического устройства (рис. 7.5). Она работала на перепаде соленостей пресной воды и раствора поваренной соли с концентрацией 3,5 г/л (0,612-молярный раствор) при температуре 25°C . При общей площади мембран $0,158\text{ м}^2$ в опытной установке была получена полезная механическая мощность примерно $1,6\text{ Вт/м}^2$ (имеется в виду площадь мембраны), что составило 65 % мощности, определенной теоретически без учета различных потерь, основная доля которых пришлось на трение в сопле (55 %) и в системе рециркуляции. Эти потери могут быть существенно снижены (в 10—20 раз), и тогда удельная мощность может быть доведена до величины 6 Вт/м^2 , что оказывается в 2,5 раза больше теоретического значения. Прирост вырабатываемой мощности вызвало явление концентрационной поляризации, заключающееся в повышении концентрации раствора вблизи мембраны со стороны раствора соли за счет проникновения соли в мембрану. В результате этого осмотическое давление повышается так, что равновесное значение увеличивается с $27,9 \cdot 10^5$ до $77,54 \cdot 10^5$ Па, соответственно увеличивается скорость поступления пресной воды через мембрану. Для обратного осмоса это явление имеет отрицательные последствия, что ставит под сомнение эффективность крупномасштабного обессоливания морской воды с помощью мембран, погружаемых на глубину более 240 м (известный проект Левеншпиля, предложившего опустить трубу с пакетом мембран на глубину около 8 км с тем, чтобы образующийся столб пресной воды, плотность которой на 3 % ниже плотности морской воды, под действием образующегося перепада гидростатических давлений фонтанировал на поверхности [51]).

Интересно отметить, что при предварительных экспериментах на одном модуле будущей опытной установки с такой же мембраной из асимметрического триацетата целлюлозы («Osmotics Sepa PS97») было получено максимальное давление

$17,8 \cdot 10^5$ Па при активности воды в растворе, равной 0,979 85, соответствующей равновесному осмотическому давлению $27,9 \cdot 10^5$ Па. Замеренное значение расхода пресной воды через мем-

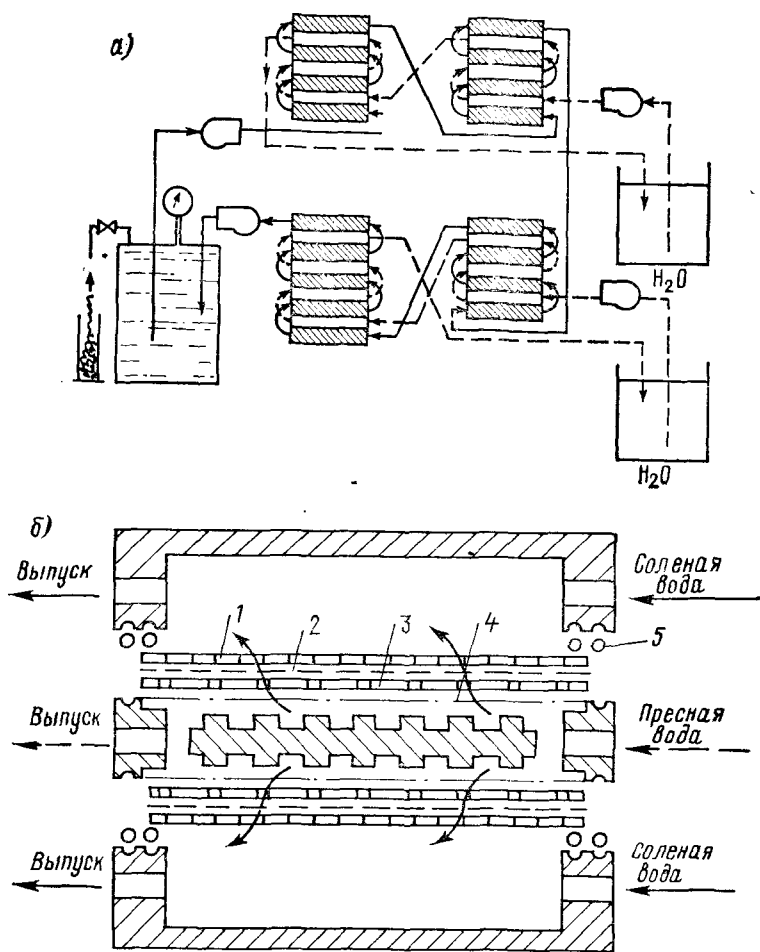


Рис. 7.5. Опытная установка Джеллинека и Масуды [57]: а — схема установки; б — схема отдельного модуля.

1 — мембрана; 2 — фильтровальная бумага; 3 — стальной проволочный экран; 4 — перфорированная стальная пластина; 5 — уплотнитель

брану составило $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при обратном потоке соли $1,05 \cdot 10^{-4} \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (95 % насыщения). Константа проницаемости мембраны $B = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, коэффициент диффузии $D = 1,29 \cdot 10^{-12} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}$. В опытной установке, составленной из нескольких блоков (рис. 7.5, а, схема отдельного блока приведена на рис. 7.5, б) было получено значение коэффициента диффузии почти в 3 раза более высокое $D = 3,65 \cdot 10^{-12} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}$. Исследо-

ватели объясняют это тем, что на образование (возникновение) поляризации требуется некоторое время. Во втором случае с момента заполнения системы раствором соли до начала опытов прошло около суток. Отмечают они и другие эффекты, связанные с оптимальными размерами соплового отверстия, более эффективным креплением мембран и устройства защитного фильтра перед мембраной.

На основе выполненных исследований Г. Джеллинек и Х. Масуда предложили два варианта схем полноразмерных СоленЭС, использующих, так же как и опытная установка, принцип пре-

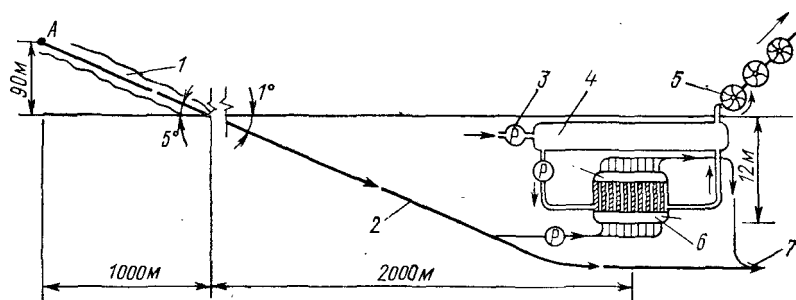


Рис. 7.6. Вариант СоленЭС, предложенной Джеллинеком и Масудой [57].

1 — река; 2 — трубопровод пресной воды; 3 — насос; 4 — напорный танк соленой воды; 5 — система турбин с электрогенераторами; 6 — мембранный преобразователь; 7 — подача пресной воды к последующим преобразователям

образования соленостной энергии в кинетическую энергию потока раствора. Один из вариантов показан на рис. 7.6. Эта СоленЭС сочетает принцип осмоса с противодавлением с подводным размещением оборудования. Она состоит из 125 отдельных блоков, подключенных к общей магистрали пресной воды, берущей начало примерно в 1 км от места впадения реки в море. Общая длина трубопровода составляет около 3 км. Каждый блок включает танк для раствора длиной 100,5 и диаметром 8,5 м с подсоединенной к нему 40-метровой батареей площадью поперечного сечения 4 м^2 , содержащей 1000 мембран, разделяющих батарею на камеры с пресной водой и раствором, шириной 0,02 м каждая. Общая площадь мембран из все того же несимметричного триацетата целлюлозы составляет 10^6 м^2 , что обеспечивает выходную мощность электростанции примерно 1,6 МВт при разумных потерях на перекачку воды и рассола (около 12 %).

Экономические оценки, сделанные в расчете на то, что СоленЭС будет работать с эффективностью 0,65 %, выдавая на каждый израсходованный 1 м^3 пресной воды 0,2 кВт·ч электроэнергии, при потерях на нужды самой СоленЭС около 5 % мощности, требуемой на подкачку морской воды в танк, дают оптимистичные цифры от 5 до 1,3 цента за 1 кВт·ч. Первая относится к условиям, реализованным в опытной установке ($1,6 \text{ Вт/м}^2$), вторая — к случаю увеличения удельной мощности до 6 Вт/м^2 .

В расчетах принята стоимость мембран, выпускаемых компанией «Осмоникс инкорпорейтед», примерно 0,2 долл./м² при объеме выпуска до 2 км² и учтено, что время «жизни» триацетатной мембраны примерно 6 мес. Таким образом, стоимость 1 кВт·ч электроэнергии подобной СоленЭС оказывается примерно равной величинам, характерным для атомных и тепловых станций.

§ 7.4. «Безмембранные» системы

Для реализации проектов осмотических преобразователей в промышленном масштабе необходимы эффективные мембраны, обладающие достаточной стойкостью и обеспечивающие требуемую производительность при стоимости на один-два порядка ниже той, что может дать сейчас химическая промышленность. Недостаточна пока и механическая прочность мембран. Чтобы извлекать с помощью преобразователей осмотического давления мощность, сравнимую с мощностями ГЭС, необходимо пропускать через мембраны таких преобразователей потоки пресной или солоноватой воды, соизмеримые с потоками, проходящими через турбины этих ГЭС. Но эти потоки потребуют предварительной подготовки — фильтрации. Без фильтрации мембраны будут достаточно быстро заиливаться и выходить из строя. Это означает, что СоленЭС необходимо снабжать системами фильтров и отстойников — целыми фабриками для подготовки воды. Такие фабрики потребуют отчуждения значительных площадей и дополнительных капиталовложений, что при оценке стоимости энергии, вырабатываемой гипотетическими СоленЭС, обычно не учитывают. Все вместе делает концепцию СоленЭС не такой уж привлекательной по сравнению с обычным гидротехническим строительством.

Попытки отказаться от мембран как наиболее уязвимых элементов преобразователей соленостной энергии вероятно и привели к идее «безмембранных» преобразователей. Мембраны здесь все-таки есть, но их роль выполняет сама поверхность жидкости. В основе методов преобразования соленостной энергии — изменение давления насыщенного пара над поверхностью жидкости в зависимости от концентрации растворенных в ней веществ. Относительное понижение давления пара оказывается пропорциональным концентрации раствора и не зависит от химической природы растворенного вещества (закон Рауля, справедливый для растворов достаточно низкой концентрации, к которым относится и морская вода).

Различие в давлении насыщенных паров — следствие разницы в энергиях, необходимых для испарения одинаковых объемов растворов различной концентрации. Для речной и морской воды эта разница невелика и составляет примерно 2,5 Дж/г, т. е. около 0,1 % скрытой теплоты испарения пресной воды (2501 Дж/г при температуре 0°C). Эта разность и позволяет запастись солнечную энергию в объеме, примерно соответствующем гидравлической

энергии рек [74]. Осмотическое давление и различие в давлении насыщенных паров — две стороны одного физического явления. В изотермических условиях расчет с использованием обоих этих параметров приводит к одинаковому результату по энергии. Различие между ними состоит лишь в зависимостях от температуры — давления паров — степенная функция и осмотическое давление — линейная (рис. 7.7). Для речной и морской воды различие прак-

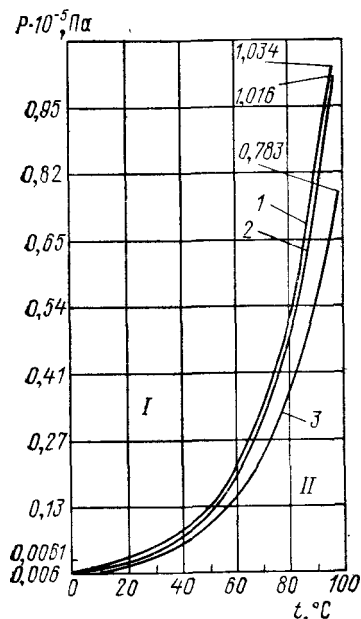
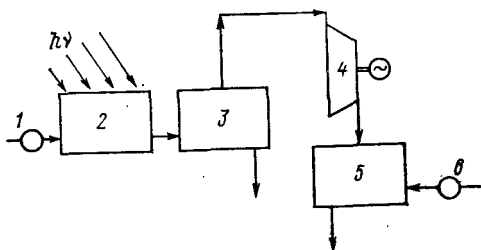


Рис. 7.7. Зависимость давления насыщенных паров раствора от концентрации соли и температуры [57].

1 — пресная вода; 2 — морская вода (соленость 34,5 ‰); 3 — рассол (соленость 280 ‰); I — жидкость; II — пар

Рис. 7.8. Принципиальная схема паросорбционного соленостного преобразователя.

1 — насос пресной или морской воды; 2 — солнечный водонагреватель; 3 — испаритель; 4 — турбина с электрогенератором; 5 — сорбционный конденсатор водяного пара; 6 — насос подачи концентрированного рассола — сорбента



тически не заметно, однако если обратиться к более концентрированному раствору, то разница становится более существенной. Скорость испарения с ростом температуры увеличивается, что, как отмечает М. Олссон, позволяет при заданном размере энергетической установки получить большую мощность, однако общее количество энергии, извлекаемой из единицы объема, не изменяется.

Использование разности давлений паров над растворами различной концентрации приводит к почти тем же проблемам, что и в конструкциях ОТЭС с открытым рабочим циклом. Причем основная — необходимость в тихоходных турбинах с большими площадями рабочих сечений. Правда, разность давлений паров в случае использования подогретых растворов может быть значительно увеличена. Так, если при 40°C перепад составляет всего $2,7 \cdot 10^3 \text{ Па}$, то уже при 70°C (температура, сравнительно легко достигаемая за счет использования, например, солнечной энергии даже в средних широтах) — $8,1 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

Одно из первых таких устройств было предложено группой сотрудников института Скриппса (рис. 7.8). Устройство может ра-

ботать на рассолах различной концентрации, (речная вода—морская вода, морская вода—вода из Мертвого моря). Для подогрева используется энергия Солнца, которая расходуется на поддержание температуры растворов на уровне 24—29 °С и на компенсацию потерь, связанных с испарением. В качестве недостатков принципа такого преобразования были отмечены малая разность давлений, необходимость значительного расхода циркулирующей в системе воды и, следовательно, большие потери на испарение и подогрев (примерно в отношении 1 : 1000, т. е. до 1000 кВт·ч тепла на 1 кВт·ч вырабатываемой мощности для пары речная вода—мор-

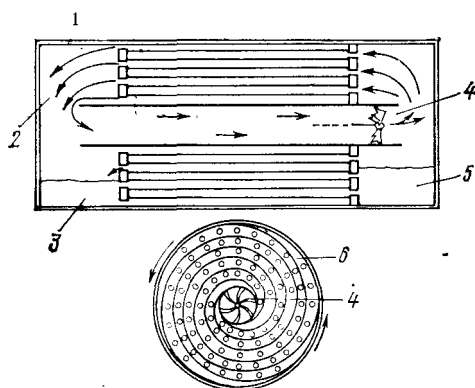


Рис. 7.9. «Безмембранный» преобразователь Ольссона—Айзекса [75].

1 — кожух; 2 — поток водяного пара; 3 — пресная вода; 4 — турбина; 5 — концентрированный раствор соли; 6 — теплообменник

ская вода). Особенно эффективна схема на разности давлений при работе совместно с солнечным прудом.

Одна из проблем при создании подобных устройств — обеспечение достаточного количества пара низкого давления, для чего необходимы эффективные испарители. Эта задача была решена в том же институте, а решение реализовано в устройстве, схема которого приведена на рис. 7.9 [75]. Метод, положенный в основу этого устройства, по определению В. А. Акуличева и В. В. Княжева [21], обратен парокомпрессионному опреснению, при котором морская вода испаряется в вакууме, а получаемый пар сжимается до достижения условий насыщения и конденсируется. Выделяющаяся при конденсации теплота вновь расходуется на испарение. Энергию получают, обратив процесс и использовав разность давлений у поверхностей, смачиваемых водой различной солёности.

Рабочий цикл устройства включает несколько операций: подвод рабочих жидкостей к установке (пресной либо морской воды и морской воды либо рассола); очистку воды от крупных инородных включений; дегазацию рассолов; испарение пресной воды на одной стороне теплообменного аппарата; извлечение энергии из потока пара с помощью турбины; конденсацию пара на стороне теплообменника, смачиваемого соленым раствором; обновление рабочих жидкостей. Трудно разработать теплообменный аппарат, который бы полностью передавал тепло, выделяющееся при кон-

денсации паров за турбиной, пресной (менее соленой) воде. Потери тепла ведут к охлаждению пресной воды и прекращению процесса испарения. Для пары речная вода—морская вода достаточно разницы в $0,5^{\circ}\text{C}$, чтобы этот процесс прекратился. Большие возможности таит использование концентрированного раствора соли. В этом случае разность температур не должна быть менее 5°C , чтобы процесс не прекратился. Вопрос удачно решен в конструкции опытного устройства, изображенного на рис. 7.9: использование двойной спирали позволяет наилучшим образом одновременно решить вопросы об увеличении площади испарения и о передаче энергии конденсации (стенки спирали выполнены из хорошо проводящего тепло материала). Корпус устройства изготавливают из стали с теплоизоляцией либо из бетона. Боковые крышки отформованы из армированной пластмассы.

Разработка турбин для подобных устройств практически не отличается от аналогичных конструкций для термальных электростанций открытого цикла. Единственное, что, пожалуй, надо отметить, это значительное увеличение диаметра рабочего колеса (при одинаковой мощности), если использован перепад речная вода—морская вода. В этом случае падение давления на турбине составляет не более 0,1 падения давления в ОТЭС. При использовании концентрированного раствора конструкция турбины значительно упрощается, так как соответствующее падение давления может быть в 10 раз большим, чем для ОТЭС такой же мощности.

Предварительные испытания устройства были проведены в 1979 г. на модели, обеспечивающей объемный расход пара $12,3$ л/с при использовании пресной воды и концентрированного рассола. Через поверхность теплообменника площадью 1 м^2 передавалось около 700 Вт мощности, расходуемой на испарение, при этом выделялось и рассеивалось около 10 Вт мощности, связанной с соленостной энергией. Расчетная скорость потока пара составляла около 22 м/с.

Внедрение цилиндрического теплообменного аппарата диаметром 30 и длиной 30 м с 10 -метровым каналом для турбины позволяет надеяться получить при толщине стенки теплообменника 5 мм и площади его поверхности $7,5 \cdot 10^6\text{ м}^2$ до 30 МВт мощности (ориентировочный КПД 40%). Эта цифра получена при использовании концентрированного рассола и пресной воды. В случае применения пресной и морской воды мощность агрегата упадет до 3 МВт. При использовании избыточного тепла от соседних тепловых и атомных станций и противоточного теплообменника могут существенно подняться рабочая температура и увеличиться выработка энергии.

Выполненные на модели эксперименты показали, что подобная установка в настоящее время может создавать большие удельные мощности (по различным источникам от $2,5$ до 10 Вт/м^2) по сравнению с преобразователями осмотического давления (не более 1 Вт/м^2) и с обратным электродиализом. Одно из достоинств такого принципа переработки соленостной энергии — отсутствие

необходимости сложной подготовки воды, что чрезвычайно упрощает процесс переработки энергии. Этот способ вероятно позволит добиться минимальной стоимости энергии по сравнению с упомянутыми выше [21] и ближе других стоит к промышленной реализации.

§ 7.5. Прямое преобразование соленостной энергии в электрическую

Прямые способы преобразования энергии всегда кажутся предпочтительными (исчезает необходимость в громоздких электро-

механических генераторах), тем более что процесс электролиза достаточно широко распространен в народном хозяйстве, являясь одним из основных процессов для получения пресной воды в районах с развитой электроэнергетикой. При обессоливании электродиалитическим способом морскую (или другую солоноватую воду) пропускают через набор ячеек, разделенных ионообменными мембранами, обладающими свойством при достаточно низких концентрациях раствора пропускать ионы

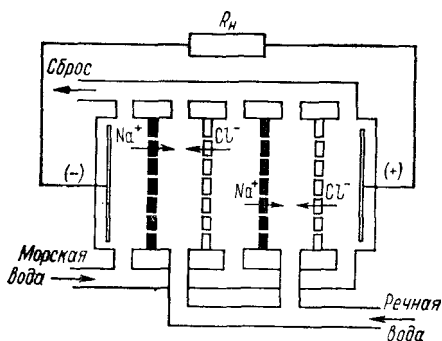


Рис. 7.10. Диалитическая батарея для прямого преобразования соленостной энергии в электрическую [17]

только определенного знака. При одинаковых концентрациях в смежных ячейках на мембранах ничего не наблюдается, но стоит наложить электрическое поле, как процесс перемещения ионов принимает направленный характер, в результате чего в одних ячейках происходит снижение концентрации ионов обоих знаков, а в других — ее повышение. Для полного обессоливания воду пропускают через несколько батарей последовательно. Раствор с повышенной концентрацией ионов либо используется для дальнейшей переработки, либо сбрасывается в водоем.

При обратном электродиализе (в диалитической батарее) соленая и пресная вода подаются в различные ячейки, также ограниченные двумя разнотипными мембранами, через которые положительные (Na^+) и отрицательные (Cl^-) ионы проникают в пресную воду. Такое направленное движение электрических зарядов создает в замкнутой цепи ток (рис. 7.10). Ионообменные мембраны изготовляют из пористых полимерных материалов, способных фиксировать анионы и катионы с достаточно большой молекулярной массой. Например, в качестве катионообменной мембраны может быть использована пленка из сополимера поливинилхлорида и сульфитированного полистирола, на стенках пор

которой фиксированы сульфитные группы SO_3^- . Анионообменная мембрана может содержать фиксированные $(\text{CH}_3)_3^+$ группы. Если по обеим сторонам такой мембраны (независимо от знака фиксированных ионов) находятся достаточно сильно разбавленные растворы электролитов с различной концентрацией, то на них устанавливается в равновесных условиях определенная разность потенциалов, отличающаяся знаком и определяемая по формуле

$$\Delta\varphi = \pm (RT/F) \ln (c_2/c_1), \quad (7.14)$$

где знак «+» соответствует анионообменной, а «-» — катионообменной мембране; F — число Фарадея (96 496 Кл/моль); $c_{2,1}$ — концентрация.

Важная особенность ионообменных мембран — снижение величины проводимости при значительном повышении концентрации растворов. Анионы и катионы в порах электрически взаимодействуют с ионами электролита, образуя двойные электрические слои. При определенных (достаточно малых) концентрациях поры в мембранах заполнены только ионами, несущими заряд, противоположный фиксированному на стенках пор анионам и катионам. Ионы противоположного знака отсутствуют, а электрический контакт между растворами происходит только за счет перемещения ионов одного знака. При высоких концентрациях в полостях пор оказывается электронейтральная смесь катионов и анионов, и мембрана становится простой диафрагмой, потенциал на которой определяется только различием в подвижностях ионов электролита [17]. Для учета влияния подвижности ионов в предыдущее выражение необходимо добавить множитель вида $(\tau_K - \tau_A)$, где τ_K и τ_A — числа переноса однозарядных катионов и анионов, зависящие в общем случае от концентрации электролитов, контактирующих с мембраной, знака фиксированных ионов и структуры мембраны. Для катионообменной мембраны — в разбавленных растворах — $\tau_K \rightarrow 1$, $\tau_A \rightarrow 0$, для анионообменной — наоборот. Соответственно изменяется и знак разности потенциалов.

Для батареи, включающей N пар мембран, суммарная ЭДС $E = 2N\Delta\varphi$. Это выражение удобно преобразовать, подставив числовые значения и перейдя от натуральных логарифмов к десятичным. Тогда при температуре воды 25°C с погрешностью менее 2 % получим для ЭДС диалитической батареи простое выражение

$$E = 0,12N \lg \frac{c_2}{c_1}. \quad (7.15)$$

Если с помощью этого выражения оценить ЭДС батареи из 500 пар мембран, работающей на пресной воде соленостью 0,85 ‰ и морской воде соленостью 35 ‰, получим разность потенциалов, равную 96 В. Выделяющаяся на нагрузке мощность определяется по закону Ома для полной цепи с внешним сопротивлением R_H и внутренним R

$$P = I^2 R_H = E^2 R_H / (R + R_H)^2. \quad (7.16)$$

Как и для любого источника тока максимальная мощность выделяется при равенстве сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи. В этом случае, как отмечают В. А. Акуличев и В. В. Княжев [21], становятся минимальными капитальные затраты на строительство СоленЭС. Принципиально может быть рассмотрен и другой случай: $R_n > R$, который реализуется, если ограничивающим фактором является расход пресной воды. СоленЭС при этом работает в режиме, близком к холостому ходу, но зато пресная вода может практически использоваться до тех пор, пока концентрация соли в ней не сравняется с ее концентрацией в морской воде.

Общее падение напряжения в цепи складывается из падения напряжения на нагрузке, на внутреннем участке батареи и на электродах. Последняя величина сравнительно мала: для покрытого платиной анода (платинирование необходимо из-за того, что на аноде происходит восстановление иона Cl^- до молекулы Cl_2) и стального катода (на нем выделяется водород) она не превышает 3 В. Сопротивление же внутреннего участка цепи может быть найдено как сумма сопротивлений мембран и отсеков пресной воды (сопротивлением отсеков с морской водой пренебрегаем). Выразив эти сопротивления через удельные проводимости, получим для внутреннего сопротивления выражение вида

$$R = \frac{N}{A} \left(r_a + r_k + s_n \frac{1}{\sigma_p c_p} \right), \quad (7.17)$$

где A — площадь каждой мембраны, м^2 ; r_a , r_k — удельные сопротивления мембран, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$; s_n — ширина отсека пресной воды; σ_p — электропроводность пресной воды, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{м}^2$; c_p — концентрация соли в пресной воде, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$. Так как и числитель, и знаменатель дроби в выражении для мощности включают величину концентрации соли в речной (пресной) воде, то было бы интересно определить, каково оптимальное ее значение, при котором мощность максимальна: простое уменьшение c_p приводит не только к росту ЭДС, но и к увеличению внутреннего сопротивления. Такой анализ был выполнен Д. Вайнштейном и Ф. Лейтцем [21]. Он показал, что для рассмотренного выше набора из 1000 мембран оптимальным значением оказывается $c_p = 0,0259$ моль/л при концентрации соли в морской воде $c_m = 0,57$ моль/л. Так как соленость речной воды колеблется в пределах от 0,005 до 0,015 моль/л, имеет смысл «доводить» ее концентрацию до оптимальной, добавляя морскую воду в речную. При оптимальных значениях концентраций величина ЭДС диалитической батареи оказывается равной 80 В.

Возможна оптимизация модулей диалитических СоленЭС и по другим параметрам, но она, как отмечают В. А. Акуличев и В. В. Княжев [21], затруднена. В качестве примера они рассматривают возможность снижения внутреннего сопротивления за счет уменьшения расстояния между мембранами, указывая, что такое уменьшение приведет к увеличению энергетических затрат

на прокачку воды. Критичны к изменению и другие параметры.

Идея диалитического преобразователя не нова. По словам А. Голден, «ее пытались использовать, о ней писали, но в результате предали забвению уже в 50-х годах» [51]. Д. Вайнштейн и Ф. Лейтц вновь рассмотрели вопрос и провели серию опытов на стандартной электродиализной ячейке в конце 70-х гг. Экспериментальные результаты оказались в хорошем соответствии с теорией и внушают определенный оптимизм. Однако основные трудности способа на сегодняшний день не устранены. Так же как и в случае гидроосмотического преобразования, вопрос упирается в проблему создания дешевых долговечных мембран (для диализа она стоит более остро, чем для гидроосмоса), в проблему предварительной подготовки воды, без которой даже самые долговечные мембраны выйдут из строя из-за заиливания и механической порчи.

§ 7.6. Солнечные пруды

Солнечный пруд — это концентратор солнечной энергии, в котором накопление тепла происходит не во всем объеме воды, а лишь за счет повышения температуры в глубинном слое, отличающемся повышенной концентрацией солей. Температура воды в таком слое может подниматься до 100 °С, оставаясь на поверхности сравнительно невысокой.

Условия существования подобного аномального перепада температур — наличие определенной разности соленостей, при которой прекращается вертикальный массообмен между слоями, и отсутствие механических факторов, возбуждающих перемешивание. Такие пруды существуют в природе: подходящие условия время от времени возникают в небольших стоячих соленых прудах и в океанских лагунах, периодически заполняемых водой, в странах с достаточно жарким климатом.

Однако открыто это явление было в умеренном поясе — на территории Венгрии в конце прошлого века [45]. Сначала его сочли результатом деятельности бактерий, населяющих придонные слои, затем — следствием нагрева за счет тепла подземного источника. Лишь более детальное изучение показало, что истинная причина разогрева глубинных вод состоит в особенностях поглощения солнечного излучения. В солнечном пруду излучение видимой части спектра проникает через верхний достаточно тонкий пресный слой и с эффективностью примерно 20 % трансформируется в тепло в нижнем соленом слое. Поверхностный слой при этом выполняет роль экрана, исключающего потери тепла за счет излучения в инфракрасной области и за счет испарения.

В современной форме идея использования солнечных (или, как их еще называют, соленостных) прудов была разработана в Израиле более двадцати лет назад. Соответствующее устройство включало мелкий (глубиной около 1 м) пруд с затемненным

дном, в котором насыщенный раствор соли был прикрыт слоем пресной воды. В отсутствие конвективного перемешивания (от ветра поверхность пруда защищалась синтетической пленкой) рассол в нижнем слое разогревался почти до 100°C и мог быть использован для приведения в действие тепловой машины, выполненной по схеме ОТЭС замкнутого цикла. Оценки показали, что, используя воду поверхностного слоя пруда площадью примерно 1400 м^2 для охлаждения, а воду придонного слоя для нагревания

рабочего тела ОТЭС при температуре рассола около 90°C можно получить до 6 кВт полезной мощности, т. е. примерно 4 Вт с 1 м^2 поверхности пруда. Таким образом, подобный пруд может рассматриваться как источник энергии для мелких потребителей.

Схема ОТЭС — не единственный вариант преобразователя энергии, аккумулируемой в солнечном пруду. С не меньшей эффективностью для этого может быть использована и схема СоленЭС (рис. 7.11). Очевидно, что для нормальной работы подобной электростанции необходимо, чтобы точки забора пресной и соленой вод и их сброса были достаточно хорошо разнесены. В противном случае естественные процессы разделения не будут успевать компенсировать изменение солевого состава в осмотическом преобразователе пленочного типа. Если же речь пойдет об использовании безмембранного преобразователя, то проблема нарушения градиента солености из-за разбавления концентрированного раствора отпадет и останется только проблема обеспечения достаточно медленной подачи отработанных вод в соответствующие слои. Впрочем, на участке с максимальными скоростями течения с успехом может быть использован разделяющий слой искусственный экран в виде плавающей на поверхности рассола пленки.

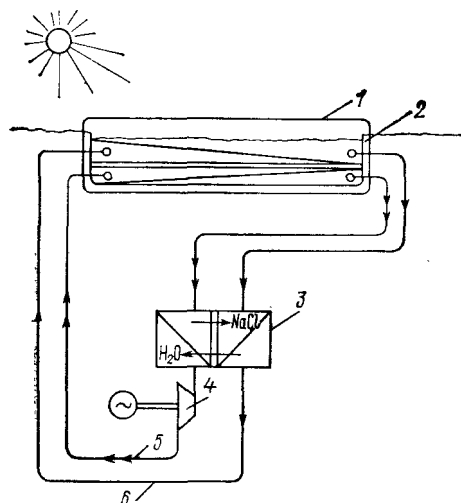


Рис. 7.11. Принцип действия солнечного пруда с соленостным преобразователем [63].

1 — прозрачный экран; 2 — облицовка пруда; 3 — осмотический преобразователь; 4 — турбина с электрогенератором; 5 — концентрированный рассол; 6 — слабый рассол

Для осмотического преобразователя проблему изменения концентрации рассола можно решить с помощью вспомогательного пруда, где рассол будет упариваться до требуемой концентрации в результате естественного испарения, либо с помощью градирен. Можно повышать концентрацию рассола добавлением соли. Именно так это делалось при создании опытных прудов (пруд

глубиной 1 м требует первичного «заряда» в количестве 180—200 кг соли на кв. метр).

К настоящему времени проработано несколько вариантов конструкций солнечных прудов, в которых использованы либо естественные пруды и лагуны или низменности, либо искусственные сооружения (обвалованные участки суши, бетонные или другие емкости). Французские специалисты из Национального центра использования океана (CNEXO), например, построили в окрестностях г. Монпелье (Средиземноморское побережье Франции) пруд площадью 1000 м² и глубиной 1 м в виде прямоугольной емкости, выложенной из кирпича и покрытой изнутри слоем стойкой к агрессивной среде резины толщиной 1 мм. Эксперименты подтвердили работоспособность конструкции.

Солнечные пруды, позволяющие в среднем получать мощность 35 кВт при максимальной мощности 150 кВт сооружены в Саудовской Аравии (2400 м²) и США (2000 м²). Преобразуемая в них энергия используется для кондиционирования воздуха, обогрева плавательных бассейнов и производства электроэнергии. Однако экономические оценки оказались не в пользу технологии преобразования энергии с помощью солнечных прудов: по удельным капиталовложениям они при наличии других типов источников энергии оказались неконкурентоспособными по сравнению с любыми вариантами традиционных источников. Лишь в странах с жарким климатом солнечные пруды могут найти применение, особенно если соответствующие преобразователи одновременно с электроэнергией будут вырабатывать пресную воду. Здесь могут быть использованы установки, работающие по принципу ОТЭС открытого цикла.

БИОЛОГИЯ В ОКЕАНСКОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**§ 8.1. Энергетическая биотехнология**

Особое место в энергетике на возобновляемых ресурсах занимает преобразование солнечной энергии с помощью биосистем — различных видов живых существ и искусственных систем, построенных либо из веществ биологического происхождения, либо по их схеме. В целом, соответствующие технологические процессы относятся к стремительно развивающейся в наши дни отрасли народного хозяйства — биотехнологии. Поэтому, говоря об энергетике будущего и, в частности, об океанской энергетике, мы не можем обойти вниманием биотехнологию, точнее, энергетическую биотехнологию, использование принципов которой в океанской энергетике сулит возможность создания высокопродуктивных и экологически приемлемых систем, основанных на фотосинтезе.

Примерами подобных систем служат получающие все большее распространение в развивающихся странах генераторы биогаза, работающие на обводненных отходах сельскохозяйственного производства. В Индии, КНР, Пакистане действуют миллионы таких генераторов, позволяющих решать энергетические проблемы на уровне больших сельскохозяйственных общин. Есть подобные установки и у нас в стране. По подсчетам специалистов, только за счет использования различных отходов биосырья можно удовлетворить потребности народного хозяйства СССР в горючем газе примерно на 20 % [11].

Потенциальные возможности биотехнологии не ограничиваются, конечно, переработкой отходов: они охватывают практически все стороны жизнедеятельности современного человека. Реально создание систем, вырабатывающих белки, сырье для металлургии, горючее для атомных реакторов, электроэнергию и т. п. В процессе жизнедеятельности растений и бактерий можно непосредственно получать такие энергоносители, как водород, минуя стадию биологического разложения сырья. Причем важно, что все из перечисленных процессов уже опробированы по крайней мере в лабораторных условиях. Биотехнологии предсказывают в будущем одно из самых значительных мест в народном хозяйстве планеты. По мнению некоторых специалистов, именно

биотехнология позволит решить в перспективе все энергетические и продовольственные проблемы человечества.

Правда, вышесказанное относится к достаточно отдаленному будущему: на пути развития биотехнологии много сложных научных, технических и социальных проблем. В настоящее время основное внимание уделяется развитию и совершенствованию традиционных методов использования биомассы в энергетике, из которых, увы, самый распространенный пока — сжигание древесины. Дело в том, что запасы древесины в мире достаточно велики: в древесной массе запасено примерно столько же энергии, сколько содержится в разведанных залежах каменного угля. Ежегодно только растения планеты связывают путем фотосинтеза примерно $8 \cdot 10^{10}$ т углерода, и ежегодно наращивается биомасса, содержащая около $3 \cdot 10^{21}$ Дж, что почти в 10 раз превышает современное потребление всех видов энергии в мире [31]. Теплота сгорания древесины, например, всего в 2 раза ниже такого же показателя лучших сортов моторного топлива (соответственно примерно 20 МДж/кг по сравнению с 40 МДж/кг). В современном мире в энергетике используются в среднем лишь 2 % общего годового прироста древесины, в некоторых странах, в Финляндии например, древесное топливо в общем балансе составляет до 15 %. В США потребление древесного топлива с 2 % от общего количества топлива в 1977 г. возросло к 1982 г. до 4 %.

Интерес к древесине, как к топливу, во всем мире довольно высок. Причем речь идет не только о более рациональной заготовке древесины и повышении КПД ее использования, но, в основном, о создании промышленных плантаций быстрорастущих культур, которые можно было бы экономично перерабатывать в более калорийное топливо. На таком «подготовленном» топливе уже строятся ТЭС, причем использование современных топочных устройств, например с подачей предварительно специально подготовленных древесных гранул в зону горения, позволяет получить удельную стоимость тепла примерно в 2 раза более низкую, чем в установках на жидком топливе.

Стратегия преобразования в энергию биомассы практически не зависит от того, где она добывается — на суше или в море. Получаемая любым способом биомасса может либо непосредственно сжигаться после высушивания, либо перерабатываться в более калорийное топливо, либо служить сырьем (рис. 8.1) для выработки требуемых видов энергоносителей. Соответственно можно рассматривать растения и так топливо, и как сырье для переработки, и как производитель энергоносителей и других полезных веществ. К потенциальным возможностям биотехнологии относится также в перспективе и прямое преобразование энергии солнечного излучения в электрический ток с помощью живой ткани.

Как уже говорилось выше, одна из основных задач и в плане энергетики, и в плане решения продовольственных проблем — получение достаточного количества растительной биомассы. И на

суше, и в океане у исследователей, связанных с решением этой задачи, — общие цели. Это поиск и селекция подходящих культур, наилучшим образом перерабатывающих солнечную энергию, воздействие на культуры для получения максимальной продуктивности, выбор оптимальных условий разведения организмов, разработка комплекса мероприятий и технических средств для их выращивания, снятия и переработки урожая и т. п. В недалекой

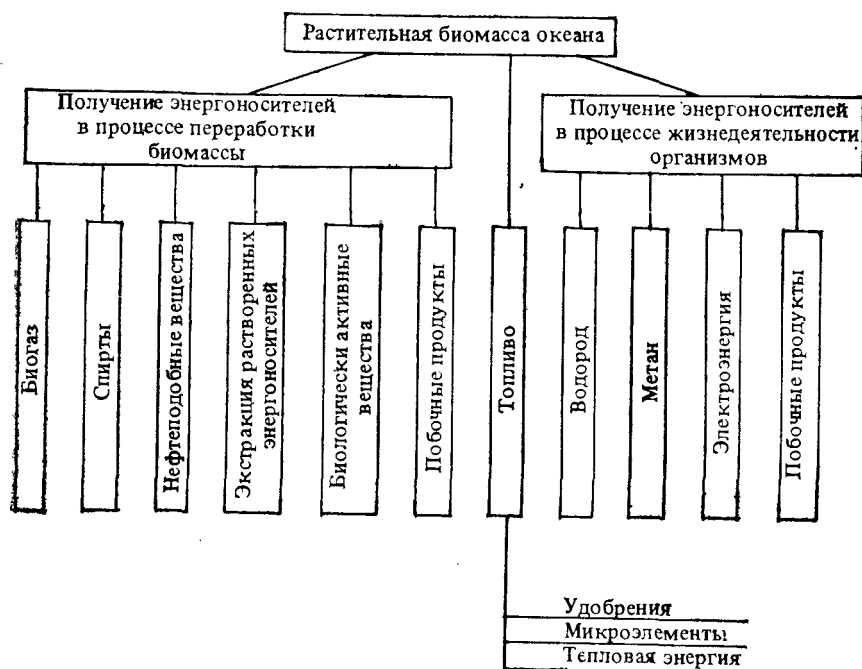


Рис. 8.1. Стратегия использования биомассы

перспективе стоит создание полезных культур методами генной инженерии. Генная инженерия уже теснит методы традиционной селекции из агротехники, позволяя в короткие сроки с высокой надежностью целенаправленно получать необходимые признаки растений не путем скрещивания и прививания, требующих значительных затрат времени и ограниченных условиями совместности организмов, а непосредственным воздействием на генетический аппарат клетки, на молекулы ДНК.

Иногда наземная и океанская технологии производства биомассы настолько сближаются, что их становится трудно разделить. Например, при разведении микроскопических водорослей в искусственных условиях, с одной стороны, речь идет о типичных водных организмах, а с другой — о сложных инженерных сооружениях для разведения водорослей — альготронах, строящихся на суше и связанных с водоемами только трубопрово-

дами. При переработке сточных вод биологические процессы могут вестись как в установках на суше, так и непосредственно в мелководных хорошо прогреваемых прибрежных заливах. Возможно дальнейшее использование вод, прошедших биоочистку, для повторного применения в качестве охлаждающей жидкости для ТЭС. Это позволяет получить двойную выгоду: уменьшить расход чистой воды и повысить эффективность работы систем биоочистки за счет подогрева.

§ 8.2. Фотосинтез

Какие бы варианты энергетического использования биомассы мы ни рассматривали, в основе их всегда лежит фотосинтез —

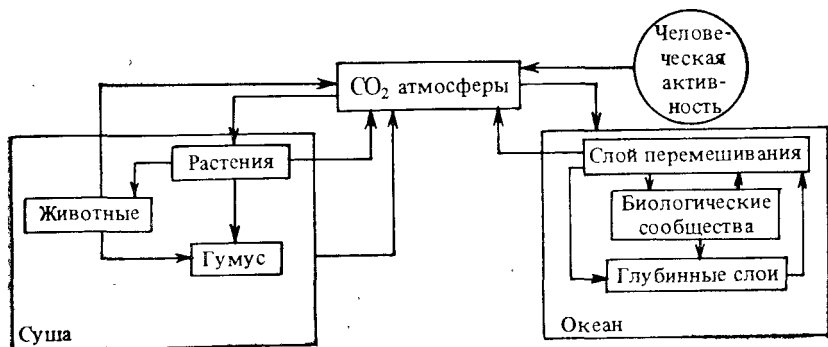
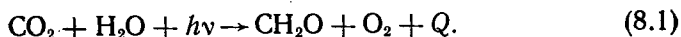


Рис. 8.2. Планетарный круговорот углерода [22]

преобразование энергии света в химическую энергию органических веществ. Поглощая солнечную энергию, фотосинтезирующие организмы участвуют в планетарном круговороте углерода (рис. 8.2). При этом Мировой океан играет роль регулятора содержания углекислого газа в атмосфере, где его находится в 50 раз меньше, чем в океане. На этом же рисунке показано перераспределение энергии, поглощаемой фотосинтезаторами, между различными потребителями морепродуктов*.

При фотосинтезе содержащиеся в особых органеллах растительных клеток — хлоропластах — пигменты, в основном хлорофиллы, поглощают кванты видимого света и за счет этого снабжают клетку энергией, необходимой для образования прежде всего углеводов, синтез которых принципиально описывается уравнением

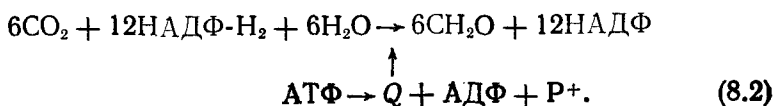


* Да Сильва Э. Х. Морские микро- и макроорганизмы: возобновляемые ресурсы. — Импакт, 1982, № 3, с. 49—60.

Одновременно с образованием углеводов происходят обогащение среды кислородом, который свободно проникает через клеточные мембраны, и выделение энергии.

Приведенная выше реакция отражает основную суть фотосинтеза, предельно упрощая описание самого явления. На самом деле, фотосинтез — более сложная совокупность фото- и электрохимических процессов, детальные механизмы которых во многом еще не установлены. В процессе многоступенчатой реакции в клетке образуется целый набор органических веществ, необходимых для обеспечения жизнедеятельности. Схематично основные этапы фотосинтеза отражает рис. 8.3. Выделены две характерные фазы процесса — световая, на которой происходит, в основном, преобразование энергии, и темновая, где наиболее важно превращение вещества. В световой фазе в хлоропласте «работают» две фотосинтетические системы — ФС-1 и ФС-2, особенно чувствительные к красному участку спектра солнечного излучения с длиной волны в диапазоне 0,65—0,70 мкм. Процесс преобразования солнечной энергии идет следующим образом. Первоначально в системе ФС-2 кванты света возбуждают хлорофилл Chl-a, который теряет электроны и становится активным катализатором биофотоллиза — реакции разложения воды на молекулу кислорода, два иона водорода и два электрона. Молекулы кислорода свободно, как уже отмечалось, проникают в среду через клеточные мембраны, а ионы водорода — протоны и электроны используются при последующих энергетических превращениях: образовании высокоэнергетического аденозинтрифосфата (АТФ) — универсального во всей живой природе аккумулирующего и транспортирующего энергию вещества, и для восстановления молекулы никотинамидаденин (НАДФ) до НАДФ-Н₂ путем присоединения к первой молекуле двух протонов (H). Но чтобы электроны, полученные с помощью фотосистемы ФС-2, могли выполнить задачу по образованию АТФ, им недостает энергии. Ее им предоставляет другая фотосинтетическая система — ФС-1, содержащая еще одну разновидность хлорофилла — хлорофилл-в Chl-b. В качестве переносчиков электронов в клеточных процессах участвует ряд специфических белков, объединенных в электронно-транспортную цепь.

Темновая фаза фотосинтеза (цикл Кальвина) включает в себя в качестве основного процесса восстановление углекислоты, полученной клеткой из окружающей среды, до углеводов. Восстановителем здесь служит образованный на световой фазе НАДФ-Н₂, причем эта реакция эндотермична, и необходимая для ее развития энергия поставляется за счет расщепления АТФ. Характерный тип реакции фиксации СО₂ и образования углеводов можно представить в виде



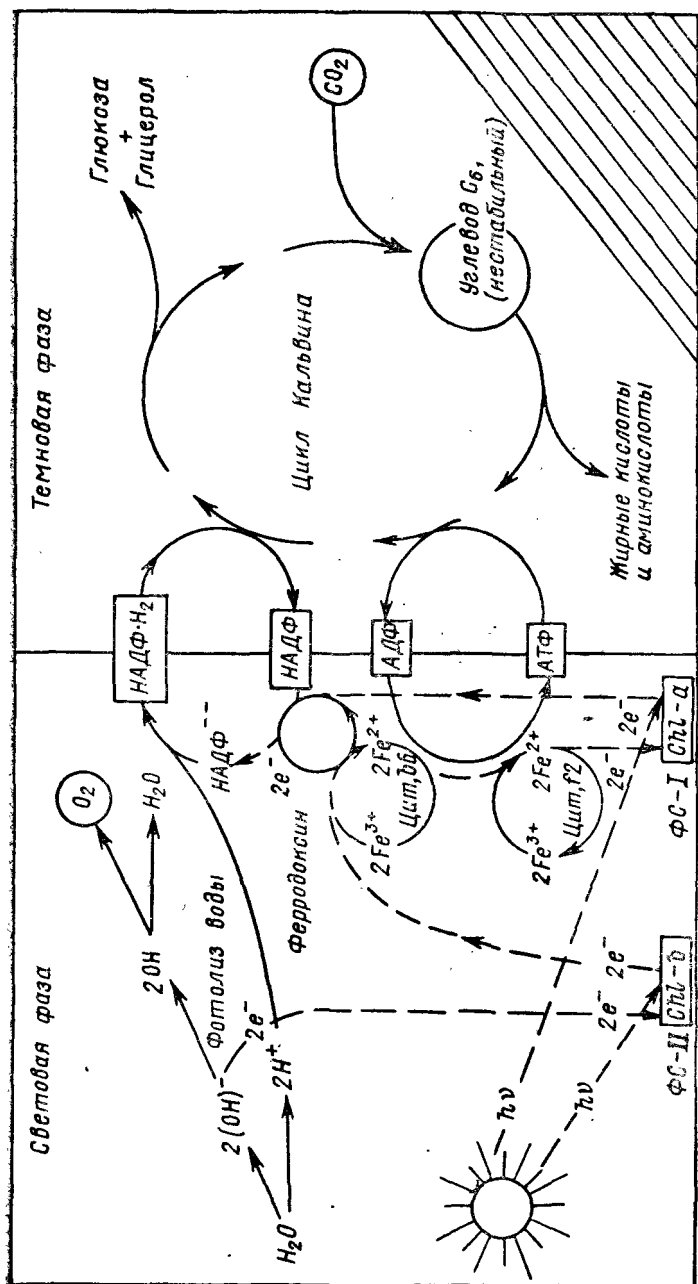


Рис. 8.3. Основные этапы фотосинтеза [26]

Энергетический смысл фотосинтеза в зеленых растениях заключается в переносе в хлоропластах клеток атома водорода вверх по энергетической лестнице. Интересно отметить, что в процессе этого переноса преодолевается разность потенциалов 1,2 В!

Здесь фотосинтез описан весьма схематично, и чтобы ознакомиться с ним более подробно лучше обратиться к обширной литературе*.

§ 8.3. Водоросли как источник энергии

По мнению специалистов наилучшими биологическими и технологическими свойствами в качестве культур для переработки в высококалорийное топливо обладают два представителя ламинариевых — морская капуста — ламинария (*Laminaria japonica*) и гигантский тихоокеанский келп (*Macrocystis pyrifera*).

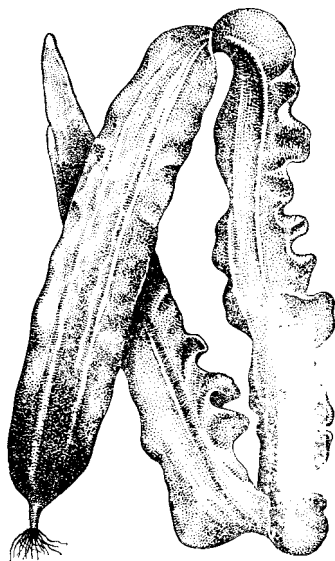


Рис. 8.4. Ламинария японская

Ламинария — двухлетняя водоросль, имеющая длинное (до 3,5 м) пластинчатое слоевище шириной в среднем 20—35 см (рис. 8.4) оливкового цвета. Пластина слоевища кожистая, неоднородная по толщине, края ее тоньше, чем середина, волнистые. В нижней части слоевище переходит в короткий ствол, заканчивающийся ризоидами, с помощью которых водоросль прикрепляется к субстрату — обычно каменистому или скалистому грунту. В ризоидах, стволе и пластине имеются ряды слизистых каналов. Водоросль отмирает на втором году жизни после интенсивного спорометания. Репродуктивные органы — спорангии и паразифизы — появляются поочередно

на обеих сторонах пластины в конце июля — начале августа.

Ламинария распространена в Желтом и Японском морях у берегов Приморья, Японии, Южных Курильских островов, юго-западного и южного Сахалина. У островов Малой Курильской гряды один из видов ламинарии имеет ширину слоевища до 50 см, а толщину до 6 см. Масса одного растения при длине 17 м достигает 8 кг. Водоросли-рекордисты растут на широких (до 2500 м) каменистых мелководьях, тянущихся вдоль островов гряды. На 1 м² дна располагается до 140 слоевищ зрелых водорослей при общей биомассе до 156 кг. Общие запасы достигают

* См., например, «Основы общей биологии». М., 1982, 437 с.

300—350 тыс. т, причем, условия произрастания таковы, что ежегодно можно собирать до 90 % общих запасов. Приведенные цифры сильно разнятся для различных районов.

Химический состав водорослей и, в частности, содержание в них воды (оно может колебаться в пределах от 73 до 91 %) изменяется в зависимости от сезона и условий произрастания. От 53 до 74 % сухого остатка приходится на органические вещества, 23—33 % — на альгиновую часть (смесь органических кис-

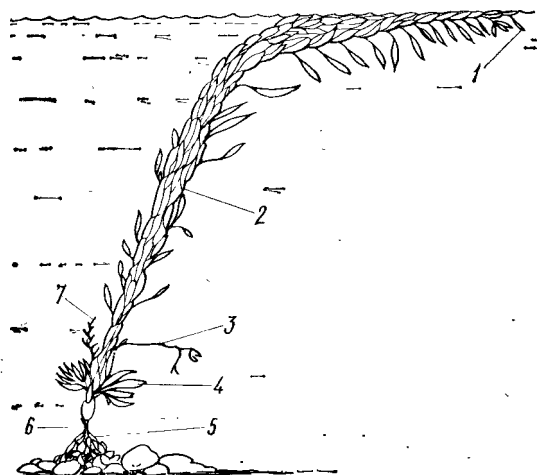


Рис. 8.5. Тихоокеанский келп — макроцистис [65].

1 — растущая вершина зрелой ветви; 2 — пучок стеблей;
3 — отмирающая ветвь; 4 — репродуктивные листья —
спороносы; 5 — ризоиды; 6 — ствол; 7 — молодой побег

лот), 7—22 % — на маннит (многоатомный кристаллический спирт) и его производные, 2,5—4,6 % — на минеральные вещества. Содержание азотистых веществ колеблется от 3,5 до 19 % [16]. Наилучших показателей ламинария достигает в возрасте слоевищ 16—17 мес, поэтому время сбора качественного урожая ограничивается двумя-тремя месяцами (с апреля по июнь).

Еще более интересное растение — гигантский тихоокеанский келп (рис. 8.5). Это крупнейшая на Земном шаре водоросль, достигающая длины до 60 м и обладающая наибольшей скоростью роста: в природных условиях до 0,6 м/сут, в лабораторных — в несколько раз большей. Так же как и ламинария, гигантский келп растет на твердом субстрате, прикрепляясь к нему ризоидами. Последние переходят в стеблеподобную ножку с похожими на листья пластинками, впоследствии дающими начало новым побегам — стволообразным слоевищам, на которых примерно через равные промежутки располагаются пластинчатые фотосинтезирующие листья. Взрослое растение насчитывает в среднем 30—40 побегов. Растение многолетнее, новые ветви генерируются после

того, как зрелые начинают стареть (через 6—9 мес активного роста). От 50 до 60 % зрелых растений формируют крону, вершина которой плавает в приповерхностном слое. Плавуность растению обеспечивают специальные органы—пневматоцисты—кожистые образования с пузырьками газа, растущие у основания листьев. Листья кроны поглощают примерно 99 % солнечного света, потребляемого растением. Постоянно возобновляющаяся крона, служащая для сбора урожая — еще одно важное достоинство гигантского келпа.

Ткани келпа состоят примерно на 87 % из воды и на 13 % из органических и минеральных веществ, причем первые составляют от 55 до 62 % сухого остатка. Среди органических веществ примерно 3/2 приходится на маннит, альгин, ламинарин, фукудан, которые могут быть подвергнуты анаэробному разложению для получения метана. Белки, составляющие 5—7 % сухого остатка, по пищевой ценности соответствуют белку сои и могут быть использованы как добавки в корм животных. Сам состав ламинариевых подсказывает необходимость комплексной переработки получаемого биосырья [65]. Дж. Куллини* сравнивает заросли гигантского келпа с настоящими подводными лесами, дающими пищу и кров массе морских организмов и рыб. То же самое можно сказать и о зарослях ламинарии японской. Роль природных «защитников» молоди эти заросли не потеряют и при искусственном разведении на океанских фермах.

Несколько слов о культивировании микроводорослей, отличающихся чрезвычайно высокой продуктивностью. Только десятки видов диатомовых, широко распространенных в морях и океанах, синтезируют за год примерно половину всего органического вещества планеты. Наиболее интересны в качестве объекта для разведения одноклеточные зеленые водоросли (к ним относятся, в частности, хлорелла). Эти водоросли уже более десяти лет культивируют с целью получения богатой углеводами (до 35 %), азотосодержащими веществами (до 45 %) и жирами (до 10 %) биомассы, годной как для дальнейшей переработки, так и для непосредственного добавления в корм сельскохозяйственным животным. Интересна возможность в широких пределах управлять содержанием отдельных веществ в этих водорослях путем изменения физических и химических условий их развития. Так, в хлорелле при интенсивном освещении можно получить концентрацию жиров до 80 % сухого остатка. Такие растительные жиры сами по себе — высокоэнергетическое вещество с удельной теплотой сгорания около 40 МДж/кг. Они могут использоваться как горючее и как пищевое сырье.

В литературе указывается на возможность получения урожайности одноклеточных до 35 г сухой массы с 1 м² водоема в сутки. Это позволяет рассчитывать на непрерывный сбор до 100 т/га сухой массы в год, что превосходит на сегодняшний день урожай

* Куллини Дж. Леса, моря. Л., 1981.

самых продуктивных сельскохозяйственных культур. Из водорослей можно получать заменители нефти. Например, на основе культуры одноклеточной зеленой водоросли дуналиелла, развивающейся в широком диапазоне соленостей и дающей в сухом остатке до 85 % многоатомного спирта — глицерола, в Пенсильванском университете (США) уже разработана технология гидрогенизации, позволяющая получать жидкие углеводороды C_{18} — C_{24} , которые могут быть смешаны с сырой нефтью перед ее перегонкой и увеличат выход моторного топлива. Процесс переработки биомассы идет под давлением $7 \cdot 10^6$ Па при температуре 400°C . В качестве побочных продуктов гидрогенизации получают углекислый газ и аммоний, разлагаемый далее на аммиак и углекислый газ, необходимые для роста самих водорослей. Выход заменителя нефти в опытах составил около 50 % от количества переработанной биомассы. По предварительным подсчетам, акватория площадью около 50 тыс. га может обеспечить получение до 5000 м^3 в сутки нефтеподобных веществ [32].

Таблица 8.1

Сопоставление энергетического выхода переработки водорослей и сухопутных сельскохозяйственных культур *

Наименование культуры/вырабатываемое топливо	Выход сухой биомассы, т/га в год	Выход топлива	
		т/га в год	ГДж/га в год
Сахарный тростник/этанол	25	4,4	160
Маннго/этанол	14,5	10,6**	380
Масличные	4	1	40
Водоросли/метанол	90	18	900
Водоросли/углеводороды	90	16	700

* Wagener K., Rebello A. Actual. Cons. nac. petrol, 1983, vol. 15, № 82, p. 33—39 (РЖН, 1984, вып. 1, реф. 1.90.106).

** Требуется энергии для дистилляции.

Сравнение энергетических возможностей переработки водорослей и сухопутных культур (табл. 8.1) убедительно говорит в пользу водорослей. Выход энергии из биомассы водорослей даже при скромных значениях продуктивности (урожайности) при любом виде переработки существенно превышает эффект, который может быть получен с помощью сельскохозяйственных культур.

§ 8.4. Океанские фермы для выращивания макроводорослей

Океанские фермы для выращивания ламинариевых на искусственном субстрате — основа современного высокопродуктивного водорослеводческого хозяйства. Искусственный субстрат был выб-

ран из-за того, что перенесение обычных методов агрокультуры в подводные хозяйства оказалось нерентабельным по целому ряду причин технологического и экологического свойства. Такой тип фермы практически не имеет ограничения по глубинам — уже разработаны конструкции, которые могут эксплуатироваться в открытом море, а это дает возможность использовать в хозяйственных целях значительные площади океанской поверхности.

Простейший вариант установки для выращивания морской капусты изображен на рис. 8.6. Подобные конструкции используются уже более 10 лет в практике отечественной марикультуры

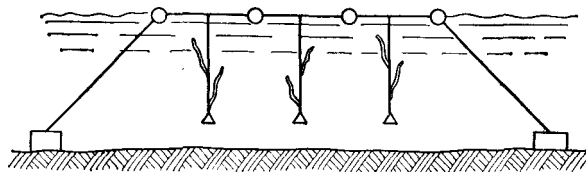


Рис. 8.6. Простейшая установка для выращивания ламинарии

в Приморье. Их отличительная особенность — съемные поводцы, служащие субстратом для закрепления спор и роста водорослей. Споры осаждают на поводцы в мелководных бассейнах на берегу. Затем в марте—апреле поводцы с молодыми растениями вывозят в море и прикрепляют к горизонтальным канатам. Собирают урожай, снимая поводцы с уже взрослыми растениями. Масса сырой ламинарии, высаженной в марте—апреле, уже в феврале следующего года достигает 50—55 кг. Без специальной подкормки и регулирования температурных условий морская ферма на основе подобных установок позволяет в условиях Приморья получать до 70 т/га сырой продукции при средней массе одного слоевища 0,8 кг в двухлетнем цикле выращивания. Цикл выращивания может быть сокращен до одного года, если высаживать на поводцы не споры, а подготовленную рассаду высотой 15 см, также выращенную в бассейнах на берегу при оптимальных условиях [16].

Работы по искусственному разведению морской капусты были начаты на Дальнем Востоке в 60-х гг., а первая водорослеводческая ферма была основана в 1972 г. Площадь искусственных морских плантаций в Приморье уже достигает 65 га при урожайности 80—100 т/га. Эти плантации обеспечивают получение всей товарной продукции. Продуктивность ферм пока низка и отстает от предельной, наблюдаемой в естественных условиях. Развитию сети ферм мешают трудности, связанные с большой долей ручного труда при современной технологии посадки, обслуживания и сбора урожая.

Дальнейшее развитие фермы этого типа получили, когда в 1974 г. была построена широко известная опытная ферма Г. Уилкокса вблизи о. Сан-Клемента примерно в 100 км от кали-

форнийского побережья США. Ферма площадью 3 га (рис. 8.7) представляла собой гибкий плот, по периметру которого размещались поплавки, соединенные полипропиленовыми канатами. Из

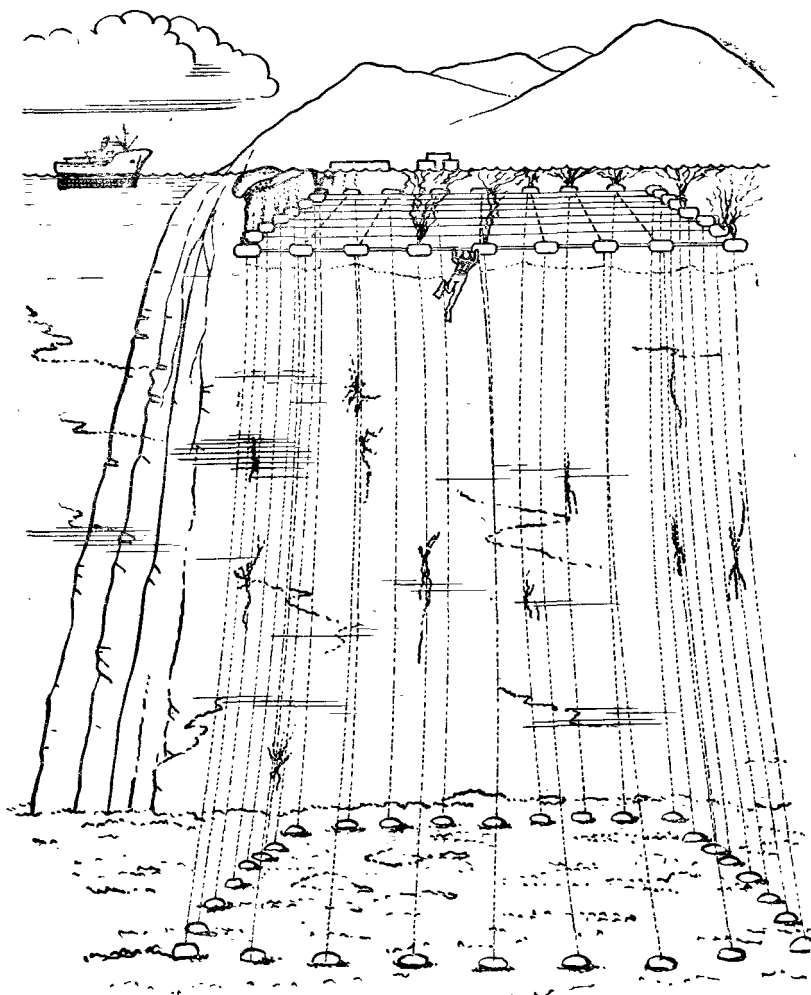


Рис. 8.7. Стационарная ферма Уилкокса [51]

таких же канатов была смонтирована рабочая часть плота — искусственный субстрат для разведения гигантского келпа. Плот удерживался системой якорей в 12 м от поверхности при глубине моря около 90 м. Это была прочная пространственная конструкция, способная противостоять штормам средней силы. Возможно, она просуществовала бы достаточно долго, если бы уже в январе 1975 г. не была разрушена неизвестным судном, команда которого не обратила внимания на навигационные знаки, защищав-

шие ферму, построенную, кстати говоря, под эгидой ВМС США и обслуживавшуюся его специалистами [51].

Эксперимент не был завершен (не удалось получить урожай культурного келпа), но он способствовал продолжению работ по созданию установок уже с искусственной подкормкой водорослей за счет подъема богатых биогенными солями глубинных вод (проста подкормка удобрениями с поверхности не дала бы нужного эффекта из-за ухудшения прозрачности воды, а ведь водорослям нужен еще и свет!).

Установка первой экспериментальной фермы была частью программы министерства энергетики США, принятой в 1975 г. и рассчитанной на 10—15 лет. Программа предусматривала проведение необходимых исследований по разведению гигантского келпа и его переработке, в основном в метан, путем анаэробного разложения. Кроме биологических исследований, конструкторских работ, отработки методов разведения келпа предстояло разработать технологию его предварительной подготовки к переработке: подобрать необходимые культуры бактерий, отработать технологию биологического разложения. Все эти работы были выполнены Научно-исследовательским институтом газа. Заключительная фаза программы предполагала создание опытно-промышленной фермы площадью около 40 тыс. га в Атлантическом или в Тихом океане. Предполагалось, что 1 га такой фермы может обеспечить среднегодовую потребность в пище и энергии от 6 до 12 чел. [65]. Очередное изменение конъюнктуры на нефтяном рынке побудило правительство США практически прекратить финансирование этих работ и передать их частным фирмам.

Следующим шагом в развитии океанских ферм стало создание совершенно новой плавучей конструкции в виде океанского буя с трубопроводом для подачи обогащенной глубинной воды. Эти работы проводились под научным руководством Научно-исследовательского института солнечной энергии отделом систем утилизации энергии компании «Дженерал электрик» (Филадельфия, США). В работах принимали участие несколько субподрядчиков, в частности работы по конструированию оборудования и его изготовлению были выполнены отделением фирмы «Глобал марин» (Ньюпорт, Калифорния). Возглавил проект Ж. Леон.

На основе результатов предыдущих работ были выработаны основные требования к новой конструкции:

- конструкция не должна создавать значительного сопротивления океанским течениям, волнам и ветру;

- она должна выдерживать без значительных повреждений шторм с высотой волн 16 м и течением 1 м/с (случается, в среднем, раз в 50 лет);

- конструкция должна полностью соответствовать биологическим требованиям, необходимым для роста келпа, и при работе не загрязнять среду;

- для проведения исследований она должна позволять установку на якорь на глубине моря примерно до 700 м;

конструкция должна быть безопасной для персонала и удобной для обслуживания;

обогащенные биогенными солями воды должны подниматься с глубины до 500 м в таком количестве, чтобы обеспечить концентрацию азота в объеме, занятом растениями, на уровне $3 \cdot 10^{-6}$ грамм-атома на литр.

Конструкция фермы (рис. 8.8) была разработана после целого ряда машинных экспериментов и испытания моделей. В качестве субстрата для разведения келпа в ней использованы синтетические канаты, натянутые на раму из 6 спиц, связанных стальными тросами. Спицы на шарнирах прикреплены к жесткой секции трубопровода на глубине примерно 18 м от поверхности воды. Благодаря шарнирам рама может складываться, что важно при установке фермы. Жесткая секция трубопровода шарнирно связана с одной стороны с корпусом буя, с другой — с трубопроводом глубоководной воды. Внутри корпуса буя установлены насосы для подъема воды, приводимые в действие 15-сильным дизелем. Элементы фермы имели при-

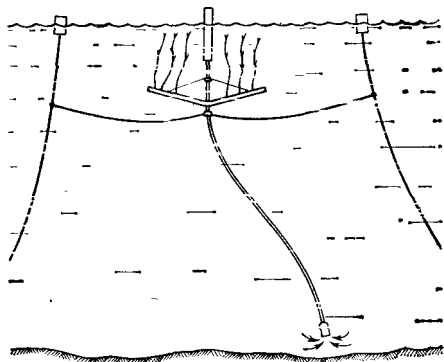


Рис. 8.8. Плавающая ферма Уилкокса [65]

мерные размеры: диаметр корпуса буя — 2,7, длина — 13 м, диаметр рамы для субстрата — 30,3 м, толщина спиц — 0,3 м, диаметр полиэтиленового трубопровода — 0,6 м при толщине стенок 75 мм. Рама фермы была рассчитана на 100 взрослых растений и имела полезную площадь примерно 0,1 га.

Ферма была установлена в сентябре 1978 г. с помощью пространственной якорной системы с четырьмя буями на глубине около 600 м в 4,5 миль мористее Лагуна Бич, несколько севернее Лос-Анджелеса. Установка шла в три приема (якорная система, буй, трубопровод). Первая попытка подключить трубопровод оказалась неудачной: при транспортировке была повреждена система датчиков усилий изгиба, необходимых для того, чтобы выполнить цикл исследований, связанных с опусканием трубопровода на глубину и контролем его поведения в процессе эксплуатации фермы. Трубопровод пришлось буксировать назад в гавань, где он монтировался перед этим из 18-метровых отрезков полиэтиленовых труб сваркой. Подобная работа по установке вертикального глубоководного трубопровода выполнялась впервые и впоследствии полученный опыт был использован при установке аналогичного трубопровода первой ОТЭС на Гавайях.

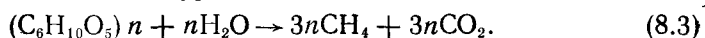
В декабре того же года водолазы посадили на ферме 102 взрослых растения, но через 2 мес сильный шторм разрушил защитный экран, поставленный вокруг фермы для уменьшения

скорости естественного течения от 0,3 до 0,05 м/с, предотвращения быстрого вымывания питательных солей и предохранения растений от разрушения об элементы конструкций. В результате все растения погибли. Через 3 мес из спор взрослых растений были выращены молодые побеги, их прикрепили к субстрату фермы, они хорошо прижились и выросли. На ферме проводились исследования по изучению скорости роста водорослей в зависимости от количества подаваемых питательных солей и внешних условий.

Все исследования по биологии келпа, также как и на стационарной ферме проводились под руководством профессора Калифорнийского института технологии В. Норфа. При этом были не только определены необходимые количества и состав потребных келпу биогенных элементов (водоросль оказалась чувствительной к содержанию азота, магния, железа), но и разработана технология трансплантации растений, контроля их роста и состояния в условиях открытого моря.

Комплекс исследований, выполненных при создании фермы-буя и ее опытной эксплуатации в течение двух лет, позволил накопить огромный фактический материал, на базе которого разработаны рекомендации для создания полупромышленной фермы-платформы площадью 400 га. Такая платформа, снабженная двигателем и энергетической установкой, приводимой в действие волнами, сможет перемещаться в океане, создавая тем самым оптимальные условия для развития водорослей. На платформе могут быть размещены установки для переработки биомассы и все необходимое для длительного проживания и работы персонала. Конкуренция с ОТЭС исключена, так как район базирования ферм-платформ будет лежать в значительно более высоких широтах с более низкими температурами воды на поверхности. Вероятно, на такой ферме придется предусмотреть механизацию посадки первичного материала и условия для его подготовки. Сложных экранов для защиты от течений не понадобится, так как при большой биомассе растения будут сами регулировать интенсивность обмена воды внутри зарослей.

В основе переработки биомассы водорослей лежит процесс разложения целлюлозоподобных веществ микроорганизмами. Для целлюлозы он описывается уравнением



Теоретически это позволяет из 1 т целлюлозы получить 416 м³ метана. Соответственно из 1 т сырого келпа, содержащей примерно 60 кг конвертируемых веществ, можно получить около 25 м³ метана, который после очистки можно непосредственно использовать в качестве горючего или переработать в этанол. Методика, разработанная в Институте газовой технологии (г. Чикаго), позволяет приблизиться к теоретическому пределу примерно на 75 %. По этой технологии измельченная масса сырого келпа с добавлением воды подвергается анаэробной обработке в реакторе при температуре 25° С с добавлением примерно 8 кг келпа на 1 м³

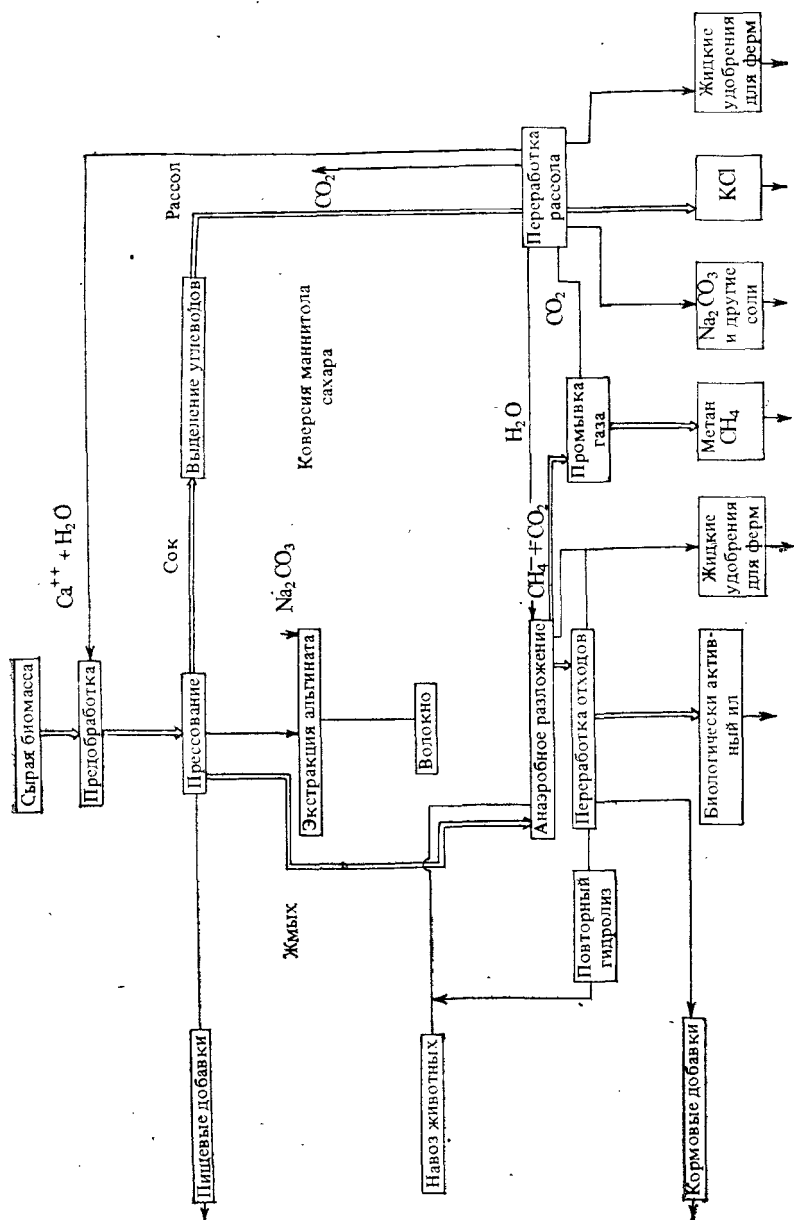


Рис. 8.9. Комплексная переработка келпа [90]

объема в сутки. Процесс почти полной переработки длится 15 сут. Разработанный процесс оказался на 25 % эффективнее подобного же для переработки смеси трав. Исследователи считают, что можно приблизиться к теоретическому пределу и при этом даже сократить время полной переработки келпа до 6 сут [65]. Есть сведения, что путем более сложной обработки можно повысить коэффициент использования первичного сырья и получать из 1 т сырого келпа количество метана, эквивалентное 18 кг светлых нефтепродуктов.

Выше речь шла об использовании и энергетике океанских водорослей. Но водорослями богаты и реки, и водохранилища, и опресненные заливы. В Аргентине после строительства на р. Парана двух плотин с водохранилищами площадью 1,3 млн. га появится возможность промышленно перерабатывать в метан водный гиацинт (*Eichornia crassipes*). Возможности нового производства оцениваются в 1—1,4 млрд. м³/год. Причем пригодные в качестве удобрений отходы производства будут содержать от 55 до 220 тыс. т азота, а это в 2—8 раз выше современных потребностей Аргентины в азотных удобрениях. Водный гиацинт интересен еще тем, что он может выращиваться на городских стоках и использоваться для их очистки. По оценке Национальной лаборатории космической технологии США (залив Сант-Луис, Миссисипи) с 1 га сточного пруда может производиться от 1 до 2 т сухой массы водного гиацинта, что позволит получать в сутки от 250 до 500 м³ метана и около 1,3 т ценных удобрений [45]. Любопытно отметить, что ботаники всегда считали водный гиацинт страшным сорняком водоемов и даже прозвали его «зеленой чумой».

Комплексная переработка водорослей не ограничивается только получением биогаза. Она позволяет получать целый ряд ценных продуктов (рис. 8.9).

§ 8.5. Проект «Биосоляр»

Выше упоминалось о возможностях искусственного выращивания микроводорослей, но приемлемого технического решения, способного обеспечить требуемые масштабы их производства, до последнего времени не было. Лишь несколько лет назад возникла идея соответствующего комплекса, которая сейчас приобрела черты проекта. Речь идет о цикле работ, выполненных сотрудниками Московского университета под руководством В. В. Алексеева и М. Я. Лямина [2] и имевших целью перенести выращивание культуры хлореллы из лабораторных условий в открытое море. Так родился отечественный проект «Биосоляр», в котором обоснована возможность непрерывного разведения микроводорослей в специальных контейнерах, плавающих на поверхности открытого водоема (рис. 8.10).

Комплекс включает систему связанных гибкими трубопроводами плавучих контейнеров и размещенное на берегу или на мор-

ской платформе оборудование для переработки водорослей и регенерации продуктов их разложения. Контейнеры, играющие роль культиваторов и светосборщиков, представляют собой плоские ячеистые поплавки из армированного полиэтилена, открытые сверху для доступа воздуха и солнечного света. Контейнеры гибкими силовыми элементами образуют на поверхности водоема податливую структуру, отслеживающую волновые колебания. Трубопроводами контейнеры связаны с отстойником и регенератором. В отстойник постоянно откачивается часть продукции биосинтеза,

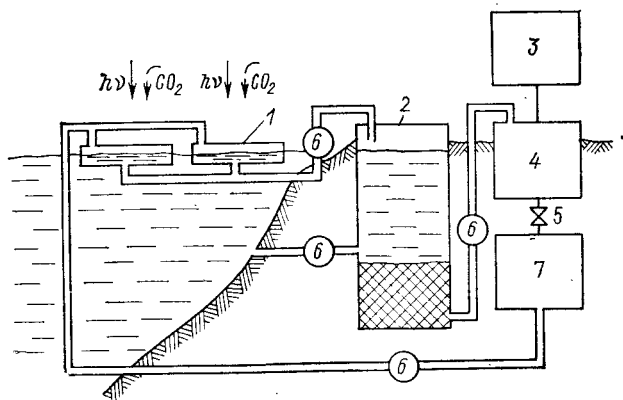


Рис. 8.10. Проект «Биосоляр» [2].

1 — контейнеры — светосборники; 2 — отстойник; 3 — хранилище метана; 4 — метантенок; 5 — вентиль; 6 — насосы; 7 — регенератор

а из регенератора в контейнеры поступают питательные вещества — остаток от анаэробной переработки в метантенке. Получаемый в метантенке биогаз содержит метан и углекислый газ в пропорции примерно 2:1. Путем дополнительного обогащения этой смеси можно добиться повышения содержания в ней метана до 90 %.

За счет использования продуктов переработки водорослей для удобрения растущих водорослей система оказывается практически замкнутой по всем биогенным элементам, кроме углерода, кислорода и водорода. Их обмен со средой происходит как через открытую поверхность контейнеров, так и за счет дополнительной подпитки водой из водоема. Закачка свежей воды обеспечивает, кроме того, возможность регулирования плавучести контейнеров за счет изменения уровня жидкости в них от нескольких до десятков сантиметров. Это дает возможность «подстраивать» контейнеры под определенные ветровые и волновые условия.

Волновые движения поверхности играют для «Биосоляра» двойственную роль. С одной стороны, структура из контейнеров может быть разрушена волнением, с другой — без волнения нет достаточно интенсивного перемешивания среды в контейнерах.

Поэтому авторы проекта предусматривают создание в открытом море волнозащитных сооружений, подыскивают оптимальные размеры контейнеров, изучают их поведение в волновом бассейне. Важную роль играет и ветер. Выступающие над водой части контейнеров будут испытывать большие ветровые нагрузки, что необходимо учитывать при проектировании элементов силового крепления, в которых в реальных условиях будут развиваться сложные напряжения.

Оценивая эффективность «Биосоляра» авторы проекта полагают, что суммарный КПД комплекса будет не ниже 6 %. Это предположение основано на том, что КПД конверсии солнечного излучения в водорослевых системах составляет 8 % и близок к максимальному для фотосинтеза, а КПД преобразования биомассы в метан — не ниже 80 %. Даже в средних широтах такой КПД позволяет получать 1 т у. т. с площади примерно 70 м². Таким образом, с площади Аральского моря можно получить не менее 1 млрд. т у. т., а это превышает 10 % всего условного топлива, добытого человечеством в 1975 г.

Оценивая стоимость проекта, В. В. Алексеев показывает, что для производства 1 млн. т у. т. (площадь контейнеров 70 км²) капитальные затраты составят примерно 100—150 млн. руб. при сроке службы конструкций 10 лет. Этот вывод позволяет считать, что затраты на «Биосоляр» окажутся примерно такими же, как и при добыче соответствующего количества нефти. Также утверждается, что по энергоотдаче (отношению количества вырабатываемой энергии за срок службы к количеству энергии, затраченной при создании системы) «Биосоляр» почти в 2 раза превосходит АЭС, для которых эта величина составляет примерно 13.

Наиболее подходящий район для размещения подобных водорослевых ферм — приэкваториальные зоны Тихого и Индийского океанов с их высокими поверхностными температурами. Но подобные конструкции могут применяться и в средней полосе нашей страны, если для их обогрева использовать излишки тепла АЭС и ТЭС. В этом случае станция мощностью 1 МВт дополнительно обеспечивает получение около 0,5 т у. т., что дает возможность увеличить ее КПД не менее чем на 20 % при возрастании затрат на строительство всего на 5—7 % [2].

«Биосоляр» — сочетание солнечной энергетики с океанской технологией. Он может стать эффективным элементом системы комплексного преобразования океанской энергии. Для этого «Биосоляр» может быть объединен с тепловыми и волновыми океанскими электростанциями, которые могут поставлять ему дополнительные биогенные элементы и СО₂ из глубинных слоев воды, обеспечивать защиту от волнения, что создаст реальную возможность размещения его в открытом море.

Основное достоинство «Биосоляра» по сравнению с другими способами преобразования солнечной энергии — отсутствие наземных концентраторов последней, причем приемником излучения

служит сама водная поверхность. Другие достоинства в том, что такой способ получения топлива практически не требует разработки каких-то особых видов оборудования: все необходимое для переработки микроводорослей в газ уже практически выпускается промышленностью. Конечно, технические трудности при реализации такого проекта достаточно велики. Необходимо в течение всего года обеспечивать водоем оптимальным подводом тепла, поддерживать на нужном уровне освещенность, определенный химический состав воды, подавлять развитие нежелательных культур, обеспечивать определенную динамику извлечения биомассы с тем, чтобы водоросли не успевали отмирать и загрязнять водоем и т. п. Ферму такого типа подстерегают и другие опасности. Велика, в частности, возможность накопления в биомассе водорослей нежелательных элементов, например тяжелых металлов, не только из-за присутствия загрязнений в воздухе и воде водоемов, но и за счет циркуляции микроэлементов в полузамкнутой системе регенерации. Это, в свою очередь, может привести к генетическим изменениям культивируемой популяции водорослей, результат которых предсказать пока не представляется возможным.

Наиболее серьезное препятствие для создания водорослевых ферм типа «Биосоляра» в высоких широтах — отсутствие постоянного в течение года солнечного облучения. Выход из положения подсказывают предлагаемые в настоящее время проекты энергетических спутников, выводимых на геостационарные орбиты. Будучи снабжены концентраторами солнечной энергии и аппаратурой для передачи ее в естественном либо преобразованном виде на приемные станции, размещенные на поверхности планеты, такие спутники могут постоянно обеспечивать определенный приток лучистой энергии. Энергия солнечного излучения неравномерно распределена по спектру в диапазоне от инфракрасных частот до рентгеновских. Преобразовывать в сверхвысокочастотное излучение и передавать на Землю в виде радиоволн, наименее подверженных ослаблению в атмосфере, можно достаточно широкий диапазон в естественном спектре. А что если каким-то образом вырезать фотосинтетическую часть из этого диапазона и в концентрированном виде подать на поверхность фермы? В случае плохой прозрачности атмосферы можно было бы все излучение преобразовывать в СВЧ-излучение. Можно было бы, наконец, запустить и специальный спутник для освещения поверхности фермы. Он не был бы слишком дорогим, так как в нем отсутствовали бы преобразователи энергии в более «транспортабельные» виды. Да и система приема была бы предельно простой: использовалась бы естественная способность водной поверхности хорошо поглощать излучение как раз на нужных длинах волн. Кроме того, в такой системе передачи энергии устраняются опасности, связанные с распространением в атмосфере достаточно плотных пучков радиоволн.

Принципиальная схема фермы с искусственным спутником дана на рис. 8.11. Такое дополнительное солнце могло бы созда-

вать достаточно высокие концентрации излучения на поверхности фермы в течение всего года. Нужно только отметить, что слишком высокая облученность и не требуется: кривая фотосинтетической активности микроводорослей имеет насыщение, выше которого нет смысла повышать облученность. При чрезмерной облученности для повышения продуктивности можно было бы активно перемешивать среду, но, как отмечает ряд авторов, это сильно удорожало бы ферму, точнее, получение биомассы.

Проекты создания крупных биоэнергетических ферм пока еще находятся в стадии отработки технических решений. Их промыш-

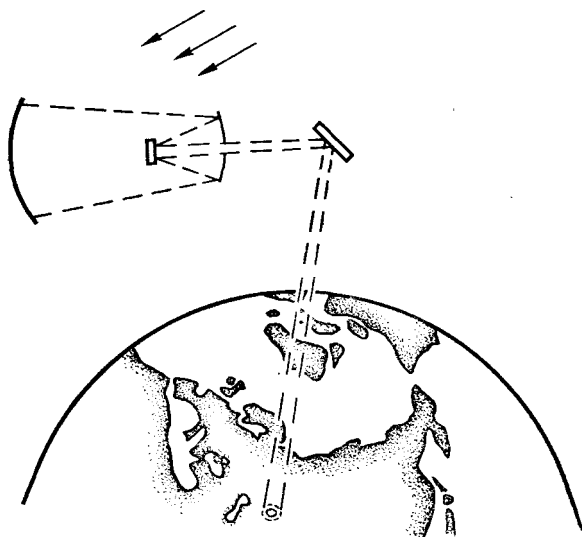


Рис. 8.11. Схема использования искусственного спутника для освещения поверхности морской фермы

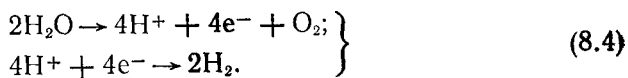
ленная реализация зависит от большого числа факторов и, в частности, от того, будет ли найден какой-нибудь более рентабельный способ фотосинтетического преобразования энергии.

§ 8.6. Биологические методы получения водорода

Один из путей, которым может пойти в будущем энергетическая биотехнология, — развитие методов получения водорода с помощью живых организмов — бактерий и водорослей — или с помощью субклеточных частиц этих организмов. Работы в этом направлении и у нас в стране, и за рубежом ведутся уже более полувека.

Идея процесса выделения фотоводорода заложена в самой природе фотосинтеза, на начальном этапе которого в хлоро-

пластах под воздействием света и при участии ферментов происходит биофотоллиз воды, причем получаемый ион водорода используется далее для синтеза углеводов. Реакция биофотоллиза идет в две стадии:



В роли катализаторов этих реакций и переносчиков элементов выступают специфические металлоферменты, объединенные в электронно-транспортную цепь (см. § 8.2).

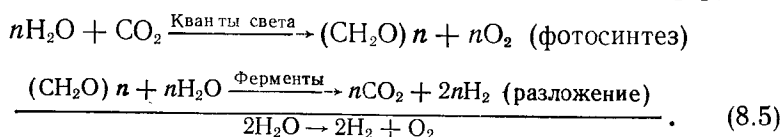
В опытах Сейберта (Институт исследования солнечной энергии, США) и других [82] была доказана возможность производства водорода живыми клетками зеленых водорослей с эффективностью, составляющей не менее 76 % общей эффективности фотосинтеза. При этом отмечено, что на производство водорода может быть использовано более 10 % падающего солнечного излучения — значительно больше, чем у современных полупроводниковых преобразователей, КПД которых пока не превышает нескольких процентов. На примере обычной водоросли хламидомонады (*Chlamydomonas reinhardtii*) было подтверждено, что образование фотоводорода и кислорода идет в молярном отношении 1,92, близком теоретическому значению 2. Было показано, что процессом можно активно управлять, добавляя в среду различные химические вещества. Более того, оказалось возможным управлять скоростью выделения фотоводорода с помощью веществ, защищающих гидрогеназу от соединения с кислородом, либо усиливающих передвижение фотоэлектронов от 84 до 174 моль на 1 мг водорослей в час.

Для того чтобы «заставить» клетки водоросли продуцировать фотоводород, оказалось достаточным определенное время выдерживать их в анаэробных условиях. На культуре клеток было показано, что заметное выделение фотоводорода начинается через 45 мин анаэробного состояния, причем максимум производительности водорода достигается через 3—5 ч выдерживания культуры клеток без кислорода. В клетках же, обработанных ацетатом натрия, выделение водорода отмечалось уже через 10—15 мин анаэробнозиса, а максимум активности наступал через 2 ч. На производительность клеток влияли различные органические субстраты, повышающие энергообмен.

Интересные результаты получены при экспериментальном изучении процесса одновременного получения водорода и кислорода путем биофотоллиза воды, осуществляемого в анаэробных условиях той же водорослью в кювете, освещаемой лампой накаливания, дававшей интенсивность облучения 125 Вт/м² [54]. Облучение культуры длилось 3 ч, а последующая выдержка в темноте — 1 ч. Скорость образования H₂ и O₂ сохранялась практически постоянной в течение более чем 100 ч и составляла для водорода примерно 2,4·10⁻⁹, а для кислорода — 0,6·10⁻⁹ моль/ч на 1 мг водоросли. Важно отметить, что у второго поколения водорослей,

выращенного из обесцветившихся за 100-часовой цикл клеток и восстановившего свой зеленый цвет, наблюдалось многократное увеличение скорости образования водорода и кислорода, составившей в первые 20 ч примерно 35 и $23 \cdot 10^{-9}$ моль/ч на 1 мг, а за 100-часовой цикл в среднем $11,6 \cdot 10^{-9}$ соответственно. После этого водоросли сохраняли свою продуцирующую способность в течение еще 140 ч на уровне, превышающем производительность первого поколения в 100-часовом цикле примерно на 30 %.

Использовать живую клетку для получения фотоводорода при изменении внешних условий заманчиво, но не менее интересно дополнить фотосинтезирующий механизм растения аппаратом, использующим часть энергии фотосинтеза с тем, чтобы растение могло нормально существовать, производя одновременно требуемый энергоноситель. Идея такого направленного изменения подсказана самой природой: у ряда растений под воздействием секретов, выделяемых насекомыми, или под воздействием бактерий происходит видоизменение тканей и образуются вздутия — так называемые галлы, в которых поселяются организмы — галлообразователи. В галлах происходит процесс изменения природы тканей, и процесс фотосинтеза как бы поворачивает вспять: образованные одной частью растения углеводы здесь разлагаются с выделением нужных организмам-паразитам водорода или метана. Этот процесс описывается следующим образом (см., например, [6])



На стадии разложения катализ может осуществляться как в самой клетке, так и бактериями. Например, для бобовых характерным галлообразователем служит бактерия физобиум (*Rhizobium*). Подсчитано, что плантации соевых бобов за счет деятельности этой бактерии выделяют в атмосферу ежегодно около 30 млрд. м³ водорода. А это эквивалентно примерно 0,2 % всей энергии, потребляемой в настоящее время США. Конечно, собрать такой водород не представляется возможным, но почему бы не создать растение, в галлах которого происходило бы интенсивное его образование в количестве, достаточном для промышленного использования?

И в этом направлении работы ведутся в исследовательских центрах мира. В Международном институте прикладного системного анализа (Лаксенбург, Австрия)*, например, Ч. Маркетти работает над созданием «водородного дерева», в котором процессы, описанные выше, происходили бы по схеме, приведенной на рис. 8.12. Листья «водородного дерева» должна, как и у обычного дерева, служить естественным коллектором солнечного излу-

* Курьер ЮНЕСКО, 1981, № 3, с. 31.

чения, а произведенный в галле водород, отведенный по трубам в хранилище, станет его продукцией. Есть вполне обоснованные надежды, что современные методы генной инженерии позволят действительно создать подобное дерево, тем более, что в природе существуют аналоги. Как такое дерево будет размножаться, как будет относиться к изменению погодных условий, к загрязнениям в среде, как будет противостоять вредителям — на эти и другие вопросы еще предстоит ответить. Однако уже сейчас можно сказать, что за приобретение новых свойств иногда приходится рас-

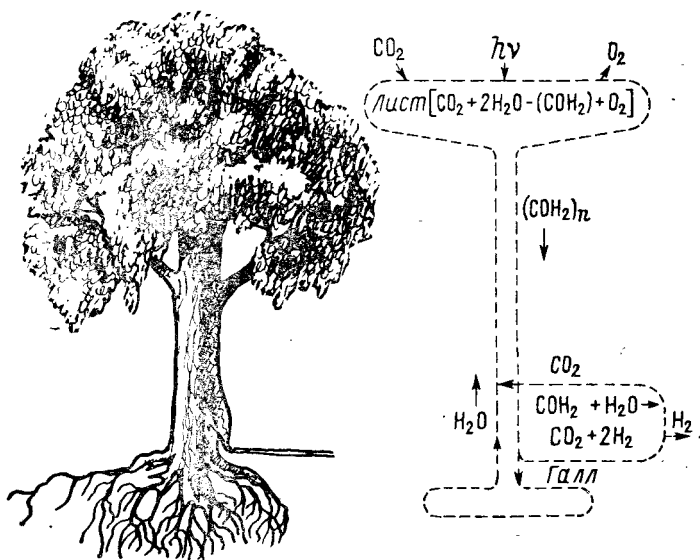


Рис. 8.12. «Водородное дерево» Ч. Маркетти

плачиваться утратой старых, часто жизненно важных. Какова будет цена «водородного дерева» пока никто не может сказать.

Еще один путь биотехнологии в энергетике — создание искусственных биологических систем для получения водорода и кислорода или фотосинтезирующих веществ, запаасающих в той или иной форме солнечную энергию. Здесь работа также ведется по нескольким направлениям. Отметим только два из них — создание искусственных систем на основе «деталей» живых клеток и создание систем, имитирующих деятельность клеток, на основе химических веществ.

В первом варианте (рис. 8.13) используется фотосинтезирующая структура, аналогичная фотореакционному центру ФС-II (см. рис. 8.3), продукция которой — соединение водорода с каким-то биотранспортирующим веществом — подается в объем, занятый катализатором. В этом объеме водород и выделяется. Во втором варианте имитируется работа уже обоих реакционных центров. За счет искусственного разделения процессов разложе-

ния воды и выделения водорода в таких системах оказывается возможным снизить интенсивность обратных реакций и увеличить выход водорода.

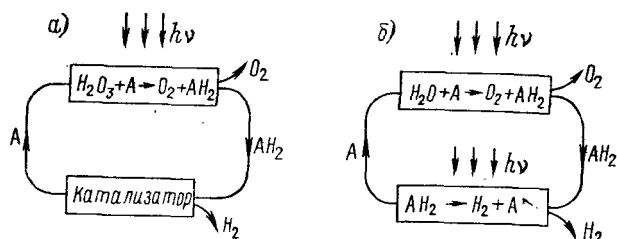


Рис. 8.13. Принцип устройства искусственной фотобиологической системы [6]: а — с использованием катализатора; б — с использованием двух фотобиологических центров

Пример конструкции «живого генератора» по второму варианту дан на рис. 8.14. В противоположность устройству фотосинтетической системы сине-зеленых водорослей реакционный центр ФС-I вместе со способной к реверсии гидрогеназой помещен здесь по одну сторону мембраны, а ФС-II с водорастворимым белком —

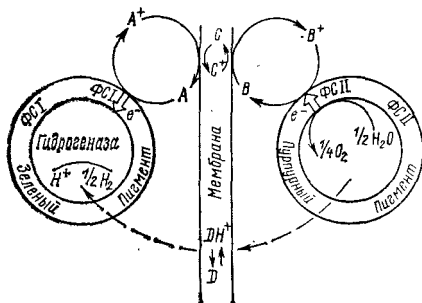


Рис. 8.14. Конструкция «живого генератора водорода» [74]

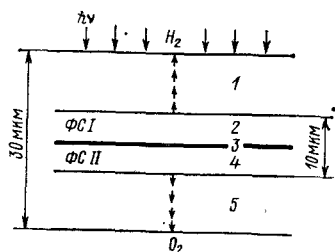


Рис. 8.15. Физические размеры «живого генератора водорода» [74].

1, 5 — защитные диффузионные мембраны; 2, 4 — фотосинтезирующие мембраны; 3 — барьерная мембрана

по другую. Роль барьерной мембраны сводится к предотвращению обратного воссоединения молекул H_2 и O_2 (мембрана «прозрачна» только для ионов водорода и электронов, переносимых в ней двумя различными переносчиками С и Д, как бы «вмонтированными» в нее).

О размерах такого генератора дает представление рис. 8.15. Генератор выполнен из набора мембран разной толщины и природы. Верхняя и нижняя — защитные мембраны. Молекулы водо-

рода и кислорода диффундируют через эти мембраны в одном направлении, а питающая фотосинтеза вода с растворенными в ней необходимыми питательными веществами — в другом. Фотосинтетические мембраны состоят из плотно упакованных пузырьков диаметром 60 нм, занимающих примерно 70 % объема мембран. Каждый пузырек содержит около 5000 молекул пигмента и примерно 50 реакционных центров. Мембрана в пузырьках ФС-I содержит пигмент от зеленых бактерий, в пузырьках ФС-II заключен пигмент синне-зеленых морских водорослей. Толщина фотосинтетических мембран выбрана так, чтобы в них полностью поглощались кванты солнечного света с соответствующей длиной волны.

Барьерная мембрана по предположению исследователей должна иметь толщину не более 10—20 нм. Для изготовления такой мембраны требуется полимерный материал, обладающий чрезвычайно низкой «прозрачностью» для водорода и кислорода. В качестве переносчиков электронов внутри мембраны может быть использован диметилбензохинон, а протонов — динитрофенол. Теоретически скорость переноса заряда электронами и протонами через барьерную мембрану будет составлять примерно 10^{-2} Кл/(см²·с). Такая скорость обеспечивает максимальную возможную выработку водорода, ограничивая производительность генератора.

М. Олссоном и Ж. Бернштейном [74] рассчитаны характеристики водородного генератора для освещенности 740 Вт/м² в предположении о 10 %-ном преобразовании энергии. Так как для освобождения 1 моля водорода из воды требуется 237 кДж, то скорость его получения должна быть 31,2 нмоль/см²/с или 0,7 мм³/см²/с. Скорость производства кислорода соответственно в 2 раза меньше. Авторы предполагают, что удастся довести парциальное давление водорода в генераторе до 10^4 Па и выпускать при этом кислород в атмосферу, где его парциальное давление составляет $9 \cdot 10^3$ Па. Они обещают, что через 5—10 лет активных исследований можно рассчитывать на создание действующего солнечно-водородного генератора.

В системах, имитирующих процессы биофотоллиза живых клеток, для разложения воды используются различные органические и неорганические катализаторы. Может, например, быть применен хлорофилл, получаемый из зеленых водорослей либо путем синтеза. Уже есть сообщения о результатах исследований, дающих возможность в перспективе получать «искусственный» хлорофилл со скоростью, превышающей скорости этого процесса в природных системах.

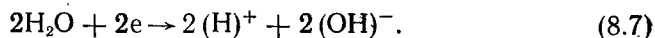
§ 8.7. Варианты энергетических биотехнологий

Живые организмы могут непосредственно вырабатывать электроэнергию. Обратимся к фотосинтезу, представив его как процесс переноса электрического заряда. В фотосинтезирующем аппарате клетки под действием облучения непрерывно генерируется фототок, а участвующие в этом процессе биоэлементы играют роль «электронного насоса», совершающего работу против сил термодинамического потенциала от молекулы воды к соединениям, близким по электрохимическому потенциалу к водородному электроду [6]. Это позволило создать топливные элементы, в которых химическая энергия органических и даже некоторых неорганических веществ преобразуется в электрическую с помощью сорбированных противоположных окисляющих и восстанавливающих ферментов либо бактерий или микроводорослей, синтезирующих эти ферменты. Например, разработаны биоэлектрические топливные элементы, на аноде которых водородогенными бактериями выделяется водород, а на катоде восстанавливается кислород, образованный хлореллой. Несколько лет назад появились сообщения о создании такого элемента с морской водой в качестве электролита, обеспечивающего плотность тока 0,15—1,25 мА/см² при напряжении 0,8—0,95 В. Подобные элементы предполагалось использовать в качестве источников питания для автономных буев и маяков, но, очевидно, сложности, связанные с необходимостью поддерживать определенные условия для существования и водорослей, и бактерий оказались непреодолимыми либо живые генераторы просто не смогли выдержать конкуренцию с проверенными химическими источниками.

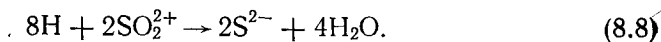
Работы в этой области ведутся уже более 20 лет. Так, например, еще в 1961 г. французские специалисты описали гальванический элемент с растворимым анодом из магния и стальным катодом с помещенной на нем колонией бактерий (*Desulfohalobium sulfophilum*), в котором в качестве электролита используется морская вода с добавкой лактата натрия для питания бактерий. На аноде элемента происходил процесс выделения в раствор ионов магния.



на катоде — процесс восстановления молекулы воды до гидроксильного иона



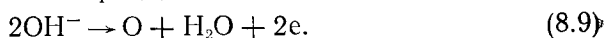
Одновременно на катоде шел процесс биохимического превращения сульфатных групп под воздействием бактерий



При этом бактерии выступали в роли переносчиков электронов на внутреннем участке электрической цепи.

Возможно размещение колонии бактерий (рода *Hydrodenomonas*), восстанавливающих кислород, донором которого служит водоросль хлорелла на катоде. Для подкормки микроорганизмов в электролит вводили дополнительные питательные вещества либо использовали вещества, содержащиеся в морской воде*.

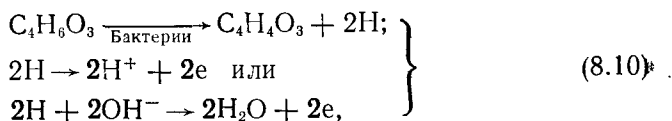
В этой же заявке описан механизм работы биохимического топливного элемента с нерасходуемыми электродами, покрытыми колониями живых организмов. На аноде помещались бактерии (*Pseudomonas*), потребляющие кислород, на катоде — синезеленая водоросль, его выделяющая. Таким образом, на катоде элемента идет реакция восстановления кислорода до OH^- , а на аноде — образование кислорода, поглощающего бактериями:



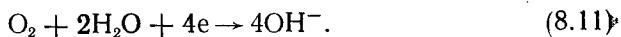
Кислород присутствует, таким образом, и у катода, и у анода, но только с различным парциальным давлением.

Возможна наконец, реализация такого элемента с нерасходуемыми электродами, в котором на них протекали бы различные микробиологические процессы. В частности, описан элемент, на аноде которого окисляется водород, выделяемый водородогенными бактериями, а на катоде восстанавливается кислород, образуемый в результате жизнедеятельности водорослей. Практически, это тип «живого» водородо-кислородного топливного элемента. С помощью элементов описанного класса получены плотности токов в диапазоне $0,15\text{—}1,25 \text{ мА/см}^2$ при напряжении $0,8\text{—}0,95 \text{ В}$.

Другой вариант биологических электрогенераторов — генераторы, основанные на использовании ферментов, в которых происходит дегидрогенизация углеводов. Например, на аноде такого генератора может идти реакция вида



а на катоде —



Реакция дегидрогенизации катализируется, например, бактериями рода *Nocardia*. Образующийся в результате водород окисляется на аноде либо до иона, либо до молекулы воды в зависимости от величины pH электролита. Образовавшиеся на катоде гидроксильные ионы мигрируют в электролите к аноду, где нейтрализуются. Работает этот элемент также по принципу топливного элемента. В этом направлении уже были получены обнадеживающие результаты: есть сообщение о создании стабильного лабораторного биологического топливного элемента, способного работать месяцами.

* Заявка Франции № 1303200, 1961 г.

Вообще же проблема повышения стабильности биогенераторов — одна из наиболее важных на пути их создания. Биосистемам свойственно старение, связанное с естественным разрушением (денатурацией) белков и биологических мембран. Время жизни хлоропластов в лабораторных установках длится от нескольких часов до нескольких суток. Повысить время жизни биосистем можно за счет использования целых или модифицированных клеток микроорганизмов, остающихся «работоспособными» до нескольких месяцев. Система из неповрежденных микроорганизмов при сохранении благоприятных условий может существовать «вечно» за счет постоянной возобновляемости.

Разработка «живых» электрогенераторов на основе водорослей и бактерий, равно как и создание подобных производителей водорода, — одна из возможных альтернатив на будущее. Правда, здесь нельзя обойти уже существующие в природе биологические электрогенераторы — генерирующие электрические импульсы ткани электрических рыб.

Известно более 300 видов рыб, имеющих электрические органы, позволяющие их владельцам ориентироваться в пространстве, отыскивать пищу, защищаться от нападения хищников и оглушать жертвы. Электрические угорь и сом, например, генерируют импульсы тока около 1 А при напряжении до 400 В, электрический скат — импульсы тока 50 А при напряжении 45–60 В. Разряды обычно состоят из нескольких (порядка десяти) импульсов длительностью от 2 до 4 мс. Электрический скат может производить до 150 разрядов в час.

Основной элемент электрических организмов таких рыб — видоизмененная мускульная клетка, так называемая «электрическая пластинка». Пластинки «собраны» в призмы, призмы — в электрические органы. Электрические угри, обитающие в реках Южной Америки, например, имеют объемистые электрические органы, занимающие до $\frac{4}{5}$ длины тела при массе, равной до $\frac{1}{3}$ массы тела (рис. 8.16). В каждой из семидесяти призм угря содержатся 6–10 пластинок, их поверхности покрыты сосочками, к пластинкам подходит множество нервных окончаний.

Появление разности потенциалов на противоположных сторонах пластинки объясняется изменением содержания ионов калия за счет изменения проницаемости для них стенок клетки под действием нервного импульса. При этом снаружи клеток преобладают положительные, а внутри — отрицательные заряды. Быстродействие механизма образования зарядов чрезвычайно велико — тысячные доли секунды. Величина разности потенциалов на одну пластинку достигает 150 мВ (электрический угорь).

Трудно представить, чтобы имело смысл разводить электрических рыб для получения электроэнергии, но вполне вероятно, что в будущем методами, например, генной инженерии можно будет создать самостоятельно живущий в искусственных условиях

* Дажоз Р. Электрические рыбы. — Наука и жизнь, 1966, № 10, с. 60–66.

электрический орган с достаточными для практических целей параметрами выходного тока. Пока работы с электрическими рыбами не выходят за рамки исследовательских. Изучаются условия их жизни, природа, поведенческие реакции. Например, американским исследователем Ф. Мандриотой показано, что такие рыбы поддаются дрессировке и могут выдавать электрические разряды по команде. На основе принципов электрической локации, вероятно подмеченных у электрических рыб, уже созданы

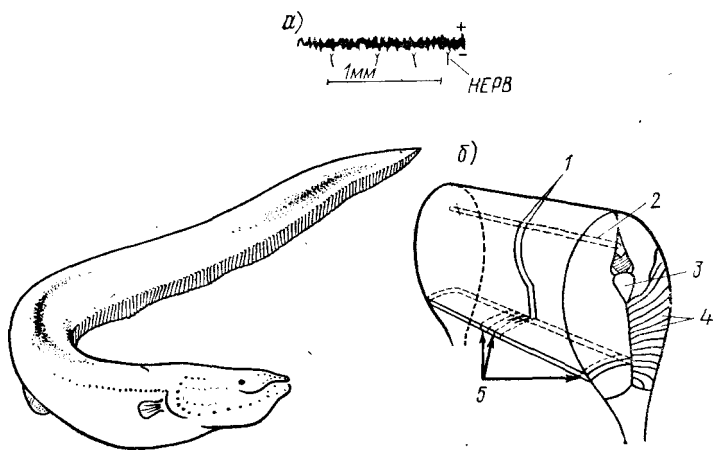


Рис. 8.16. Электрический угорь и его «электрогенератор» (по Р. Дажоу): а — электрическая пластинка; б — схема соединения пластинок.

1 — нервные окончания; 2 — спинной мозг; 3 — плавательный пузырь;
4 — призмы; 5 — электрические пластинки

портативные и надежные устройства для связи между водолазами.

Рассказ о возможности биологических объектов в энергетике будет не полон, если не отметить еще одно их свойство, которое уже используется человеком: способность накапливать определенные для каждого вида организма вещества из морской среды. В природе существуют организмы, способные накапливать соединения урана (топливо для АЭС) и другие радиоактивные элементы. Использование живых организмов — накопителей урана в энергетике очень заманчиво, особенно если учесть, что запасы этого элемента на суше истощаются, а в 1 км³ океанской воды его содержится около 11 т. Япония, например, рассчитывает к 1990 г. добывать из океанской воды 3400 т урана в год. С этой целью проводятся исследования по разработке методов адсорбции из воды урана микробной биомассой. Кроме того, в Японии ведутся опыты по применению хлореллы для производства тяжелой воды, в США — работы по микробиологической обработке отходов АЭС [32].

Мнение о том, что за биологическими методами получения энергии как за частью общей планетарной биотехнологии большое будущее, возникло не случайно: очень велики за последнее время успехи, достигнутые биологией, биофизикой, генетикой. Появилась новая отрасль промышленности — микробиологическая, мощности которой постоянно наращиваются, делая возможным получение все новых и новых видов продукции (см., например, работу [11]). Не случайно некоторые исследователи считают уже следующий век — веком биотехнологии: по темпам капиталовложений соответствующие отрасли должны будут превзойти все остальные. Ведь только на основе биотехнологии можно создать систему, полностью обеспечивающую потребности человечества в пище, одежде, энергии и сырье для промышленности. Ни одна из современных технологий не обладает таким диапазоном возможностей. Причем, что очень важно, работать такая система принципиально может исключительно на солнечной энергии, не создавая дополнительной нагрузки на среду ни отходами производства, ни избытком выделения тепла.

Мировой океан может занять в этой системе место первичного концентратора солнечной энергии, как природная, постоянно обновляющаяся среда, как звено в цепи углеродного цикла планеты. Какому виду организмов будет отдано предпочтение — трудно сказать. Вполне возможно, что это будет совершенно новые, не существующие сейчас в природе культуры. Но в любом случае океан будет поставщиком биомассы и хранителем генофонда. Можно с уверенностью говорить о системах производства биомассы в океане как о полностью управляемых и практически не подверженных природным катаклизмам и никаким образом не ухудшающих биологических показателей океана.

Если возвратиться собственно к задачам океанской энергетики на возобновляемых ресурсах, то пока можно уверенно говорить о возможностях промышленного получения энергии и энергоносителей только в результате использования биомассы как сырья для получения биогаза или жидких углеводородов. К сожалению, такой путь использования биомассы практически не отличается от пути, предусматривающего сжигание ископаемого топлива: «оно ведет к тем же нарушениям глобальных циклов (распределения тепла и углерода — В. К), что и использование продуктов прошлого фотосинтеза» [11]. Кроме того, «усиленное производство биомассы в энергетических целях конкурирует с производством пищи, волокна, строительных материалов... В условиях ограниченных ресурсов сельскохозяйственного использования земель приоритет должен быть отдан пище, поскольку для нее нет иных источников, кроме биомассы» [11].

Работы в области энергетической биотехнологии продолжают. И хотя, по словам Г. А. Заварзина, подобный вариант энергетики «находится на той же стадии развития научной разработки, как и термоядерная энергетика», мы вправе ожидать от нее в будущем значительных практических результатов.

ОКЕАНСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ

§ 9.1. Экологический подход

В случае широкомасштабного развития океанской энергетики человечеству придется иметь дело с новым типом воздействия на среду. Пожалуй, основной особенностью этого воздействия будет его наиболее сильное проявление в области, формирующей и поддерживающей на границе гидросферы и атмосферы те климатические условия, которые обеспечивают жизнь на планете.

К новым постоянно изменяющимся под натиском традиционной энергетики условиям в среде наилучшую приспособляемость до сих пор проявлял человек — виновник многих экологических неурядиц последнего времени. Действительно, численность населения планеты устойчиво растет, растет средняя продолжительность жизни, продолжается акселерация, которую некоторые исследователи относят за счет повышения в атмосфере содержания CO_2 , выделяющегося вследствие сжигания ископаемого топлива. Несколько хуже приходится прочим живым существам, населяющим планету: список животных и растений, ежегодно пополняющих Красную книгу видов, находящихся под угрозой вымирания, постоянно растет. Диаграмма рис. 9.1 показывает тенденцию изменения значения различных причин гибели животных и растений по мере увеличения масштабов внедрения человека в природу (по мере развития масштабов хозяйственной деятельности человека). Основную опасность для природы представляет именно загрязнение среды, причем в будущем оно может иметь еще более ощутимые последствия.

Наступление энергетики на основе ископаемого топлива на природу, хотя и с оговорками, но продолжается. На крупнейших реках планеты строятся гигантские гидроузлы, совершенно изменяющиеся условия обитания на значительных пространствах, растет вклад в энергетику АЭС с их гигантскими тепловыми выбросами и большим количеством радиоактивных отходов, требующих специальных условий для захоронения. В результате развития техники реакторов-размножителей на быстрых нейтронах, количество отходов должно уменьшиться почти на два порядка. Опытнo-промышленные устройства такого типа уже работают и

у нас в стране, и за рубежом, однако технология их еще не доведена до широкомасштабного внедрения.

Даже переход на такой неисчерпаемый источник энергии, как термоядерные реакции, не только не снимет экологических проблем, связанных со сбросом в среду дополнительного тепла, но и, возможно, вызовет новые: опыт человечества учит, что ни одно энергетическое нововведение не обходилось без ущерба для среды, причем часто не удавалось даже предсказать направление, в котором следовало искать грядущие потери. Безусловно,

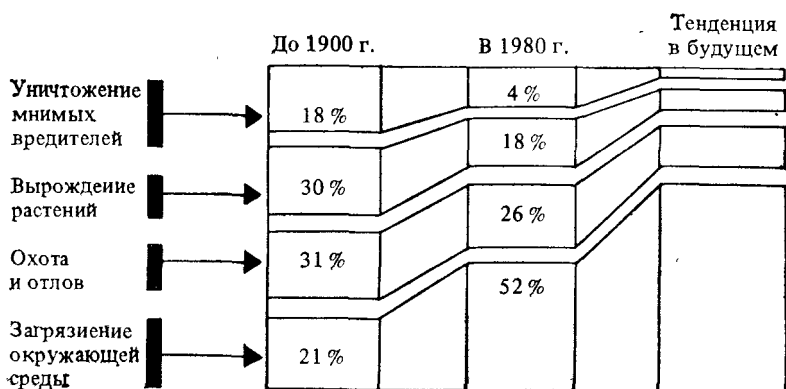


Рис. 9.1. Изменение в различные периоды причин гибели растений и животных

при использовании неограниченных ресурсов энергии будет найден способ защиты среды от перегрева. Решения подсказывает сама природа, сбрасывающая избыток энергии в виде инфракрасного излучения в космос, но на пути технического решения этой проблемы еще предстоит работать.

Кажущаяся экологическая чистота энергетики на возобновляемых океанских источниках, «даровой» характер энергии (за энергию платят, по словам С. Солтера, боги) во многом определили популярность концепции океанской ветви энергетики, привлекли к ним внимание правительств, ЮНЕСКО. Экологически чистой энергия является в том смысле, что при ее использовании для переработки в другие виды не происходит выделения в окружающую среду избыточного тепла сверх того, что поступает в результате природных процессов в соизмеримом по времени с периодом действия преобразователей временном интервале. Энергетика на возобновляемых ресурсах океана не затрагивает запасов ископаемого топлива, не дает увеличения в атмосфере концентрации вредных химических веществ и аэрозолей. Однако предварительные оценки допустимого воздействия на среду при изъятии даже части энергии природных источников были слишком приближенными. Для океанских источников, например, первоначально предполагалось, что если изъятая энергия не будет превышать не-

скольких процентов суммарной, то никакого серьезного вреда среде нанесено быть не может. Такая уверенность родилась на основе анализа естественных колебаний мощности соответствующих носителей (годовой нестабильности скоростей океанских течений, обмена энергией между океаном и атмосферой, вариации стока рек и т. д.). Возможность отклонений в ходе естественных процессов в океане, вызываемых постоянным воздействием преобразователей, возможность «обратной связи» во внимание не принимались. В то же время хорошо известны природные факторы, изменение количественного выражения которых даже на единице процентов может оказаться пагубным для биосферы. Например, изменение средней температуры атмосферы на 2—4 К может «положить начало глубочайшей перестройке всей гидродинамики атмосферы, причем в направлении, которое мы пока не можем четко себе представить» [22].

Экологический подход к океанской энергетике предусматривает изучение механизмов воздействия тех или иных технических средств на экосистемы, определение количественных критериев для оценки этого воздействия, выработку норм допустимого воздействия и рекомендации по снижению его уровня, если последнее необходимо. В этом смысле океанская энергетика не отличается от других видов технологических процессов.

Под экосистемой понимается совокупность специфического физико-химического окружения (биотопа) с сообществом живых организмов (биоценозом), населяющих данный биотоп [26]. Экосистемы — основные структурные единицы для описания биосферы, в которой они группируются вполне определенным образом и достаточно регулярно по отношению к физическим координатам. Масштабы экосистем различны: речь может идти о экосистемах, размещающихся на площади в несколько квадратных метров при толщине, измеряемой в сантиметрах, и в несколько миллионов квадратных километров при толщине в километры. Такой разброс масштабов как раз и характерен для океанских экосистем (можно говорить об укрупненных экосистемах), включающих более мелкие в качестве составных зависимых и независимых элементов. Экосистемы в масштабах морей и океанов относятся к макроэкосистемам.

Для изучения внешнего воздействия в отдельной экосистеме принято выделять характерный организм или группу организмов. В целом для биосферы таким характерным организмом является сам человек. Основные охранные службы работают как раз с целью поддержания нормальных условий жизни именно этого вида. Поэтому при оценке воздействия на природную среду океанских энергетических объектов имеет смысл выделить в отдельные группы факторы, влияющие на человека и его биотоп, и факторы, оказывающие воздействие на прочие характерные экосистемы. Такой подход принят, например, А. Моулом и В. Уильямсом [72], выделившими три категории, требующие особого внимания в плане охраны среды человека: собственно чело-

век, его здоровье и безопасность; воздействие на экологические системы и косвенно на человека; воздействие на восприятие человека. Для полноты картины следует, вероятно, добавить воздействия, ограничивающие привычные виды деятельности человека, и оценить потенциальные возможности положительного влияния, которое энергетические объекты могут привнести в природные процессы.

Очевидно, что воздействие на человека как на биологический вид идет не только через изменения в среде (в том числе и климатические) и в пище, но через изменения в роде деятельности, в условиях труда и отдыха, в общественных отношениях. Последнее время большое внимание уделяется эстетической стороне жизни, развитию индустрии отдыха как неперменной составляющей обеспечения производительности труда и т.п. В отношении человека как элемента экосистемы оценки, таким образом, должны выходить за рамки только биологических характеристик. Развитие океанской энергетики несомненно приведет к указанным изменениям по крайней мере для какой-то части человечества. Правда, последствия этого воздействия станут заметными лишь в отдаленной перспективе, и судить об изменениях в среде придется по менее масштабным экосистемам, чем макроекосистема человека, и по другим характерным организмам.

Воздействие на экосистемы океана со стороны энергетических объектов можно оценить в рамках представлений о загрязнении среды. В этом случае под загрязнением следует понимать искусственное изменение любого жизненно важного параметра среды. Природа загрязнения может быть самой различной — физической, химической, биологической. Это и изменение температуры, и изменение концентрации растворенных в воде газов или веществ, влияющих на содержание определенных газов, например кислорода, изменение прозрачности, солености, количества биогенных веществ и т.п.

Каждому загрязнению (а в такой широкой постановке, вероятно, необходимо выделять первичные и вторичные загрязнители, появление которых — следствие попадания в среду первых) свойственна своя предельно допустимая концентрация (ПДК), ниже которой оно может не приниматься во внимание. Для таких загрязнителей, имеющих, как правило, химическую и биологическую природу, важно только следить за скоростью изменения их содержания в среде с тем, чтобы вовремя принять необходимые меры по предотвращению выхода за пределы ПДК. Иные критерии приходится использовать для оценки эстетического загрязнения, которое вероятно можно ранжировать по величине занятых площадей, объемам, доступности наблюдения. Такие загрязнения особенно неприятны в зоне отдыха, а так как океанское побережье чаще всего относится к таким зонам, то понятно, что громоздкие доступные взгляду сооружения в море либо выброшенные на берег разрушенные сооружения как раз и будут относиться к такому виду загрязнения.

Для океанских загрязнителей, как впрочем и для других, характерна возможность проявления синергизма (сочетание действия отдельных компонент может привести к более значительному эффекту, нежели действие каждого из них в отдельности). Например, одновременное снижение температуры поверхностных слоев воды в тропических морях и увеличение в них концентрации биогенных элементов за счет выноса охлажденных глубинных вод может привести к повышению продуктивности этих достаточно бедных районов океана. Однако в силу сложности взаимного влияния различных факторов, утверждать это категорично нельзя: справедливость утверждения определяется конкретным диапазоном естественных условий биотопа. Другой пример синергизма, указанный в работе Ф. Уильда [91], — опасность совместного воздействия утечек хлора, используемого в качестве биоцида, и аммиака, применяемого в качестве рабочего тела ОТЭС или вырабатываемого как энергоемкость. В результате их взаимодействия в окружающей среде возможно появление стойких отравляющих веществ, более опасных, чем каждый из реагентов в отдельности.

Может показаться, что загрязнение Мирового океана промышленными стоками, удобрениями, моющими средствами уже достигло такого уровня, на фоне которого потенциальные загрязнения от только зарождающейся океанской энергетики могут показаться ничтожными. Это не совсем так. Дело в том, что загрязнения не распределены в объеме океана равномерно, а приближены к перенаселенным промышленным прибрежным зонам, эстуариям крупных рек, протекающих через промышленные районы, ко внутренним морям. На всю толщу океанских вод им мешают распространяться естественные барьеры, создаваемые в океане градиентами температуры, плотности, солености, скорости [30]. Развитие же океанской энергетики предусматривает как раз возможность воздействия на эти барьеры. Кроме того, вынесение энергоблоков в открытый океан чревато загрязнением на значительном удалении от побережья продукцией последних в зонах, ранее недоступных прямому загрязнению с суши.

И еще один важный момент. В тех прибрежных районах, где загрязнение промышленными стоками пока еще не сказывается на состоянии экосистем из-за активного разбавления стоков океанскими водами, после установки поглотителей океанской энергии могут возникнуть новые искусственные водоразделы, препятствующие оттоку загрязненных вод. Последнее особенно касается размещения в прибрежных водах протяженных сетей ВолнЭС.

§ 9.2. ОТЭС и океанская среда

ОТЭС обладают наибольшими «возможностями» в смысле загрязнения среды. Это связано и с тем, что именно из этих станций может быть создан наиболее крупный размещенный в откры-

том океане парк преобразователей энергии с разнообразием получаемых на таких станциях продуктов с ни с чем не сравнимым воздействием на динамику океанских вод. Действительно, ОТЭС, работающая по замкнутому циклу, должна перерабатывать примерно $800 \text{ м}^3/\text{с}$ океанских вод на каждые 100 МВт мощности. При развитии сети ОТЭС суммарный подъем глубинных вод может оказаться по масштабу сравнимым с воздействием на океанскую среду таких природных явлений, как естественные апвеллинги вблизи океанского побережья с резким нарастанием глубины либо тропический ураган. Известно, например, что в результате прохождения последнего из поверхностных слоев океана отбирается такое количество энергии, что температура поверхностных вод снижается на градус и более и остается пониженной в течение нескольких дней [44].

Устойчивое понижение температуры поверхностных слоев в тропических морях, которое может стать следствием продолжительной переработки тепловой энергии, серьезным образом повлияет на климат за счет снижения интенсивности испарения. В зависимости от масштабов изъятия тепловой энергии и плотности размещения ОТЭС в океане такие изменения могут быть как локальными, так и глобальными. Другой вид нарушения термического равновесия в среде, связанный с работой ОТЭС, — возможное перемешивание теплых поверхностных и холодных глубинных вод, в результате которого может произойти невыгодное для работы станций уменьшение перепада температур, равно как и губительное для теплолюбивых форм живых организмов изменение абсолютной температуры. Исследуя варианты сброса отработанной холодной воды блоком ОТЭС мощностью 100 МВт , японские специалисты, например, показали, что термическая неоднородность в океане будет проследиваться на сотни метров от места выпуска сбрасываемых вод несмотря на значительное перемешивание с окружающими водами. Протяженность контрастного шлейфа сильно зависит от наличия в зоне выпуска течений. Результаты этого анализа приведены на рис. 9.2. Данные получены при температуре сбрасываемых вод $11,1^\circ\text{C}$ и окружающей среды 28°C [59]. При таком сбросе вблизи ОТЭС образуется зона сильного возмущения гидродинамических и тепловых полей (забор теплых вод также приводит к возмущению первых!). Одно из средств борьбы с такими возмущениями — закачивание отработанных вод под слой термоклина. Но это вероятно в какой-то степени удорожает строительство ОТЭС и может привести к разрушению самого термоклина за счет образования мощного потока присоединенной жидкости вследствие сильного перемешивания сбрасываемых вод со средой [45].

Сети ОТЭС могут стать, как это ни кажется на первый взгляд парадоксальным, источником увеличения в атмосфере содержания углекислого газа, растворенного в толще вод и не перешедшего в форму нерастворимых карбонатов. В конденсаторах ОТЭС CO_2 , концентрация которого в глубинных водах примерно на

25 % выше, чем в поверхностных, из-за нагревания и снижения давления будет выделяться и попадать в атмосферу. Особенно интенсивно этот процесс может идти в теплообменниках станций

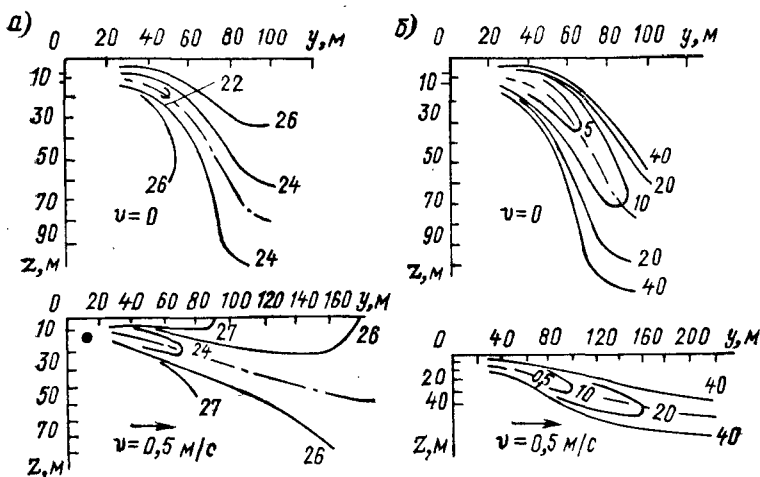


Рис. 9.2. Параметры потока воды, сбрасываемой ОТЭС мощностью 100 МВт [59]: а — изотермы (начальная температура воды 11 °С, температура в окружающей среде 28 °С); б — изоконцентрации, характеризующие степень разбавления сбрасываемых вод

открытого цикла, в которых в качестве рабочего тела используется морская вода, а охлаждение водяного пара достигается путем разбрызгивания холодной воды в атмосфере отработанного пара. Такие станции могут дать выброс CO_2 , эквивалентный 30 % выброса ТЭС с равной ОТЭС мощностью [64]. Эта «возможность» требует еще детального изучения, так как процесс растворения CO_2 в морской воде — достаточно сложная, многоэтапная реакция, в результате которой кроме CO_2 в воде присутствуют угольная кислота H_2CO_3 , гидрокарбонатный HCO_3^- и карбонатный CO_3^{2-} ионы. Отно-

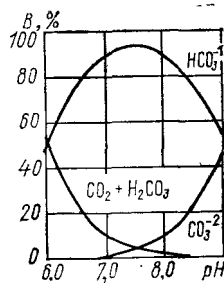


Рис. 9.3. Зависимость концентрации компонентов углеродного цикла в океане от величины рН

сительные концентрации этих компонентов зависят от концентрации ионов водорода H^+ , т. е. от величины рН воды, связанной, в свою очередь, с соленостью и температурой. Для морской воды при солености 35 ‰ нормальным считается изменение рН в пределах 7,8—8,2. При нормальном рН растворенный в воде углерод пребывает в форме гидрокарбонатного иона HCO_3^- в соотношении, иллюстрируемом рис. 9.3. Величина рН — основная в химии воды.

Сам механизм обмена CO_2 атмосферы с океаном еще не изучен настолько, чтобы с уверенностью сказать о ходе процессов его обратного поступления в атмосферу. На пути, например, прямого выделения CO_2 стоит барьер, поддерживаемый достаточно высокой величиной скорости реакции между водой и этим газом с образованием угольной кислоты.

Роль изменения содержания CO_2 в атмосфере, связанного со сжиганием ископаемого топлива, в будущей климатической ситуации еще однозначно не выяснена. Существуют два мнения. Одно из них утверждает, что повышение концентрации CO_2 из-за парникового эффекта (избирательное поглощение молекулами CO_2 инфракрасного излучения в диапазоне 12—18 мкм, где сосредоточена значительная часть избыточного тепла, переизлучаемого Мировым океаном в космическое пространство) приведет к повышению температуры и серьезным климатическим последствиям. Согласно другому мнению, повышение концентрации CO_2 вызовет интенсификацию процессов жизнедеятельности в растительном мире суши и океана, которые скомпенсируют прирост атмосферного углекислого газа, так что в какой-то период встанет даже вопрос о его недостатке. Здесь может пригодиться способность ОТЭС открытого цикла интенсифицировать обмен CO_2 глубинных и поверхностных слоев, брать на себя таким образом роль регулятора обратного поступления CO_2 в атмосферу. Результаты наблюдений за содержанием CO_2 в атмосфере, выполнявшихся в течение достаточно длительного времени на Южном полюсе, показывают, что относительное количество CO_2 остающегося в атмосфере, к общей его массе, выделяющейся вследствие промышленной деятельности и естественных процессов (океанский апвеллинг, вулканическая деятельность, лесные пожары и т. п.), существенно колеблется из года в год, отслеживая в какой-то степени колебания природных факторов, существовавших и до появления современной промышленности [35].

На примере возможности регулирования содержания CO_2 в атмосфере с помощью сетей ОТЭС мы видим принципиальную возможность получения в отдаленной перспективе положительного влияния на биосферу. Менее отдаленной перспективой кажется принципиальная возможность с помощью этих сетей стабилизировать энергообмен океан—атмосфера за счет регулирования температуры поверхностного слоя воды. Сети ОТЭС могут стать средством, предотвращающим образование тропических ураганов, на ликвидацию последствий которых ежегодно расходуется до 3 млрд. долл. Если сопоставить карту распределения температур в тропических районах океана с районами образования тайфунов, то окажется, что как раз те зоны, которые рассматриваются как места для размещения ОТЭС и есть зоны наиболее частого зарождения последних. Это подтверждает карта, приведенная на рис. 9.4. Метеорологами подмечено, что для зарождения катастрофических циклонов обязательным условием служит прогрев поверхностных вод до 26—28 °С. Крупный парк ОТЭС, гаранти-

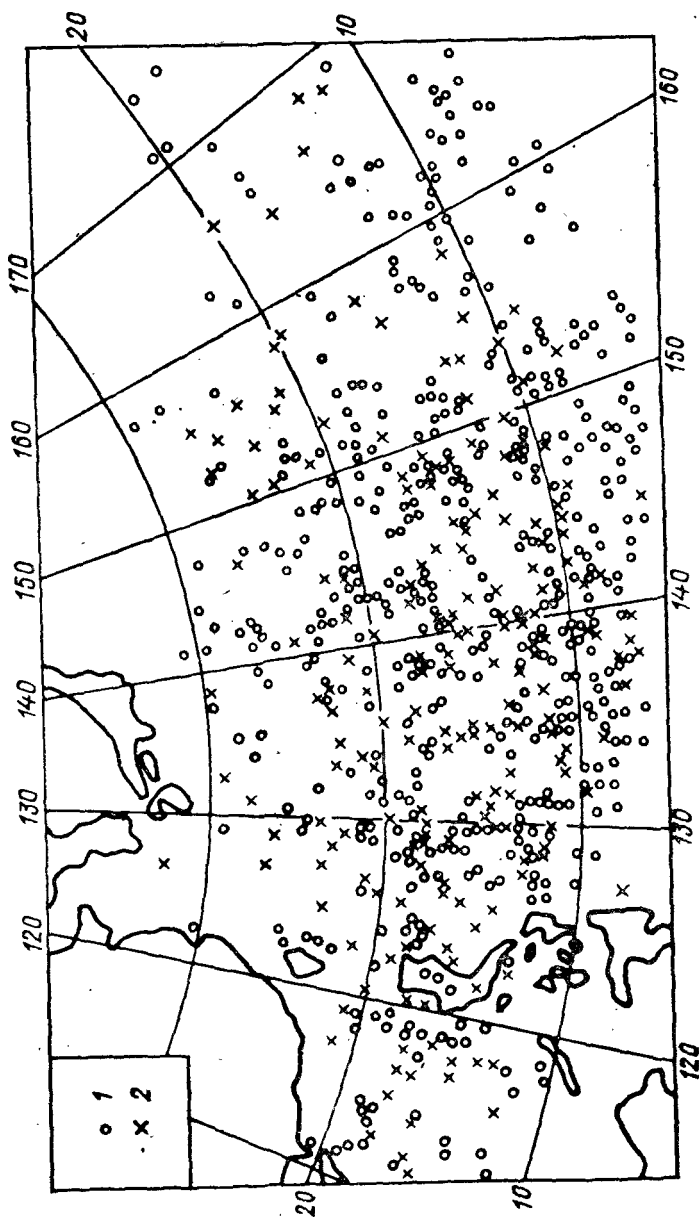


Рис. 9.4. Район зарождения циклонов в Тихом океане.
1 — по данным Аракавы за 1940—1959 гг.; 2 — по данным ДВНИГМИ за 1953—1969 гг.

рующий поддержание температуры в циклоноопасные периоды на требуемом уровне, может стать эффективным средством борьбы с этими явлениями.

До сих пор речь шла о воздействии на физические параметры океана и лишь косвенно предполагалось, что таким образом через эти параметры идет воздействие и на экосистемы. При непосредственной оценке воздействия сетей ОТЭС на биопродуктивность океана, точнее прилегающих к станциям районов океана, мы также сталкиваемся с двойственностью ситуации. С одной стороны, подъем богатых биогенными солями глубинных вод может служить фактором повышения биопродуктивности этих в общем-то бедных районов. Но кроме биогенных солей, источники которых отсутствуют в открытом океане, для повышения биопродуктивности требуется еще и кислород, содержание которого в экваториальных водах значительно ниже, чем в водах более высоких широт, где как раз и лежат самые продуктивные районы. Можно рассчитывать на то, что подъем глубинных вод позволит снизить температуру поверхностных вод хотя бы в каких-то локальных зонах с одновременным увеличением за счет повышения растворимости кислорода содержания последнего. Например, при снижении температуры на 2—3° можно рассчитывать на повышение содержания O_2 не менее чем на 10 %, что позволит создать искусственные контрасты в среде, отличающиеся повышенной продуктивностью. С другой стороны, со сбросом в среду холодных вод связана гибель теплолюбивых видов с низкой термической устойчивостью, изменение видового состава организмов, кормовой базы и т. п. Кроме того, экосистема будет постоянно подвергаться воздействию биоцидов, препятствующих обрастанию рабочих элементов станции, воздействию различных реагентов, металлов, масел и других побочных выбросов.

Большую опасность представляют утечки рабочих тел станций с замкнутым циклом. Последствия воздействия, например, аммиака на среду еще недостаточно изучены. В небольших количествах он может выступать в роли биогенного элемента, усиливая рост обрастателей. Выброс аммиака в больших количествах при авариях создает серьезную угрозу и морским обитателям и персоналу [91].

Создание первых крупномасштабных образцов ОТЭС, как, впрочем, и любых других типов преобразователей, должно сопровождаться не только проверкой работоспособности оборудования, но и всесторонним исследованием воздействия на океанскую среду. Программы проведения таких комплексных исследований уже разработаны. В цитированной выше работе Ф. Уильда, например, описана программа всестороннего изучения воздействия на среду ОТЭС, созданная по заданию министерства энергетики США специалистами университета Беркли, Калифорния. Эта программа предусматривает изучение в районе размещения опытной станции изменения физических параметров океана, химического загрязнения, эффектов, связанных с размещением в откры-

том океане крупномасштабного объекта, играющего роль искусственного рифа, социально-экономических явлений. На рис. 9.5 приведена схема размещения контрольно-измерительных средств вблизи ОТЭС, включающая средства наблюдения из космоса за изменением метеорологической обстановки и термических полей океана в районе станции, сбора сведений о физических, биологи-

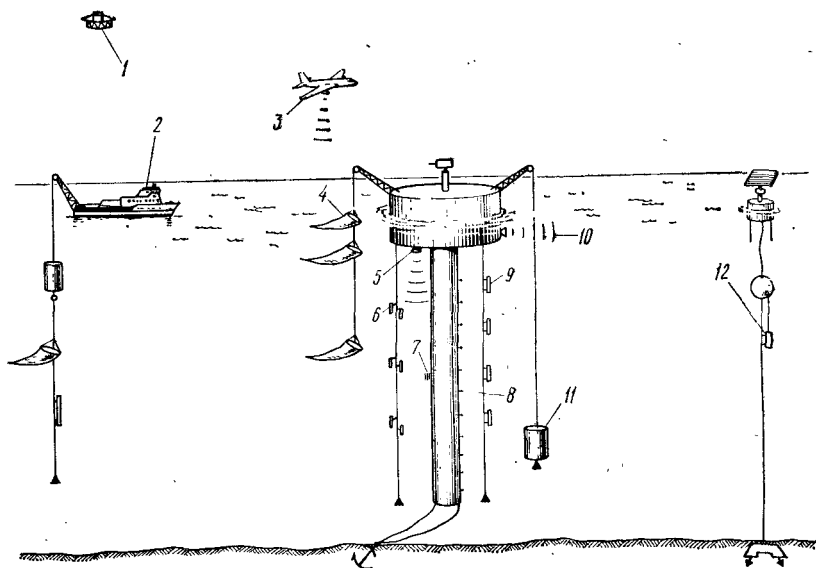


Рис. 9.5. Схема размещения контрольных средств для изучения воздействия на среду опытной ОТЭС [91].

1 — спутник с тепловыделяющими приемниками; 2 — мобильная система контроля параметров среды на различных расстояниях от ОТЭС; 3 — самолет, оборудованный фотографической и тепловыделяющей аппаратурой; 4 — лебедка с планктонными сетями; 5—10 — гидролокаторы; 6 — система изучения биологии обитания; 7 — телекамера; 8 — датчики температуры; 9 — батометры для взятия проб жидкости; 11 — система измерения физических параметров среды (турбулентность, скорость и т. п.); 12 — система для измерения физико-химических параметров воды на достаточном удалении от ОТЭС

ческих и химических изменениях в толще вод вблизи станции и на различных удалениях от нее, таких же измерений в приповерхностном слое атмосферы. Схему предполагается реализовать на первой же крупномасштабной системе [91].

В табл. 9.1, с некоторыми изменениями заимствованной из этой же работы, приводится несколько выходящий за рамки только экологии перечень исследований и разработок, которые должны сопровождать развитие концепции ОТЭС. В большой мере многие из положений таблицы имеют отношение и к другим видам преобразователей.

Основные направления исследований и разработок при развитии ОТЭС [91]

Факторы воздействия на среду	Требуемые исследования и разработки
Перемешивание океанских вод при работе ОТЭС	<p>Создание расчетной модели предсказания воздействия на среду</p> <p>Определение характеристик среды в местах потенциального размещения ОТЭС</p> <p>Описание изменений в среде в результате испытания преобразователей</p> <p>Определение влияния изменения параметров среды на характерные для мест размещения ОТЭС экосистемы</p>
Воздействие на живые организмы водозаборников ОТЭС	<p>Поиск литературных данных для определения степени воздействия на живые организмы при выполнении сходных операций по забору воды</p> <p>Наблюдение за воздействием на живые организмы опытных водозаборников ОТЭС и установление факторов, способствующих привлечению организмов</p>
Воздействие на климат	<p>Разработка расчетных моделей для предсказания изменений климата (микро- и макро-климатические изменения)</p> <p>Описание специфических для мест размещения опытных ОТЭС результирующих воздействий на климат</p> <p>Определение потенциального увеличения уровня содержания CO_2 в атмосфере в результате работы ОТЭС</p> <p>Определение потенциальных микроклиматических эффектов от дегазации при работе ОТЭС открытого цикла</p>
Воздействие биоцидов	<p>Составление банка данных по определению действия биоцидов на организмы</p> <p>Контроль, взятие проб, определение характеристик выбросов ОТЭС</p> <p>Проведение лабораторных исследований по определению эффектов, связанных с изменением концентрации биоцидов на морские экосистемы</p>
Утечка рабочих тел	<p>Создание банка данных по характеристикам воздействия на морские экосистемы различных по объему утечек потенциальных рабочих тел ОТЭС</p> <p>Изучение возможности утечек при работе опытных ОТЭС, наблюдение за воздействием утечек на экосистемы</p>

Факторы воздействия на среду	Требуемые исследования и разработки
<p>Воздействие вследствие коррозии конструкций</p>	<p>Создание банка данных по воздействию на морские организмы растворяющихся при коррозии и попадающих в окружающую среду металлов</p> <p>Контроль, взятие проб и изучение характера выброса в среду и распределения в ней различных продуктов коррозии при работе опытных станций</p>
<p>ОТЭС как искусственный риф, заселяемый мигрирующими организмами</p>	<p>Изучение факторов, способствующих привлечению организмов к станциям</p> <p>Изучение динамики заселения, зональности факторов, регулирующих жизнедеятельность искусственного биотопа</p>
<p>Воздействие на персонал</p>	<p>Разработка программ обеспечения безопасности персонала при работе с характерными для ОТЭС химическими соединениями, в том числе и производимыми на ОТЭС</p>
<p>Вторичное экологическое воздействие</p>	<p>Оценка вторичного воздействия (использование суши, препятствие движению воздуха и воды, твердые и жидкие отходы и т. п.), связанного с различными конструктивными особенностями ОТЭС</p> <p>Оценка социально-экономического воздействия развития сетей ОТЭС</p> <p>Оценка социальных аспектов и вторичного воздействия передачи электроэнергии возможным потребителям</p> <p>Создание банка данных по характеристикам распространения загрязненных вод и воздуха, возможным при использовании ОТЭС в качестве заводов по производству различных химических соединений; разработка приемлемых методов контроля (мониторинга) природной среды</p>
<p>Факторы юридического характера</p>	<p>Периодическое проведение изучения международного права и, в частности, морского права применительно к использованию ОТЭС</p> <p>Проведение глубокого изучения потенциальных юридических или общественных споров и разногласий, которые могут возникнуть при размещении ОТЭС в определенных районах океана</p> <p>Разработка правовых основ использования систем ОТЭС в интересах всего человечества (мирового сообщества)</p>

§ 9.3. Особенности воздействия на среду ветровых установок

Основные факторы, которые необходимо учитывать при оценке экологических особенностей ОВЭС, — это шум, в том числе аэродинамический, возможность разрушения конструкций, помехи миграциям птиц, помехи человеческой деятельности. Вероятно, в наименьшей степени эти факторы будут проявляться при работе ОВЭС, размещенных вдали побережья на искусственных островах или платформах, а в наибольшей — непосредственно на побережья, в том числе и на побережье естественных островов. В последнем случае к перечисленным факторам необходимо добавить и эстетическое загрязнение при визуальном восприятии ВЭУ. Вопросы уменьшения отрицательного влияния на восприятие таких сооружений сейчас исследуются. Прорабатываются формы конструкций опор, виды отделки и окраски, варианты размещения ВЭУ или целой группы ВЭУ в ландшафте, особенно если последний представляет собой эстетическую ценность. С таким вопросом столкнулись, например, французские энергетики при выборе места для сооружения ВЭУ на о. Уэссан (западная оконечность п-ва Бретань), на котором с целью сохранения ландшафта запрещено даже сооружение линий электропередач [34].

Достаточно полный обзор исследований отрицательных факторов, связанных с установкой и эксплуатацией ВЭУ большой мощности, выполнен П. Маннингом [67]. Особое внимание в обзоре уделено шумовым характеристикам мощных ВЭУ. Аэродинамический шум возникает как при обтекании воздушным потоком опорных конструкций и лопастей, так и при взаимодействии вращающихся лопастей с потоком. Повышение уровня шума наблюдается особенно у мощных установок с окружными скоростями концов крыльев, достигающими до 100—120 м/с. Для ВЭУ типа MOD-2 измерения акустического шума дали уровень 56 дБ на расстоянии 400 м и 30 дБ на расстоянии 2100 м. MOD-2 состоит из трех укрепленных на общем основании крыльевых турбин мощностью 2,5 МВт каждая. Частотный спектр этой установки сложен по составу: он имеет два максимума — один на частоте 1 кГц и второй в диапазоне от 20 до 60 Гц.

В обзоре отмечено также, что значительное повышение уровня шума может возникать при работе группы ВЭУ из-за того, что каждая последующая турбина взаимодействует с уже возмущенным предыдущей турбиной потоком. По теоретическим оценкам для групп ВЭУ, размещенных с шагом 6—10 диаметров ветроколеса, степень турбулентности потока должна увеличиваться на 30—50 %. Необходимо добавить, что шум влияет не только на нервную систему человека, повышая его утомляемость и даже приводя к серьезным нервным заболеваниям, но и на животный мир, резко обедняющий в зоне повышенных акустических нагрузок от любых промышленных объектов. Нормы шумового загрязнения для промышленных зон и для зон отдыха приняты во всех странах, но распространяются они только на человека.

Установка гигантских преобразователей энергии ветра сопряжена с вероятностью их разрушения. Последнее может происходить как в случае превышения ветровыми нагрузками расчетных значений, а это особенно характерно для районов побережья, подверженных действию циклонов, так и при нормальной работе вследствие усталостных явлений в конструктивных элементах или из-за отказа автоматики. В холодных районах существует опасность обледенения лопастей. По расчетным данным вероятность падения лопастей установок большой мощности на расстояние более 300 м не превышает 50 %. Средствами борьбы с такого рода авариями могут быть различные контрольные и противообледенительные системы. Но несмотря на наличие таковых необходимо введение зон отчуждения вокруг мощных ВЭУ, строгое соблюдение режимов эксплуатации и техники безопасности при их обслуживании.

И удаленные в море, и размещенные на побережье ВЭУ представляют опасность для пернатых, особенно в случае их установки на путях миграции. Определена вероятность соударения птиц с лопастями при пролете через плоскость, ометаемую турбиной быстроходной ВЭУ, со скоростью 4 и 15 м/с, оцениваемая в 26 и 6 % соответственно. Таким образом, наибольшей опасности подвергаются крупные перелетные птицы.

Из факторов, относящихся к помехам человеческой деятельности, и П. Маннингом и другими авторами отмечаются нарушение распространения радиоволн СВЧ и УКВ диапазонов из-за отражения сигналов от движущихся лопастей, возможность помех для авиации. В частности, помехи приему телевизионных передач при работе ВЭУ MOD-2 наблюдались на расстоянии до 2—3 км, а для других типов установок — даже до 6 км. Разработаны меры по борьбе с такими помехами путем использования радиопрозрачных композитных материалов для изготовления лопастей и путем применения ретрансляторов радиосигналов. Для обеспечения безопасности полетов самолетов предусматривается установка сигнальных огней на вершинах башен и на концах лопастей. Последние могут включаться только при вертикальном положении крыльев.

К последней группе факторов следует отнести и возможное ослабление силы ветров в зоне расположения крупного парка ВЭУ, которое может достаточно серьезно повлиять на атмосферную циркуляцию.

Это, в свою очередь, может повлечь за собой нарушение перемещения воздушных масс вблизи расположенных рядом с таким парком промышленных районов и усиление загрязнения воздушного бассейна.

Анализ приведенных факторов показывает, что при правильном выборе мест размещения ВЭУ по отношению к природным, промышленным и жилым объектам, при правильной их эксплуатации можно свести воздействие этих видов преобразователей на экологию к минимуму.

§ 9.4. Океанские гидроэлектростанции и среда

Группа океанских гидроэлектростанций объединяет в себя собственно преобразователи кинетической энергии естественных океанских течений, преобразователи энергии приливно-отливных течений и искусственно созданных перепадов уровней в океанских проливах.

Теоретически наиболее изучен, вероятно, вопрос о экологическом воздействии системы ОГЭС на Флоридское течение, где ожидается появление первых крупномасштабных преобразователей. Интересна эволюция представлений о возможном уровне изъятия энергии из этого течения. Если на уровне постановки задачи десять лет тому назад речь шла об изъятии 4 % суммарной энергии, то сейчас указывается цифра 1,2 % [81]. Судя по данным этой же работы, выполнены исследования по оценке возможного волнообразования, турбулентного перемешивания вод, изменения температуры вследствие торможения потока. Из всех этих параметров только турбулизация течения внушает некоторые опасения из-за интенсификации перемешивания, могущей отрицательно повлиять на планктон при недостаточном заглублении турбин (имеется в виду проект «Кориолис»). Достаточное заглубление, а по этому проекту оно предполагается примерно на 25 м, должно предельно снизить воздействие на миграцию рыб, развитие планктона, обеспечить свободу судоходству. В целом, учитывая, что расход Флоридского течения составляет лишь 10 % расхода Гольфстрима, воздействие на перенос тепла в Атлантическом океане энергообъектов, установленных во Флоридском проливе, будет относительно незначительным.

Может быть, исключение составляют годы сильных положительных колебаний расхода, когда последний увеличивается по сравнению со средним значением ($10 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$) в 3 раза и более.

Оптимизм этих оценок достаточно высок. В качестве положительного фактора, позволяющего компенсировать последствия возможных ошибок при оценках, указывается то обстоятельство, что процесс установки промышленных преобразователей энергии во Флоридском проливе по чисто технологическим соображениям будет достаточно медленным и что до проявления серьезных расхождений в оценках и в реальных изменениях в среде у энергетиков будет достаточно времени на перестройку. В этом смысле преобразователи «локального базирования» выгодно отличаются от устройств, имеющих протяженные капитальные гидротехнические сооружения типа плотин. В последнем случае судить об изменениях в среде можно только после завершения строительства, требующего, как правило, гигантских материальных затрат. Именно поэтому человечество всегда будет с осторожностью относиться ко всем проектам изменения циркуляции вод в океане, связанным с созданием плотин в проливах или изменением глубин последних по крайней мере до тех пор, пока соответствующие

расчеты климатических изменений в среде не приобретут требуемой достоверности.

Одно из таких мест, давно привлекающих внимание гидроэнергетиков, — Гибралтарский пролив, через который Средиземное море «питается», по словам А. Лакомба [18], водами Атлантики. Сравнительно небольшая ширина пролива (около 18 км в самом узком сечении) и глубины, не превышающей 350 м, позволяют современными средствами построить здесь плотину, которая бы отсекла море от океана, позволила бы за счет испарения снизить уровень воды в нем на несколько десятков метров и обеспечить перепад, необходимый для эффективной работы турбогенераторов электростанции, размещенной в плотине или в порогах, слагающих берега *. Однако структура водообмена между морем и океаном в этом проливе достаточно сложна. Оказывается, если в Средиземное море поступает с поверхностными водами около 1 млн м³/с при солёности примерно 36,2‰, то вытекает из него через глубинное течение этого же пролива всего на 5 % меньше воды, но солёностью 38,2‰, т.е. на 5 % выше, чем у поверхностных вод. Этот средний режим колеблется, компенсируя изменения климатических и погодных флуктуаций [23].

Относительно этого проекта известен прогноз М. Юинга о последствиях реализации строительства дамбы. Согласно этому прогнозу, прекращение поступления более солёных вод в Атлантический океан может уже через три десятилетия привести к такому уменьшению солёности в нем, что повлечет за собой полное изменение циркуляции вод океана, результатом которых может в конечном итоге стать прекращение поступления тёплых вод Гольфстрима в Арктику и похолодание там с одновременным потеплением в континентальной Европе. В свое время этот прогноз вызвал отрицательную реакцию другого известного океанолога Г. Стоммела, указавшего, что на основе предположений М. Юинга можно было бы с таким же успехом предсказать и обратные процессы [23]. Этот пример приведен для того, чтобы показать сложность и неоднозначность подобных прогнозов при современном состоянии науки об океане даже для стационарных процессов обмена водных масс.

Еще большие трудности возникают при попытке в прогнозах учесть особенности океанской изменчивости. На рис. 9.6 приведена схема одного из меандров Гольфстрима. Отрываясь от основного течения, такой меандр может достаточно время существовать в океане, влияя на перенос тепла и, следовательно, на климат в Европе. Эти сравнительно подвижные и крупномасштабные вихри возникают случайным образом в результате такого взаимодействия Гольфстрима с прибрежными и океаническими водными массами, при котором течение, резко изменив направление движения в сторону открытого моря за мысом Хаттерас, становится не-

* Другой вариант гидроузла в этом проливе, не требующий столь сильного воздействия на среду, рассмотрен в § 5.5.

устойчивым. Сам же поворот объясняется сложным взаимодействием в пограничном слое из-за резкого изменения характера рельефа дна вблизи точки поворота. Сейчас еще нет единого мнения относительно как причины поворота, так и причин меандрирования * Гольфстрима.

Крупномасштабные вихри диаметром до 200 км со скоростями течений внутри их от 20 до 100 см/с существуют десятки суток. Весь вихрь медленно продвигается вдоль основного течения.

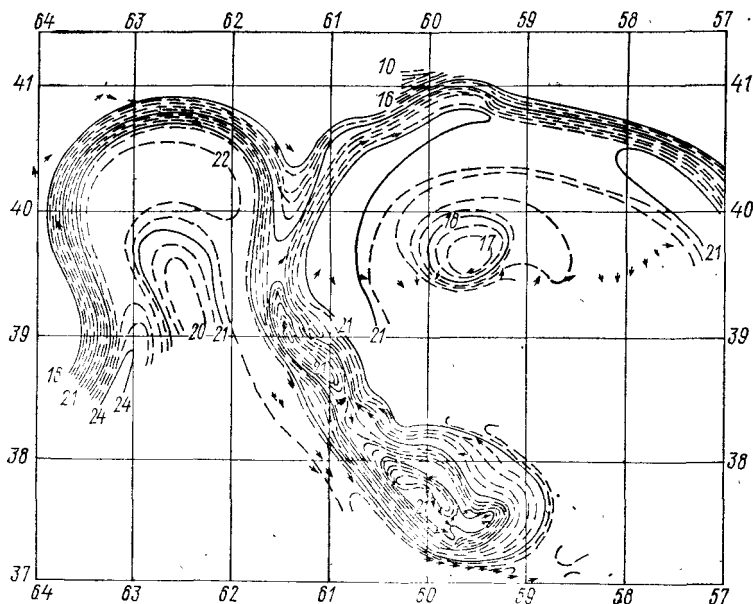


Рис. 9.6. Замкнутый меандр в зоне Гольфстрима. Показаны изотермы (температура в градусах по Цельсию) и направления течений [18]

Возможность изменять направление движения океанских течений за счет внесения возмущений в сравнительно узком пограничном слое интересна не только для Гольфстрима, но и для Куросио. Если трудно себе представить возможность создания каких-либо сооружений, непосредственно отклоняющих эти мощные потоки для того, чтобы повлиять на климат целых регионов, то за счет установки преобразователей кинетической энергии в пограничных слоях управление течениями кажется вполне возможным.

Относительно влияния на природу установки преобразователей энергии течений в проливах со сравнительно небольшими расходами можно утверждать, что никаких серьезных климатических изменений в этом случае произойти не может. Однако этого нельзя сказать об отсутствии воздействия на экологию: проливы

* Толмазин А. Океан в движении. Л., 1976.

часто служат путями естественной миграции морских животных, и их перекрытие может серьезно подорвать основы воспроизводства рыб и морских животных, имеющих промысловое значение. Последнее особенно касается проливов Курильской гряды, через которые происходит миграция лососевых, сельди, морского котика и других ценных животных.

§ 9.5. Особенности воздействия на среду волновых электростанций

Волновые электростанции могут быть построены в открытом море вдали от побережья, вблизи побережья, непосредственно на берегу. Наибольшее негативное влияние на природную среду они как раз могут оказать, если будут установлены в зоне вблизи побережья, где начинают проявляться эффекты, связанные с переносом горных пород, в результате которых формируется вся прибрежная полоса. Дело в том, что в прибрежной зоне постоянно идут процессы разрушения и наслаивания пород, слагающих дно: волны, волновые, ветровые и приливные течения постоянно сортируют разрушенные породы, выносят их из мест разрушения и перемещают на значительные расстояния как вдоль, так и в сторону от побережья. При этом глинистые частицы, ил, мелкий песок имеют возможность транспортироваться при обычных погодных условиях сравнительно слабыми потоками жидкости. Крупный песок и галька движутся под действием обрушивающихся волн в зоне прибоя. Все процессы в десятки и сотни раз интенсифицируются во время штормов. За счет их география побережья постоянно изменяется, а всякое внедрение в эти процессы приводит к последствиям, которые даже не всегда оказывается возможным предсказать.

С самого начала строительства различных сооружений на побережье человечество сталкивается с постоянно возникающими проблемами, связанными либо с прекращением поступления наносов и появлением затопляемых и разрушаемых участков, либо, наоборот, с накоплением осадочных пород, препятствующим судоходству и другой деятельности. К сходным процессам приводят строительство различных защитных стенок, препятствующих поступлению в море наносов, и любые изменения ландшафтов, в результате которых уменьшается подвижность пляжного материала. Аналогично действует удаление растительности, приводящее к усилению ветровой эрозии и выносу выветриваемых пород из системы береговой зоны, изъятие пляжного материала для строительства, различные землечерпательные работы.

На «борьбу» с морем постоянно требуется все больше средств, поэтому кажется разумным вообще ограничить деятельность в прибрежной зоне, чтобы в какой-то мере разрешить конфликт между использованием и сохранением береговых ресурсов. С этой целью предлагается, например, ранжировать отдельные участки

береговой зоны по степени влияния на процессы динамики и в зависимости от критичности к той или иной деятельности либо полностью запретить на них размещение сооружений, либо разрешить таковое с определенными ограничениями. В качестве принципа управления состоянием береговых зон предлагается не пытаться сохранять неизменными их границы, и насколько это возможно поддерживать процессы естественных колебаний границ.

Природу перемещения наносов под действием волн и течений поясняет рис. 9.7, где показана схема циркуляции в прибрежной полосе. Во время штормов перпендикулярные к береговой линии

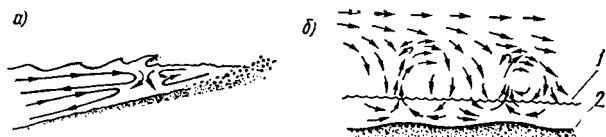


Рис. 9.7. Схема циркуляции наносов в прибрежной зоне:
а — вертикальный разрез; б — вид в плане.

1 — зона бурунов; 2 — береговая линия

разрывные течения усиливаются, увеличивается и степень «разжижения» грунта под действием обрушивающихся волн. Все это ведет к усилению транспорта наносов. На характер последнего влияет и начальное направление прихода волн, и начальная конфигурация берега, и география дна. В мелководной прибрежной зоне при глубине меньше половины длины волны происходит изменение направления движения волн, возможна даже фокусировка волн на определенных участках побережья, где разрушения от действия волн будут более заметными.

Любые варианты преобразователей волновой энергии так или иначе изменяют волновой режим побережья. В одних случаях это приводит лишь к заметному ослаблению амплитуды волн, воздействующих на побережье, например если используются плавучие системы, в других — к серьезному изменению динамики придонных вод и к изменению характера перемещения наносов. В каждом конкретном случае система волновых преобразователей должна рассматриваться как гидротехническое сооружение, строительство которого может привести к существенному изменению географии прибрежной зоны, повлечь нарушение динамики вод и в конечном счете привести к последствиям, нарушающим динамическое равновесие, поддерживающее естественное состояние побережья.

В качестве вторичного экологического воздействия волновых электростанций можно отметить возможность изменения условий существования некоторых видов гидробионтов, в частности бентосных организмов, для которых важна определенная скорость поступления питательных веществ, в естественных условиях обеспечиваемая транспортом наносов.

§ 9.6. Приливные станции и окружающая среда

Плотины ПЭС как бы выделяют в районе постройки две под-области — внутреннюю (бассейн-аккумулятор) и внешнюю (подпитывающее этот бассейн море). Влияние на среду в обеих под-областях проявляется по-разному, но все вносимые возмущения связаны так или иначе с конкретной географией побережья и дна, особенностями распространения приливных волн, размещением плотин станций и их мощностью, определяющей размеры бассейнов. Для внутренних подобластей не последнюю роль играет и режим эксплуатации станций.

Во внутренних подобластях из-за появления плотин с водопропускными устройствами происходит полная перестройка режимов течения и частичная перестройка режимов водообмена с морем. Это влечет за собой изменение режимов движения наносов (последние особенно сильно сказываются на работе гидроузлов в том случае, если бассейн размещен в эстуарии реки), возможно также некоторое изменение качества воды, изменение видового состава животных. Воздействие на животный мир связано с тем, что крупные животные не могут проходить через плотины, а относительно мелкие, в основном рыбы, свободно проникают через водопропускные каналы и даже водоводы низкооборотных турбин. Это обстоятельство может иметь и положительный, и отрицательный эффект. На Кислогубской ПЭС, например, после пуска станции длительное время наблюдалось значительное обогащение фауны за счет морских рыб, проникавших в бассейн. Однако для того, чтобы новый биотоп мог нормально существовать, было необходимо обеспечить постоянный режим работы водопропускных сооружений для обновления воды в бассейне. В противном случае начиналась гибель животных.

В этом случае, если ПЭС используется в режиме ГАЭС, потребляющей избыток энергии в энергосистеме на закачку воды в бассейн, возможно повышение уровня воды по сравнению с достигаемым во время естественного прилива. Это также может иметь отрицательные последствия для животного мира, так как затоплению могут подвергнуться участки, ранее не попадавшие в зону прилива, результатом чего станет изменение, даже правильное сказать, полная перестройка биотопов. Из-за ухудшения водообмена с открытым морем особенно при наличии стока в бассейн ПЭС загрязненных вод в нем может произойти накопление загрязнений, что серьезно повлияет на качество воды и животный мир. В любом случае внутренние эффекты от создания бассейнов приливных станций по масштабу ограничены пределами их акваторий и затопляемых участков побережья.

Во внешних же подобластях воздействие на окружающую среду может быть по масштабам более сильно выражено, чем во внутренних. Это связано с тем, что строительство плотин оказывает определенное влияние на приливный режим и приливные течения в районе, значительно более протяженном, чем бассейн

ПЭС, выделяемый плотиной. Возможные эффекты увеличения подъема уровня прилива и изменения скорости течений зависят от географических факторов и должны детально изучаться в каждом конкретном случае.

Наибольший объем подобных работ был в свое время выполнен для заливов Мэн и Фанди на границе США и Канады. Различными исследователями для этого района (см. рис. 9.8), было, в частности, показано, как размещение плотин в разных участ-

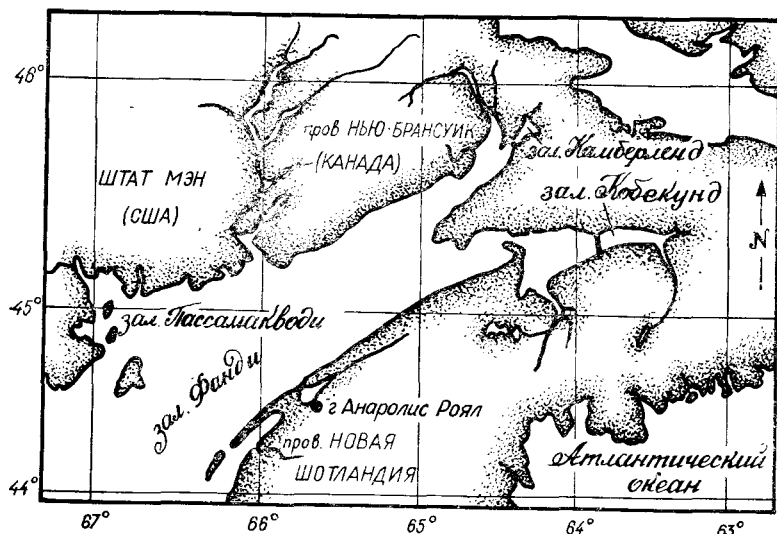


Рис. 9.8. Схема размещения ПЭС в зал. Фанди

ках бухты может повлиять на трансформацию приливной волны, вызвав изменение высоты прилива на величину в пределах 1 % (от 2 до 30 см) и изменение скорости течения в заливе примерно на 5 %. Для системы зал. Мэн — зал. Фанди создана расчетная модель, позволяющая проводить анализ изменения режимов приливов.

Экологические аспекты подробно рассмотрены П. Ларсеном [63]. Выполненный им анализ интересен и для нас, так как позволяет оценить хотя бы качественно многие явления, на которые прежде при анализе возможных последствий создания ПЭС даже не обращали внимания. Связанное со строительством ПЭС изменение уровня прилива в прилегающих районах объясняется отражением части энергии приливной волны из-за изменения резонансных свойств во внешней подобласти. Это повлечет за собой увеличение колебаний между урезами при высокой и низкой воде. Уровень ординара сохранится. Следствием изменения уровня может стать изменение гидрологического режима низин и прибрежных соленых болот. Даже на литорали, обычно затопляемой приливом, могут произойти изменения экосистем вследствие из-

менения времени пребывания различных организмов (животных и растений) под водой. Изменение же водного режима болот особенно опасно для экологии всего залива, так как именно они являются наиболее продуктивными биотопами.

Ларсен отмечает, что даже сравнительно небольшие изменения высоты прилива могут повлиять на человеческую деятельность в подверженной таким изменениям зоне. Прежде всего в зоне затопления исчезнут некоторые важные для человека виды животных, в низменных районах из-за усиления действия воли может начаться активная эрозия почв (для обрывистых берегов изменения менее существенны). Кроме того, произойдет изменение режима судоходства, что особенно скажется в мелководных районах. Безусловно, все эти изменения как-то стабилизируются, придут к новому равновесию, но это будет уже вторая стадия процесса, которая не сможет компенсировать экономических потерь, связанных с первой.

Так же точно должно установиться новое равновесие и в отношении приливных течений, усиление которых приведет к изменению транспорта наносов в самом зал. Мэн и прилегающих к нему эстуариях. Показано, что увеличение перемешивания вод в заливе может повлиять на сезонные температуры воды, на режим обмена с открытым морем питательными веществами из-за их задержки вследствие нарушения стратификации. Сочетание этих факторов (для зал. Мэн предсказывается уменьшение температуры вод примерно на 1°) должно по оценке экологов привести к увеличению первичной и вторичной продуктивности и к изменению видового состава всей экосистемы.

Есть еще один «подводный камень» в экосистеме зал. Мэн. Почти ежегодно здесь обнаруживают моллюски, содержащие до 80 мкг опасного для человека яда на 100 г массы. Человеку достаточно принять в пищу трех моллюсков, чтобы получить смертельную дозу яда паралитического действия. Его происхождение — бурное развитие ядовитого планктона, сопровождаемое красным цветением воды, обязанным некоторым видам динофлагеллят. При изменении режимов циркуляции в заливе красное цветение может поразить новые участки акватории. Вопрос биологии развития этих опасных видов организмов еще изучен недостаточно, но исследователи предупреждают о необходимости помнить о возможности распространения ядовитых организмов после постройки плотин в бухте Фанди по всему зал. Мэн, тем более что в 1978 г. уже возник новый район появления этих организмов на побережье штатов Нью-Гемпшир, Мэн и Массачусетс. Ранее, в 1972 г., например, отравления наблюдались только в районе зал. Фанди. Явления, связанные с появлением ядовитых динофлагеллят, встречались и в других районах мира, в частности на северо-западном побережье Англии, вблизи берегов Флориды, Ирландии, в Бристольском заливе и других районах.

Непосредственно на человеческую деятельность увеличение скоростей приливных течений может повлиять и за счет измене-

ния фарватеров, более быстрого заиливания морских каналов, влекущих за собой серьезные экономические потери из-за увеличения объемов дноуглубительных работ. Последние, в свою очередь, также ухудшают качество вод (за счет уменьшения прозрачности и взмучивания часто вредных осадков, содержащих тяжелые металлы и пестициды).

Приведенные данные в какой-то степени иллюстрируют возможный ущерб природной среды и человеческой деятельности при строительстве ПЭС, но необходимо еще раз оговориться, что для каждого географического района определяющие факторы будут связаны с конкретными условиями именно этого района, и автоматически переносить результаты исследований с одного района на другой, как и вообще при оценке экологических последствий любых вторжений в среду, безусловно нельзя.

Вдохновляет тот факт, что 20-тилетний опыт эксплуатации ПЭС на р. Ранс не выявил сколько-нибудь заметного вредного влияния этой однобассейновой станции на животный и растительный мир эстуария. Скорее наоборот, влияние оценивается как положительное. Это дает сторонникам развития приливной энергетики сильный козырь в борьбе с ее противниками.

§ 9.7. Приливы и возможность воздействия на климат

Речь здесь пойдет о проекте Г. Андерсона [37], предлагающего создать с помощью приливной энергии искусственное теплое течение из Тихого океана через Атлантический и Ледовитый и снова в Тихий. Предполагается, что величина потока в таком течении может быть в 10 раз больше, чем несет р. Амазонка, а перенос энергии в 3000 раз превысит то, что дает сейчас энергосистема Великобритании. Предлагается в районе Центральной Америки и в Беринговом проливе (рис. 9.9) установить систему клапанных насосов, приводимых в действие приливной энергией. Пять процентов тепла этого потока смогут в течение 12 лет расплавить арктические льды, что не приведет к существенному изменению уровня Мирового океана. На расплавление льдов Гренландии понадобится еще несколько сотен лет. За это время можно будет успеть избыток воды направить на создание искусственного моря в центре пустыни Сахара, например за счет переброски стока Нила. По предварительным оценкам, затрат одной единицы приливной энергии будет достаточно для переброски в северном направлении миллиона единиц тепловой энергии Тихого океана. Проект, названный автором «Лунное тепло» (Lunaheat), позволит не только сделать пригодными для хозяйственной деятельности огромные районы моря и суши в Арктике, улучшить климат в Северной Европе и на большей части СССР, но и поможет очистить Атлантику и Средиземное море за счет усиления циркуляции в Атлантике.

Проектов изменения климата в Арктике было уже несколько начиная с фантастического предложения Жюль Верна с помощью гигантского тангенциального взрыва изменить положение оси вращения Земли вместо 67° к плоскости эклиптики на нормальное, до вполне осуществимого проекта П. М. Борисова с помощью плотины и насосных агрегатов в Беринговом проливе усилить теплообмен между Тихим и Ледовитым океанами. Опасность последнего видится в том, что за счет усиления циркуляции в Тихом океане может измениться климат и в Антарктике, в результате чего начнется таяние льдов, покрывающих Антарктиду. Послед-

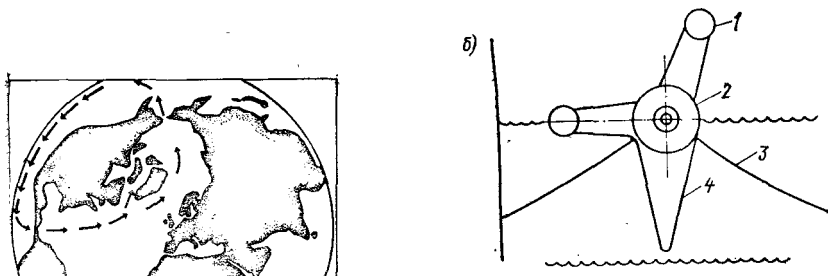


Рис. 9.9. Проект использования приливной энергии для воздействия на климат Северного полушария [37]: а — карта искусственного течения вокруг Северной Америки; б — схема клапана для создания разности уровней в районе Центральной Америки.

1 — балластная цистерна; 2 — поплавок; 3 — якорный канат; 4 — клапан

нее же чревато увеличением уровня Мирового океана примерно на 12 м и затоплением почти всех современных городов. По проекту Г. Андерсона предлагается ограничить изменение циркуляции в Тихом океане за счет канала шириной 3 км и прилегающего к нему приливного бассейна в Центральной Америке.

Этот бассейн образуется системой затворов протяженностью около 200 км и дамбами, так что площадь бассейна будет примерно $200 \times 150 \text{ км}^2$. При высоте прилива в этом районе около 3 м бассейн будет дважды в день наполняться приливом, что позволит обеспечить расход воды около 66 тыс. $\text{км}^3/\text{год}$. Центрально-Американский канал шириной 3 км, протяженностью 80 км и глубиной 500 м с падением дна 0,5 м позволит обеспечить скорость потока примерно 2,7 м/с. В Беринговом же проливе за счет прилива высотой 1 м можно обеспечить скорость потока в 1,3 м/с, что при ширине пролива 80 км и глубине около 62 м позволит перекачивать около 68 тыс. км^3 воды (10 среднегодовых расхода Амазонки). В целом этот трансокеанский поток не так уж и велик, если сравнивать его с Гольфстримом (около 2 %), однако с ним будет связан дополнительный приток 185 ТВт тепла. С учетом потерь примерно половины тепла при транспортировке в транс-океанском потоке, потребуется примерно 12 лет, чтобы сообщить 80 тыс. км^3 арктического льда необходимую энергию для плавления.

ния. Так как масса льда Гренландии примерно в 50 раз больше, то они будут довольно слабо затрагиваться привносимым теплом. Точность этих расчетов достаточно низка. Они не учитывают, например, увеличения поглощения океаном солнечного излучения из-за изменения (увеличения) коэффициента поглощения, которое может дать существенный эффект сразу же после начала таяния льдов даже на части поверхности. Впрочем, сам автор указывает на возможность ошибки в пределах порядка.

Наиболее сложная часть проекта — создание эффективных гигантских клапанов, необходимых для пропускания приливной волны в одну сторону. Г. Андерсон предлагает конструкцию, схематично изображенную на рис. 8.9. Это гигантский плавучий клапан, выполненный в форме тримарана, каждый из консольно подвешенных поплавков которого может поочередно подниматься в воздух, заставляя клапан принимать положения «закрыто» или «открыто». Специальный насос, расположенный внутри основного центрального корпуса (длина 800, диаметр 20 м), мощностью 4 МВт с газовой турбиной будет перекачивать воду из одного поплавка в другой, в результате чего гигантский «лепесток» высотой 62 м и будет принимать либо горизонтальное, либо вертикальное положение. По водоизмещению один затвор эквивалентен танкеру грузоподъемностью 1 млн. т.

При величине плеча 40 м и диаметре поплавок 8 м с его помощью можно будет развить момент около 16 ГН·м. В то же время для поворота клапана требуется «всего» около 15 ГН·м. Суммарное давление на закрытый клапан около 500 МН, а это определяет удерживающее усилие в опорах, когда все устройство находится на плаву. В случае шторма центральное крыло сможет подниматься из воды с помощью гидропривода.

Реализация проекта рассчитана на 60 лет. Его стоимость составит примерно 120 млрд. ф. ст. Сам автор считает, что подходящие условия для воплощения проекта в жизнь возникнут не ранее двадцатых годов следующего столетия.

§ 9.8. Биологическое воздействие среды на энергетические объекты

Этому воздействию подвержены все типы океанских энергопреобразователей, размещенные на поверхности и в толще вод. Оно проявляется в обрастании сооружений водными организмами и связанной с обрастанием коррозии — естественных процессах, посредством которых океан как бы ассимилирует инородные объекты. Скорость обрастания сильно зависит от природных условий. На севере Атлантики, в Белом и Баренцевом морях она составляет от 2 до 5 кг/м² в год, в теплых Азовском, Каспийском, Средиземном, Черном и Японском — от 40 до 100 кг/м² в год. Толщина обрастаний может достигать 10 см.

Различают несколько категорий морских обрастаний [77]: пленки, состоящие из бактерий, одноклеточных водорослей и простейших животных, не оказывающие серьезной нагрузки на сооружения;

твердые обрастания, состоящие из животных, имеющих известковые раковины, жестко прикрепляющиеся к поверхностям (мидии, морские утки, баянусы, многощетинковые черви);

мягкие обрастания, включающие анемоны, губки, гидроиды и другие группы растений и животных; некоторые группы могут входить в обе эти категории в зависимости от типа скелета.

Обычно обрастание начинается с появления на поверхностях, находящихся в воде, бактериальной слизи, способствующей более быстрому появлению прикрепляемых форм организмов. За одно и то же время на чистой поверхности прикрепляются два-три зародыша, а на покрытой слизью — от 40 до 50. Пленки могут влиять на процесс коррозии за счет концентрации в них сульфатвосстанавливающих бактерий, относящихся к анаэробным организмам. Последние, оказываясь под слоем последующих наслоений обрастателей второй и третьей категорий, продолжают свою коррозионную деятельность.

Однако связь коррозии и обрастания неоднозначна. Есть две точки зрения на этот вопрос. Согласно одной, обрастания могут играть положительную роль, защищая поверхность от прямого контакта с агрессивной морской средой особенно в зоне переменного уровня воды. Это характерно для стационарных сооружений типа волноломов. В этом случае обрастание может приносить даже двойную пользу и для сооружений, и для среды: на обрастающих поверхностях возникают новые биотопы, увеличивается продуктивная площадь для прикрепляемых форм организма, формируются условия для роста молоди рыб и т. д. Сооружение становится в какой-то мере искусственным рифом, повышающим биопродуктивность. Другая точка зрения — противоположна. Вероятно, многое зависит от районов наблюдения за процессами, происходящими под слоем обрастаний, от температурного режима и микрофлоры вод.

Во всех случаях, когда речь идет о плавучих конструкциях, конструкциях, имеющих подвижные воспринимающие энергию волн элементы либо использующих морскую воду в качестве рабочего тела, обрастание играет отрицательную роль из-за ухудшения динамических характеристик. В этих случаях на борьбу с обрастанием приходится затрачивать дополнительные средства, часть мощности установок.

Опыт эксплуатации морских судов показывает, что даже достаточно быстрое перемещение потока воды у поверхностей не спасает от обрастаний, так как некоторые виды зародышей организмов способны прикрепляться к поверхности при скоростях порядка даже 4—5 м/с. Возможно, помогает им в этом наличие на поверхности достаточно «толстого» пограничного слоя и турбулентных пульсаций скорости, в результате которых переносимые потоком

микроорганизмы оказываются «заброшенными» в малоподвижный погранслои.

Ухудшение динамических характеристик из-за обрастания особенно актуального для теплых морей, когда не только увеличивается масса установок, но и вследствие появления неровностей изменяется присоединенная масса жидкости, вовлекаемая в движение при перемещении относительно воды. Особые трудности возникают при обрастании внутренних поверхностей различных воздушных камер, водоводов, трубопроводов.

Большой опыт наблюдения за динамикой обрастаний стационарных сооружений имеют эксплуатационщики морских добывающих платформ. В уже цитированной работе [77] приводятся, например, интересные данные по обрастанию платформ в Северном море. Авторы выделяют три зоны обрастания: поверхностную (до глубины 25 м), среднюю (25—75 м) и глубинную (от 70 до 150—200 м — уровень дна для большинства действующих месторождений в Северном море), в которых наблюдения проводились в течение нескольких лет. К особенностям поверхностной зоны они относят непостоянство совокупности обрастателей, сильно зависящего от проходящих в районе установки течений, близости побережья и даже сезона очистки сооружений от обрастаний. В близких к побережью зонах, где преобладают мидии, дающие слой обрастания толщиной 15—20 см и сильно увеличивающие нагрузку на платформу, очистку поверхностной зоны в районе ватерлинии приходится проводить раз в два-три года (на расстоянии порядка 100 км от побережья, куда личинки заносятся с прибрежными водами).

В центральных районах моря поверхности опор заселяются другими органами, наиболее распространены живущие колониями гидроиды вида тубулярия. Они образуют волокнистые структуры из мягких, растениеподобных стеблей длиной 8—10 см. Тубулярия не увеличивает массу и сопротивление движению вод вокруг опор, однако очистку поверхностей приходится проводить для визуального контроля их состояния. Кроме того, тубулярии, как и мидии, задерживают большое количество ила, который, окказавшись в анаэробном слое, может стать причиной коррозии. Очень интересна возможность регулирования видового состава за счет использования конкуренции между видами: очистка поверхностей в правильно выбранное время года может позволить получить более предпочтительный видовой состав обрастания.

В средней зоне особенно интересно поэтапное обрастание, первичный слой которого состоит из развивающегося в первые год-два сообщества трубчатых червей, и мелких ракушек, а на второй-третий годы поверх первичного слоя появляется вторичный из довольно быстро развивающихся колоний гидроидов, губок и мшанок. Низкие концентрации кислорода под слоем плотно сementированных ракушек способствуют возникновению точечной коррозии листовой стали. В глубинной зоне обрастания отмечено появление крупных баянусов, пластинки оснований которых на-

столько прочно прикрепляются к защитному слою покрытия, что отделяются вместе с ним. Глубоководные организмы создают трудности в основном при инспектировании сооружений.

Принципам защиты от коррозии и обрастания посвящены специальные работы. Наиболее широко применяются различные покрытия. Для систем типа трубопроводов и камер наибольшей эффективностью обладают периодически подаваемые биоциды, например раствор хлора, оказывающиеся серьезными загрязнителями. Возможно применение различных физических методов, например использование радиоактивных препаратов, вводимых в покрытия, или резкого изменения температуры в среде, прилегающей к обрастанию поверхности. Последнее может быть принципиально применено для очистки от обрастаний внутренних поверхностей трубопроводов и теплообменников. Для этого достаточно в трубопроводы теплой воды периодически подавать холодную воду, поднимаемую из глубин (в случае ОТЭС). Аналогичный способ опробован на обрастающих водозаборниках прибрежных ТЭС.

Необходимость выполнения большого объема исследований, связанных, в частности, с функционированием и взаимодействием со средой океанских преобразователей энергии, выдвинула совершенно новую проблему в области борьбы с обрастаниями — борьбу с микрообрастаниями измерительных элементов различных датчиков. Например, для некоторых их типов слой обрастания толщиной уже в 0,025 мм снижает эффективность измерений. Работа незащищенного датчика температуры приводила к ошибке в показаниях величиной 70 % после 15-дневной работы в океане.

Первоначально для борьбы использовались токсичные покрытия, облучение ультразвуком, радиоактивные препараты. Все эти способы для таких целей оказались непригодными, за исключением способа электролитического гипохлорирования. Способ заключается в том, что через систему чувствительный элемент (анод) и дополнительный стальной катод пропускают электрический ток, в результате чего на аноде непосредственно из морской воды образуются соединения хлора, уничтожающие обрастатели. Анод должен быть выполнен из платины. Для датчика температуры, например, это нетрудно сделать, нанеся на его диэлектрическую поверхность тонкий слой платины (толщиной 0,2—0,3 мкм). Потери последней в год составляют примерно 0,001 мкм, что для указанной толщины покрытия пренебрежимо мало. Способ был опробован в лабораторных условиях и дал хорошие результаты.

Способ электролитического гипохлорирования эффективен и для систем, в которых циркулируют большие объемы воды, однако требует больших расходов электроэнергии и надежного контроля для предотвращения серьезного загрязнения среды.

§ 9.9. Обобщенная оценка воздействия на среду различных типов преобразователей океанской энергии

Вопрос оценки взаимодействия со средой отдельных типов преобразователей и систем таких преобразователей находится в стадии изучения. Полученные к настоящему времени количественные данные имеют, скорее, частный, а в ряде случаев даже противоречивый характер. Это связано с тем, что описание даже только физического взаимодействия преобразователей со средой достаточно сложно. При оценке же экологического влияния слишком большое количество параметров, которые связаны между собой неоднозначным образом, не позволяет создать поддающиеся обсчету адекватные модели либо использовать для анализа методы теории подобия. По этой причине основным надежным способом оценки влияния таких устройств на среду остается эксперимент на близких по масштабу к натуре образцах. Однако и в случае выполнения такого эксперимента приходится всякий раз делать оговорку, так как полученные в одном районе океана результаты не могут быть автоматически перенесены на другие районы из-за различия в природных условиях и различной структуры биотопов.

Сказанное позволяет утверждать, что для обобщенной оценки экологической ситуации в Мировом океане в случае развития сетей океанских преобразователей энергии в настоящий момент лучше всего остановиться на качественной стороне вопроса. Для иллюстрации его состояния и составлена табл. 9.2, в какой-то степени характеризующая экологические особенности различных групп преобразователей. Оценка возможных результатов воздействия выполнена на основе анализа возможного влияния на человека и другие живые организмы. В тех случаях, когда прямые оценки для конкретных типов устройств отсутствовали, использовались аналогии с различными стационарными морскими сооружениями (дамбы, волнозащитные стенки, платформы, гидроэлектростанции и т. п.).

Каждый столбец таблицы соответствует определенной группе преобразователей. Последовательность расположения групп в какой-то мере отвечает их потенциальным возможностям по масштабу воздействия на среду. В этом плане ОТЭС и ОГЭС кажутся наиболее интересными, так как принципиально оно может носить глобальный характер. Воздействие на среду станций прочих групп во всей вероятности не может выйти за пределы регионов или даже локальных зон. Безусловно, суммарная величина воздействия зависит от масштабов внедрения тех или иных установок, от абсолютных величин единичных мощностей, от концентрации в зоне размещения и суммарной мощности.

Другая особенность табл. 9.2 состоит в том, что каждая группа обобщает различные конструктивные типы преобразователей, и поэтому выделенные факторы относятся к группе в целом, а не к отдельным типам. Из-за этого при анализе данных

Взаимодействие преобразователей энергии океана и природной среды

Виды воздействия		Результаты воздействия на среду	Группа преобразователей						
			ОГЭС	ОГЭС	ВолнЭС	ОВЭС	БиоЭС	Со-ленЭС	ПЭС
на человека	через здоровье	Изменение климата Изменение состава атмосферы Аварийные выбросы реагентов Другие опасности при обслуживании Повышение уровня шума	!! !! !! !!	!! ! !!	 ! !	 !! !!	 ! !!	 !	 !
	через восприимчивость и ограничение деятельности	Ограничение хозяйственной деятельности Перестройка хозяйственной деятельности Помехи авиации и связи Отчуждение земель Ущерб реакции	! 	!! ! !	!! !	! !! ! !!	! ! ! !	! ! !	
на другие организмы	косвенные	Изменение циркуляции вод " стратификации вод " содержания взвесей " температуры вод " содержания растворенных газов " транспорта наносов " гидрологического режима суши	! !! ! !! ! !	!! ! ! !	! !! ! !!	 !! !!	! ! ! !	! ! ! !	

Возможные отрицательные

Виды воздействия	Результаты воздействия на среду	Группы преобразователей						
		ОТЭС	ОГЭС	ВолиЭС	ОВЭС	БиоЭС	Со-ленЭС	ПЭС
Возможные отрицательные, на другие организмы, прямые	Поступление в среду биоцидов	!!	!	!	!	!		
	Повышение уровня шума			!	!			
	Поступление в среду металлов, масел и т. п.	!	!	!			!	
	Нарушение миграции животных		!!	!	!!		!	!
	Изменение видового состава организмов	!	!		!	!	!	!
	Гибель организмов	!	!	!	!			
	Заболевание организмов					!		!
	Вырождение организмов		!			!		!
Возможные положительные	Управление климатом	!	!!					
	Обогащение среды биогенными элементами	!!	!	!!		!		
	" среды кислородом					!		
	Снижение естественной абразии			!!		!		!
	Уменьшение транспорта осадочных пород		!	!!	!	!!		!
	Защита биотопов от хищников		!	!!	!	!!		!
	Создание искусственных биотопов		!	!	!	!!		!
	" производительных очистных систем					!!		

таблицы в ряде случаев приходится обращаться к частным классификациям преобразователей, чтобы объяснить некоторые совокупности факторов, кажущиеся на первый взгляд нереальными. Например, очевидно, что волновые преобразователи, установленные в открытом море вдали от побережья, вряд ли будут влиять на транспорт наносов, а термальные станции замкнутого цикла по всей вероятности не дадут существенного вклада в изменение углеродного баланса планеты и т. д. И еще одно обстоятельство: все преобразователи для простоты названы энергостанциями, хотя необходимо иметь в виду, что речь идет о энергоустановках вообще, вне зависимости от того, какой продукт является конечным (электроэнергия, водород, аммиак и т. п.).

Не будем подробно останавливаться на анализе таблицы, предоставляя это читателю. Заметим только, что сейчас пожалуй больше всего данных по экологическому воздействию имеется по преобразователям энергии ветра и приливов, образцы которых находятся уже в стадии эксплуатации достаточно длительное время.

В заключение этой главы подчеркнем еще раз, что на сегодняшний день не представляется возможным до конца уяснить отдельные последствия интенсивного освоения энергетических ресурсов Мирового океана. Существующие модели, в которых рассматриваются процессы переноса вещества и энергии в биосфере, позволяют делать только частные прогнозы, надежность которых быстро падает по мере удаления от настоящего момента времени. Причина этого и в качественных превращениях, которые могут произойти в среде при изменении количественного выражения воздействия на нее, и в неизвестных нам возможностях технологии будущего, и в трудности предсказания хода общественных явлений, связанных с возможным изменением в потребностях человечества в тех или иных видах энергии.

Наши желания по отношению к освоению энергетических ресурсов океана сейчас явно превышают реальные возможности, определяемые уровнем знаний о всем комплексе явлений в океане, в атмосфере и неотделимо связанной с ними биосфере. Это необходимо иметь в виду не только при разработке новых технических решений и при испытании крупномасштабных образцов океанских преобразователей, но и при разработке самой стратегии природопользования.

ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОКЕАНСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 10.1. Передача электроэнергии на берег

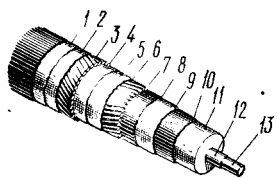
Вопрос о передаче электроэнергии, вырабатываемой океанскими электростанциями, будущим потребителям в ряде случаев оказывается ключевым, заставляющим пересматривать отношение к вариантам выполнения преобразователей энергии. Особенно остро этот вопрос встает, когда речь идет о плавучих преобразователях, размещаемых в открытом море, — плавучие ОТЭС, волновые и ветровые установки. Основной способ передачи электроэнергии в этом случае — кабельные силовые линии. Но при создании таких линий возникают достаточно сложные вопросы, решение которых представляет самостоятельную техническую проблему. Причем сложности связаны не с созданием высоковольтных кабелей вообще (они широко применяются в энергетике), а с разработкой соединительных кабелей, связывающих плавучие объекты с прокладываемыми по дну стационарными кабелями. Наиболее трудно реализовать соединительные кабели для ОТЭС. Здесь и необходимость в высоких рабочих напряжениях для передачи сравнительно больших мощностей (до 400 кВ при мощности электростанции 400—500 МВт), и большие глубины (до 6000 м), требующие достаточно протяженных соединительных линий, и большие перепады давлений, при которых должен работать кабель. Надежность таких кабелей определяется их электрической и механической прочностью, стойкостью к износу в местах подключения к платформам или непосредственно к преобразователям, если имеются в виду волновые установки, стойкостью к истиранию в местах переменного контакта с грунтом, ремонтпригодностью. Крайне желательно, чтобы такой кабель мог служить в течение всего срока службы плавучей установки, т. е. не менее 25 лет.

В настоящее время такие соединительные кабели находятся еще в стадии разработки. Рис. 10.1 дает представление об устройстве одного из вариантов такого кабеля, изучаемого специалистами фирмы «Симплекс уайр энд кэбл компани» (США). Этот кабель предназначен для передачи электрической мощности 100 МВт при переменном напряжении 138 кВ. Его основные эле-

менты — многожильный проводник площадью примерно $1,75 \text{ см}^2$, изолятор из полиэтилена высокого давления толщиной 24 мм, герметизирующий слой из мышьяковистого свинца толщиной 3 мм, выбранного за его высокую усталостную прочность, и двухслойная оплетка из проволоки (нержавеющая сталь типа AL-6X),

Рис. 10.1. Пример устройства силового электрического кабеля для ОТЭС [84].

1 — битумный компаунд; 2, 3, 5 — слои нейлона; 4, 6 — слои проволоки из нержавеющей стали; 7 — слой джута; 8 — плотная полиэтиленовая оболочка; 9 — герметик (мышьяковистый свинец); 10, 12 — полупроводниковые покрытия; 11 — основной изолятор из полиэтилена высокого давления; 13 — токопроводящая жила



отличающейся высокой стойкостью против коррозии в морской воде. Опытные образцы отрезков кабеля уже прошли довольно сложный и длительный цикл испытаний на механическую и электрическую прочность при различных нагрузках, характерных для будущих предполагаемых мест установки первых образцов ОТЭС. Испытания показали, что кабель подобной конструкции после соответствующей доработки может быть рекомендован при глубинах установки ОТЭС до 2000 м [84].

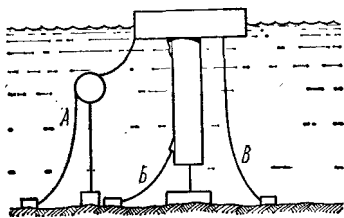


Рис. 10.2. Варианты подключения силовых кабелей к плавучим ОТЭС [84]: А — непосредственное соединение; Б — соединение через вспомогательный разгрузочный буй; В — закрепление кабеля на трубопроводе холодной воды

Сам кабель — только часть проблемы обеспечения передачи электроэнергии. Необходимо создать надежные системы подключения кабелей к платформам, устройства соединения отрезков кабелей в подводном положении. На рис. 10.2 показаны возможные варианты установки соединительных кабелей в толще воды. Варианты отличаются длинами кабелей, возможными перемещениями платформ, определяемыми устройством якорных систем, допустимыми амплитудами колебаний платформ.

Наиболее прост в осуществлении вариант с естественным расположением кабеля, он же наиболее прост в ремонте. Однако при таком способе кабель наиболее уязвим при относительно больших перемещениях платформы. Вариант с промежуточным буйем требует в 1,5—2 раза большего расхода кабеля, более сложен в установке, при обследовании и ремонте, однако обеспечивает наилучшую развязку по отношению к вертикальным колебаниям платформы. Оба варианта требуют якорных устройств, обеспечивающих перемещение платформы в ограниченном секторе по

отношению к точке подсоединения кабеля на дне и не допускают поворота платформы вокруг оси.

При третьем варианте, когда кабель закреплен вдоль трубопровода холодной воды, используемого в качестве элемента якорного устройства, можно достичь минимального расхода кабеля, обеспечить вращение платформы вокруг своей оси, существенно снизить механические нагрузки за счет растяжения кабеля под действием собственного веса. Такой вариант требует наличия развязывающих устройств, допускающих скручивание кабеля на 360° . В качестве таковых могут быть использованы различные скользящие контакты в герметизированных корпусах. Это также довольно сложные устройства, особенно если учесть, что для передачи электроэнергии на переменном токе требуется не менее четырех одножильных кабелей (трех трехфазных, одного запасного). Образцы подобных устройств уже разработаны. Существуют и более простые устройства, обеспечивающие некоторое число степеней свободы кабелей при вводе в корпус платформы либо за счет специального выдерживающего изгибающие нагрузки элемента, либо за счет вращающегося шарнира. Последние могут быть применены для присоединения кабеля к платформам в случае выбора первого или второго вариантов подключения.

При выборе типа кабельного соединения принимаются во внимание безопасность системы, стоимость, массогабаритные характеристики, надежность, простота обслуживания. В общем случае трудно рекомендовать и тип присоединения, и соответствующую арматуру. Экономический анализ, выполненный зарубежными специалистами, показывает, например, что если за основной критерий взята стоимость, то в более выгодном положении оказываются крупные энергоблоки. По надежности же обеспечения энергией предпочтение могло бы быть отдано сравнительно небольшим энергоблокам, которые, кстати говоря, и легче обслуживать. Но так как стоимость при предварительных оценках систем играет более существенную роль, то приоритет крупных энергоустановок оказывается неоспоримым.

По этой причине передача электроэнергии с относительно небольших плавучих волновых установок при всех их достоинствах в смысле эффективности преобразования энергии с помощью кабельных соединений делает последние неконкурентоспособными по сравнению с менее эффективными волновыми же преобразователями, стационарно размещаемыми на дне (см., например, преобразователи фирмы «Виккерс», преобразователь типа «моллюск»). Стационарные, проложенные в грунте силовые кабели значительно более надежны, разработана техника для их прокладки, проверки состояния и ремонта.

Для береговых электростанций (приливных, соленостных, волновых и ветровых) проблемы передачи электроэнергии те же, что и для других материковых станций. Наибольшие трудности возникают при передаче энергии на большие расстояния при вклю-

чении соответствующих электростанций в энергосистемы. Для этих целей разрабатываются сейчас сверхвысоковольтные линии электропередач на напряжение до 1800 кВ (уже сооружена линия, работающая при напряжении 1150 кВ, Экибастуз — Челябинск). Решение проблем передачи электроэнергии в этом случае идет независимо от океанской энергетики и позволяет надеяться на осуществление эффективного использования электроэнергии береговых океанских станций, где бы они ни располагались (здесь, вероятно, уместна ссылка на возможность строительства таких удаленных от энергосистем станций, как Пенжинская и Тугурская ПЭС).

Сейчас ведется разработка не только высоковольтных традиционных проводных линий электропередач, но и сверхвысоковольтных кабельных линий, выполненных в виде трубопроводов, заполняемых газами с высоким электрическим сопротивлением (SF_6), и в виде вакуумных трубопроводов, по которым передача энергии могла бы вестись с помощью пучков ускоренных электронов. Разрабатываются, наконец, варианты сверхпроводящих линий передач, основное свойство которых — снижение до минимума потери электроэнергии. Пропускная способность таких кабелей выше, чем у обычных, не менее чем в 15 раз. Это позволяет надеяться на возможность передачи с помощью таких единичных кабелей мощностей порядка 5000 МВт.

Для удаленных от побережья энергоблоков диапазон возможностей при выборе способов передачи энергии существенно ниже. Принципиально возможно осуществление такого экзотического способа передачи, как передачи с помощью пучка направленного электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, передаваемого на достаточно высоко расположенный отражатель и с него на приемную станцию. Такой отражатель можно было бы установить с помощью, например, воздушного шара. Можно использовать и энергетический спутник, находящийся на геостационарной орбите. Такой спутник конструктивно был бы значительно проще, нежели собирающий энергию Солнца, конвертирующий ее в СВЧ-излучение и передающий на Землю. Он играл бы роль пассивного ретранслятора и нуждался бы только в обычных устройствах для коррекции положения. За счет особенностей отражения волн сантиметрового диапазона металлоемкость отражателя такого спутника была бы меньшей, чем в случае солнечного коллектора, а время жизни значительно выше из-за возможности использования материалов, стойких к жесткому излучению. Используя свойство независимости распространения электромагнитных волн, с помощью одного такого ретранслятора можно было бы либо собирать на единый наземный приемник энергию, вырабатываемую несколькими ОТЭС, либо, наоборот, от каждой из них осуществлять передачу на свой приемник. Правда, рентабельность таких способов передачи энергии и их экологическую безопасность еще надо доказать. Вообще же развитие подобных систем — дело достаточно отдаленного будущего.

В настоящее же время единственным технически и экономически оправданным способом использования электроэнергии, получаемой на энергоустановках, размещенных в открытом море вдали от берегов, остается получение с ее помощью различных энергоносителей и других энергоемких веществ.

§ 10.2. Аккумулирование энергии

Применительно к задачам океанской энергетики аккумулирование энергии имеет важное значение в связи с тем, что позволяет компенсировать колебание мощности природных источников. Это особенно существенно для автономных ветровых и волновых электростанций.

Эффективность некоторых систем аккумулирования энергии *

На сжатом воздухе	30**
То же, с газовой турбиной	45
С топливными элементами на водороде и кислороде	55
Гидравлические	65—75
Механические с вращающимся колесом	75
Электрохимические батареи	70—87
Сверхпроводящий контур	75—90

* Bhatt S. Indian and East Eny. 1982, vol. 124, N 8, p. 329—335.

** В литературе для современных ПАЭС (цинемоаккумулирующих электростанций) встречается значение 70 %.

Рассматриваемые здесь способы и системы для аккумулирования разрабатывались задолго до обращения к океанской энергетике и работы в этой области уже достаточно далеко продвинулись вперед, несколько опережая развитие океанских преобразователей. Для нас важно, что практически все типы разрабатываемых сейчас аккумулирующих устройств могут найти применение и в океанской энергетике. Общее требование к таким системам — минимальные потери энергии в процессе зарядки, разрядки, хранения. Это требование позволяет определить эффективность аккумуляторов как отношение энергии, выданной потребителям, к общей энергии, затраченной на зарядку. По этому показателю худшими характеристиками обладает система, работающая на сжатом воздухе, а лучшими — сверхпроводящий контур, действие которого основано на длительном сохранении возбужденного в процессе зарядки тока в замкнутом проводнике, находящемся в состоянии сверхпроводимости за счет охлаждения до температур, близких к абсолютному нулю. При выборе типа аккумулятора играют роль и другие показатели. Важны экономические показатели, определяемые, например, удельными капиталовложениями на 1 кВт·ч запасенной энергии. Важна величина скорости зарядки и вывода энергии, изменяющаяся от долей секунды у сверхпроводящего контура до нескольких часов у механических и электромеханических аккумуляторов. На экономичность аккумулирования влияет и способность систем выдерживать требуемое достаточно большое число циклов заряд-разряд, при-

чем необходимые для проведения зарядки параметры не должны существенно отличаться от обеспечиваемых источником энергии (океанским преобразователем в нашем случае).

Наибольшее распространение получили аккумуляторы на гидравлическом принципе. На нем, в частности, основаны схемы ГАЭС, строительство которых ведется во всем мире. До недавнего времени это был практически единственный приемлемый метод аккумулирования достаточно больших количеств энергии. Такие станции отличает большой срок эксплуатации, простота и низкая стоимость обслуживания, высокая надежность. Несколько

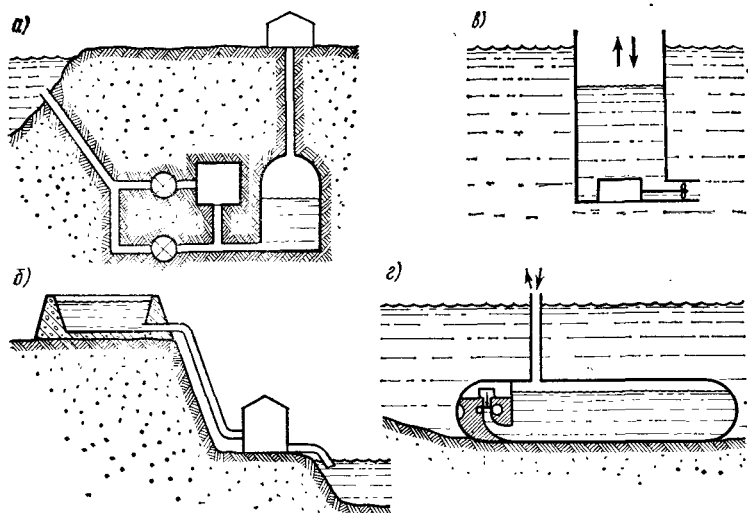


Рис. 10.3. Схемы гидроаккумулирующих станций: а — подземная гидропневматическая; б — гидравлическая с искусственным верхним бассейном; в — гидравлическая с плавучим или стационарным кессоном; г — подводная гидропневматическая

вариантов схем ГАЭС приведены на рис. 10.3. Все они могут быть построены вблизи побережья и состыкованы с соответствующими преобразователями океанской энергии. Последние два варианта могут быть размещены в открытом море и обладают тем достоинством, что для их создания не требуется отводить участки суши. Построены такие аккумулирующие установки могут быть в промышленной зоне и отбуксированы к месту установки. Особенно интересен последний тип станции, размещаемый на дне водоема. Такая подводная ГАЭС была разработана в нашей стране*. Ее отличает отсутствие напорных трубопроводов, обладающих достаточно высокими потерями гидравлической энергии. Авторами станции, сотрудниками Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина Ю. С. Васильевым

* А. с. № 484280 (СССР), 1972 г.

и В. А. Кукушкиным, предложен еще и способ строительства необходимых для нее оболочечных конструкций непосредственно в открытом море.

Возможность использования воздушного аккумулирования просматривалась на начальном этапе создания океанских преобразователей применительно к волновым устройствам на гидرو-пневматическом принципе. В сочетании с гидравлической турбиной воздушно-гидроаккумулирующие станции рассматривались применительно к малым приливным установкам. Принцип действия такой станции поясняет рис. 10.2, а. Подземный бассейн такой станции является хранилищем и воды, и сжатого воздуха. Работа воздушной и гидравлических турбин осуществляется последовательно. При зарядке вода из резервуара удаляется с помощью воздушного компрессора. Стоимость строительства подобных установок значительно превышает стоимость наземных и подводных.

ГАЭС — это достаточно крупные энергетические объекты, предназначенные для централизованного использования в энергосетях как для компенсации пиковых нагрузок, так и для аккумулирования «провальной» энергии АЭС и ТЭЦ в ночное время. Однако в системной энергетике рассматриваются и возможности использования индивидуальных накопителей, размещаемых в непосредственной близости от потребителей энергии. В качестве таковых применимы накопители электрохимического, механического и сверхпроводящего типа.

Среди электрохимических накопителей пока доминируют свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Однако их удельные показатели уже не удовлетворяют потребителей. Им на смену идут разрабатываемые сейчас щелочные аккумуляторы (никель-цинковые, никель-железные), обладающие реальной удельной энергией около 0,1 кВт·ч/кг — вдвое большей, чем у свинцово-кислотных. Отметим, что более дорогие и менее стойкие по числу циклов заряд-разряд серебряно-цинковые аккумуляторы, используемые в основном в некоторых видах малогабаритных транспортных средств, обладают удельной энергией примерно 0,5 кВт·ч/кг. Главная цель разработок, ведущихся практически во всем мире, — создание универсальной и сравнительно недорогой системы накопления энергии. Надо иметь в виду, что диапазон применения аккумуляторных батарей ограничен. Они предназначены главным образом для обеспечения кратковременных (порядка 1—2 ч) нагрузок. Нужны батареи, отличающиеся простотой обслуживания, большим сроком службы, высоким КПД заряда-разряда и надежностью. Пока, как это отмечается в литературе, комплексу этих требований не отвечает ни один из существующих типов аккумуляторных батарей. Одно из важных достоинств, определяющих интерес к аккумуляторным батареям как накопителям, — малая постоянная времени их включения в сеть в случае необходимости. По этому показателю они уступают только сверхпроводящим системам.

Достоинства инерционных систем, запасующих энергию в форме кинетической энергии вращающегося маховика, — достаточно быстрый цикл заряд-разряд, неограниченная глубина разряда и большое число циклов, сравнительная простота, малые затраты на обслуживание, длительный срок службы, гибкость подвода энергии (электропривод, гидравлический и механический приводы). Потери в таких устройствах могут быть сведены к минимуму за счет заполнения их корпусов инертными газами, вакуумирования, использования магнитных подвесов. Маховик пикового компенсатора на этом принципе емкостью 10 МВт·ч при скорости вращения примерно 3500 оборотов в минуту будет иметь диаметр 10 м и массу 200 т. Такая установка требует примерно 100 м² площади, в то время как для аналогичной по запасаемой энергии ГАЭС необходима площадь примерно в 40 раз большая.

Развитие технологии получения сверхпрочных материалов позволило создать сверхбыстроходный маховик, плотность запасенной энергии у которого в 15 раз выше, чем у обычного стального. У последнего она ограничивается пределом прочности, устанавливающим максимальную скорость вращения. Маховик сверхбыстроходного накопителя присоединяется непосредственно к ротору бесступенчато регулируемого генератора на магнитном подвесе. Этот блок играет роль либо мотора (при заряде), либо генератора (при разрядке накопителя). Тело такого маховика состоит из радиально расположенных сверхпрочных нитевидных кристаллов, объединенных в отдельные стержни, и не имеет привычного обода. Во время вращения кристаллы испытывают только растягивающие напряжения. Разрушение некоторой части их при экстремальных перегрузках не приводит к разбалансировке колеса, и аварии не происходит.

Чрезвычайно интересны сверхпроводящие накопители, представляющие собой проводящий контур, помещенный в шахте, заполненной жидким гелием. По расчетам американских специалистов единичная емкость такого накопителя может быть равна 10⁴ МВт·ч. У такого блока потери энергии составят только 700 МВт·ч, а мощность, необходимая для работы системы охлаждения, — не более 30 МВт. Полную зарядку системы можно осуществить за 10 ч, а разряд — за 14 ч, при этом максимальный ток, который может быть получен от системы, составляет около 300 · 10³ А, а средний ток в цикле — не менее 0,7 от максимального. Расход гелия в системе сравнительно невелик: при запуске ее требуется примерно 300 кг/(МВт·ч) с ежегодным добавлением для компенсации утечки 20 кг/(МВт·ч), т. е. менее 10 %.

Описанные системы хранения энергии предполагают ее накопление и передачу потребителю в виде электрической энергии. Из них только одна предполагает выработку за счет избытка электроэнергии нового энергоносителя, который в таком виде может быть транспортирован потребителю. Речь идет о получении на океанских электростанциях водорода. Этому вопросу посвящен следующий параграф.

§ 10.3. Водород в океанской энергетике

Выше, в связи с океанской биотехнологией, уже упоминался водород как возможный энергоноситель и сырье для микробиологической промышленности. Но водород не только экологически чистое топливо, он прекрасный восстановитель для получения металлов из окислов, сырье для химической промышленности. В качестве топлива он может использоваться как в двигателях внутреннего сгорания для самых различных видов транспорта от автомобилей до космических и подводных аппаратов, так и для отопления жилищ. Водород обладает самыми высокими удельными энергетическими характеристиками: его теплотворная способность примерно в 3 раза выше, чем у лучших сортов углеводородных топлив. По этому показателю молекулярный водород уступает только атомарному водороду же, при рекомбинации которого выделяется энергия в 10 раз большая, чем у лучших сортов ракетного углеводородного топлива. Одна из важных особенностей водорода как топлива — его способность гореть в широком диапазоне концентраций кислорода (здесь он уступает лишь ацетилену).

Широкий диапазон возможностей применения водорода * делает его практически универсальным энергоносителем, ориентируясь на который можно постепенно перестроить всю экономику планеты. Именно поэтому расчет на получение водорода на океанских электростанциях кажется достаточно перспективным: получение водорода в качестве конечного продукта работы таких станций снимает вопрос о необходимости аккумулирования энергии, упрощает передачу из удаленных районов в места потребления, исключает необходимость увязывать работу океанских электростанций с энергосетями. Такой вариант использования океанской энергии оказывается приемлемым не только для автономных ОТЭС, но и для удаленных от потребителей энергии приливных, волновых и ветровых электростанций. Вырабатываемый на таких станциях водород мог бы транспортироваться по трубопроводам. При создании таких трубопроводов есть, конечно, свои трудности, связанные с возможностью охрупчивания материалов, происходящего из-за способности водорода образовывать с металлами совершенно особый класс соединений — гидриды, и вследствие коррозии, развивающейся в местах утечки водорода. Сейчас ведется активный поиск конструкционных материалов, способных противостоять этим явлениям. Возможно применение керамики, пластмасс и композитных материалов.

Впрочем, гидриды сейчас изучаются и как перспективные аккумуляторы водорода. Оказалось, что ряд металлов, сплавов и соединений обладает уникальной способностью растворять в себе водород, причем процесс этот является обратимым и может управ-

* Более подробно см., например, в кн.: Подгорный А. Н., Варшавский И. Л., Приймак А. И. Водород и энергетика. Киев, 1984.

ляться, например, изменением температуры. Объемное содержание водорода в гидридной форме по отношению к массе контейнера выше, чем при его хранении в жидком состоянии. Порошки интерметаллидов LaNi_5 и FeTi образуют уже при обычных температурах гидриды с содержанием водорода до 1,8 % по массе. Существуют соединения, способные в диапазоне температур 100—200°C и давлении $1\text{--}1,4 \cdot 10^6$ Па растворять до 5—7 % водорода по массе. Плотность водорода в таких соединениях приближается к плотности его в жидком состоянии.

По технико-экономическим показателям устройства на гидридах оказываются значительно эффективнее традиционных, в которых водород запасается в жидкой или газообразной фазах. В книге А. Н. Подгорного и других приведен пример, позволяющий сравнить гидридный аккумулятор со стандартным газовым баллоном, рассчитанным на хранение 500 г водорода. Такой баллон при полезном объеме до 45 л имеет массу около 80 кг, соответствующий же контейнер с гидридом массой не более 50 кг имеет объем всего 14 л. Заряжается такой аккумулятор при низких давлениях и не требует ни компрессоров высокого давления, ни толстостенных либо теплоизолированных, как в случае хранения жидкого водорода, сосудов. Упрощаются, таким образом, заправка, транспортировка, хранение (хранение жидкого водорода требует специальной холодильной техники), повышаются взрыво- и пожаробезопасность. Очень интересное свойство гидридного аккумулятора — его избирательность, позволяющая не только извлекать водород из смесей с другими газами, но и очищать его от посторонних примесей. Это особенно важно при дальнейшем использовании водорода для производства белка. Затраты энергии в цикле хранения водорода в гидридных аккумуляторах примерно сравнимы с газобаллонным методом и в 4—5 раз ниже, чем при сжижении. Они составляют 1,8—2,2 кВт·ч/кг водорода. На основе использования гидридных систем сейчас разрабатываются самые различные устройства от двигателей внутреннего сгорания до холодильных машин.

Трудно рассчитывать, что гидридные аккумуляторы водорода найдут применение в системной энергетике. Их наиболее вероятное место — обеспечение непрерывной работы сравнительно небольших энергетических установок.

Другая сторона вопроса работы океанских электростанций в системе водородной энергетики — собственно получение водорода. Наиболее естественным для таких станций кажется получение его электролизом морской воды — способ, не требующий никаких дополнительных ингридиентов, кроме электроэнергии и морской воды, хотя на суше стоимость водорода, полученного таким способом и оказывается в 1,5—2 раза выше обычного (паровая конверсия метана, газификация углей и др.). Выше, рассматривая возможности защиты трубопроводов ОТЭС от обрастания, мы упоминали использование электролиза морской воды как средство получения активного биоцида — гипохлорида. Но гипохло-

рид — не единственное вещество, получаемое в этом процессе, когда кроме водорода и хлора на электродах еще выделяются нерастворимые соединения магния. В основном последние сильно затрудняют нормальную эксплуатацию электролизеров. При использовании электролиза в обычных условиях этой проблемы не возникает из-за того, что в качестве электролита используют концентрированные растворы щелочей в пресной воде, свободной от дополнительных примесей.

Различными группами исследователей предлагались разные модификации электролиза с целью использовать морскую воду, однако до сего дня этот вопрос не решен окончательно и в качестве альтернативы рассматривается возможность использования стандартных электролизеров, работающих на предварительно опресненной воде (на ОТЭС открытого цикла получение пресной воды не представляет проблемы). Для электролиза морской воды рассматривалась возможность, например, вести его на глубине 1 км с тем, чтобы водород собирать под давлением, а газообразный хлор отправлять на поверхность и нейтрализовать его путем соединения с водой при температуре 650°C , т. е. с дополнительными потерями энергии. Изучалась возможность

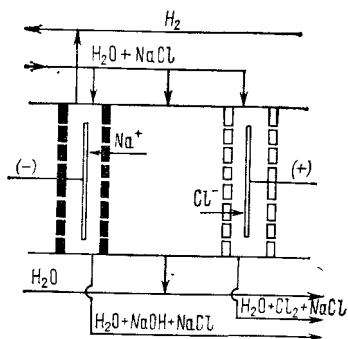


Рис. 10.4. Схема электролизера для одновременного получения водорода и пресной воды [48]

применения различных избирательных электродов и создания гидродинамических условий в электролизерах, при которых не происходило бы осаждения нерастворимых соединений на них. Канадскими исследователями, в частности, в этом направлении было показано, что за счет подбора концентрации электролита, скорости его движения в пространстве между электродами и уровня турбулентности потока осаждение соединений магния может быть сведено к минимуму. Кроме того, изучалась возможность создания принципиально новых электролизных ячеек, в которых бы происходила нейтрализация хлора и гипохлорида продуктами самого же электролиза.

Пример такого электролизера приведен на рис. 10.4. Ячейка напоминает электродиализатор. Она содержит электроды и пластиковые мембраны, пропускающие либо анионы, либо катионы, причем аноды подвешены между анионными, а катоды — между катионными мембранами. Образующийся у катода водород выделяется в виде газа, а хлор с раствором из анодного пространства подается в нейтрализатор, где смешивается с раствором щелочи, образующейся у катода. Дополнительным продуктом такой ячейки оказывается обессоленная вода [48]. Работы в этом направлении продолжаются.

§ 10.4. Плавающие заводы для производства аммиака и метанола

Вообще, идея строительства плавучих заводов родилась задолго до начала работ по океанской энергетике. Первыми такими заводами были, пожалуй, плавучие судоремонтные мастерские, перегонявшиеся в места строительства новых портов, затем появились рыбоперерабатывающие плавбазы, плавучие электростанции (сначала дизельные, а потом и атомные). Сейчас во всем мире строятся плавучие заводы по переработке нефти и газа, по выпуску минеральных удобрений и других химических веществ, по производству пресной воды. Привлекает к таким заводам их мобильность, отсутствие необходимости выделения земель, возможность постройки в промышленно развитых зонах, а эксплуатация практически без выполнения работ нулевого цикла в любом районе Мирового океана. Есть у них и другие достоинства, среди которых можно отметить, например, большую безопасность для населения в случае аварий, если речь идет о производстве вредных веществ, меньшую стоимость, если для строительства используются отслужившие срок танкеры. Например, на танкере дедвейтом 1700 т может быть размещена опреснительная установка производительностью около 6000 т/сут, а 60-тысячник позволяет вместить опреснитель производительностью 200 000 т/сут.

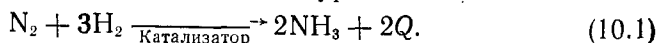
Развитие океанской энергетики позволяет осуществить совершенно новый подход к созданию плавучих заводов в связи с возможностью автономного снабжения их энергией. Особое внимание в этом плане привлекают ОТЭС, размещаемые вдали от потребителей энергии в открытом океане. Кроме водорода, о котором уже говорилось выше, такие станции допускают объединение практически с любыми установками, для осуществления технологического процесса требующими больших количеств энергии. В таких технологиях сам водород может рассматриваться не только как конечный продукт, но и как полуфабрикат для получения целого ряда веществ.

Одна из таких технологий — синтез аммиака из водорода и азота. Потребность в аммиаке как сырье для производства удобрений и пластмасс во всем мире исчисляется десятками миллионов тонн в год. По расчетам экономистов к 2000 г. она превысит 100 млн. т.

Основное сырье для производства аммиака в настоящее время — природный газ, причем на одну тонну аммиака идет более 1000 м³ газа, истощение запасов которого заставляет искать новых путей, нового сырья.

Аммиак — едкий, бесцветный газ, при давлении 10⁶ Па он легко сохраняется в жидком виде в стальных емкостях. Температура испарения жидкого аммиака при давлении 10⁵ Па — 240 К, а при 3,5 · 10⁶ Па — 354 К. Этот диапазон параметров определяет использование аммиака в качестве рабочего тела ОТЭС. Затраты энергии на производство аммиака легко оценить исходя из того количества электроэнергии, которое необходимо для получения

всех компонентов синтеза, идущего при участии катализаторов под высоким давлением в соответствии с уравнением

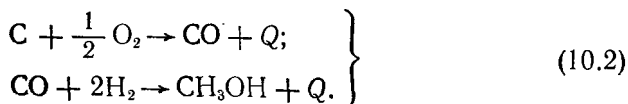


Если учесть, что на получение 1 кг азота требуется около 7 кВт·ч, водорода — 50 кВт·ч, а сам синтез требует примерно 1 кВт·ч/кг продукта, то суммарная затрата энергии на получение 1 кг аммиака составляет примерно 18 кВт·ч. Таким образом, производство оказывается достаточно энергоемким и может быть рентабельным только при наличии дешевой электроэнергии.

Как переносчик водорода аммиак достаточно эффективен, так как содержит его по массе более 15 % (сравните с гидридами, в которых содержание водорода по массе не превышает 7 %). Он может использоваться непосредственно как топливо, причем даже как топливо для двигателей внутреннего сгорания. К недостаткам аммиака относится возможность утечки и меньшая, чем у водорода, удельная энергия.

Один из первых проектов плавучего завода по получению аммиака из морской воды и воздуха атмосферы на базе ОТЭС был предложен лабораторией прикладной физики университета Джона Гопкинса (США). Завод с годовой производительностью 10 тыс. т аммиака вместе с термальной энергетической установкой мощностью 100 МВт по этому проекту должен размещаться на плавучем основании длиной примерно 145, шириной — 60, осадкой около 20 м и при общем водоизмещении примерно 120 тыс. т. Без трубопровода холодной воды осадка основания составит около 11 м, что позволит транспортировать его от верфи до места установки в море. Опыт строительства примерно таких же судовых барж в мировой практике уже имеется. По данным национального центра по производству удобрений США производство аммиака на океанских установках сейчас могло бы быть на 10—15 % дешевле, чем из природного газа, если бы океанские термальные установки стали бы производиться серийно.

Кроме аммиака на океанских ОТЭС можно производить и метанол. Интерес к производству этого спирта связан с возможностью его практически прямого использования в существующих конструкциях двигателей внутреннего сгорания современных автомобилей, что делает их экологически более чистыми. Кроме того, метанол — ценное сырье для химической промышленности. Единственный недостаток метанола — необходимость в источнике окиси углерода для его производства, которое описывается следующими двумя реакциями:



Для производства 1000 т метанола необходимо израсходовать примерно 700 т высококачественного угля, который придется до-

ставлять на плавучий завод. Впрочем, как считают специалисты уже упомянутой лаборатории прикладной физики, снабжение завода углем могут осуществлять те же танкеры, которые должны будут отвозить готовую продукцию. Для этого обогащенный и измельченный на береговых предприятиях уголь надо превратить в 70—75 % водную суспензию. За счет термальной установки на заводе будет получаться электроэнергия, расходуемая на электролиз воды, а за счет неполного сжигания угля при определенных термодинамических условиях — необходимые для последую-

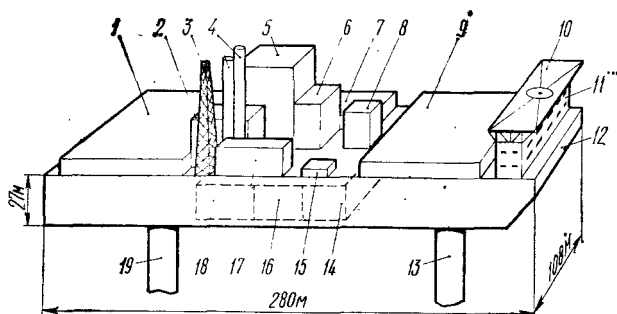


Рис. 10.5. Плавучий завод для получения метанола [38].

1, 9 — ОТЭС мощностью по 80 МВт каждая; 2 — компрессорная; 3 — сигнальная мачта; 4 — дистилляторы; 5 — регенератор отработанных газов; 6 — газификатор угля; 7 — установка для получения серы; 8 — котел-утилизатор; 10 — вертолетная площадка; 11 — помещения для команды (для обслуживающего персонала); 12 — корпус баржи; 13, 19 — трубопроводы для забора холодной воды; 14 — танк для хранения водно-угольной суспензии; 15 — установка для переработки отходов; 16 — танк для хранения отходов; 17 — установка для охлаждения воздуха; 18 — танк для хранения метанола

щего синтеза окись углерода и пар высокого давления, идущий в турбины насосов, компрессоров и вспомогательных электрогенераторов. Полученный СО проходит довольно сложную очистку, прежде чем его смешают с водородом и под давлением около 7 МПа подадут в реактор. В процессе многостадийной очистки СО отделяют от сернистого газа, примесей CO_2 , твердых частиц, паров воды. На продуктах очистки предусмотрена работа специальной установки для получения серы (около 30 т в день). Метанол-сырец, получаемый на выходе из реактора, содержит до 15 % воды, некоторое количество высших спиртов и летучих остатков. Поэтому его подвергают дополнительной дистилляции с тем, чтобы в систему хранения закачать 99 %-ный спирт. Продолжительность цикла расходование угля — заполнение емкостей для хранения этанола и других веществ определена в 28 дн. [38].

Плавучий завод будет включать два энергетических блока мощностью 80 МВт каждый и комплекс для получения метанола. Для их размещения предполагается использовать судно водоизмещением 514 тыс. т ($274 \times 119 \times 27,4$ м) с осадкой в рабочем положении примерно 20 м. Корпус судна будет выполнен из на-

пряженного бетона, а трубопроводы для подъема холодной воды — из облегченного бетона (диаметр трубопроводов около 12 м). Судно должно быть оснащено собственной движительной установкой мощностью около 12 МВт для того, чтобы противостоять сложным погодным условиям. Рассчитано, что при такой мощности двигателей судно сможет иметь ход 0,26 м/с против ветра около 13 м/с. Для предотвращения изгибающих нагрузок в трубопроводах при волнении, превышающем расчетное (высота волн 5,5 м, в предполагаемом районе эксплуатации волны большей высоты наблюдаются не более 30 ч в год), судно будет снабжено успокоителями качки.

О конструкции плавучего завода дает представление рис. 10.5. В носовой части судна размещены жилые помещения (команда и персонал завода 100 чел), в средней части — собственно завод. Остальное пространство занято двумя ОТЭС, работающими совершенно автономно. Особенность плавучего завода — максимальное использование в проекте уже действующего оборудования — стандартных электролизеров, оборудования для газификации угля, приготовления угольной суспензии, синтеза метанола, очистки газа и метанола. Дело стоит за серийной ОТЭС мощностью 80 МВт.

§ 10.5. Океанская добыча урана

Известно, что океанские воды — один из перспективных источников ядерного горючего для атомных станций: в Мировом океане в виде карбонатного иона $U_2(CO_3)^{4-}$ растворено около 4 млрд. т урана, причем концентрация его примерно постоянна по всей толще вод и составляет 3,3 мкг/л (в 10—20 раз выше концентрации растворенного золота!).

Вопросы переработки морской (океанской) воды с целью получения ядерного горючего обсуждаются уже около 20 лет. К настоящему времени исследованы различные процессы выделения соединений урана из воды: флотация, экстракция с помощью органических растворителей, осаждение с помощью различных коагуляторов, поглощение с помощью различных сорбентов. Последний процесс, точнее поверхностная сорбция — адсорбция, считается наиболее эффективным, так как не связан с использованием большого количества химических веществ, способных существенно загрязнять перерабатываемую воду, изменять ее биологические свойства за счет изменения рН. Лучшими адсорбентами считаются гидроксид титана и ионообменные смолы на основе полиамидных соединений [62].

Экономически новая технология пока еще не оправдана: стоимость эквивалентного количества соединений урана, добываемых из океанской воды, примерно в 5 раз выше получаемого при переработке урановых руд на суше окисла урана U_3O_8 (по некоторым данным стоимость одного килограмма последнего составляет

примерно 80 долл.). Однако увеличение добычи на суше в связи с потребностями энергетики, истощение запасов и соответствующий рост стоимости уже в недалеком будущем должны снизить эту разницу (уже сейчас предсказывается возможное повышение цены U_3O_8 до 250 долл./кг [35]), так что даже для стран — производителей урана переработка океанских вод может стать выгоднее, чем переработка отвалов урановых рудников. Выгода же для стран, не имеющих собственной сырьевой базы, будет очевидной.

Все разработанные к настоящему времени достаточно эффективные адсорбционные установки работают на принципе создания потока жидкости через слой адсорбента, который после насыщения подвергают регенерации с помощью различных растворителей. Адсорбент используется либо в виде твердой пористой перегородки, через которую прокачивается перерабатываемая вода, либо в виде «кипящего» слоя, в котором гранулы адсорбента поддерживаются во взвешенном состоянии самим током жидкости («псевдожизненный слой»). Последний вариант наиболее технологичен, так как позволяет осуществить непрерывный процесс получения конечного продукта. Для создания тока жидкости предполагается использовать океанские течения, в том числе и приливно-отливные, волны, потоки, создаваемые при работе ОТЭС. Во всех этих случаях для добычи уранового сырья будет использоваться возобновляемая энергия и, следовательно, в перспективе атомная энергетика может «породниться» с океанской, невзирая на протесты сторонников преимущественного развития атомной энергетики.

Одним из первых проектов добычи урана с помощью течений была идея создания адсорбционной установки в проливе Мэнэй между западной оконечностью Уэльса и о. Англси в Ирландском море. Этот пролив — одно из уникальных явлений природы: при длине около 25 км его ширина в средней части не превышает 2 км. Английские специалисты предложили в 60-х гг. использовать дно бухты в наиболее узком месте в качестве естественной поверхности для помещения адсорбента (гидроокись титана), водообмен над которым осуществлялся бы приливно-отливными течениями. Предполагалось под установку занять площадь около 1 млн. м². Проект не был осуществлен, но позволил по-новому взглянуть на возможность использования энергии приливов в естественных устьях.

К настоящему времени выполнен значительный объем исследований по изучению особенностей океанской технологии добычи урана. Эти работы позволили определить оптимальные параметры будущих промышленных установок — необходимые количества адсорбента, тип адсорбента, размеры гранул, скорости течения воды, обеспечивающие наилучшую адсорбцию, энергетические затраты на производство уранового концентрата. Определено, например, что наименьшим гидродинамическим сопротивлением обладает адсорбент в кипящем слое, при использо-

вании которого энергия на питание насосов составляет менее 5 % той, которая может быть добыта при использовании получаемого расширяющегося материала [62].

В результате исследований, выполненных на опытной установке, рассчитанной на загрузку 500 кг адсорбента при максимальной подаче воды через камеры $360 \text{ м}^3/\text{ч}$ и установленной в июле 1980 г. в Гольфстриме, в 15 милях юго-восточнее Майами, американские специалисты показали, что в течение года с помощью 72 кг зернистой гидроокиси титана (диаметр частиц 2 мм, плотность $1,4 \text{ г/см}^3$) при 12-кратной десорбции можно получить примерно 300 г концентрата. Ионообменной смолы с гранулами диаметром 0,4—1,0 мм необходимо в 3 раза меньше. Опытная установка была выполнена в виде блока с четырьмя квадратными камерами размером $0,7 \times 0,7 \text{ м}$, вода в камеры подавалась погружным насосом через диффузор-распределитель.

Более мощную установку, рассчитанную на получение из морской воды 10 кг урана в год, в 1983 г. должны были запустить японские специалисты. В этой установке также используется гидроокись титана, но с размером зерен 1 мм, что обеспечивает увеличение эффективной площади адсорбента по сравнению с американской установкой в 4 раза и, соответственно, уменьшает необходимое количество его примерно в такое же число раз. Вода в установке прокачивается через плотный слой адсорбента насосами со скоростью 1 см/с. Министерство внешней торговли и промышленности Японии планирует в 1985—1990 гг. оснастить все атомные электростанции страны установками по добыче урана из морской воды. Ожидается, что в 1990 г. это даст возможность получать до 3400 т урана.

В Японии разработан проект оснащения установки для добычи урана плавучей океанской термальной станции. Подсчитано, что ОТЭС мощностью 100 МВт, расходующая примерно 85 % полезной вырабатываемой электроэнергии на дополнительную прокачку воды через адсорбент, в котором гидравлические потери составляют примерно 15 %, позволит в год добывать количество урана, достаточное для работы в течение года АЭС мощностью 1 ГВт, т.е. в 10 раз больше, чем установленная мощность ОТЭС! В этих расчетах КПД адсорбции принят равным 50 % — десорбции — 90 %, из 110 т уранового концентрата путем обогащения получают примерно 23 т обогащенного урана с содержанием изотопа U^{235} 2,7 %, достаточно для работы водяного реактора на медленных нейтронах.

Схема блока переработки воды показана на рис. 10.6. Через адсорбент пропускается весь сток ОТЭС (и теплая, и холодная вода), а также дополнительное количество воды, прокачиваемое за счет электроэнергии, вырабатываемой станцией.

Не менее заинтересована в получении океанского урана ФРГ. В энергетическом балансе этой страны АЭС пока не занимают ведущую роль. На их долю приходится установленная мощность около 10 ГВт, причем среднегодовая потребность в природном

уране составляет примерно 1300 т. Прогнозные оценки показывают, что к 2030 г. общее потребление энергии в стране почти утроится. Основную роль должны будут взять на себя АЭС, установленная мощность которых должна возрасти в 1000 раз. При современной технологии переработки ядерного горючего это потребует астрономических количеств расщепляющихся материалов для реакторов, запасами которых ФРГ не располагает. Это и объясняет повышенный интерес к океану, как источнику природного урана.

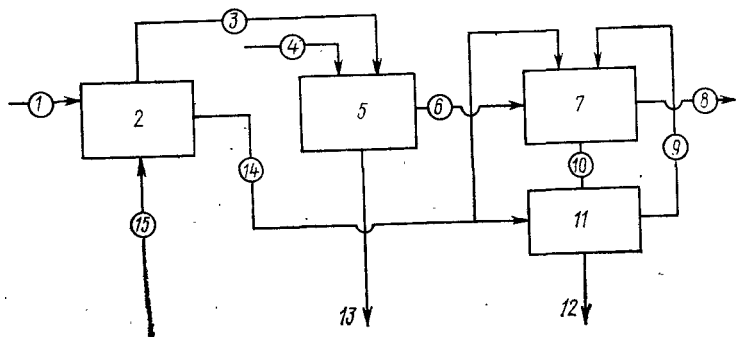


Рис. 10.6. Схема переработки океанской воды при получении уранового концентрата.

1 — подача теплой поверхностной воды; 2 — ОТЭС; 3 — подача сбрасываемых вод ОТЭС; 4 — подача поверхностной воды; 5 — адсорбционный блок; 6 — подача насыщенного соединениями урана адсорбента; 7 — блок десорбции; 8 — выдача уранового концентрата; 9 — подача реагентов; 10 — подача отработанных реагентов; 11 — блок восстановления реагентов; 12, 13 — сброс отработанных вод

В настоящее время учеными и инженерами ФРГ разработано несколько вариантов океанских установок, работающих как на естественной прокачке воды через адсорбент, так и на принудительной прокачке, выполненных в виде стационарных береговых либо плавучих конструкций (заякоренные платформы-заводы, одно- и многокорпусные суда, платформы, продукция которых для переработки передается на обогатительную установку, размещенную на судне обеспечения). На рис. 10.7 показана схема устройства перерабатывающей заякоренной платформы, устанавливаемой на естественном течении, разработанная специалистами фирмы «Ураненбергбау». Размеры установки рассчитаны на получение 100 т урана в год при вертикальном течении воды через камеру с адсорбентом со скоростью 0,05 м/с. Переработка ведется в «кипящем» слое, а для десорбции адсорбент прокачивается через соответствующие аппараты, размещенные в центральном корпусе. Там же находятся необходимое энергетическое оборудование, запасы реагентов, склад готовой продукции и все необходимое для обеспечения автономной длительной работы комплекса.

Вертикальные размеры и подъем платформы над поверхностью воды определены для условий Флоридского течения.

Кроме указанных выше адсорбентов специалисты ФРГ уделяют большое внимание поиску более дешевых природных веществ, которые могут быть эффективными адсорбентами. Специалистами фирмы «Дорнье систем», например, разработана установка с принудительной прокачкой морской воды, в которой в качестве адсорбента применен гранулированный почвенный гумус (перегнившие органические вещества, содержащие набор гумино-

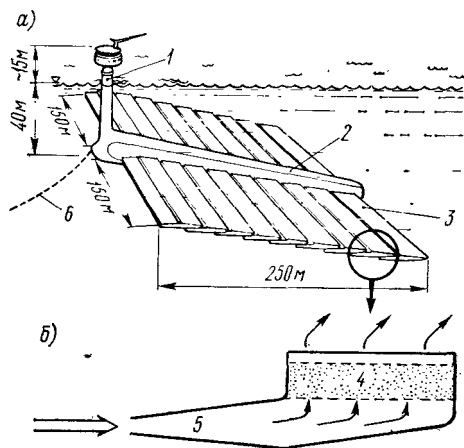


Рис. 10.7. Завод, вырабатывающий урановый концентрат за счет энергии океанского течения [62]: а — общий вид плавучего завода; б — адсорбционная камера в разрезе.

1 — надводная платформа с вертолетной площадкой и шахтой; 2 — центральный корпус с десорбционными установками; 3 — адсорбционная камера; 4 — «книжный» слой адсорбента; 5 — входной диффузор с форкамерой; 6 — якорная система

вых кислот, ускоряющих ход процессов адсорбции). В такой установке при скорости воды (вертикального потока) $0,1 \text{ м/с}$ на входе в слой адсорбента и коэффициенте адсорбции $0,5$ добыча 100 т в год урана возможна при площади поверхности, занимаемой адсорбентом, всего в 20 тыс. м^2 (в предыдущей установке она примерно в 4 раза больше). Адсорбент должен размещаться в 80 блоках площадью $10 \times 25 \text{ м}$ каждый. В судовом исполнении при четырехслойном расположении блоков такая установка вписывается в габариты океанского судна длиной 250 м . Развитие способов переработки океанской воды с целью получения урана таким образом оказывается выгодным не только энергетике, но и судостроительной промышленности.

§ 10.6. Комплексный подход к освоению ресурсов океана

Выше уже упоминалась возможность объединения различных вариантов преобразователей океанской энергии с целью более полного использования ресурсов. Речь шла об одновременном использовании в единых комплексах каких-либо двух устройств. Например, об объединении волновых и тепловых преобразователей с морскими фермами для выращивания водорослей, прилив-

ных электростанций и ветровых, волновых и ветровых с использованием плавучих конструкций первых для размещения вторых. Просматривается возможность совместной эксплуатации ОГЭС и СоленЭС, СоленЭС и ОТЭС. Возможны и другие сочетания. Более того, возможно объединение трех и, вероятно, даже четырех типов преобразователей. Например, в системе ОТЭС, ВолнЭС и БиоЭС волновые преобразователи могли бы играть роль защитных волногасящих устройств и первичных источников энергии, необходимых для запуска ОТЭС.

Другой тип интеграции — объединение на базе одного или большого количества преобразователей целого ряда в той или иной степени связанных производств. Один такой пример был продемонстрирован на рис. 8.9, где показывалась возможность комплексной переработки келпа. Другой приведен на рис. 10.8 и дает представление о разветвленном производстве, которое может быть организовано на базе ОТЭС и БиоЭС. На этом рисунке схема, заимствованная из работы Ж. Констанса [45], дополнена ветвью переработки морской воды с целью получения уранового концентрата [62]. Все отдельные технологические процессы этой схемы в той или иной степени уже отработаны и создание комплекса вполне реально. Подобный комплекс мог бы стать основой для промышленного развития уединенного островного государства, мог бы быть ведущим предприятием искусственного острова или плавучего города в океане.

Наконец, можно говорить о еще более высокой степени интеграции — объединении на основе использования океанской энергетики хозяйственной и природопреобразующей деятельности в океане вообще. Подобная интеграция предполагает использование всех видов преобразователей океанской энергии, увязанных в единый комплекс с производственными предприятиями и океанскими фермами, и действующих в интересах мирового сообщества. На начальном этапе создания такой комплекс мог бы развиваться по линии разработки энергетических и биологических ресурсов. Затем сюда же можно было бы подключить разработку минеральных ресурсов океана и управление климатом планеты путем воздействия с помощью океанских преобразователей на природные явления.

Схема такой системы могла бы иметь вид, показанный на рис. 10.9. Она, безусловно, требует детальной проработки в части правовых, социально-экономических и политических вопросов, создания математических моделей взаимодействия океанского производства с производством на суше, его взаимодействия со средой, управления и контроля. Вся деятельность такой системы должна была бы происходить под руководством ООН и ее институтов, которые бы устанавливали приоритеты отраслей, руководили бы финансированием и распределением ресурсов в интересах членов сообщества. До недавнего времени подобными системами занимались больше фантасты, но постепенно человечество подходит к тем рубежам, начиная с которых ему волей-неволей придется

объединяться, чтобы противостоять сырьевому, энергетическому и экологическому кризисам.

Развитие океанской энергетики ставит перед мировым сообществом ряд совершенно новых правовых задач, связанных с возможными помехами судоходству в результате размещения в открытом море океанских преобразователей, «энергетических» ферм, возможным влиянием на климат в региональном или даже глобальном масштабе, переработкой океанских ресурсов энергии, по-

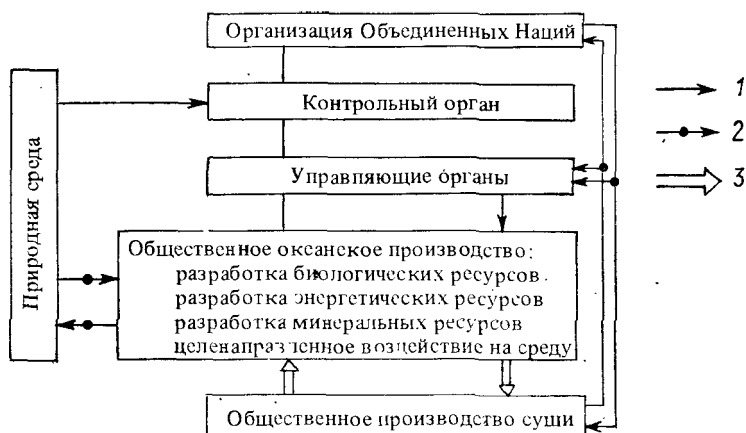


Рис. 10.9. Система комплексного использования ресурсов Мирового океана.

1 — информационные потоки; 2 — физическое воздействие; 3 — потоки сырья и продукции

праву принадлежащих всему человечеству, в интересах отдельных государств или групп государств. Учитывая возможность создания глобальной энергосистемы и промышленного производства на основе возобновляемых ресурсов океана, можно предположить, что здесь уже в ближайшем будущем возникнут международные проблемы, равные, если не превосходящие по своей остроте, тем, которые возникли при регулировании разведки и разработки минеральных ресурсов континентального шельфа, рыболовства и мореплавания. Принципиальные пути решения подобных проблем намечает разработанная недавно под эгидой ООН конвенция по морскому праву.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Океанская энергетика — обширная область научно-технической и хозяйственной деятельности, в которой пересекаются интересы многих отраслей народного хозяйства. Речь идет не только о разработке новых источников энергии — задача сама по себе чрезвычайно важная, особенно если учесть энергетический голод развивающихся стран, — но и о принципиальной возможности полной перестройки хозяйственной деятельности отдельных регионов и всей планеты на основе комплексного использования ресурсов Мирового океана. Океанская энергетика, как мы могли убедиться, способна обеспечить разработку океанских запасов полезных ископаемых, получение высококачественных энергоносителей, получение пищевых продуктов. Ее развитие позволит не только создать новую энергетическую базу, но и избавиться от целого ряда экологически опасных технологий, сделать управляемым климат планеты. Все это уже не фантастика, а вполне реальные проекты, необходимая основа для осуществления которых практически задана.

Чтобы океанская энергетика заняла свое место в хозяйстве Земли, предстоит многое сделать, причем главное здесь скорее не за наукой и техникой, а за политикой: развитие океанской энергетики в полной мере требует усилий всего человечества, так как Мировой океан и его ресурсы, в том числе энергетические, — достояние всего мирового сообщества. В этом плане развитие океанской энергетики — одна из тех возможностей, которые существуют у народов мира для того, чтобы объединить усилия не на противоборстве, а на решении грандиозных по своим масштабам созидательных задач.

Даже в том случае, если в ближайшие десятилетия по каким-то причинам научно-технического, экономического, социального

и т. п. свойства идеи развития океанской энергетики не будут реализованы, она не сойдет с повестки дня: уж очень разнообразны возможности, которые сулит осуществление даже имеющихся предложений. Здесь может быть уместно обратить еще раз внимание читателей на то обстоятельство, что оптимальные варианты многих видов преобразователей океанской энергии — это не только энергетические объекты, но и наилучшие средства защиты от штормов, и средства воздействия на некоторые природные процессы, с которыми приходится постоянно сталкиваться тем, кто занят морским строительством, индустрией отдыха, марикультурой.

А те возможности, которые океанская энергетика открывает для творчества? Разве они исчерпаны? Конечно нет! Как и всякая новая отрасль океанская энергетика привлекает к себе внимание наиболее «изобретательной» части человечества, и можно смело предположить, что в области океанской энергетики мы еще услышим о сотнях оригинальных технических решений. Но для развития океанской энергетики, как ни для одной другой отрасли хозяйственной деятельности, необходим прочный мир на нашей планете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акуличев В. А. Океан и энергетика.— Природа, 1979, № 8, с. 29—37.
2. Алексеев В. В. Эволюция биосферы. Перспективы использования солнечной энергии.— Достижения и перспективы, 1981, вып. 19, № 7, с. 53—62.
3. Ауэр, Бос, Робертс, Тоут. Нетрадиционные энергоресурсы.— В кн.: Энергетика мира. М., Энергия, 1979, с. 89—98.
4. Ахметов Р. Б. Состояние и перспективы использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии.— Изв. АН СССР. Энерг. и трансп., 1984, № 3, с. 3—20.
5. Бериштейн Л. Б. Приливные электростанции в современной энергетике. М., Энергия, 1961.
6. Варфоломеев С. Д., Зайцев С. В., Зацепин С. С. Проблемы преобразования солнечной энергии путем биофотоллиза воды.— Биологическая химия (Итоги науки и техники). М., ВИНТИ, 1978, № 12, с. 269—289.
7. Ветроэнергетика/Под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ. под ред. Я. И. Шефтера. М., Энергоатомиздат, 1982.
8. Волшаник В. В., Зубарев В. В., Франкфурт М. О. Использование энергии ветра, океанских волн и течений.— Итоги науки и техн. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии М., ВИНТИ, 1983.
9. Гарвей Д. Атмосфера и океан. М., Прогресс, 1982.
10. Егоров Н. И. Физическая океанография. Л., Гидрометеониздат, 1966.
11. Заварзин Г. А. Биологическая энергетика и экологические последствия ее широкого использования.— Достижения и перспективы, 1982, № 27, с. 74—84.
12. Зубарев В. В. Проблема использования энергии ветра для электрификации: Обзорная информ. М., Информэнерго, 1980.
13. Ильин А. К., Тикменов В. В. Основные характеристики демонстрационной океанской тепловой электростанции мощностью 500 кВт, Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1982.
14. Ильин А. К., Тикменов В. В. Схема и характеристики автономной арктической тепловой станции мощностью 100 кВт. Владивосток, изд. Тихоокеан. океанологического ин-та, АН СССР, 1982.
15. Использование энергии приливных и ветровых волн в океане/Отв. ред. В. А. Акуличев, Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1984.
16. Кизеветтер И. В., Грюнер В. С., Евтушенко В. А. Переработка морских водорослей и других промысловых водных растений. М., Пищевая промышленность, 1967.
17. Кoryта М. Ионы, электроды, мембраны. М., Мир, 1983.
18. Лакомб А. Энергия моря. Л., Гидрометеониздат, 1972.
19. Мак-Кормик М. Преобразование энергии морских волн/Пер. с англ.— М., Энергоатомиздат, 1985.
20. Малышев Н. А., Лятхер В. М. Ветроэнергетические станции большой мощности.— Гидротехническое стр-во, 1983, № 12, с. 38—44.
21. Методы преобразования энергии океана. Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1983.

22. Моисеев Н. Н. Человек, среда, общество. М., Наука, 1982.
23. Наука об океане/Сокр. пер. с англ. М., Прогресс, 1981.
24. Новые разработки в области конструкций, стройматериалов и гидроагрегатов, выполненные на основе исследований Кислогубской приливной электростанции. Сб. ст./Под ред. Л. Б. Бернштейна. М., 1980.
25. Преобразование тепловой энергии океана/Отв. ред. В. А. Акуличев. Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1984.
26. Рамад Ф. Основы прикладной экологии/Пер. с фр. Л., Гидрометеиздат, 1981.
27. Сидоров В. И. Об использовании ветроэнергетических ресурсов.—Изв. АН СССР. Энерг. и трансп., 1980, № 3, с. 73—82.
28. Степанов В. Н. Океаносфера. М., Мысль, 1983.
29. Стырикович М. А., Синяк Ю. В. Социально-экономические аспекты долгосрочного развития энергетики.—Достижения и перспективы, 1982, № 27, с. 27—41.
30. Уильямс Дж. Основы контроля загрязнения моря. Л., Судостроение, 1984.
31. Холл Д. О. Солнечная энергия как топливо.—Импакт, 1982, № 3, с. 37—48.
32. Чернов Г. И. Энергетика и промышленная микробиология.—Ж. Всес. химич. об-ва им. Д. И. Менделеева, т. 27, вып. 6, 1982, с. 665—669.
33. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра. М., Энергоатомиздат, 1983.
34. Электростанции на нетрадиционных источниках энергии и использование их в энергосистемах: Обзорная информация/Зубарев В. В. и др. М., Информ-энерго, 1983.
35. Энергия и климат: Сб. ст./Пер. с англ. Л., Гидрометеиздат, 1981.
36. Abuelnaga A., Seireg A. Optimum design and control of self-supported wave energy systems.—Trans. ASME J. Energy Res. Technol., 1982, 104, N 3, p. 247—256.
37. Anderson H. H. Lunaheat: Let's abolish winter in the northern regions.—Pumps'79. 6th Technol. Conf. Beaford, 1979, p. 83—88.
38. Avery W. H. Ocean thermal energy—status and prospects.—Mar. Technol. Soc. J., 1978, vol. 12, N 2, p. 9—16.
39. Avery W. H., Richards D., Niemeyer W. G., Shoemaker J. D. OTEC energy via methanol production. 18th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf., Energy Marketplace, Orlando, Fla, Aug. 21—26, 1983. Proc. vol. 1, N. Y., 1983, p. 346—354.
40. Bailey D. Z. Large-span tensioned hydro(aero) foils for power generation anchored across a stream, current or wind.—Mar. Technol. Soc. J., 1978, vol. 11, N 5—6, p. 22—29 (ЭИ АН СССР ПБСР, 1979, вып. 20, реф. 181).
41. Bonnefille P. Tidal power stations.—In: Primary energy: present status and future respect. Berlin, 1982, p. 319—334.
42. Booda L. L. National, International in ocean energy grows.—Sea Technol., vol. 22, N 8, p. 20—21, 23. (1982).
43. Budal K., Falnes J. Wave power conversion by point absorbers: a Norwegian project.—Int. Journ. Ambient Energy, 1982, vol. 3, N 2, p. 59—67.
44. Cohen R. Energy from the ocean.—Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1982, vol. A307, N 1499, p. 405—435.
45. Constans J. Marin Sources of energy. Pergamon Press, 1979.
46. Drew S. Wave energy: the search for a submerged oscillating water column system.—Solar World Forum. Proc. Int. Solar Energy Soc., 1981, vol. 4. Oxford, 1982, p. 3080—3085.
47. Eckener U. Energie aus Meereswellen — Technologie und Natzung.—Jahrb. Schiffbautechn. Ges., 1978, Bd. 72. Berlin, 1979, S. 39—44.
48. El-Bussuoni A. M. A., Sheffield J. W., Vezirogly T. N. Hydrogen and fresh water production from sea water.—Int. Journ. Hydrogen Energy, 1982, vol. 7, N 12, p. 919—932.
49. Evans D. V. Power from water waves.—Ann. Rev. Fluid. Mech., 1981, N 13, p. 157—158.
50. Giannotti J. G., Vadus J. R. Ocean thermal energy conversion: ocean engineering technology development—Oceans' 81, Conf. Rec. 1981, p. 870—878.

51. Golden A. Oceans of energy. N. Y. and London, 1979, 142 p. (Пер. А. Голден. Океаны энергии. М., Знание, 1983).
52. Golding E. W. The generation of electricity by wind power. London, 1955.
53. Gorlow A. Small scale tidal energy consumption.—Energy Res. and Conserv. Relat. Built. Environ.—Proc. Int. Conf. vol. 1, Miami Beach, 1980, p. 492—500.
54. Greenbaum E. Application of intact algae to the biophotolysis problem.—Biotechnol. and Bioeng. Symp., 1982, N 12, p. 469—474.
55. Igra O. Research and development for shrouded wind turbines.—Energy Conv. and Manag., 1981, vol. 21, N 1, p. 13—48.
56. Isaacs J. D. Utilization of the energy in ocean waves.—Ocean Enging., 1976, vol. 3, p. 175—187.
57. Jellineck H. H. G., Masuda H. Osmo-power theory and performance of an osmo-power pilot plant.—Ocean Enging., 1981, vol. 8, N 2, p. 103—128.
58. Johnson D. H. The exergy of the ocean thermal resource and analysis of second-law efficiencies of idealized ocean thermal energy conversion power cycles.—Energy (Gr. Brit.) 1983, vol. 8, N 12, p. 927—946.
59. Kamogawa H. OTEC research in Japan.—Energy, 1980, vol. 5, N 6, p. 481—492.
60. Kilar I. A., Stillz P. H., Ancona D. F. Offshore wind-energy-conversion systems.—J. Energy, 1981, vol. 5, N 2, p. 79—83.
61. Kirk D. W., Leadas A. E. Precipitate formation during sea water electrolysis.—Int. Journ. Hydrogen Energy, 1982, vol. 7, N 12, p. 925—932.
62. Koske P. H., Ohlrogge K., Denzinger H. Urangewinnung aus Meerwasser—Grundlagen, Entwicklungsstand und Perspektiven.—„mt“, 1982, vol. 13, N 3, p. 63—69 (ЭИ АН СССР ПБСР, 1984, вып. 11, реф. 103).
63. Larsen P. F. Potential environmental consequences of tidal power development seaward of tidal barrages.—Oceans'81, Conf. Rec., 1981, p. 908—912.
64. Lavi A. Innovative ocean energy system: projects and problems.—In: Oceanography. The present and Future, N. Y., 1980, p. 327—346.
65. Leone J. E. Marine biomass energy project.—Mar. Technol. Soc. Journ., 1980, vol. 14, N 2, p. 12—31.
66. Madeley G. D. Future energy sources.—Gas Eng. and Manag., 1978, vol. 18, N 8, p. 262—274.
67. Manning P. T. The environmental impact of the use of large wind turbines.—Wind Eng., 1983, vol. 7, N 1, p. 1—11.
68. Matsuura K., Honda T., Kinoshita H. Thermoelectric generation by direct heat exchange.—Technol. Rep. Osaka Univ., 1982, vol. 33, N 1691, p. 59—68.
69. McCormick M. E., Johnson D. G., Hebron R. Wave energy conversion in restricted waters by a heaving cylinder/linear-inductance system.—Oceans'81. Conf. Rec., N. Y., 1981, p. 898—902.
70. McGuinness T., McHalle F. OTEC cold water pipe (CWP) at sea test program.—Oceans'82: Conf. Rec., N. Y., 1982, p. 560—564.
71. Miyazaki T., Masuda V. Test on the wave power generator „Kaimei“.—Proc. 12th Annu. offshore technol. conf. vol. 1. Dallas, Tex., 1980, p. 101—117 (ЭИ АН СССР ПБСР, 1980, вып. 30, реф. 228).
72. Mowl A., Williams W. Renewable energy supplies and environmental issues. Energy Rural and Isl. Commun. Proc. Conf. Oxford, 1981, p. 93—98.
73. Nishi A. Performance estimation of ocean current power plant.—4th Miami Int. Conf. Alternative Energy Sources. Proc. Condens. Pap., Coral Gables, Fla.; 1981, p. 392—395.
74. Olson J. M., Bernstein J. D. Solar production of hydrogen.—Ind. and Eng. Chem. Prod. Res. and Develop., 1982, vol. 21, N 4, p. 640—646.
75. Olsson M. S. Salinity-gradient vapor-pressure power conversion.—Energy (Gr. Brit.), 1982, vol. 7, N 3, p. 237—246.
76. Penney T., McCormick M., Miles J. Development program leading to an optimized oscillating water column wave energy converter featuring a bi-directional turbine.—AIAA Paper, 1981, N 2547, p. 12.
77. Ralf R., Troake R. P. Marine growth on North Sea oil and gas plat-

forms.—Proc. 12th Annu. Offshore Technol. Conf., vol. 4. Dalas, Tex., 1980, p. 42—49.

78. Richards W. E., Vadus I. R. Ocean thermal energy conversion: technology development.—Ocean Manag., 1981, vol. 7, N 1—4, p. 327—352.

79. Robinson H. L. The Darriens wind turbine for electrical power generation.—Aeronautical Journ., 1981, June, p. 244—252.

80. Ross J. H., Watts J. L. Mored pipe/mobile platform: an innovative approach to the floating OTEC plant.—Oceans'82. Conf. Rec. N. Y., 1982, p. 566—571 (ЭИ АН СССР ПБСР, 1984, вып. 1, реф. 5).

81. Schmitt W. R. Marin power—accomplishments of the 1970's.—17 IECEC, vol. 3, 1982, p. 1418—1426.

82. Seibert M., Lien S., Weaver P. F., Janzen A. F. Photobiological production of hydrogen and electricity.—Solar Energy Convers, vol. 2. Selec. Lect. Int. Symp. Solar Energy Util., Toronto, 1981, p. 273—292.

83. Shelpuk B., Levendowski A. A. Alterate cycles to ocean thermal energy conversion.—Proc. 11th Annu. Offshore Technol. Conf., vol. 3. Dallas, Tex., 1979, p. 2031—2038 (ЭИ АН СССР ПБСР, 1981, вып. 22, реф. 165).

84. Soden I. E., Eaton R., Walsh J. P. Progress in the development and testing of OTEC riser cables.—Oceans'82. Conf. Rec. N. Y., 1982, p. 587—604.

85. Tidal power test taps Fundy flow.—ENR, 1981, vol. 207, N 18, p. 39—40.

86. Vadus J. R. OTEC ocean engineering technology development.—Oceans'82, Conf. Rec. N. Y., 1982, p. 547—559.

87. Wakao N. Heat extraction from tropical seawater.—Proc. 1st Asian and Pacif. Chem. Congr. Singapore, 1982, p. 167—175.

88. Warne D. F. Wind as an offshore source of power.—Ind. Isl. Int. Conf., London, 17—19 Nov., 1981, London, 1981, p. 183—188.

89. Wick G. L., Schmitt W. R. Prospects for renewable energy from the sea.—Mar. Technol. Soc. J., 1977, vol. 11, N 5—6, p. 16—20. (ЭИ АН СССР ПБСР, 1979, № 2, реф. 14).

90. Wilcox H. A. The ocean as a supplier of food and energy.—Experientia, 1981, N 38, p. 31—35.

91. Wilde P. Environmental programs for ocean thermal energy conversion (OTEC).—Oceans'81. Conf. Rec. N. Y., 1981, p. 854—861. (ЭИ АН СССР ПБСР, 1983, № 35, реф. 266).

92. Windpower. A. Handbook, N. Y., 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От научного редактора	3
Предисловие	5
Глава 1. ЭНЕРГЕТИКА МИРА И РЕСУРСЫ ОКЕАНСКОЙ ЭНЕРГИИ	7
§ 1.1. Прогнозы энергетической ситуации	7
§ 1.2. Общий баланс возобновляемой энергии океана	10
§ 1.3. Ресурсы тепловой энергии	14
§ 1.4. Энергетический потенциал океанских течений	18
§ 1.5. Использование энергии ветра и волнения	21
§ 1.6. Ресурсы приливной энергии	25
§ 1.7. Потенциал энергетики на растворении пресных вод в океане	30
§ 1.8. Перспективы использования биомассы	33
Глава 2. ОКЕАНСКАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА: ОТЭС ЗАМКНУТОГО И ОТКРЫТОГО ЦИКЛОВ	36
§ 2.1. Историческая справка	36
§ 2.2. Основные принципиальные схемы ОТЭС	41
§ 2.3. Выбор оптимального типа преобразователя	47
§ 2.4. Проекты ОТЭС замкнутого цикла	53
§ 2.5. ОТЭС с открытым рабочим циклом	56
Глава 3. ДРУГИЕ ТИПЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ	60
§ 3.1. Использование перепада температур океан—атмосфера	60
§ 3.2. Особенности технических решений ОТЭС	63
§ 3.3. Прямое преобразование тепловой энергии	73
§ 3.4. Методы интенсификации работы ОТЭС	78
§ 3.5. Малогабаритные преобразователи	81
Глава 4. ОКЕАНСКАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА	87
§ 4.1. Исторический аспект	87
§ 4.2. Классификация ветроэлектрических установок	90
§ 4.3. Основные соотношения для расчета ветроустановок	95
§ 4.4. Ветровые установки в открытом море	100
Глава 5. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ОКЕАНСКИХ ТЕЧЕНИЙ	111
§ 5.1. Общие сведения об ОГЭС	111
§ 5.2. Общая характеристика технических решений	113
§ 5.3. Вантовая турбина Д. Бейли и турбина А. Ниши	119

§ 5.4. Турбина в насадке	124
§ 5.5. Гидроэнергетические узлы в проливах	129
Глава 6. ПРОЕКТЫ ВОЛНОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	132
§ 6.1. Исторический аспект	132
§ 6.2. Классификация волновых преобразователей	136
§ 6.3. Преобразователи с качающимися элементами	139
§ 6.4. Точечные преобразователи	143
§ 6.5. Гидропневматические преобразователи	149
§ 6.6. Волновые насосы	156
§ 6.7. Концентраторы волновой энергии	160
Глава 7. ЭНЕРГЕТИКА НА ПЕРЕПАДАХ СОЛЕННОСТИ	165
§ 7.1. Взгляд на проблему	165
§ 7.2. Основные соотношения для расчета преобразователей солёностной энергии	167
§ 7.3. Гидроосмотические системы	170
§ 7.4. «Безмембранные» системы	176
§ 7.5. Прямое преобразование солёностной энергии в электрическую	180
§ 7.6. Солённые пруды	183
Глава 8. БИОЛОГИЯ В ОКЕАНСКОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	186
§ 8.1. Энергетическая биотехнология	186
§ 8.2. Фотосинтез	189
§ 8.3. Водоросли как источник энергетики	192
§ 8.4. Океанские фермы для выращивания макроводорослей	195
§ 8.5. Проект «Биосолар»	202
§ 8.6. Биологические методы получения водорода	206
§ 8.7. Варианты энергетических биотехнологий	212
Глава 9. ОКЕАНСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ	217
§ 9.1. Экологический подход	217
§ 9.2. ОТЭС и океанская среда	221
§ 9.3. Особенности воздействия на среду ветровых установок	230
§ 9.4. Океанские гидроэлектростанции и среда	232
§ 9.5. Особенности воздействия на среду волновых электростанций	235
§ 9.6. Приливные станции и окружающая среда	237
§ 9.7. Приливы и возможность воздействия на климат	240
§ 9.8. Биологическое воздействие среды на энергетические объекты	242
§ 9.9. Обобщённая оценка воздействия на среду различных типов преобразователей океанской энергии	246
Глава 10. ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОКЕАНСКОЙ ЭНЕРГИИ	250
§ 10.1. Передача электроэнергии на берег	250
§ 10.2. Аккумуляция энергии	254
§ 10.3. Водород в океанской энергетике	258
§ 10.4. Плавающие заводы для производства аммиака и метанола	261
§ 10.5. Океанская добыча урана	264
§ 10.6. Комплексный подход к освоению ресурсов океана	268
Заключение	272
Список литературы	274
	279