

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Невинномысский технологический институт (филиал)**

Методические указания по выполнению практических работ по
дисциплине «Энергетические установки на основе возобновляемых
источников энергии»

Направление подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника
Профиль подготовки – Электропривод и автоматика промышленных
установок и технологических комплексов
Квалификация выпускника – бакалавр

Методические указания предназначены для проведения практических занятий по дисциплине «Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и соответствуют требованиям ФГОС ВО направления подготовки бакалавров.

Составитель: доцент кафедры ИСЭА А.И. Колдаев

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Ветроэнергетика. Мощность ветроэнергетических установок	5
2. Энергия солнца. Солнечные коллекторы	11
3. Энергия океана.	15

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня вопросы энергосбережения и экологии вышли на первый план и требуют незамедлительных решений. Для успешной работы инженерам-теплоэнергетикам следует уметь правильно анализировать природные и экономические условия и технические возможности для использования энергосберегающих технологий, к которым относится также использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. А для этого необходимо иметь теоретическую базу и знать типовые методики расчетов.

В пособии имеются необходимые справочные данные и аналитические зависимости для некоторых данных, представленных в справочной литературе.

Предусматривается как индивидуальное решение задач студентами по вариантам, так и командная работа студентов в группах.

1. Ветроэнергетика. Мощность ветроэнергетических установок

Ветроэнергетика с ее современным техническим оснащением является вполне сложившимся направлением энергетики. Ветроэнергетические установки мощностью от нескольких киловатт до мегаватт производятся в Европе, США и других частях мира. Большая часть этих установок используется для производства электроэнергии, как в единой энергосистеме, так и в автономных режимах.

Основными достоинствами ветроэнергетики являются: простота конструкций и простота их эксплуатации; доступность этого поистине неисчерпаемого источника энергии. К недостаткам следует прежде всего отнести непостоянство направления и силы ветра; возможность длительных простоев и вытекающая из этого необходимость аккумуляирования и резервирования ветроэнергетических установок; отчуждение территорий и изменение традиционных ландшафтов.

Известно, что при скорости ветра u , м/с, и плотности воздуха ρ , кг/м³, ветроколесо, ометающее площадь F , м² развивает мощность P , Вт, определяемую

$$P = \xi F \rho u^3 / 2. \quad (1.1)$$

Здесь ξ – коэффициент мощности, характеризующий эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока и принимаемый равным 0,35.

Из (1.1) видно, что мощность P пропорциональна ометаемой площади F и кубу скорости. Коэффициент мощности зависит от конструкции ветроколеса и скорости ветра. Так как скорость ветра непостоянна, а мощность очень сильно зависит от скорости, то выбор оптимальной конструкции ветроколеса во многом определяется требованиями потребителя энергии. Обычно среднегодовая мощность, снимаемая с единицы площади ветроколеса, пропорциональна плотности воздуха и кубу средней скорости. Максимальная проектная мощность ветроэнергетической установки (ВЭУ) определяется для некоторой стандартной скорости ветра. Обычно эта скорость равна примерно 12 м/с, при этом снимаемая с 1 м² ометаемой площади мощность – порядка 300 Вт при значении ξ от 0,3 до 0,45. В районах с благоприятными ветровыми условиями среднегодовое производство электроэнергии составляет 22 – 30% его максимального проектного значения. Срок службы ветрогенераторов обычно не менее 15 – 20 лет, а их стоимость колеблется от 1000 до 1500 долл. США за 1 кВт проектной мощности.

Одно из основных условий при проектировании ветровых установок – обеспечение их защиты от разрушения очень сильными случайными

порывами ветра. Ветровые нагрузки пропорциональны квадрату скорости ветра, а раз в 50 лет бывают ветры со скоростью, в 5 – 10 раз превышающей среднюю, поэтому установки приходится проектировать с очень большим запасом прочности. Кроме того, скорость ветра очень колеблется во времени, что может привести к усталостным разрушениям, а для лопастей к тому же существенны переменные гравитационные нагрузки (порядка 10^7 циклов за 20 лет эксплуатации).

Причиной возникновения ветров является поглощение земной атмосферой солнечного излучения, приводящее к расширению воздуха и появлению конвективных течений. В глобальном масштабе на эти термические явления накладывается эффект вращения Земли, приводящий к появлению преобладающих направлений ветра. Кроме этих общих, или синоптических, закономерностей многое в этих процессах определяется местными особенностями, обусловленными определенными географическими или экологическими факторами. Скорость ветров увеличивается с высотой, а их горизонтальная составляющая значительно больше вертикальной. Последнее обстоятельство является основной причиной возникновения резких порывов ветра и некоторых других мелкомасштабных эффектов. Суммарная кинетическая энергия ветров оценивается величиной порядка $0,7 \cdot 10^{21}$ Дж. Вследствие трения, в основном в атмосфере, а также при контакте с земной и водной поверхностями эта энергия непрерывно рассеивается, при этом рассеиваемая мощность – порядка $1,2 \cdot 10^{15}$ Вт, что равно примерно 1% поглощенной энергии солнечного излучения.

Для анализа ветроэнергетического потенциала местности составляется ветроэнергетический кадастр, который представляет собой районированную систему численных характеристик режима ветра. Ветроэнергетический кадастр – это совокупность объективно достоверных и необходимых количественных сведений, характеризующих ветер как источник энергии. В кадастре все характеристики обычно представлены в табличной или графической форме, используя материалы многолетних наблюдений.

В большинстве прикладных задач ветроэнергетики гораздо важнее знать не суммарное количество энергии, которое может выработать ветроустановка, например, за год, а ту мощность, которую она может обеспечивать постоянно. При сильном ветре, от 10 до 12 м/с, ветроустановки вырабатывают достаточно электроэнергии, которую иногда даже приходится сбрасывать в систему или запасать. Трудности возникают в периоды длительного затишья или слабого ветра. Поэтому для ветроэнергетики является законом считать районы со средней скоростью ветра менее 5 м/с малопригодными для размещения ветроустановок, а со скоростью 8 м/с – очень хорошими. Но

независимо от этого во всех случаях требуется тщательный выбор параметров ветроустановок применительно к местным метеоусловиям.

Для проведения анализа ветроэнергетического потенциала требуется предварительно проводить в течение года ежедневные 5-ти кратные измерения скорости ветра с равными промежутками времени: в 9 ч, 12 ч, 15 ч, 18 ч и в 21ч.

Возможно использование баз данных метеоизмерений или ветроэнергетических кадастров.

Порядок обработки результатов измерений следующий [6].

1. Результаты измерений скорости ветра u_1 , м/с, объединяются в группы с интервалом Δu . Определяется общее число измерений N .

2. Поскольку измерения скорости могут проводиться на высоте h_1 , а для оценки энергетического потенциала нужна скорость ветра u , м/с, на высоте предполагаемой установки ветротурбин h , определение скорости ветра на высоте h выполняется с помощью известной аппроксимационной зависимости

$$u = u_1 (h / h_1)^{1/5}, \quad (1.2)$$

где h определяется из предварительных расчетов (если известен диаметр колеса ветроагрегата, например).

3. Определяется величина вероятностного распределения скорости ветра

$$\Phi_u = N_{ui} / N, \quad (1.3)$$

где N_{ui} – число измерений в i -ом скоростном интервале.

Строится зависимость $\Phi_u = f(u)$. Произведение $\Phi_u \Delta u$ может быть интерпретировано как часть времени года, в течение которого скорость ветра имеет значения, заключенные в интервале от u до $u + \Delta u$.

4. Среднее значение скорости ветра u_c , м/с, определяется соотношением

$$u_c = \sum u_i / N, \quad (1.4)$$

где $\sum u_i$ – сумма всех измеренных значений скорости.

5. Определяется вероятность $\Phi_{u>u'}$ появления ветра со скоростью u , большей некоторой заданной скорости u' , для чего складываются вероятности всех скоростных интервалов, в которых $u > u'$.

Вероятность $\Phi_{u>u'}$ может быть интерпретирована как часть времени года, в течение которого ветры дуют со скоростью, большей u' .

Строится зависимость $\Phi_{u>u'} = f(u)$.

6. Мощность ветрового потока единичного сечения P_u , Вт определяется

$$P_u = \rho u^3 / 2, \quad (1.5)$$

где ρ – плотность воздуха, принимается равной $1,3 \text{ кг/м}^3$.

Произведение $P \Phi_u$ представляет собой функцию распределения энергии ветра. Строится зависимость $P \Phi_u = f(u)$.

7. Строится зависимость $P_u = f(\Phi_{u>u'})$, позволяющая определить вероятность ожидания ветрового потока заданной мощности.

Все расчеты удобно выполнить в EXCEL.

После выполнения обработки измерений и расчетов проводится анализ полученных результатов. Обычно акцентируются следующие моменты.

1. Пользуясь построенной зависимостью $\Phi_u = f(u)$, необходимо сравнить среднее значение скорости ветра с наиболее вероятным значением скорости ветра в данной местности, а также с расчетной скоростью, принимаемой для проектирования ВЭУ ($u = 10 - 12 \text{ м/с}$).

2. При помощи построенной зависимости $P \Phi_u = f(u)$, определяется значение скорости при которой функция распределения энергии ветра имеет максимум и сравнивается с наиболее вероятным значением скорости ветра в данной местности.

3. С помощью построенной зависимости $P_u = f(\Phi_{u>u'})$, определяется вероятность ожидания ветрового потока определенной мощности.

Исследования показывают, что наиболее точно статистические данные метеорологических измерений описываются теоретической зависимостью распределения Рэлея.

Таким образом, для определения вероятности скорости ветра имеется аналитическое выражение, соответствующее экспериментальным данным. В этом случае, во-первых, возможно резко сократить необходимое количество измерений скорости ветра, во-вторых, имеется возможность аналитического расчета характеристик ветроустановок.

Для распределения Рэлея справедливы следующие равенства

$$\Phi_{u>u'} = \exp\left[-\pi/4 \cdot (u'/\bar{u})^2\right], \quad (1.6)$$

где $\Phi_{u>u'}$ – вероятность появления ветра со скоростью u , м/с, большей некоторой заданной скорости u' , м/с; \bar{u} – среднее значение скорости, м/с;

$$(\bar{u}^3)^{1/3} = 1,24\bar{u}. \quad (1.7)$$

Для распределения Рэлея также справедливы утверждения, что вероятность скорости Φ_u максимальна при значении скорости

$$u = (2/\pi)^{1/2} \cdot \bar{u} = 0,8 \bar{u} \quad (1.8)$$

и функция $\Phi_u \cdot u^3$ максимальна при значении скорости

$$u = 2 (2/\pi)^{1/2} \cdot \bar{u} = 1,6 \bar{u}. \quad (1.9)$$

Достоверно оценить, какая доля энергии ветра может быть использована в энергетике, вряд ли возможно, так как эта оценка очень сильно зависит от уровня развития ветроэнергетики и ее потребителей. Тем не менее, официальные оценки возможной доли ветроэнергетики в энергетике в целом, например, в Великобритании и Западной Германии, не предполагающие каких-либо серьезных изменений в сложившейся инфраструктуре энергопотребления, дают не менее 20%. При определенных изменениях инфраструктуры доля ветроэнергетики может быть существенно большей. Автономные ветровые энергоустановки весьма перспективны для вытеснения дизельных электростанций и отопительных установок, работающих на нефтепродуктах, особенно в отдаленных районах и на островах.

Ветроэнергетические установки классифицируются по двум основным признакам – геометрии ветроколеса и его положению относительно направления ветра.

Классификация ветроэлектрогенераторов на основе перечисленных выше признаков, конечно, не исчерпывает всего многообразия возможных конструкций ветроустановок. Особенно это касается наиболее перспективных установок, использующих специальные устройства для увеличения скорости набегающего ветрового потока.

Ветроколесо с горизонтальной осью. Рассмотрим горизонтально-осевые ветроколеса пропеллерного типа. Основной вращающей силой у колес этого типа является подъемная сила. Относительно ветра ветроколесо в рабочем положении может располагаться перед опорной башней или за ней. При переднем расположении ветроколесо должно иметь аэродинамический стабилизатор или какое-либо другое устройство, удерживающее его в рабочем положении. При заднем расположении башня частично затеняет ветроколесо и турбулизирует набегающий на него поток. При работе колеса в таких условиях возникают циклические нагрузки, повышенный шум и флуктуации выходных параметров ветроустановки. Направление ветра может изменяться довольно быстро, и ветроколесо должно четко отслеживать

эти изменения. Поэтому в ВЭУ мощностью более 50 кВт для этой цели используются электрические серводвигатели.

В ветроэлектростанциях обычно используются двух- и трехлопастные ветроколеса, последние отличаются плавным ходом. Электродвигатель и редуктор, соединяющий его с ветроколесом, расположены, обычно, наверху опорной башни в поворотной головке. В принципе их удобнее размещать внизу, но возникающие при этом сложности с передачей крутящего момента обесценивают преимущества такого размещения. Многолопастные колеса, развивающие большой крутящий момент при слабом ветре, используются для перекачки воды и других целей, не требующих высокой частоты вращения ветрового колеса.

Ветроэлектростанции с вертикальной осью. Ветроэлектродвигатели с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Кроме того, такая схема позволяет за счет только удлинения вала установить редуктор с генераторами внизу башни.

Принципиальными недостатками таких установок являются: 1) гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за более часто возникающих в них автоколебательных процессов и 2) пульсация крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора. Из-за этого подавляющее большинство ветроэлектродвигателей выполнено по горизонтально-осевой схеме, однако исследования различных типов вертикально-осевых установок продолжаются.

Наиболее распространенные типы вертикально-осевых установок следующие.

1. *Чашечный ротор (анемометр).* Ветроколесо этого типа вращается силой сопротивления. Форма чашеобразной лопасти обеспечивает практически линейную зависимость частоты вращения колеса от скорости ветра.

2. *Ротор Савониуса.* Это колесо также вращается силой сопротивления. Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы, т. е. отличаются простотой и дешевизной. Вращающий момент создается благодаря различному сопротивлению, оказываемому воздушному потоку вогнутой и выгнутой относительно него лопастями ротора. Из-за большого геометрического заполнения это ветроколесо обладает большим крутящим моментом и используется для перекачки воды.

3. *Ротор Дарье.* Вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или трех тонких изогнутых несущих поверхностях, имеющих аэродинамический профиль. Подъемная сила максимальна в тот момент, когда лопасть с большой скоростью

пересекает набегающий воздушный поток. Ротор Дарье используется в ветроэлектростанциях. Раскручиваться самостоятельно ротор, как правило, не может, поэтому для его запуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя.

4. *Ротор Масгрива*. Лопастей этого ветроколеса в рабочем состоянии расположены вертикально, но имеют возможность вращаться или складываться вокруг горизонтальной оси при отключении. Существуют различные варианты роторов Масгрива, но все они отключаются при сильном ветре.

5. *Ротор Эванса*. Лопастей этого ротора в аварийной ситуации и при управлении поворачиваются вокруг вертикальной оси.

Концентраторы. Мощность ветроэнергостанции зависит от эффективности использования энергии воздушного потока. Одним из способов ее повышения является использование специальных концентраторов (усилителей) воздушного потока. Для горизонтально-осевых ветроэлектростанций разработаны или предложены различные варианты таких концентраторов. Это могут быть диффузоры или конфузоры (дефлекторы), направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади, большей сметаемой площади ротора, и некоторые другие устройства. Широкого распространения в промышленных установках концентраторы пока не получили.

Задачи

1.1. Определить вертикальный профиль ветра, если известно, что на высоте h , м, скорость ветра составила v , м/с.

1.2. Определить диаметр ветроколеса, необходимый для ветроустановок мощностью 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 кВт при скорости ветра $v = 12$ м/с; коэффициенте использования энергии ветра $\xi = 0,3$; плотность воздуха принять равной $\rho = 1,2$ кг/м³.

1.3. На какой высоте целесообразно размещать ветродвигатели, если известно, что на высоте $h = 1,5$ м скорость ветра составила $v = 5$ м/с. Потребность в энергии составляет 100 кВт. Сколько потребуется установок, если диаметр ветроколеса равен D , м.

1.4. На острове Фейр в Северном море проживают 70 человек. Там трудности с углем, нефтью, бензином – все нужно завозить. Однако, на острове постоянно дуют ветра со средней скоростью 8 м/с. Определите число и мощность ветроустановок, которые могут обеспечить энергией данный населенный пункт. Структура энергопотребления следующая: освещение, бытовые приборы – 3 кВт; отопительные установки, электроплиты – 35 кВт; теплицы – 7 кВт; зарядка электромобилей – 5 кВт. Диаметр ветроколеса D , м.

1.5. В нижнесаксонской деревне Бимольтен, на высоте 98 метров, установлены 14 ветротурбин. Определить их установленную мощность, если их диаметр составляет 10 м. Известно, что на высоте $h = 2$ м скорость ветра $v = 6,8$ м/с.

1.6. В нижнесаксонском Лере к северо-западу от острова Боркум, строятся 12 ветротурбин, мощностью 4-5 МВт каждая. Определить их теоретический диаметр при скорости ветра $v = 12$ м/с.

1.7. Для условий предыдущей задачи. В 2007г. планировалось общую мощность увеличить до 1000 МВт. Сколько потребуется установить еще таких турбин?

1.8. Турбина Е 112 имеет установленную мощность 4,5 МВт. Ее диаметр составляет 110 м. Определить высоту, на которой должна работать турбина в номинальном режиме, если известно, что в данной местности на высоте h , м, скорость ветра составила v , м/с.

1.9. Постройте зависимость снимаемой мощности с турбины 1). от диаметра турбины $D = 2; 4; 8; 15; 30; 50; 100$ м. Принять скорость ветра $v = 12$ м/с; коэффициент использования $\xi = 0,3$; плотность $\rho = 1,2$ кг/м³. 2). От скорости ветра $v = 6; 8; 10; 12; 14$ м/с. Принять диаметр ветроколеса $D = 15$ м; коэффициент использования $\xi = 0,3$; плотность $\rho = 1,2$ кг/м³. 3). От высоты установки ветроколеса турбины $h = 20; 30; 40; 60; 80; 100; 120$ м. Принять диаметр ветроколеса $D = 15$ м; коэффициент использования $\xi = 0,3$; плотность $\rho = 1,2$ кг/м³, если известно, что в данной местности на высоте h , м, скорость ветра составила v , м/с.

2. Энергия солнца. Солнечные коллекторы

Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и доступности не уступает энергии ветра и поэтому также достаточно перспективна.

Использование солнечной энергии достаточно разнообразно, но наиболее очевидная область использования солнечной энергии – подогрев воздуха и воды. В районах с холодным климатом необходимо отопление жилых зданий и горячее водоснабжение. Промышленность также требует большое количество горячей воды. В Австралии, например, на подогрев жидкостей до температуры 100°С расходуется почти 20% энергии. Для многих стран использование солнечных систем теплоснабжения – это способ уменьшить зависимость экономики от импорта ископаемых топлив. В связи с этим во многих странах, особенно в Австралии, Израиле, США, Японии, Испании, Германии, Австрии, Греции и Кипре активно расширяется производство солнечных нагревательных систем. Общая площадь солнечных коллекторов,

установленных в странах ЕС, к концу 2004 года достигла 13 960 000 м², а в мире превысила 150 000 000 м². Ежегодный прирост площади солнечных коллекторов в ЕС в среднем составляет 12 %, а в отдельных странах – 20 – 30 % и более. Суммарная тепловая мощность солнечных коллекторов в системе теплоснабжения составила более 680 000 ГВт ч в год.

Основными достоинствами солнечной энергии являются ее доступность и многогранность применения; неисчерпаемость; простота использования солнечных систем теплоснабжения и ГВС и возможность использования стандартного оборудования; относительное постоянство во многих районах.

К недостаткам следует отнести рассеянность; периодичность; необходимость применения зачастую дорогих материалов; необходимость аккумуляирования и резервирования вследствие ее периодичности.

Солнечный коллектор – устройство, которое служит для нагрева воды потоком солнечной энергии и является основным компонентом любой солнечной системы теплоснабжения. Солнечный тепловой коллектор включает прозрачную панель, теплопоглощающую панель, набор стеклянных трубок для жидкостного теплоносителя, теплоизоляционный слой.

В коллекторе происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии жидкости, т. е. преобразование солнечной энергии в тепло. Самые простые приемники содержат весь объем жидкости, которую необходимо нагреть. Приемники более сложной конструкции нагревают за определенное время только небольшое количество жидкости, которая, как правило, затем накапливается в отдельном резервуаре (баке-аккумуляторе). От технического совершенства коллектора и стоимости зависит эффективность всей системы солнечного теплоснабжения и ее экономические показатели.

Поток лучистой энергии $Q_{нов}$, Вт, поглощаемой поверхностью приемника, составляет

$$Q_{нов} = \tau_{нов} \alpha A I, \quad (2.1)$$

где $\tau_{нов}$ – коэффициент пропускания солнечного излучения прозрачным покрытием, принимается равным 0,9 для одинарного стеклянного покрытия, 0,8 – для двойного стеклянного покрытия, 0,81 – для селективного стекла; α – коэффициент поглощения приемной поверхностью коллектора солнечного излучения, принимается равным 0,91 для одинарного стеклянного покрытия, 0,9 – для двойного стеклянного покрытия, 0,81 – для селективного стекла; A – площадь

освещаемой поверхности коллектора, м^2 ; I – облученность поверхности солнечного коллектора, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

В процессе поглощения энергии температура поверхности приемника повышается и становится существенно выше температуры окружающего воздуха. Это приводит к возникновению обратного теплового потока в окружающую среду, который можно определить

$$Q_{\text{ном}} = A(T_n - T_{o.c.})/R_n, \quad (2.2)$$

где T_n – температура приемной поверхности коллектора, К; $T_{o.c.}$ – температура окружающего воздуха, К; R_n – термическое сопротивление приемной поверхности коллектора, для типичных коллекторов можно принять равным $0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ для одинарного стекла, $0,22 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ – для двухслойного стекла, $0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ – для селективного стекла.

Уравнение солнечного коллектора тогда можно представить

$$Q_{\text{ск}} = A[\tau_{\text{нов}} \alpha I - (T_n - T_{o.c.})/R_n]. \quad (2.3)$$

Однако не вся энергия, получаемая коллектором, передается воде, а только ее часть, характеризующая коэффициентом перехода k_f солнечной энергии, показывающим долю теплового потока $Q_{\text{ск}}$, передаваемого жидкости, принимается равным $0,85$

$$Q_{\text{ж}} = k_f Q_{\text{ск}}. \quad (2.4)$$

Количество же тепла, требуемого для нагрева жидкости на определенную разницу температур $Q_{\text{ж}}$, Вт можно записать в виде

$$Q_{\text{ж}} = L\rho c(T_k - T_n), \quad (2.5)$$

где; T_k – конечная температура воды, К; T_n – начальная температура воды, К; ρ – плотность воды, равная $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; c – теплоемкость воды, равная $4200 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$; L – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$.

Уравнение теплового баланса коллектора можно записать в виде

$$k_f A(\tau_{\text{нов}} \alpha I - (T_n - T_{o.c.})/R_n) = L\rho c(T_k - T_n). \quad (2.6)$$

Из уравнения баланса солнечного коллектора определяются все основные характеристики.

Задачи

2.1. Имеется плоский пластинчатый нагреватель с размерами $2 \times 0,8$ м². Сопротивление теплопотерям составляет $R_n = 0,13$ м²К/Вт; температура приемной поверхности коллектора T_n увеличивается на 20 °С; температура окружающего воздуха $T_{o.c.} = 22$ °С; коэффициент пропускания солнечного излучения прозрачным покрытием $\tau_{нов} = 0,9$ для одинарного стеклянного покрытия; коэффициент поглощения приемной поверхностью коллектора солнечного излучения $\alpha = 0,9$ для одинарного стеклянного покрытия, облученность поверхности солнечного коллектора $I = 750$ Вт/м²; начальная температура воды $T_n = 20$ °С; ρ – плотность воды, равная 1000 кг/м³; c – теплоемкость воды, равная 4200 Дж/кг·К. Определить требуемый объемный расход воды L , м³/с, для обеспечения условия повышения температуры воды на выходе из коллектора на 10 °С.

2.2. Для условий задачи 2.1. Как изменится расход воды, если использовать двойное остекление?

2.3. Для условий задачи 2.1. Как изменится расход воды, если использовать селективное покрытие?

2.4. Для условий задачи 2.1. Как изменится расход воды, если поток лучистой энергии в плоскости коллектора станет $I = 1000$ Вт/м²?

2.5. Для условий задачи 2.1. Как изменится расход воды, если поток лучистой энергии в плоскости коллектора станет $I = 450$ Вт/м²?

2.6. Для условий задачи 2.1. Как изменится температура воды на выходе, если при том же расходе воды поток лучистой энергии в плоскости коллектора станет $I = 1000$ Вт/м²?

2.7. Для условий задачи 2.1. Какая должна быть площадь коллектора, чтобы обеспечить водоснабжение коттеджа, в котором проживают 5 человек из условия 150 литров на человека в сутки?

2.8. Постройте зависимость расхода воды 1). от площади коллектора по условиям задачи 2.1. $A = 2; 3; 6; 10; 20; 40; 100; 200$ м², 2). от температуры входящей жидкости $T_n = 12; 15; 18; 20; 24$ °С, 3). от температуры окружающего воздуха $T_{o.c.} = 20; 24; 28; 32; 36$ °С, 4). от температуры выходящей жидкости $T_k = 30; 35; 40; 45$ °С, 5). от температуры поверхности коллектора $T_n = 40; 45; 50; 55; 60$ °С.

2.9. Постройте зависимость температуры воды на выходе 1). от площади коллектора по условиям задачи 2.1. $A = 2; 3; 6; 10; 20; 40; 100; 200$ м², 2). от температуры входящей жидкости $T_n = 12; 15; 18; 20; 24$ °С, 3). от температуры окружающего воздуха $T_{o.c.} = 20; 24; 28; 32; 36$ °С, 4). от расхода воды $G = 10; 15; 20; 25; 30; 35$ 10⁻³ кг/с, 5). от температуры поверхности коллектора $T_n = 40; 45; 50; 55; 60$ °С, 6). от интенсивности солнечной радиации $I = 450; 500; 600; 700; 800; 900$ Вт/м².

3. Энергия океана

3.1. Энергия волн

Огромные количества энергии можно получить от морских волн. Мощность, переносимая волнами на глубокой воде, пропорциональна квадрату их амплитуды и периоду. Поэтому наибольший интерес представляют длиннопериодные ($T \sim 10$ с) волны большой амплитуды ($a \sim 2$ м), позволяющие снимать с единицы длины гребня в среднем от 50 до 70 кВт/м.

Возможность преобразования энергии волн в электроэнергию доказана уже давно. Существует множество технических решений, позволяющих реализовать эту возможность. В последние годы интерес к волновой энергетике резко усилился, особенно в Японии, Великобритании, странах Скандинавии, в результате чего эксперименты переросли в стадию реализации проектов. Современная тенденция разработки таких установок, как и вообще установок на возобновляемых видах энергии, ориентируется на единичные модули умеренной мощности (около 1 МВт) размером порядка 50 м вдоль фронта волны. Подобные устройства уже сейчас могут принести определенные экономические выгоды в случае замены дизельных генераторов, снабжающих энергией удаленные поселки, особенно на островах.

Развитие волновой энергетике сопряжено со значительными трудностями. В основном они сводятся к следующему.

1. Волны нерегулярны по амплитуде, фазе и направлению движения. Проектировать же устройства для эффективного извлечения энергии в широком диапазоне варьирующихся величин не просто.

2. Всегда есть вероятность возникновения экстремальных штормов и ураганов, во время которых образуются волны очень большой интенсивности. Конструкции волноэнергетических устройств должны, разумеется, им противостоять. Примерно раз в 50 лет возникают волны, амплитуда которых в 10 раз превышает среднюю. Следовательно, во время штормов конструкции должны выдерживать нагрузки, примерно в 100 раз большие, чем при нормальной работе.

3. Подобные пиковые величины мощности присущи главным образом именно волнам на глубокой воде, проходящим со стороны открытого моря. Трудности, связанные с созданием энергетических устройств для таких волновых режимов, их обслуживанием, удержанием в заданном положении, передачей энергии на берег, вызывают опасения.

4. Обычно период волн $T \approx 5 \div 10$ с (частота порядка 0,1 Гц). Достаточно трудно приспособить это нерегулярное медленное движение к генерированию электроэнергии промышленной частоты, которая в 500 раз выше.

5. Выбрать подходящий тип устройства для преобразования энергии из всего их многообразия – сложная, часто просто непосильная задача.

6. Привычка мыслить категориями крупномасштабной энергетики промышленно развитых районов ведет к искушению создавать лишь крупные волновые электростанции в местах с высокими волновыми потенциалами. При этом существует тенденция игнорировать зоны умеренных потенциалов, где зачастую использование волновой энергии оказывается экономически более оправданным.

Преимущества волновой энергии состоят в том, что она достаточно сильно сконцентрирована, доступна для преобразования и на любой момент времени может прогнозироваться в зависимости от погодных условий. Создаваясь под действием ветра, волны хорошо сохраняют свой энергетический потенциал, распространяясь на значительные расстояния. Например, крупные волны, достигающие побережья Европы, зарождаются во время штормов в центре Атлантики и даже в Карибском море.

Наибольшее число волновых энергетических устройств разрабатывается для извлечения энергии из волн на глубокой воде. Это наиболее общий тип волн, существующий при условии, что средняя глубина моря D превышает величину половины длины волны $\lambda/2$. Например, при характерной длине волны $\lambda \sim 100$ м и амплитуде a м волна ведет себя как на глубокой воде при глубине моря, превышающей 30 м. Амплитуда кругового движения с глубиной уменьшается экспоненциально и становится пренебрежимо малой при $D \geq \lambda/2$. В волне на мелководье частицы движутся по эллиптическим орбитам, движение охватывает придонный слой, приводя к диссипации энергии волны.

Поверхностные волны на глубокой воде имеют характерные особенности.

1) Волны являются неразрушающимися синусоидальными с нерегулярной длиной, фазой и направлением прихода.

2) Движение каждой частицы жидкости в волне является круговым. В то время как изменяющиеся очертания воли свидетельствуют о распространении волнового движения, сами по себе частицы не связаны с этим движением и не перемещаются в его направлении.

3) Поверхностный слой жидкости остается на поверхности.

4) Амплитуда движения частиц жидкости экспоненциально уменьшается с глубиной. На глубине $\lambda/2\pi$ от среднего положения уровня поверхности амплитуда кругового движения частиц уменьшается в e раз ($e = 2,72$ – основание натуральных логарифмов). На глубине $\lambda/2$ перемещение частиц жидкости становится пренебрежимо малым, составляя менее 5% поверхностного.

5) Существенно, что амплитуда волны a не зависит от ее длины λ , скорости распространения c , периода T , а зависит лишь от характера предшествовавшего взаимодействия ветра с морской поверхностью. В то же время редко создаются условия, при которых амплитуда достигает значения $\lambda/10$.

6) Разрушение волны в виде белого буруна происходит, когда наклон ее поверхности составит примерно 1:7. Энергетический потенциал волны при этом рассеивается.

Теоретически анализ волнового движения в жидкости достаточно труден, однако он детально выполнен в ряде специальных изданий. Здесь из теории использованы лишь те результаты, которые необходимы для понимания работы наиболее простых волноэнергетических устройств.

Для волн на глубокой воде силы трения, поверхностного натяжения и инерции малы по сравнению с двумя доминирующими силами – гравитационной и вращательной. Поэтому водная поверхность всегда принимает такую форму, чтобы касательная к ней в любой точке была перпендикулярна направлению действия результирующей этих двух сил.

Очень важно понимать, что в волнах на глубокой воде нет поступательного движения жидкости.

В подповерхностном слое жидкости ее частицы совершают круговое движение с радиусом орбиты a , равным амплитуде волны. Высота волны H от вершины гребня до основания равна ее удвоенной амплитуде ($H=2a$). Угловая скорость движения частиц ω измеряется в радианах в секунду. Изменение формы волновой поверхности таково, что наблюдается поступательное движение, хотя сама вода, как уже отмечалось, не перемещается в направлении распространения волны (слева направо). Это кажущееся перемещение есть результат наблюдения фаз смещения последовательно расположенных частиц жидкости;

Как только одна частица в гребне опускается, другая занимает ее место, обеспечивая сохранение формы гребня и распространение волнового движения вперед.

Результирующая сила F , действует на поверхностную частицу массой m . Под действием суммы подобных сил водная поверхность принимает такую форму, при которой касательная в любой точке ее перпендикулярна F . При подъеме на гребень частица подвергается действию центробежной силы $m\omega^2$. В следующий момент частица падает вниз, и ее место занимает соседняя, вращающаяся с задержкой по фазе. В положении частицы на среднем уровне жидкости, поверхность ориентируется перпендикулярно результирующей силе F . Во впадине, направленная вниз сила имеет максимум (центробежная и гравитационная силы складываются).

Так что практически для неразрушенной волны $g \gg a\omega^2$ (например, $a = 2$ м, $T = 8$ с, $a\omega = 1,2$ м/с и $g = 9,8$ м/с²).

Пусть h — текущее значение подъема над средним уровнем, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Очевидно, что движение поверхности описывается так же, как и перемещение ее в пространстве при условии, что

$$\lambda = 2\pi g / \omega^2, \quad (3.1.1)$$

Это соотношение устанавливает зависимость между частотой, и длиной для поверхностной волны на глубокой воде.

Период движения волны $T = 2\pi / \omega = 2\pi / (2\pi g / \lambda)^{1/2}$. Следовательно,

$$T = (2\pi\lambda/g)^{1/2}. \quad (3.1.2)$$

Скорость перемещения поверхности волны в направлении x :

$$c = g\lambda / 2\pi. \quad (3.1.3)$$

Скорость c называют фазовой скоростью распространения волн, создаваемых на поверхности жидкости. Следует отметить, что эта величина не зависит от амплитуды волны и неявным образом связана со скоростью движения частиц жидкости в волне.

Элементарная теория волн на глубокой воде основана на допущениях о свойствах единичной регулярной волны. Частицы жидкости в такой волне движутся по круговым орбитам с переменной фазой в направлении распространения волны. Амплитуда этого движения в вертикальной плоскости равна половине расстояния от гребня до впадины волны и экспоненциально уменьшается с глубиной. Движение частиц остается круговым при глубине моря $D > 0,5\lambda$. На таких глубинах перемещения частиц вблизи дна пренебрежимо малы. Для этих условий (рис. 3.1. а) для частицы, находящейся на расстоянии z от среднего положения уровня поверхности, радиус круговой орбиты r определяется:

$$r = ae^{kz}, \quad (3.1.4)$$

где a — амплитуда, м; k — волновое число; z — положение частицы относительно среднего уровня поверхности, м.

Для положения ниже среднего уровня поверхности z — отрицательная величина.

Пусть E_k — полная кинетическая энергия, тогда полная кинетическая энергия на единицу ширины волнового фронта и единицу длины вдоль направления распространения волны равна

$$E_k = \rho a^2 g / 4 , \quad (3.1.5)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³.

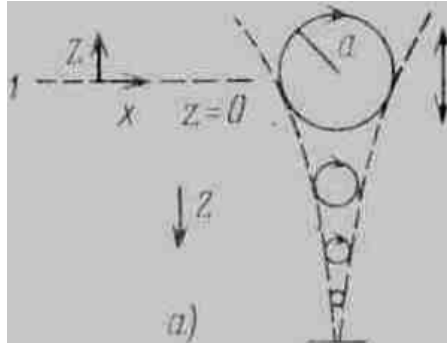


Рис. 3.1. Определение радиуса круговой орбиты частицы на глубокой воде

Нормированная потенциальная энергия волны равна в точности такой же величине. Это равенство кинетической и потенциальной составляющих энергии – свойство гармонического движения.

Приведенный способ нормирования есть не что иное, как нормирование на единицу площади поверхности волны, т. е. полная энергия на единицу площади поверхности волны равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_{\text{п}} = E_k = \rho a^2 g / 2 . \quad (3.1.6)$$

Мощность, переносимая в направлении распространения волны на единицу ширины волнового фронта, определяется выражением

$$P = \rho g a^2 \lambda / 4T . \quad (3.1.7)$$

Выше для непрерывного волнового движения на глубокой воде была определена его полная (кинетическая и потенциальная) энергия. Эта энергия связана с жидкостью, которая в среднем во времени остается в постоянном положении в пространстве. Однако приведенные расчеты ничего не рассказали о переносе энергии через вертикальное сечение.

В учебниках эту мощность принято рассчитывать исходя из первого закона динамики в предположении о результирующих давлениях и перемещениях. Прикладная математика требует точности и понимания, основанных на фундаментальной теории распространения волн в жидкости. Анализ существенно упрощается для случая волн на глубокой воде.

Мощность P равна полной энергии (кинетическая + потенциальная) E в волне на единицу площади поверхности, умноженной на групповую

скорость волн на глубокой воде $u = c / 2$, с которой волны переносят энергию. С учетом выражения для групповой скорости

$$P = \rho g a^2 c / 4 \quad (3.1.8)$$

и, следовательно, фазовая скорость

$$c = \omega / k; \quad c = \lambda / T. \quad (3.1.9)$$

Различие между групповой и волновой (фазовой) скоростями является общим для любых волновых процессов, для которых фазовая скорость зависит от длины волны.

Следовательно, мощность, переносимая волнами, увеличивается прямо пропорционально квадрату амплитуды и периоду. Именно поэтому для специалистов по океанской энергетике особенно привлекательны длиннопериодные волны океанской зыби, обладающие значительной амплитудой.

В результате волнового движения жидкости в волне одновременно с изменением положения уровня и наклона поверхности происходит изменение кинетической и потенциальной энергии, изменение давления под волной. На основе использования одного характерного признака волнового движения или их комбинации уже создано большое число различных устройств, поглощающих и преобразующих волновую энергию. Сюда же входят и устройства, улавливающие воду с гребней волн и возвращающие ее на средний уровень или к подножию волн после преобразования потенциальной энергии. Кроме того, можно использовать самые разнообразные сооружения для увеличения интенсивности волнового движения в местах размещения преобразователей за счет дифракционных и канальных эффектов.

Дать в этом разделе полный обзор всех созданных когда-либо устройств для извлечения энергии из волн просто не представляется возможным, поэтому здесь приведено описание лишь некоторых наиболее важных. Это устройства, отслеживающие профиль волны, колеблющийся водяной столб, подводные устройства и системы, улавливающие волны.

Устройства, отслеживающие профиль волны. Стефан Солтер из Эдинбургского университета разработал устройство, которое назвал «уткой». Форма ее обеспечивала максимальное извлечение мощности. Волны, поступающие слева, заставляют утку колебаться. Цилиндрическая форма противоположной поверхности обеспечивает отсутствие распространения волны направо при колебаниях утки вокруг оси. Мощность может быть снята с оси колебательной системы с таким расчетом, чтобы обеспечить минимум отражения энергии. Отражая и

пропуская лишь незначительную часть энергии волн (примерно 5%), это устройство обладает весьма высокой эффективностью преобразования в широком диапазоне частот возбуждающих колебаний.

Дальнейшие разработки Солтера направлены на то, чтобы обеспечить утке способность противостоять ударам максимальных волн и создать заякоренную гирлянду преобразователей в виде достаточно гибкой линии. Предполагается, что размер реальной утки будет равен примерно 10 м для 100-метровых атлантических волн. Нить из уток протяженностью несколько километров предполагается установить в районе с наиболее интенсивным волнением западнее Гебридских островов, мощность всей станции будет примерно 100 МВт. Проектируются и индивидуальные утки, устанавливаемые в заякоренных плотках и предназначенные для работы на меньших глубинах (примерно 20 м).

Любые волновые преобразователи имеют какие-то недостатки, но для уток наиболее серьезными оказываются следующие:

1) необходимость передачи медленного колебательного движения на привод генератора (Солтер работает над применением в качестве генераторов встроенных гироскопов, которые должны выдавать в сеть мощность, пропорциональную медленному вращению корпусов уток на волнении);

2) необходимость снятия мощности с плавающего на значительной глубине устройства большой протяженности.

Другой характерный тип устройства данного класса – ланкастерский «моллюск», использующий тот же «геометрический» принцип Солтера. Здесь клювообразный поплавок соединен с несколькими податливыми воздушными оболочками, заполненными воздухом, сжимаемым под действием волн. Сжатый воздух перегоняется из одной оболочки в другую по мере того, как волна поворачивает «клюв». Осциллирующий воздушный поток приводит в действие турбину Уэлса, отличающуюся тем, что направление ее вращения не зависит от направления потока воздуха. Турбина связана с электрогенератором.

Колеблющийся водяной столб. При набегании волны на частично погруженную полость, открытую под водой, столб жидкости в полости колеблется, вызывая изменения давления в газе над жидкостью. Полость может быть связана с атмосферой через турбину. Поток может регулироваться так, чтобы проходить через турбину в одном направлении, или может быть использована турбина Уэлса. Уже известны, по крайней мере, два примера коммерческого использования устройств на этом принципе – сигнальные буи, внедренные в Японии Масудой и в Великобритании сотрудниками Королевского университета Белфаста. Более крупное и впервые включенное в энергосеть устройство

построено в Тофтестоллене (Норвегия). В Тофтестоллене мощность установки составляет 500 кВт, она построена на краю отвесной скалы. Кроме того, национальная электрическая лаборатория Великобритании предлагает конструкцию, устанавливаемую непосредственно на морском дне.

Главное преимущество устройств на принципе водяного колеблющегося столба состоит в том, что скорость воздуха перед турбиной может быть значительно увеличена за счет уменьшения проходного сечения канала. Это позволяет сочетать медленное волновое движение с высокочастотным вращением турбины. Кроме того, здесь создается возможность удалить генерирующее устройство из зоны непосредственного воздействия соленой морской воды.

Подводные устройства. Преимущества подводных устройств состоят в том, что эти устройства позволяют избежать штормового воздействия на преобразователи. Однако при их использовании увеличиваются трудности, связанные с извлечением энергии и обслуживанием. Для примера можно предложить так называемый «бристольский цилиндр», представляющий собой наполненный воздухом плавучий корпус, закрепленный под водой на опорах, установленных на грунте. Цилиндр находится под воздействием поверхностного движения воды и изменения гидростатического давления. Вмонтированные в опоры гидравлические насосы преобразуют энергию движения цилиндра. Перекачиваемая ими жидкость может подаваться на генераторную станцию, единую для нескольких цилиндров, по трубопроводам.

Системы, улавливающие волны. Схемы подобных устройств используют явление, часто наблюдаемое в природных лагунах. Волна разбивается на откосе дамбы (вариант Естественного рифа), и вода забрасывается на высоту, превышающую средний уровень моря, заполняя бассейн. Вода может быть возвращена обратно в море через низконапорную турбину. Данная схема была детально проработана для условий острова Маврикий и предназначена для обеспечения генерирования 20 МВт электрической мощности. При удельной величине мощности волн 22 кВт/м эффективность такого устройства будет не ниже 30% (имеется в виду преобразование кинетической энергии волн в потенциальную энергию жидкости в бассейне). Необходимая длина морской дамбы равна примерно 5 км. Первая в мире коммерческая станция на этом принципе построена в Норвегии в районе с естественной фокусировкой волн.

Задачи

3.1.1. Найдите мощность волн, если известно, что период составляет 6 с, амплитуда равна 2 м.

3.1.2. Какой будет радиус круговой орбиты, если известно, что амплитуда составляет a , м, период $T = 10$ с, положение частицы $z = -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3$ м. Построить график зависимости радиуса круговой орбиты r от положения частицы z и диаграмму.

3.1.3. Определить кинетическую энергию волны, если известно, что частота равна 0,1 Гц; радиус круговой орбиты частицы в волне r составляет 5 м, положение частицы относительно среднего уровня поверхности $z = 2$ м.

3.1.4. По условиям задачи 3.1.1. при $T = 8$ с; $a = 3$ м.

3.1.5. По условиям задачи 3.1.1. при $T = 10$ с; $a = 4$ м.

3.1.6. По условиям задачи 3.1.1. при $T = 8$ с; $a = 2$ м.

3.1.7. По условиям задачи 3.1.1. при $T = 10$ с; $a = 3$ м.

3.1.8. По условиям задачи 3.1.2. при $T = 8$ с; $a = 3$ м; $z = -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3$ м.

3.1.9. По условиям задачи 3.1.3. при $T = 8$ с; $a = 4$ м; $z = -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3$ м. Построить график зависимости кинетической энергии 1). от радиуса круговой орбиты $r = 1; 2; 3; 4; 5$ м 2). от положения частицы z , м.

3. 2. Энергия приливов. Усиление приливов

Приливные колебания уровня в огромных океанах планеты вполне предсказуемы. Основные периоды этих колебаний – суточные, продолжительностью около 24 ч и полусуточные – около 12 ч 25 мин. Разность уровней между последовательными самым высоким и самым низким уровнями воды – высота прилива. Диапазон изменения этой величины составляет 0,5 – 10 м. Первая цифра наиболее характерна, вторая достигается и даже превосходится лишь в некоторых особенных местах вблизи побережья континентов. Во время приливов и отливов перемещение водных масс образует приливные течения, скорость которых в прибрежных проливах и между островами может достигать примерно 5 м/с.

Поднятую на максимальную высоту во время прилива воду можно отделить от моря дамбой или плотиной в бассейне площадью S . Если затем во время отлива пропустить эту массу воды через турбины, то можно получить мощность

$$P = \rho g S R^2/2, \quad (3.2.1)$$

где ρ – плотность воды, кг/м^3 ; R – перепад уровней, м; S – площадь приливного бассейна, м^2 .

Очевидно, что места с большими высотами приливов обладают и большими потенциалами приливной энергии.

Преобразование энергии приливов использовалось для приведения в действие сравнительно маломощных устройств еще в средневековой Англии и в Китае. Из современных ПЭС наиболее хорошо известны крупномасштабная электростанция Ране мощностью 240 МВт, расположенная в эстуарии реки Ла Ране, впадающей в залив Сен Мало (Бретань, Франция), и небольшая, но принципиально важная опытная станция мощностью 400 кВт в Кислой губе на побережье Баренцева моря в России. Поведение приливов может быть предсказано достаточно точно, с погрешностью менее 4%. Таким образом, приливная энергия оказывается весьма надежной формой возобновляемой энергии.

К достоинствам приливной энергетики относятся возможность использования стандартных устройств; ее относительное постоянство; высокая надежность.

Технические трудности в использовании энергии приливов следующие: дороговизна строительства приливных электростанций (ПЭС); периодичность в выработке энергии; экологические нарушения при строительстве ПЭС; труднодоступность перспективных районов строительства; необходимость использования большого количества турбин.

Анализом поведения приливов занимались многие известные математики и физики прошлого, включая Ньютона, Эри, Лапласа, Джоржа Дарвина, Кельвина. Однако надо иметь в виду, что современный анализ и предсказание приливов, основанный на математических методах гармонического анализа, базируются на основополагающих работах лорда Кельвина, выполненных в Глазго. Полное физическое понимание всех деталей динамики приливов все еще не достигнуто в связи со сложной топологией океанских бассейнов.

Жидкость в океанах удерживается на поверхности вращающейся Земли силами гравитации. Гравитационное же взаимодействие Земли с Луной и Солнцем возмущает эти силы, образуя приливы. Приливная энергия, снятая с турбин ПЭС, через которые протекает вода в процессе приливов, отбирает, таким образом, часть кинетической энергии вращающейся Земли. Если задействовать во всем мире все сколько-нибудь значительные места с достаточно высокими приливами, то согласно расчетам это приведет к сокращению периода вращения Земли на одни сутки за 2000 лет: это не так уж страшно для окружающей среды.

Известно, что приливная волна движется со скоростью

$$c = (gh)^{1/2}, \quad (3.2.2)$$

где g – ускорение силы тяжести, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; h – глубина залива (моря), м.

Резонанс для приливной волны, надвигающейся со стороны открытого моря, наступает при условиях, когда

$$L = j\lambda / 4, \quad (3.2.3)$$

где j – нечетное целое; L – протяженность залива в сторону материка, м; λ – длина волны вынужденных колебаний в открытом море, м.

Соответствующая резонансная частота f_r , Гц, и период T_r , с, связаны между собой следующим образом:

$$f_r = 1/T_r = c/\lambda. \quad (3.2.4)$$

Отсюда

$$T_r = \lambda/c = 4L/j(gh)^{1/2}. \quad (3.2.5)$$

Резонанс возникает, когда период собственных колебаний соответствующего бассейна оказывается равным (кратным) периоду вынужденных колебаний прилива в открытом море T_f , в этом случае

$$T_f = \frac{4L}{(gh)^{1/2}}; \quad \frac{L}{h^{1/2}} = \frac{j}{4}(g)^{1/2}T_f. \quad (3.2.6)$$

Полусуточный период прилива равен 12 ч 25 мин (45000 с), таким образом, для случая $j=1$ (основная гармоника) резонанс наступает, когда

$$L/h^{1/2} = (45\,000 \text{ с}) \cdot (9,8 \text{ м/с}^2)^{1/2}/4 = 36\,000 \text{ м}^{1/2}. \quad (3.2.7)$$

В этом примере видно близкое совпадение собственной частоты эстуария с характерной частотой прилива, в результате чего в указанном эстуарии достигаются значительные амплитуды приливного движения, высота прилива здесь доходит до 10 – 14 м.

Анализ резонансных условий достаточно сложен из-за постоянно меняющейся топологии дна и береговой линии заливов и эстуариев. Поэтому здесь производится всего лишь прикидочный расчет. При подходящих условиях высота прилива может усиливаться до 10 м.

Малопригодными для размещения ПЭС считаются заливы и эстуарии, высота прилива в которых не превышает 2 м. Но независимо от этого во всех случаях требуется тщательный анализ местных условий.

На практике эстуарии и заливы, конечно, не имеют таких однозначно определенных размеров, какие использованы в примере. Поэтому анализ резонансных условий сильно усложняется. Стало необходимым проводить моделирование природных условий в лабораторных волновых бассейнах с использованием соответствующей техники масштабирования и путем теоретического анализа. Это очень важно в связи с тем, что одним из основных вопросов при проектировании приливных энергоузлов является выяснение того, как дамба и плотина будут влиять на резонансные условия в бассейне. Некоторые расчеты, выполненные для эстуария р. Северн, показали возможность уменьшения и увеличения высоты приливов в зависимости от размещения ПЭС. Строительство ПЭС слишком дорого, чтобы позволить разработчикам ошибаться.

Задачи

3.2.1. Определить скорость распространения приливной волны, если известно, что глубина моря составляет 100 м.

3.2.2. Постройте зависимость скорости распространения приливной волны c , м/с, от глубины моря $h = 100; 200; 300; 400; 500; 800; 1000$ м.

3.2.3. Установите, следует ли ожидать резонанса в заливе, если его протяженность составляет $L = 1,5$ км, длина приливной волны $\lambda = 2000$ м, глубина $h = 200$ м

3.2.4. По условиям задачи 3.2.3. при протяженности залива $L = 3000$ км, глубине моря $h = 20$ м.

3.2.5. Определить среднюю мощность, которую можно снять с потока, если скорость движения воды составляет 40 м/с.

3.2.6. Построить зависимость резонанса от глубины залива $h = 10; 20; 30; 40; 60; 100; 200$ м при его длине $L = 200$ км.

3.2.7. Построить зависимость резонанса от длины залива $L = 20; 50; 100; 200; 500$ км. при его глубине $h = 200$ м.

3.2.8. Определить максимально возможную мощность, снимаемую за один цикл ПЭС, если площадь бассейна S составляет 2000 м^2 , перепад уровней воды R составляет 6 м.

3.2.9. По условиям задачи 3.2.8. Для Мезенского залива.

Тепловая энергия океана. ОТЭС

Мировой океан — крупнейший естественный коллектор солнечного излучения. В нем между теплыми, поглощающими солнечное излучение поверхностными водами и более холодными придонными достигается разность температур в 20°C . Это обеспечивает непрерывно пополняемый запас тепловой энергии, которая принципиально может быть преобразована в другие виды.

Сам термин преобразование тепловой энергии океана *OTEC* – ocean terminal energy – означает преобразование некоторой части этой тепловой энергии в работу и далее в электроэнергию.

На рис. 3.2. приведена схема одной из установок, позволяющих осуществить процесс такого преобразования. По существу – это тепловая машина, приводимая в действие разностью температур между «холодной» T_x – водой, поднятой с соответствующей глубины, и «горячей» водой с температурой $T_2 = T_x + \Delta T$, забранной с поверхности. Рабочая жидкость (рабочее тело), циркулируя по замкнутой схеме, отбирает тепло от горячей воды в теплообменнике испарителя, в паровой фазе приводит в действие турбину, связанную с генератором, а затем конденсируется в охлаждаемом холодной водой конденсаторе. На этом цикл завершается.

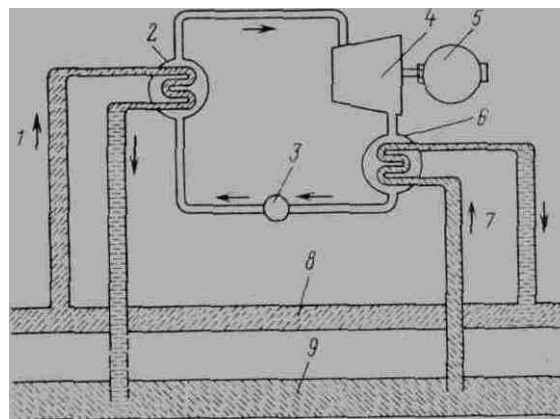


Рис. 3.2. Схема преобразования тепловой энергии океана:

1 - подача теплой воды; 2 - испаритель; 3 - насос подачи рабочего тела; 4 - турбин; 5 - генератор; 6 - конденсатор; 7 - подача холодной воды; 8 - поверхность океана; 9 - океанские глубины

Тепловая машина использует перепад температур между поверхностными и глубинными водами океана.

Ниже в деталях обсуждаются только системы, работающие по замкнутому циклу. Можно представить себе и другие системы, например использующие в качестве рабочего тела саму морскую воду и

работающие по открытому циклу. Тем не менее, изложенные здесь физические и географические сведения применимы к любым системам ОТЕС.

Начнем с определения P_0 мощности, отдаваемой теплой водой в идеальной системе. Допустим, что поток теплой воды с объемным расходом Q поступает в систему при температуре T_2 и покидает ее при температуре T_x (температура холодных глубинных вод). При определении P_0 мы, очевидно, делаем предположение об идеальном теплообменнике. В такой идеализированной системе при $\Delta T = T_2 - T_x$

$$P_0 = \rho c L \Delta T. \quad (3.3.1)$$

На основе второго начала термодинамики максимальная механическая мощность, которую можно получить от преобразования теплового потока,

$$P_1 = \eta_1 P_0 \quad (3.3.2)$$

где

$$\eta_1 = \Delta T / T_2 \quad (3.3.3)$$

есть КПД идеальной тепловой машины Карно, работающей при перепаде температур между T_2 и $T_x = T_2 - \Delta T$.

Безусловно, выход в случае реальной системы будет существенно ниже, чем P_1 . Реальные тепловые машины работают не по циклу Карно, скорее, их цикл ближе к идеальному циклу паровой турбины Ренкина. Тем не менее, эти выражения позволяют проиллюстрировать возможности и ограничения ОТЕС. Согласно (3.3.1) – (3.3.3) идеальная механическая выходная мощность преобразователя тепловой энергии равна

$$P_1 = \rho L c (\Delta T)^2 / T_2. \quad (3.3.4)$$

Таким образом, для получения значительных мощностей требуются существенные потоки воды даже для случая максимального возможного в океане перепада температур. Это в свою очередь требует применения громоздких и соответственно дорогостоящих технических средств.

Ввиду того, что P_1 зависит от квадрата ΔT , опыт подсказывает экономическую привлекательность идеи ОТЕС лишь в районах, где $\Delta T \geq 15^\circ\text{C}$. Такие районы лежат в тропиках. Активно ведутся изыскания по проблеме ОТЕС на острове Гавайи (20° сев. широты, 160° зап. долготы), на острове Науру (0° сев. широты, 166° вост. долготы), в течении Гольфстрим вблизи полуострова Флорида. В тропических

районах T_2 и T_x мало изменяются от сезона к сезону, что должно обеспечивать стабильную выработку энергии в течение всего года.

Безусловно, стабильность и независимость от капризов погоды – главные преимущества ОТЕС как возобновляемого источника энергии. Ниже перечислены другие важные преимущества ОТЕС.

1) В подходящих для размещения преобразователей районах ограничения на значения преобразуемых ресурсов накладывают только размеры установок.

2) Создание экономически оправданных установок требует лишь некоторой доработки таких широко апробированных устройств, как теплообменники и турбины. Никаких совершенно новых или технически невозможных устройств не требуется.

Главные недостатки – стоимость и масштабы установок. Если бы удалось достичь фактической мощности P_l , то стоимость стала бы минимальной, но принципиальные ограничения накладывают необходимость учитывать вязкость жидкостей и несовершенство теплообменников. Приведенные удельные затраты на создание одной не так давно запущенной экспериментальной океанской термальной электростанции (ОТЭС, не путать с латинской ОТЕС) составили 40000 долл/кВт установленной мощности. Однако проведенный анализ, показывает, что крупномасштабные серийные ОТЭС будут значительно более экономичными, что делает саму концепцию ОТЕС достойной внимания. Соответствующие работы активно ведутся в США, Франции и Японии.

Один из факторов увеличения стоимости систем ОТЭС – дороговизна их обслуживания в открытом море и передачи энергии на берег. Однако существуют прибрежные районы, где дно резко падает и оборудование ОТЭС может быть размещено на суше. Одно из таких мест – остров Науру в южной части Тихого океана.

Задачи

3.3.1. Определить расход воды L , $\text{м}^3/\text{с}$, для разности температур ΔT , К, чтобы получить от идеальной тепловой машины мощность 1 МВт при $T_2 = 300$ К.

3.3.2. Определить механическую мощность преобразователя тепловой энергии океана, если известно, что температура поверхностных слоев воды $t_2 = 27$ °С, глубинных слоев – $t_x = 15$ °С, расход воды составил $G = 1$ т/час.

3.3.3. Определить максимально возможную мощность, которую можно получить в системе ОТЭС при $t_2 = 30$ °С, $t_x = 11$ °С, $G = 5$ т/час.

3.3.4. Определить требуемый расход теплоносителя, если известно, что $\Delta T = 15$ °С, а вырабатываемая мощность составила 100 кВт, $t_2 = 26$ °С.

3.3.5. Определить необходимый диаметр трубопровода для достижения мощности ОТЭС 150 кВт при разнице температур $\Delta T = 15^\circ\text{C}$, скорости прокачки 0,1 м/с, $t_2 = 26^\circ\text{C}$.

3.3.6. По условиям задачи 3.3.5. построить зависимость диаметра трубопровода d от скорости $w = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1$ м/с.

3.3.7. По условиям задачи 3.3.5. построить зависимость диаметра трубопровода d от разности температур $\Delta T = 5; 10; 15; 20$ °C.

3.3.8. По условиям задачи 3.3.2. построить зависимость выходной мощности от расхода $L = 1; 2; 3; 6; 8; 10$ м³/ч.

3.3.9. По условиям задачи 3.3.2. построить зависимость выходной мощности от перепада температур $\Delta T = 5; 10; 15; 20$ °C.