

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Экономика и организация энергетики»

ЭКОНОМИКА НЕТРАДИЦИОННЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Практикум
для студентов специальности
1-27 01 01-10 «Экономика и организация
производства (энергетика)»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области экономики и организации производства*

Минск
БНТУ
2020

УДК 620.97 (075.8)
ББК 65.28
Э40

С о с т а в и т е л и:
Бокун И. А., Корсак Е. П.

Р е ц е н з е н т ы:
ведущий научный сотрудник Института тепло-
и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси *Виноградов Л. М.*;
зав. кафедрой «Тепловые электрические станции» БНТУ,
д-р техн. наук, профессор *Карницкий Н. Б.*

Э40 **Экономика** нетрадиционных и возобновляемых источников энергии : практикум для студентов специальности 1-27 01 01-10 «Экономика и организация производства (энергетика)» / сост.: И. А. Бокун, Е. П. Корсак. – Минск: БНТУ, 2020. – 58 с.
ISBN 978-985-550-881-7.

Практикум по дисциплине «Экономика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии» подготовлен с целью закрепления и приобретения навыков студентами. В пособии приведены технико-экономические показатели производства электрической энергии за счет использования возобновляемых источников.

УДК 620.97 (075.8)
ББК 65.28

ISBN 978-985-550-881-7

© Белорусский национальный
технический университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.....	5
1.1. Солнце – неисчерпаемый источник энергии	5
1.2. Особенности солнечного излучения.....	7
2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА.....	10
2.1. Ветер и его характеристика	10
2.2. Принцип действия ветроэнергетических установок	13
2.3. Классификация ветроустановок.....	16
2.4. Ветроэнергетические агрегаты с горизонтальной осью.....	19
2.5. Ветроэнергетические агрегаты с вертикальной осью	20
2.6. Способ управления ВЭУ.....	21
2.7. Экономико-экологическая оценка ветроэнергетики.....	24
2.8. Ветроэнергетика в Беларуси.....	28
3. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА	32
3.1. Принципы работы гидротурбины	33
3.2. Классификация малых ГЭС.....	37
3.3. Гидроэнергетика в Республике Беларусь	40
3.4. Гидравлический таран.....	41
3.5. Влияние малых ГЭС на экологию	44
3.6. Техничко-экономические показатели малых ГЭС	45
4. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ	48
4.1. Ресурсы глубинного тепла Земли	48
4.2. Геотермальные электростанции.....	51
4.3. Геотермальная энергия в Республике Беларусь	54
Темы рефератов	55
Заключение	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	58

ВВЕДЕНИЕ

Энергетика представляет фундамент современного общества, так как промышленность, транспорт, сельское хозяйство и быт не могут обойтись без потребления электроэнергии, на производство которой расходуется значительное количество органического топлива.

В связи с этим необходимо рационально и экономно использовать имеющиеся источники энергии и изыскивать новые. Растет интерес к более широкому использованию возобновляемых источников энергии (различные аспекты применения энергии Солнца, ветра, геотермальных вод и др.), а также к новым методам получения энергии, к тому же не вызывающим загрязнения окружающей среды.

Проблемы, которые связаны с происхождением, экономичностью, техническим освоением и способами использования различных источников энергии привлекают и будут привлекать внимание инженеров и ученых, так как прямо или косвенно с этими проблемами сталкивается каждый житель Земли.

Процессы превращения энергии связаны не только с потерями её, но также с эмиссией веществ, вредных для окружающей среды.

Основная часть источников энергии, используемых современными энергетическими системами – это невозобновляемые источники. Это говорит о том, что темпы их возобновления во много раз ниже темпов их использования. Кроме того, органическое топливо: уголь, мазут и газ могут быть использованы для производства химических веществ, что должно способствовать использованию возобновляемых источников энергии.

Энергия, сосредоточенная в природных ресурсах (источниках) не может быть использована непосредственно. Поэтому важными этапами на пути использования энергии человеком являются преобразование, транспорт, аккумулярование и собственно потребление энергии.

1. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

1.1. Солнце – неисчерпаемый источник энергии

Почти все источники энергии, так или иначе, используют энергию Солнца. Уголь, нефть, природный газ – не что иное, как в какой-то мере «законсервированная» солнечная энергия. Она заключена в этом топливе с незапамятных времен. Под действием солнечного тепла и света на Земле растут растения, которые накапливают в себе энергию, а потом под действием химико-термических процессов, происходящих внутри Земли, образуются углеводородные соединения, после чего они соединяются с остатками растений и превращаются в топливо. Солнце каждый год дает человечеству миллиарды тонн зерна и древесины. Энергия рек и горных водоскатов также происходит от Солнца, которое поддерживает круговорот воды на Земле.

Солнце – ближайшая к Земле звезда, центр Солнечной системы, состоит приблизительно из 100 млрд. звезд. Расстояние от Солнца до Земли составляет примерно 149,5 млн км. Наименьшее расстояние 147,1 млн км. – в январе, наибольшее – 152,1 млн км. – в июле. Солнце имеет форму шара с диаметром, равным примерно 1 392 000 км. Это расстояние в 109 раз больше диаметра Земли, или в 3,6 раза больше расстояния от Луны до Земли.

Солнце представляет собой раскаленную смесь газов, состав которой содержит 82 % водорода, 17 % гелия, остальные элементы – 1 %. Возможно на нем имеются и другие химические элементы в тех же пропорциях, что во Вселенной и на Земле. Внутри Солнца существует область высокого давления, где температура достигает 15–20 млн градусов. Светящаяся поверхность называется фотосферой, температура которой достигает 6000 °С. Вокруг нее образуется тонкая газообразная масса – хромосфера, которая, в свою очередь, окружена ещё более тонким слоем газообразной массы, называемой короной. В процессе образования энергии Солнце теряет в своей массе 43 кг в секунду и тогда за 30 млрд лет оно, возможно, потеряет в массе 0,07 %.

Солнечные лучи, которые достигают поверхности Земли, подразделяют на два вида: прямые и рассеянные. На рис. 1 показано, как это происходит.

Прямые лучи – это лучи, которые непосредственно с поверхности Солнца достигают поверхности Земли. Мощность прямого солнечного излучения зависит от чистоты (ясности) атмосферы, высоты Солнца над линией горизонта (зависит от географической широты и времени дня), а также от положения поверхности по отношению к Солнцу.

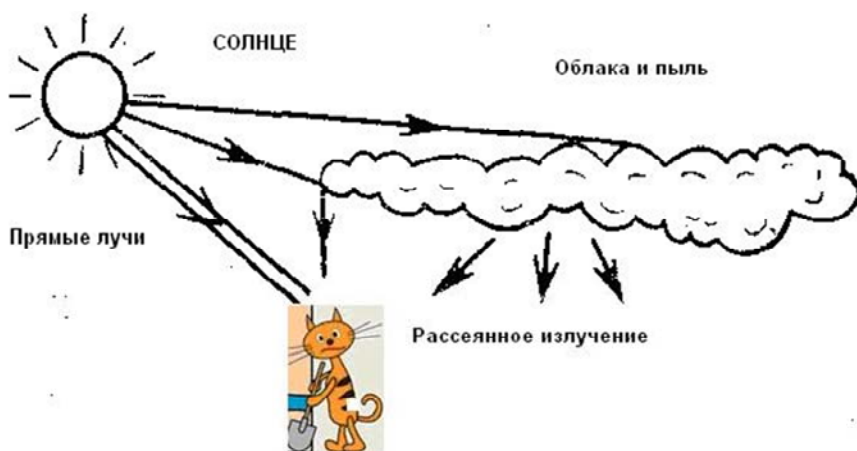


Рис. 1. Прямое и рассеянное солнечное излучение

Рассеянные солнечные лучи поступают из поверхностных слоев атмосферы и зависят от того, каким образом прямые солнечные лучи отражаются от Земли и окружающей среды. Вследствие повторяющегося процесса отражения между покрытой снегом поверхностью Земли и нижней стороной облаков мощность рассеянного солнечного излучения может достигать больших значений.

Вся энергия, излучаемая Солнцем, больше той её части, которую получает Земля, в 5 000 000 000 раз. Но даже такая «ничтожная» величина в 1600 раз больше энергии, которую дают все источники вместе взятые. За три дня Солнце посылает на Землю столько энергии, сколько ее содержится во всех разведанных запасах ископаемых топлив, а за 1 с – 170 млрд Дж. Большую часть этой энергии рассеивает или поглощает атмосфера, особенно, облака и только треть её достигает земной поверхности. Плотность солнечных лучей в космосе составляет примерно 1,4 кВт/м из которых как уже

упоминалось ранее 30 % отражается назад в космос. Таким образом, на поверхности Земли плотность солнечных лучей составляет около 1 кВт/м. Солнечная энергия, достигая поверхности Земли, несёт с собой тепло, испаряет воду, образует ветер и движение воды в морях, дает жизнь растениям.

Солнечная энергия, которая непосредственно не поглощается на Земле, отражается в космос. Земля находится в постоянном тепловом балансе с окружающей средой. Если бы этого не происходило, то Земля нагревалась бы так, что вся жизнь на ней прекратилась бы.

Солнечное излучение практически эквивалентно излучению так называемого черного тела, нагретого до температуры 5800 К. Плотность потока излучения, достигающего верхней границы атмосферы, отличается от солнечной постоянной (1353 Вт/м²) вследствие фильтрации потока солнечной энергии.

1.2. Особенности солнечного излучения

Вся потребляемая человеком энергия возвращается в виде теплоты в окружающую среду. Солнечная энергия, используемая человеком, не исчезает, но изменяет своё качество, а это влияет на статьи энергетического баланса, что в конечном итоге может вызвать как локальные, так и глобальные изменения в окружающей среде.

Солнечное излучение на поверхности Земли – это источник энергии сравнительно низкой плотности. Это обстоятельство заставляет собирать солнечную энергию с достаточно большой площади. Кроме того, в каждом данном месте солнечное излучение не постоянно по времени суток и подвержено разным колебаниям, вызванным погодными условиями и др. Вследствие этого каждая солнечная энергетическая установка, размещенная на Земле, должна иметь либо устройство для аккумуляирования энергии, либо дублирующую энергетическую установку, которая могла бы использовать другой источник энергии.

Солнечное излучение, как излучение, вообще представляет собой перенос энергии при распространении электромагнитных волн. Свойства излучения зависят длины волны λ , или частоты $f = c / \lambda$, где c – скорость света, равная примерно 3×10^8 м/с.

Солнечный спектр можно разделить на три области:

1) ультрафиолетовое излучение ($\lambda < 0,4$ мкм) – 9 % интенсивности;

- 2) видимое излучение ($0,4 < \lambda < 0,7$ мкм) – 45 % интенсивности;
- 3) инфракрасное излучение ($\lambda > 0,7$ мкм) – 46 % интенсивности.

Таким образом, основной поток солнечной энергии сформирован коротковолновым излучением.

Общее количество лучистой энергии, испускаемое с поверхности тела площадью F в единицу времени, называют потоком лучистой энергии или лучистым потоком. Лучистый поток может иметь неравномерную плотность лучеиспускания из поверхности:

$$E = dQ / dF, \text{ Вт/м}^2.$$

Эту величину называют удельным лучистым потоком или поверхностной плотностью излучения. Лучистый поток солнечной энергии, падающей на поверхность тела, поглощается не полностью. Часть энергии отражается и проходит сквозь тело (рис. 2).

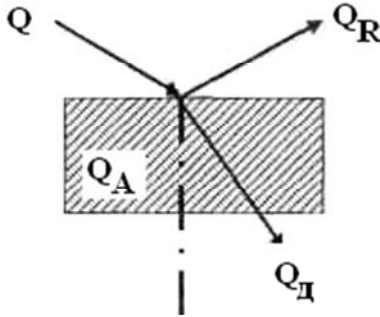


Рис. 2. Схема распределения падающей лучистой энергии

Поэтому можно записать:

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

или

$$A + R + D = 1,$$

где $A = Q_A / Q$ – поглощательная способность;

$R = Q_r / Q$ – отражательная способность;

$D = Q_d / Q$ – пропускная способность.

Тело, поглощающее всю падающую энергию, называется абсолютно черным телом ($A = 1$; $R = D = 0$).

Абсолютно черных тел в природе нет, поэтому для реальных тел $A < 1$. Если $R = 1$, то $A = D = 0$; это означает, что вся падающая на тело лучистая энергия полностью отражается, а тело называется зеркальным.

Если $D = 1$, то $A = R = 0$; это означает, что вся падающая энергия полностью проходит сквозь тело. Такие тела называются абсолютно проницаемыми (прозрачными) или диатермичными.

Свойством абсолютно черного тела обладает отверстие в стенке полого тела, ибо можно допустить, что энергия луча, падающего в это отверстие, полностью поглощается.

Мощность потока лучистой энергии, посылаемой Солнцем на Землю, огромна. За пределами земной атмосферы на каждый квадратный метр поверхности, расположенной перпендикулярно солнечным лучам, падает около 1,4 кВт. Если эту мощность умножить на поперечное сечение Земли, то общая мощность составит 170 Вт. Полная лучистая энергия, поступающая на Землю от Солнца в течение года $1500 \cdot 10^{15}$ кВт·ч, что в 20 000 раз больше общего мирового потребления энергии. Не вся эта энергия может быть использована человечеством. Из 100 % падающего на Землю излучения 34 % отражается в мировое пространство за счет отражения от облаков, 19 % поглощается в атмосфере и доля 47 % достигает поверхности Земли. Земля отдает атмосфере энергию, затрачиваемую на испарение воды и на перемещение атмосферы (27 %), и энергию инфракрасного теплового излучения 20 %. Таким образом, вся энергия, воспринятая атмосферой, уходит в виде инфракрасного излучения в мировое пространство (около 66 %).

2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

2.1. Ветер и его характеристика

Ветер, по-видимому, является наиболее старым из всех имеющихся источников энергии, используемым человеком с незапамятных времен.

Причиной возникновения ветра является поглощение солнечного излучения земной атмосферой, 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 того, ветровая закономерность определяется местными географическими и экологическими факторами.

Ветер возникает также вследствие того, что температура и давление атмосферного воздуха во всех точках Земли не одинаковы. Солнце с разной силой обогревает различные участки Земной поверхности, что вызывает перепад давлений воздуха. К основным характеристикам ветра можно отнести скорость (силу), которая по шкале Бофорта измеряется в баллах.

Таблица 2.1

Градация силы ветра по шкале Бофорта

Баллы	Характер ветра	Признаки	Скорость м/с
0	Безветрие	Дым поднимается вертикально	0–0,2
1	Почти безветрие	Дым поднимается почти вертикально	0,3–1,5
2	Легкий ветерок	Ветер едва ощутим	1,6–3,3
3	Слабый ветер	Кольшутся листья и флаги	3,4–5,4
4	Умеренный ветер	Качаются веточки, полощутся флаги	5,5–7,9
5	Свежий ветер	Качаются более крупные ветки, ветер вызывает неприятные ощущения	8,0–10,7
6	Сильный ветер	Слышен шум ветра	10,8–13,8

Баллы	Характер ветра	Признаки	Скорость м/с
7	Крепкий ветер	Качаются толстые деревья, волнение на воде	13,9–17,1
8	Шквальный ветер	Качаются толстые деревья, трудно идти	17,2–20,7
9	Шквал	Переворачивает легкие предметы, срывает черепицу с крыши	20,8–24,4
10	Буря (шторм)	Вырывает деревья	24,5–28,4
11	Сильная буря (жестокий шторм)	Разрушает постройки	28,4–32,6
12	Ураган	Опустошает обширные местности	свыше 32,6

Скорость ветра на разных высотах различна, поэтому различны и воздействия ветра на ветроколеса и предметы, расположенные на разной высоте. На поверхности Земли скорость ветра всегда равна нулю. Затем до высоты, равной примерно высоте расположенных в данном месте различных препятствий (зданий, деревьев и т. д.), скорость ветра увеличивается очень сложным образом (рис. 3).

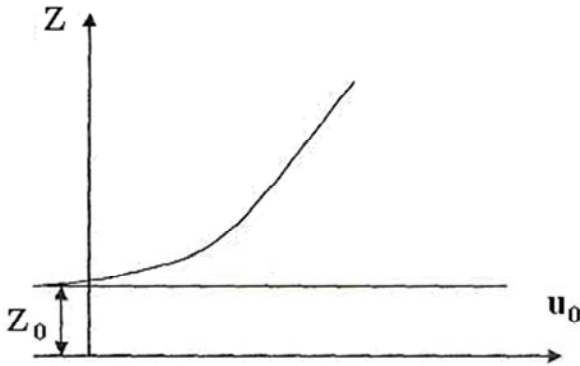


Рис. 3. Изменение скорости ветра от высоты

Зависимость скорости ветра от высоты имеет вид:

$$z - d = z_0 \exp(u_z / v),$$

где z_0 – высота препятствий относительно специального нулевого уровня;

v – характерная скорость;

u_z – скорость ветра на высоте z ;

d – смещение нулевого уровня, значение которого несколько меньше высоты местных препятствий.

В ином виде будем иметь: $u_z = vln[(z - d) / z_0]$.

Скорость ветра при стандартных метеорологических измерениях определяется осреднением за 10 минутный отрезок времени показаний анемометра, находящегося на 10 метровой высоте. Непрерывное измерение скорости ветра осуществляется с помощью специальных анемометров. Направление ветра определяется стороной света, откуда дует ветер, его представляют в виде розы ветров (рис. 4), показывающей среднюю скорость ветра в различных направлениях. На розе ветров вместо средней скорости могут быть показаны для каждого направления распределение ветра по скорости. Информация о направлении ветра чрезвычайно важна, когда установки размещают в горной местности, вблизи зданий или других ветроустановок, или возможно их затенение при некоторых направлениях ветра.

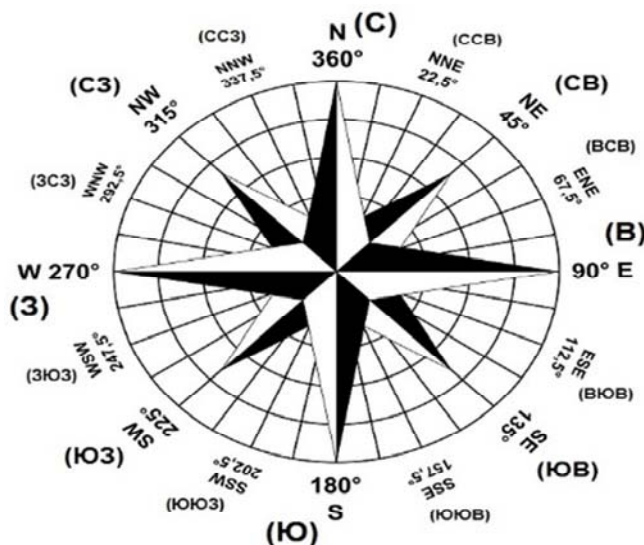


Рис. 4. Роза ветров

2.2. Принцип действия ветроэнергетических установок

Основным элементом ветроэнергетической установки является ветроколесо, преобразующее энергию ветра в полезную механическую работу.

Поток воздуха, проходя через поперечное сечение колеса обладает кинетической энергией, изменение которой в колесе можно представить в виде:

$$dE_k = dG / g (u_0^2 - u_2^2) / 2,$$

где dG / g – массовый расход воздуха через поперечное сечение струйки;

u_0, u_2 – скорость воздуха перед ветроколесом и за ним;

g – ускорение силы тяжести.

Кинетическая энергия потока воздуха, проходящего через ветроколесо равна:

$$E_k = \rho S u_0^3 / 2,$$

где ρ – плотность воздуха;

S – поперечное сечение ветроколеса;

u_0 – скорость набегающего потока.

При прохождении потока воздуха через ветроколесо, скорость его уменьшается, т. е. поток затормаживается. Коэффициент торможения потока равен:

$$a = (u_0 + u_1) / u_0,$$

где $u_1 = (u_0 + u_1) / 2$ – скорость потока внутри ветроколеса.

Мощность, развиваемая ветроколесом:

$$P = \frac{\rho S u_1 (u_1^2 - u_2^2)}{2},$$

$$P = C_p \rho F u_0^3 / 2,$$

$$C_p = 4a(1-a)^2, \quad C_{p \max} = 0,59,$$

где $a = 1 - u_1 / u_2$ – коэффициент потери скорости.

Коэффициент C_p характеризует эффективность использования ветрогенератором энергии воздушного потока, проходящего через ометаемую ветроколесом площадь S . На рис. 5 показано изменение коэффициента мощности C_p в зависимости от коэффициента потери скорости.

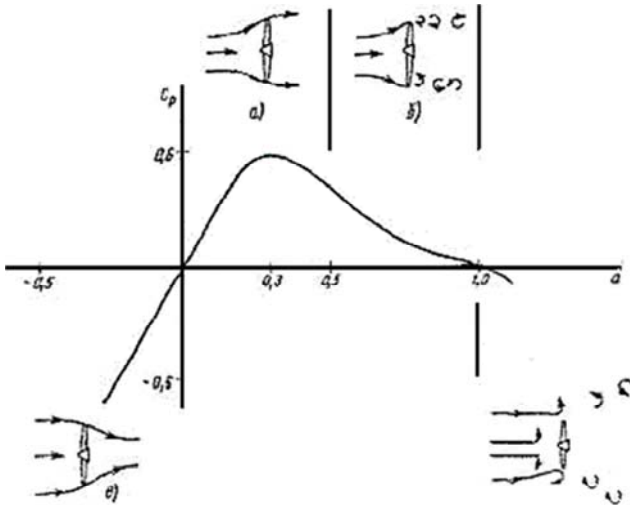


Рис. 5. Изменение коэффициента мощности в зависимости от коэффициента потери скорости:

- а) нормальный режим работы ветроколеса в ВЭУ; б) малоэффективный режим работы ветроколеса из-за сильной турбулентности ветрового потока;
- в) работа ветроколеса в режиме воздушного винта, когда энергия передается от винта потоку; г) работа ветроколеса в режиме воздушного винта при реверсе тяги (торможение самолета во время послепосадочного пробега)

Зависимость коэффициента мощности C_p от коэффициента потери скорости $a = 1 - u_1 / u_2$ при различных режимах работы ветроко-

леса. Набегающий на ветроколесо воздушный поток действует с силой:

$$F = \Delta p_{\max} S,$$

где Δp – перепад давления на ветроколесе: $\Delta p_{\max} = \rho u_0^2 / 2$.

С учетом торможения потока:

$$F = c_F \rho S u_0^2 / 2,$$

где $c_F = 4a(1 - a)$ – коэффициент лобового давления.

При расчете ветроколеса необходимо учитывать величину крутящего момента на выходном валу. Максимальный крутящий момент ветроколеса равен:

$$M = F_{\max} R,$$

где R – максимальный радиус ветроколеса.

$$M = c_F (\rho S u_0^2 / 2) R.$$

На максимальный крутящий момент оказывает влияние быстроходность ветроколеса, равная отношению окружной скорости конца лопастей v_R к невозмущенной скорости набегающего потока u_0 :

$$Z = v_R / u_0 = R\omega / u_0,$$

где ω – угловая скорость вращения ветроколеса.

$$M_{\max} = c_F \rho S u_0^2 (u_0 z) / 2\omega.$$

При проектировании ветроустановки необходимо рассчитать оптимальную быстроходность, т. е. быстроходность, при которой лопасть ротора не попадает в турбулизированный предыдущей лопастью поток. В то же время поток не должен проходить через сечение ветроколеса без взаимодействия с его лопастями:

$$Z_{opt} = 4\pi / n,$$

где n – число лопастей ветроустановки.

Следует отметить, что с увеличением скорости ветра ветровая нагрузка быстро возрастает и при скоростях ветра свыше 15–20 м/с ветроколесо может не выдержать нагрузок. Поэтому с целью предупреждения их разрушения используют такие мероприятия как: поворот ветроколеса или его лопастей в нерабочее положение; уменьшение снимаемой мощности, соответственно уменьшение лобового давления; принудительная остановка ветроколеса.

2.3. Классификация ветроустановок

Ветроэнергетические установки классифицируются по геометрии ветроколеса, его положения относительно направления ветра. При взаимодействии потока с лопастью возникают:

- 1) сила сопротивления, параллельная вектору относительной скорости набегающего потока;
- 2) подъемная сила, перпендикулярная силе сопротивления;
- 3) завихрения, обтекающей лопасти воздушного потока, что приводит к загрузке воздушного потока за плоскостью ветроколеса, т. е. его вращению относительно вектора скорости набегающего потока;
- 4) турбулизация потока, которая возникает как перед колесом, так и за ним, в результате чего лопасть часто оказывается в потоке, турбулизированным другими лопастями;
- 5) препятствие для набегающего потока.

Это свойство характеризуется параметром, называемым геометрическим заполнением, которое равно отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой ими площади.

По *взаимному положению ветроколеса* и направлению воздушного потока ВЭУ подразделяют на горизонтально-осевые и вертикально-осевые.

Если ось вращения параллельна воздушному потоку, то ветроустановка будет горизонтально-осевой.

Если ось вращения перпендикулярна воздушному потоку, ветроустановка будет вертикально-осевой.

По *вращающей силе* ВЭУ классифицируются на: установки, использующие силу сопротивления и установки, использующие подъемную силу. Ветроустановки, использующие силу сопротивления вращаются с линейной скоростью, меньшей скорости ветра, а уста-

новки, использующие подъемную силу, имеют линейную скорость концов лопастей существенно превышающую скорость ветра.

По *геометрическому заполнению* ветроколеса ВЭУ делятся на: установки с большим геометрическим заполнением (многолопастные) и малым заполнением (одно- и двухлопастные). Ветроэнергетическая установка с большим геометрическим заполнением ветроколеса развивает значительную мощность при относительно слабом ветре, и максимум мощности достигается при небольших оборотах колеса. ВЭУ с малым заполнением достигают максимальной мощности при больших оборотах.

Ветроколеса с горизонтальной осью делятся на однолопастные, двухлопастные, трехлопастные, многолопастные; с вертикальной осью различают следующие конструкции роторов: чашечный анемометр, ротор Савониуса, ротор Дарье, также имеются конструкции с концентраторами (усилителями) потока специальной конструкции.

Горизонтальные ВЭУ среднего и мегаваттного класса имеют быстроходное колесо обычно с 2–3 лопастями, которое вместе с капсулой агрегата с помощью автоматической системы ориентации поворачивается на башне по направлению ветра. В настоящее время ряд стран осуществляет серийное производство таких ВЭУ с диаметром колеса 20–40 м и мощностью 100–500 кВт, построены опытные горизонтальные ВЭУ с диаметром колеса до 70–100 м и мощностью 3–4 МВт.

Для вертикальных ВЭУ не нужна система ориентации, что является их преимуществом, однако из-за присущих им недостатков они менее распространены и находятся в стадии усовершенствования конструкции. Следует отметить, что ветроколеса с вертикальной осью вращения, в отличие от таковых с горизонтальной, находятся в рабочем положении при любом направлении ветра, однако, их принципиальными недостатками являются большая подверженность усталостным разрушениям из-за возникающих в нем автоколебательных процессов и пульсации крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора.

Из-за этого подавляющее большинство ветроагрегатов выполнено по горизонтально-осевой схеме.

По *мощности* ветроустановки делятся на: малой мощности – до 100 кВт, средней – от 100 до 500 кВт, и большой (мегаваттного класса) – 0,5–4 МВт и более.

Часто идет речь о малой ветроэнергетике, назначение которой – обеспечение водоподъема для сельскохозяйственных целей, получение тепла и электропитания отдельных потребителей в неэлектрофицированных районах и т. п. Во многих странах налажено серийное производство ветроустановок малой мощности. Например, в России НПО «Ветроэн» серийно выпускает установки мощностью 4 кВт с диаметром колеса 6 м. Следует отметить, что малая ветроэнергетика не требует больших территорий, ее можно размещать везде, где имеются для этого соответствующие условия.

Выбор характеристик ветроколеса для ветроустановки в конкретных ветровых условиях определяется целями, которые перед ней ставятся. Обычно это требование максимизации производства энергии за год, чтобы, например, уменьшить потребление топлива тепловыми станциями единой энергосистемы, либо обеспечение производства определенного минимума энергии даже при слабом ветре, чтобы, например, сохранить работоспособность насосов системы водоснабжения. Одной из важнейших характеристик ветроколеса является его быстроходность, которая зависит от трех основных переменных: радиуса ометаемой ветроколесом окружности, скорости ветра, угловой скорости вращения колеса.

По назначению ветроустановки делятся на: ветряки, турбины для привода мельниц, насосов и аэрогенераторы или ветроэлектрогенераторы для производства электроэнергии.

Установки для непосредственного выполнения механической работы называют турбиной, ветряком, а установки для производства электроэнергии, представляющим совокупность турбины и электрогенератора, называют ветроэлектрогенераторами или аэрогенераторами.

По стабильности частоты различают ВЭУ с переменной и постоянной частотой вращения, синхронизированной с энергосистемой.

Вследствие автосинхронизации аэрогенераторы, подключенные напрямую к мощной энергосистеме имеют постоянную частоту вращения. Но такие установки менее эффективно используют энергию ветра, чем установки с переменной частотой вращения.

По способу соединения ветроколеса с генератором ВЭУ делят на: жесткое или через промежуточный преобразователь энергии. Ветроколесо может быть напрямую соединено с электрогенератором (жесткое соединение) или через промежуточный преобразователь энергии, выполняющий роль буфера. Существуют также развязан-

ные схемы соединения колеса с генератором, называемые мягко-сопряженными. Нежесткое соединение наряду с инерцией ветроколеса уменьшает влияние флуктуации скорости ветра на выходные параметры электрогенератора.

ВЭУ с горизонтальной осью – это ветроколеса пропеллерного типа, приводимые в движение подъемной силой.

Относительно потока ветра колесо может располагаться перед опорной башней или за ней. При переднем расположении ветроколесо должно иметь аэродинамический стабилизатор. При заднем расположении обеспечивается самоориентация ВЭУ.

2.4. Ветроэнергетические агрегаты с горизонтальной осью

Наибольшее распространение получили ветроэнергетические установки с горизонтальной осью (рис. 6, а) Использование таких установок относительно небольшой мощности (от нескольких Ватт до сотен киловатт) экономически оправдано для энергоснабжения автономных потребителей. Такие автономные ветросиловые и ветроэлектроэнергетические агрегаты предназначены для питания радиоаппаратуры в сельскохозяйственном производстве, водоподъема, освещения и отопления жилых и производственных помещений.

На всех ВЭУ устанавливаются прочные и надежные вертолетные лопасти. Ветроколеса оснащенные виндорозами, автоматически поворачивают их в сторону ветра. ВЭУ предназначенные для подъема воды с глубин до 200 м, оснащаются высокопроизводительными насосами.

Разрабатываются ВЭУ суммарной мощностью 2 МВт. В Дании разработаны ВЭУ мощностью 2 МВт с диаметром ветроколеса 60 м. В ФРГ спроектирована ВЭУ мощностью 3 МВт с диаметром ветроколеса 100 м. В Швеции эксплуатируются ВЭУ мощностью 2 и 3 МВт. С 1981 в США работает ВЭУ мощностью 2 МВт и выработала уже к 1982 году 5,8 млн кВт·ч. Стоимость сооружения крупных ВЭУ при массовом (до 100 шт.) изготовлении оценивается в 3–7,5 млн долларов. Стоимость вырабатываемой электроэнергии составляет 8,6–21,5 цента/кВт·ч.

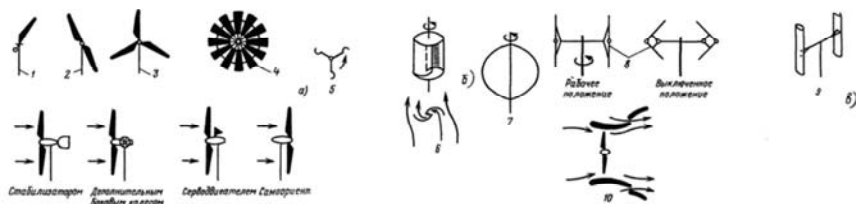


Рис. 6. Классификация ветроколес:

а) с горизонтальной осью приведены способы ориентации при переднем расположении ветроколеса; б) с вертикальной осью;

в) с концентраторами (усилителями) ветрового потока;

1 – однолопастное колесо; 2 – двухлопастное; 3 – трехлопастное;

4 – многолопастное; 5 – чашечный анемометр; 6 – ротор Савониуса;

7 – ротор Дарье; 8 – ротор Масгрува; 9 – ротор Эванса; 10 – усилитель потока

2.5. Ветроэнергетические агрегаты с вертикальной осью

Не смотря на ряд недостатков перспективными считаются конструкции ВЭУ с вертикальной осью и с вертикальными лопастями (рис. 6, б). Ведутся работы по созданию ВЭС мощностью до 30 МВт, при единичной мощности агрегата 1–6 МВт. Изменением положения лопастей можно регулировать развиваемую мощность. В таких установках в качестве лопастей используются крылья самолетов, которые имеют достаточный запас прочности для работы при расчетных нагрузках. Экономически эффективными могут оказаться роторные ВЭУ с вертикальной осью по 4,5 МВт с расчетной скоростью ветра 13,5 м/с и коэффициентом использования энергии ветра 0,465. Ротор имеет диаметр 100 м и высоту 72 м. Удельная стоимость роторных ВЭУ составляет порядка 1,2–1,3 тыс. долл/кВт.

Недостатки роторных ВЭУ:

1) гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за часто возникающих в них автоколебательных процессов;

2) пульсация крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора.

Наиболее часто встречаются вертикально-осевые установки:

1) чашечный ротор, ветроколесо приводится во вращение силой сопротивления (рис. 6, б).

2) ротор Савониуса – это колесо вращается силой сопротивления, лопасти выполнены из тонких изогнутых листов;

3) ротор Дарье (рис. 6, в) вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или трех изогнутых несущих поверхностях. Подъемная сила максимальна в тот момент, когда лопасть с большой скоростью пересекает набегающий воздушный поток. Применяется в электрогенераторах.

2.6. Способ управления ВЭУ

При использовании ветра возникает серьезная проблема: избыток энергии в ветреную погоду и недостаток ее в безветрие. Простейший способ устранения этого недостатка состоит в объединении ВЭУ с гидроаккумулирующей станцией. Во время ветра и избытка энергии ВЭУ накачивает воду в расположенный выше резервуар, а потом вода, стекая из него, приводит в действие водяную турбину. Существуют также схемы накопления энергии ВЭУ за счет закачки и сжатия воздуха, накопления его в аккумуляторах. Перспективным способом может явиться использование электроэнергии ВЭУ для производства водорода, который затем может быть использован на тепловых электростанциях.

Система управления ВЭУ оказывает влияние на эффективность её работы. При работе ВЭУ частота и напряжение не всегда стабильны, поэтому электроэнергию с такими параметрами можно применять в нагревательных элементах, а также после её выпрямления использовать для зарядки аккумулятора (рис. 7). Для стабилизации частоты всей вырабатываемой энергии используются:

1. Механическое управление лопастями ветроколеса с помощью регулятора с отрицательной обратной связью. Шаг лопастей ветроколеса регулируется так, что при изменении скорости ветра частота вращения остается постоянной.

2. Электрическое управление, при котором постоянство частоты вращения ветроколеса и генератора обеспечивается изменением электрической нагрузки на выходе генератора. При таком способе стабилизации частоты энергия ветра используется более эффективно, так как лопасти работают в оптимальном режиме.

Способ управления ВЭУ зависит также от её мощности и связи с энергосистемой. В табл. 2.2 представлены классы ветроэнергетических систем и способы их управления.

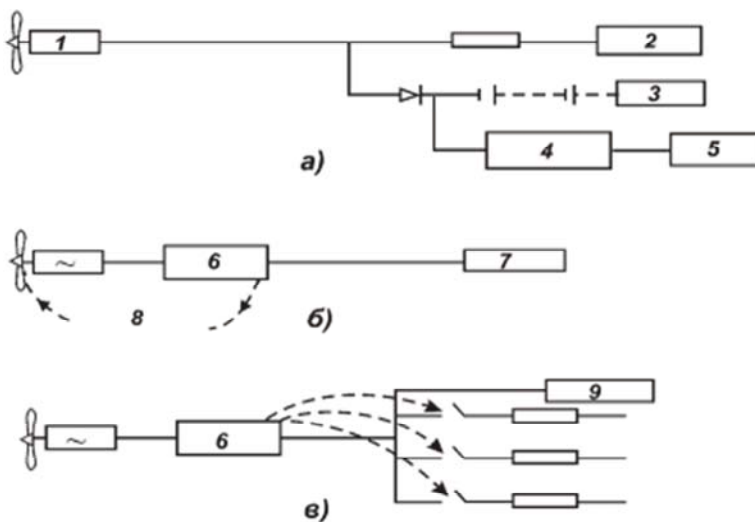


Рис. 7. Возможные схемы согласования ветроустановки с потребителями:
 1 – нестабилизированное напряжение или частота; 2 – нагревательный элемент;
 3 – аккумуляторные батареи; 4 – преобразователь постоянного напряжения в переменное; 5 – стабилизированное напряжение и частота;
 6 – регулятор; 7 – стабилизированный постоянный ток;
 8 – обратная связь; 9 – приоритетная нагрузка.

Таблица 2.2

Способы управления ВЭУ

Класс	Мощность ВЭУ	Степень автономности	Способ управления
A	$P \gg P_G$	Автономная	а) шагом ветроколеса; б) нагрузкой
B	$P = P_G$	Ветродизельная	а) раздельная работа ВЭУ и дизельгенератора; б) совместная работа ВЭУ и дизельгенератора
C	$P \ll P_G$	Подключенная к мощной энергосистеме	а) параметрами генератора постоянного тока; б) преобразованием постоянного тока в переменный

P – мощность ВЭУ; P_G – мощность других генераторов системы.

К классу А относятся отдельно стоящие одnogенераторные ветроустановки, не подключенные к какой-либо энергосистеме. Мощность их находится в пределах 5–20 кВт. Они могут использоваться для электропитания средств связи, маяков и др.

К классу В относятся ВЭУ имеющие мощность, равную мощности других генераторов. Такие ВЭУ работают совместно с дизель-генератором, который может включаться в безветрие. В ветроустановках этого класса используются две различные схемы распределения энергии:

1) одноканальная (рис. 8, а) в которой имеется один выход для питания бытовых потребителей и поддерживается стабилизированное напряжение. Дизельный генератор может включаться при отсутствии ветра, а также параллельно с ветрогенератором;

2) многоканальная система (рис.8, б) в которой имеется несколько выходов: накопитель энергии, дешевая электроэнергия, дорогая электроэнергия. При слабом ветре потребители дешевой электроэнергии отключаются. В периоды отсутствия ветра включается дизель-генератор. Преимуществом такой схемы является максимальное использование энергии в любой момент времени.

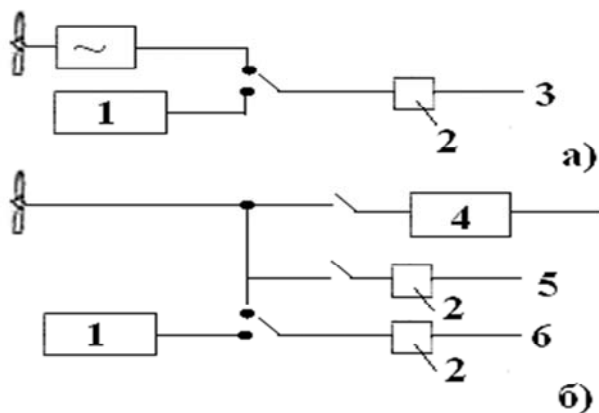


Рис. 8. Одноканальная (а) и многоканальная (б) схемы согласования ветродизельной энергоустановки с потребителями:
 1 – дизельный электрогенератор; 2 – счетчик; 3 – единая стоимость электроэнергии; 4 – накопитель энергии; 5 – дешевая электроэнергия; 6 – дорогая электроэнергия

К классу С относится ВЭУ мощностью большей, чем собственная мощность и подключенная к энергосистеме (рис. 9) В этом случае при безветрии потребители снабжаются от энергосистемы. При избытке электроэнергии при работе ВЭУ электроэнергия передается в энергосистему. Для бесперебойного электроснабжения потребителей в условиях недостаточной ветровой нагрузки предлагается аккумулирование преобразованной энергии ветра на основе электрохимического разложения воды под действием постоянного тока.

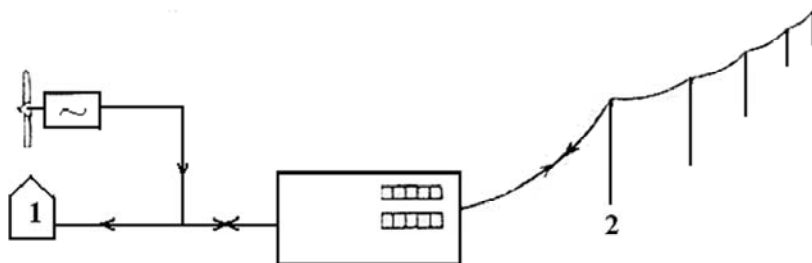


Рис. 9. Схема подключения ветроустановки к более мощной энергосистеме:
1 – жилые дома, фермы и т. д.; 2 – линия электропередачи

Генераторы ВЭУ работают в тяжелых климатических и технологических условиях, так как они находятся на открытом воздухе, подвержены колебаниям температуры, влажности, действию дождя. Кроме того, конструктивное размещение и условия эксплуатации делают их недоступными для регулярного технического обслуживания и ремонта. Они работают в условиях повышенных вибраций, нестабильной скорости ветра.

Наиболее широкое применение получают синхронные генераторы переменного тока. Иногда применяются асинхронные или асинхронизированные генераторы, также начинают использовать безредукторные низкоскоростные многоканальные генераторы.

2.7. Экономико-экологическая оценка ветроэнергетики

К основным экономическим показателям ВЭУ относятся удельные капиталовложения на 1 кВт установленной мощности и себестоимость 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии. Эффективность работы ВЭУ зависит от скорости ветра. При скорости ветра 12 м/с

можно получить максимальный эффект (100 %) от мощности генератора. При скорости ветра до 8 м/с эффект снижается до 50 %, но уже при скорости меньше 5 м/с эффективность использования энергии ветра резко снижается. На каждом месте, где предполагается строить ВЭУ, необходимо знать, как часто и с какой силой в этом районе дуют ветры. Размеры ВЭУ соответствуют определенной скорости ветра.

Экономическая эффективность ВЭУ зависит в основном от стоимости электроэнергетической установки и цены замещаемого топлива.

Экономия затрат на топливо и сокращение переменных эксплуатационных затрат могут рассчитываться по количеству сэкономленного топлива, цены на него, а также удельным эксплуатационным расходам, которые зависят от количества производимой электроэнергии. Все затраты должны включать расходы по эксплуатации, а также на технологическое обслуживание и ремонт за весь срок службы ВЭС подобно тому, как это имеет место на обычных ТЭС. В табл. 2.3 представлены основные параметры, необходимые для оценки стоимости ВЭС.

Таблица 2.3

Сопоставимые параметры ВЭС и ТЭС

Краткое описание	Обозначение	Исходные величины
Технические параметры		
Срок службы ВЭС	$T_{сл}$	20 лет
Срок службы ТЭС	$T_{сл}$	20 лет
Коэффициент полезного действия ТЭС	η	36 %
Параметры стоимости		
Топливная составляющая	s_T	0,06 долл/кВт·ч
Удельные переменные эксплуатационные расходы ВЭС	$s_{экс}$	0,01 долл/кВт·ч
Удельные капитальные вложения в ВЭС	k	2000 долл/кВт·ч
Удельные постоянные расходы	$s_{пост}$	100 долл/кВт·ч

Предполагается, что продолжительность запланированных простоев составит 5 % срока службы ВЭС, а незапланированные простои по техническим причинам также составят 5 % срока службы ВЭС.

По данным американских фирм, разрабатывающих ветровые установки, расчетная стоимость 1 кВт мощности составляет 935 долларов для станции мощностью 1500 кВт, т. е. вполне приемлемые значения. Однако следует учесть соображения о необходимости учета стоимости земельных и экологических факторов, что может существенно изменить указанные величины. Экономически приемлемой считается работа ветровой установки в течение примерно 2500 ч/год. Считается, что сооружение ветровой установки мощностью до 5–6 кВт экономически оправдано при скорости ветра 3,5–4,0 м/с. Для больших установок требуется скорость ветра, равная 5,5–6,0 м/с. Сразу же возникает вопрос, что делать потребителю в то время, когда нет ветра или его скорость недостаточна для обеспечения работы установки? В этом случае имеется несколько возможностей. Одна из них – использование резервного источника энергии, в частности подключение к другой энергосистеме. Другой вариант предусматривает работу ветровой установки с аккумулятором энергии.

С экономической точки зрения ветроэнергетика – одно из благоприятных направлений. Единица энергии, выработанная на ВЭУ предотвращает выброс в атмосферу CO_2 . Кроме того, отсутствуют выбросы оксидов азота, серы и др. Однако, ветроэнергетические установки, как и другие энергетические установки, негативно влияют на окружающую среду. Они создают шум, что отрицательно сказывается на живом микро- и макромире, изменяют ландшафт окружающей среды, генерируют помехи радио и телесвязи. Имеется возможность (вероятность) попадания птиц в лопасти ветроколеса.

Следует отметить, что для того чтобы получить мощность ветроустановки, например 1 МВт, требуется диаметр ветроколеса порядка 60 м. Отсюда и возникает большая материалоемкость ветроэнергетики. По удельной материалоемкости (металлоемкости) ветроустановки на два порядка превышают тепловые энергоустановки равноценной мощности, что в условиях всеобщего дефицита металла само по себе уже является большим недостатком ВЭУ, а тенденция замены металлических конструкций на стеклопластиковые требует экологического анализа последствий химических производств, предшествующих созданию данных материалов.

Основным недостатком ветроэнергетических станций является изъятие под их строительство больших площадей земельных ресурсов. Площади изменяются в зависимости от района размещения, типа станции и технологических особенностей конструкции. Под мощные промышленные ветроэнергетические станции в зависимости от розы ветров и местного рельефа района, необходима площадь из расчета от 5 до 15 км²/МВт. Поэтому необходимо учитывать, какая максимальная мощность может быть получена с километра, так как частично эти земли могут использоваться для сельскохозяйственных нужд, что в большей мере зависит от шумовых эффектов и степени риска при поломках ВЭУ. Например, у больших ВЭУ лопасть при поломках и отрыве может быть отброшена на 400–800 метров.

Наиболее важный фактор влияния ВЭУ на окружающую среду – это акустическое воздействие. Шумовые эффекты от ВЭУ имеют различную природу и подразделяются на механические (шум от редукторов, подшипников и генераторов) и аэродинамические воздействия, которые, в свою очередь, могут быть низкочастотными (менее 16–20 Гц) и высокочастотными (от 20 до нескольких кГц). Эти воздействия вызваны в основном вращением рабочего колеса. Шумовой эффект в непосредственной близости ВЭС достигает 50–80 дБ. Отдельную экологическую проблему составляют шумовые воздействия установок мощностью более 250 кВт, когда на концах лопаток ветроколес большого диаметра возникают сверхзвуковые скорости. При этом возникает инфразвуковой эффект, отрицательно воздействующий на биологические субъекты и человека. Установка мощностью 2 МВт с лопастью пропеллера 60 м производит такой шум, что ее нужно отключать в ночное время. Помимо основных экологических факторов воздействия ветроэнергетики на окружающую среду (блокировка земельных территорий, металлоемкость ветроустановок), они требуют предварительного цикла добычи, переработки металлов, что оказывает косвенное влияние на окружающую среду.

Размещение ветровых парков влияет на миграцию птиц и рыб (для экваториальных ВЭС). Наконец, серьезным негативным экологическим последствием использования энергии ветра является то, что в местах работы ветряков значительно ослабевает сила воздушных потоков, что может оказать влияние на климат, а также ограничить «проветривание» близлежащих промышленных районов. Еще

одной негативной чертой ветроустановок являются производимые ими помехи для воздушного сообщения и для распространения радио- и телеволн, а также оптическое загрязнение ландшафта, что приводит к оттоку туристов. Вследствие этого может сложиться ситуация, когда ущерб от уменьшения количества туристов может превысить экономическую выгоду от использования ВЭУ, что имеет место, например, в некоторых районах на побережье ФРГ.

В проектировании ВЭУ самая трудная проблема состоит в том, чтобы при разной силе ветра обеспечить одинаковое число оборотов пропеллера. При подключении к сети генератор должен давать не просто какую-то электрическую энергию, а только переменный ток со стандартной частотой 50 Гц.

В странах Западной Европы ветроэнергетика является приоритетным направлением государственной энергетической политики.

2.8. Ветроэнергетика в Беларуси

Для Беларуси ветроэнергетика не является абсолютным новшеством. В нашей стране существуют серьезные научные разработки по данной тематике, опытные производства и даже реализованные проекты.

Идеальные места для «приручения» энергии ветра – это протяженные, продуваемые со всех сторон равнины, расположенные на возвышенностях. Именно на таких территориях среднегодовая скорость ветра превышает 5 м/с, что обеспечивает эффективную работу ветроэнергетических установок. Равнинные местности с высокой скоростью ветра в Западных странах встречаются довольно часто. Но не стоит забывать о том, что и Беларусь богата подобными территориями.

По оценкам специалистов, наиболее перспективными для развития ветроэнергетики в Беларуси являются центральная и западная части Минской области, а также Витебская возвышенность. Более того, потенциал любой точки на территории Беларуси в отношении ее перспективности или неперспективности для ветроэнергетики может быть определен с помощью соответствующих расчетов, базирующихся на информации ветроэнергетического атласа страны и специального банка данных. Вопросы окупаемости и экономической эффективности ветроэнергетических установок – сфера, где еще не расставлены все точки над *i*. Если подходить к этой проблеме

глобально, учитывая перспективы постоянного удорожания энергетических ресурсов и их грядущий дефицит, то ветроэнергетическая техника однозначно является перспективным направлением вложения средств. Однако, в нашей стране как-то не принято строить долгосрочные планы и активно развивать направления науки и техники, противоречащие традиционному мышлению. Да и стоимость энергетических установок не так уж и мала. Цена установки мощностью 100–500 кВт составляет примерно 800–1000 долларов на киловатт (не считая затрат на монтаж и эксплуатацию). Отечественные сторонники ветроэнергетической концепции считают, что окупаемость таких систем не превышает 4 лет.

Одна из первых ветроэнергетических установок в стране находится на выезде из Минска в могилевском направлении. Она была разработана минской фирмой «Аэрола». Другая, разработанная НПП «Ветромаш», работает в Заславле, который практически является плацдармом для отработки новых решений по энергосбережению в Беларуси. В поселке Занарочь подготовлена площадка для установки ветростанции. И, наконец, в качестве положительного примера в области энергосбережения недавно проходившей итоговой коллегии Минжилкоммунхоза было названо сооружение ветровой установки в Городке.

Все эти пилотные проекты свидетельствуют о том, что в Беларуси для внедрения концепции ветроэнергетики на практике есть не только бесплатный ветер и благоприятные климатические предпосылки, но и люди, которые понимают, что лучше заботится о будущем сегодня, чем обрекает своих детей на бесперспективное завтра.

Анализ ветровых условий Беларуси показывает, что среднегодовые фоновые скорости ветра составляют 2,8–4,4 м/с. Поэтому они менее перспективны для ветроэнергетики. Имеется много мест в Беларуси, где скорость ветра превышает 5 м/с. Однако, разработанные роторные ветроколеса ВЭУ, в которых учитывается эффект Магнуса, можно использовать в при скорости ветра 4,4–6 м/с и более.

В таблице представлены расчетные наибольшие и фоновые скорости ветра на территории Беларуси.

Таблица 2.4

Расчетные среднегодовые скорости ветра на высотах

№ точек	Месторасположение точки			Абс. высота, м		Скорость, м/с		
	Область	Район	Населенный пункт	Наиб.	Фонов.	Наиб.	Фонов.	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Минская	Мядельский	Пасынки	217	165	6,0	3,7	
2		Молодечен.	Уша	281	240	5,7	4,3	
3		Логойский		Янушковичи	264	215	5,6	4,1
4				Лысая Гора	342	300	6,2	4,7
5				Звеужичи	261	210	5,7	4,0
6		Дзержинский		Глушинцы	342	300	6,1	4,7
7				Чики	284	240	5,7	4,3
8				Павелково	252	200	5,6	4,0
9		Минский		Клой	308	250	6,0	4,3
10				Чучаны	242	210	5,6	4,1
11		Копыльский		Велешино	243	200	5,4	4,0
12		Клецкий		Пан. Мурованка	222	180	5,3	3,9
13		Смолевичский		Луково	236	200	5,3	4,0
14		Воложинский		Першай	252	200	5,6	4,0
15	Гродненская	Ошмянский		Кеждуны	265	220	5,7	4,5
16				Тимуты	214	190	5,3	4,4
17				Лейлубка	214	190	5,3	4,4
18				Лужице	300	280	5,6	4,8
19		Островецкий		Вяжи	300	260	5,9	4,7
20		Сморгонский		Милидовщина	320	280	6,0	4,8
21		Ивьевский		Трабы	208	180	5,2	4,3
22		Новогрудский		Пуцевичи	323	290	6,0	4,8
23		Дятловский		Беляки	244	200	5,5	4,5
24		Свислочский		Б. Бобровники	232	200	5,4	4,5
25	Зельвенский		Пасутичи	223	190	5,3	4,4	
26	Гродненский		Гривки	221	190	5,4	4,4	
27	Витебская	Лиозненский		Добромысль	236	200	5,5	4,4
28				Вел. Село	250	220	5,6	4,5
29				Шарики	251	200	5,6	4,5
30				Городок	297	~2601	6,0	4,7
31				Краски	245	210	5,6	4,5
32		Витебский		Лахи	228	190	5,4	4,4
33	Городокский		Загоряне	250	220	5,7	4,5	

Окончание табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8
34	Витебская	Городокский	Укля	185	140	5,6	4,1
35		Браславский	Пугляи	229	200	5,4	4,5
36		Оршанский	Голошево	225	208	5,3	4,5
37		Толочинский	Козигорка	252	220	5,6	4,5
38			Криницы	235	"ГТо^	5,4	4,5
39		Сенненский	Пацково	252	220	5,6	4,5
40		Лепельский	Путчино	261	230	5,7	4,6
41		Докшицкий	Телешы	211	190	5,2	4,4
42		Поставский	Романишки	231	200	5,4	4,5
43		Ушачский	Адворица	231	200	5,4	4,5
44		Могилевская	Шкловский	Польковичи	220	200	4,7
45	Горецкий		Стадоселье	220	200	5,0	4,0
46	Мстиславский		Крутая	232	200	5,0	4,0
47	Бельничский		Крюки	198	170	4,7	3,8
48	Климовичский		Недведь	219	180	4,8	3,9
49	Гомельская	Кормянский	Буда-Буровая	175	150	4,5	3,7
50		Добрушский	Кр. Калинино	171	150	4,3	3,7
51		Мозырский	Бибики	201	150	5,2	3,7
51			Бибики	201	150	5,2	3,7
52	Брестская		Жемойдяки	203	160	5,0	3,7
53		Барановичский	Юшкевичи	226	190	5,0	3,9
54			Мицкевичи	232	190	5,1	3,9
55		Дрогичинский	Кремно	165	150	4,3	3,7
56		Малоритский	Радеж	162	158	3,8	3,7

На территории республики выявлено 1840 площадок для размещения ветроэнергетических установок с общей электрической мощностью 1600 МВт и предполагаемой годовой выработкой электроэнергии 6,5 млрд кВт·ч. В настоящее время считается экономически целесообразным и технически возможным использование только 5 % от установленной мощности энергосистемы, т. е. около 300–350 МВт с годовой выработкой 1–15 млрд кВт·ч. Однако, существующие методы преобразования ветровой энергии в электрическую с помощью традиционных лопастных ВЭУ в условиях Беларуси экономически не оправданы так как они эффективно работают при скорости ветра 3–6 м/с. Поэтому, для таких скоростей ветра рекомендованы новые ВЭУ, основанные на эффекте Магнуса, где в качестве аэродинамических элементов используются не лопастные, а вращающиеся усеченные конусы специальной формы (роторы), подъемная сила

которых многократно (в 6–8 раз) превосходит подъемную силу за счет присоединения к вращающемуся телу массы воздуха. Увеличение подъемной силы приводит к увеличению скорости течения на одной стороне и уменьшению на другой и принуждает тело перемещаться в область с большей скоростью. При этом отношение подъемной силы F_1 к силе сопротивления F равно:

$$F_1 / F = \frac{1}{6} \frac{R\omega}{\gamma},$$

где R – радиус ротора;

ω – угловая скорость;

γ – коэффициент кинематической вязкости.

3. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Дешевым источником энергии является падающая вода. Когда вода течет или падает с определенной высоты, ее потенциальная энергия уменьшается, при этом совершается работа. Разница в высоте обоих уровней называется перепадом или напором. Такой источник энергии выгоден тем, что он действует постоянно, не требует топлива. Только там, где вода стекает в виде потоков (ручьев), ее энергию удастся использовать полностью. Таким образом, энергия воды преобразуется в механическую, но чаще всего в электрическую.

Гидроэнергетика является наиболее развитой областью энергетики на возобновляемых ресурсах. Ее потенциальные ресурсы оцениваются суммарной мощностью 1,5 ТВт, поэтому при планировании развития гидроэнергетики не следует пренебрегать маломощными гидроэнергетическими установками (от 10 кВт до 1 МВт), экономическая эффективность которых зависит от специфики местных условий, которую в глобальных оценках трудно учесть.

На гидростанциях в основном используются два типа гидроустановок: реактивные гидротурбины, рабочее колесо которых полностью опущено в воду и вращается за счет разности давлений до колеса и за ним; активные гидротурбины, рабочие колеса которых вращаются в воздухе натекающим на его лопасти потоком воды,

т. е. кинетической энергией этого потока. Реактивная гидротурбина может работать при реверсировании генератора как насос, закачивая воду обратно в водохранилище с коэффициентами полезного действия (КПД) около 80 %.

3.1. Принципы работы гидротурбины

Гидротурбина преобразует энергию воды в механическую за счет падения объема воды на лопасть турбины в единицу времени. Тогда масса падающей воды ρQ , а теряемая ею энергия равна:

$$P_0 = QgH,$$

где Q – объем расхода воды;

g – ускорение силы тяжести;

H – высота падения жидкости;

P_0 – изменение в единицу времени потенциальной энергии воды (мощность).

Работа активной гидротурбины (на примере колеса Пельтона) основана на использовании кинетической энергии потока, где потенциальная энергия воды перед плотиной превращается в кинетическую энергию струи, которую направляют в ковши, распределенные на ободе колеса. Взаимодействие струи с ковшом изменяет ее направление. Поэтому сила, вызванная струей, действует на ковш и вращает гидротурбину (рис. 10).

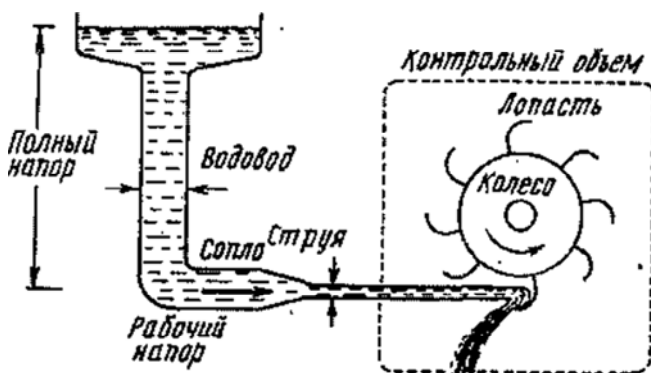


Рис. 10. Схема активной гидротурбины (турбины Пельтона)

Кинетическая энергия струи равна мощности гидротурбины без учета трения:

$$P_i = \rho Q u^2 / 2,$$

где u – скорость струи воды;

Q – объем воды;

ρ – плотность воды.

Из теоремы Бернулли следует, что при отсутствии трения в водах скорость потока равна:

$$u = \sqrt{2gH}.$$

Мощность на валу турбины с учетом ее КПД будет равна:

$$P_m = \eta_T \rho Q g H.$$

Для заданного диапазона напоров выбирается тип рабочего колеса и его диаметр:

$$D_1 = Q^{0,5} Q_1^{-0,5} H_p^{-0,25},$$

где H_p – расчетный напор – это минимальный напор в заданном диапазоне, при котором будет достигнута установленная мощность;

Q_1 – расход, приведенный к условному диаметру $D = 1$ и напору $H = 1$.

$$Q_1 = Q D_1^{-2} H^{-0,5}.$$

Как известно, характеристики гидроэлектрогенераторов (например, частота КПД) зависят от угловой скорости его вращения, а мощность развиваемая колесом гидротурбины равна:

$$P = FR\omega,$$

где R – радиус колеса гидротурбины;

ω – угловая скорость;

F – сила, действующая на лопатки колеса.

Активные турбины, работающие при малом напоре вращаются медленно и имеют большие габариты, и стоят дорого. Такие турбины используют небольшие расходы и высокие напоры. Поэтому для

увеличения числа оборотов турбины целесообразно увеличить количество направляющих СОПЛ. Взаимосвязь между мощностью гидротурбины, напором и угловой скоростью учитывается безразмерным коэффициентом быстроходности:

$$Z = \frac{P_m^{0,5} \omega}{\rho^{0,5} (gH_a)^4},$$

где P_m – мощность гидротурбины;

ω – угловая скорость;

ρ – плотность жидкости;

H_a – располагаемый напор;

g – ускорение силы тяжести.

При заданной мощности и угловой скорости чем меньше напор, тем больше значение коэффициента быстроходности должно быть у турбины.

Повысить эффективность работы гидротурбины можно за счет совершенствования ее конструкции и соплового подвода воды, т. е. создания реактивных турбин (рис. 11).

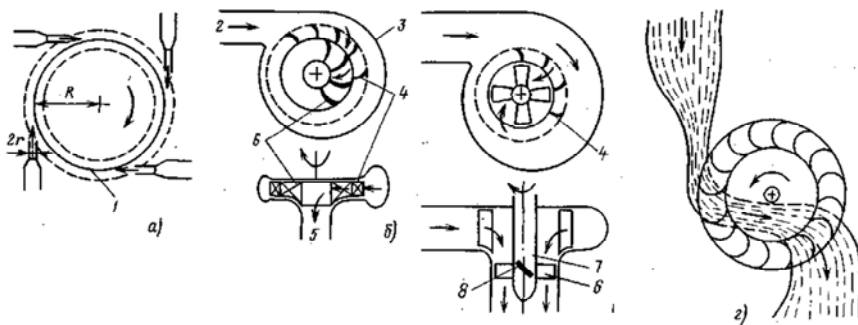


Рис. 11. Способы повышения эффективности гидротурбины за счет совершенствования ее конструкции:

- a* – четырехсопловая турбина Пельтона; *б* – радиально-осевая турбина (турбина Фрэнсиса); *в* – пропеллерная гидротурбина (турбина Каплана);
- г* – гидротурбина двукратного действия (турбина Банки);
- 1* – средний диаметр колеса; *2* – вход; *3* – спиральная камера;
- 4* – неподвижные лопатки направляющего аппарата; *5* – выход;
- б* – вращающиеся лопасти; *7* – втулка; *8* – вид лопасти с торца

В реактивной турбине струя воды воздействует на все лопасти колеса одновременно, за счет того, что струя полностью выходит в направлении оси ротора. Для равномерного распределения воды по периметру колеса устанавливаются направляющие аппараты. С целью большего увеличения расхода воды через турбину размер струи можно увеличить до размера ее колеса. Этот принцип положен в основу пропеллерных гидротурбин.

Для низких напоров ($H < 10$ м) и расходов ($Q = 5\text{--}20$ м³/с) целесообразна компоновка малых ГЭС с пропеллерной гидротурбиной в прямоугольной камере. Для напоров от 10 до 20 м в названном диапазоне расходов наиболее экономичной является компоновка малой ГЭС с горизонтальной осевой гидротурбиной и вынесенным в машинный зал вертикальным генератором.

Низконапорные малые ГЭС с расходом 20–40 м³/с целесообразно создавать с горизонтальными «трубными» гидротурбинами. Зона напоров от 20 м и выше – радиально-осевыми гидротурбинами.

Мощность турбина Пельтона в 4 раза выше односопловой турбины такого же размера. Все лопасти турбины Фрэнсиса непрерывно обтекаются поступающим из направляющего аппарата потоком. Максимальный коэффициент быстроходности достигается увеличением размера струи до размера рабочего колеса. У гидротурбины двукратного действия струя воды взаимодействует с лопастями колеса дважды.

В пропеллерных гидротурбинах зачастую возникают явления кавитации, которые увеличиваются с увеличением скорости потока и напора, что приводит к повреждению гидротурбины. Поэтому осевые (пропеллерные) гидротурбины используются при низких напорах. Их КПД резко падает при уменьшении скорости потока из-за изменения угла обтекания потоком лопатки колеса. Но с помощью системы автоматического управления можно поддерживать оптимальный угол обтекания, поворачивая лопасти.

Если задана требуемая мощность гидротурбины, а также диапазон напоров, то диаметр рабочего колеса можно определить по формуле:

$$D_p = P^{0,5} Q_1^{-0,5} H_p^{-1,5} \eta_T^{-0,5},$$

где Q_1 – расход, приведенный к условному диаметру $D_1 = 1$ м и $H_1 = 1$ м.

H_p – расчетный напор;

η_T – КПД турбины;

P – мощность турбины.

Мощность турбины должна приниматься большей, чем мощность генератора с учетом потерь:

$$P\eta_G = P_G,$$

где P_G – мощность генератора;

$\eta_G = 0,96-0,98$ – КПД генератора.

Активная мощность гидрогенератора равна $N_G = 1,73UI \cos \varphi$, где $\cos \varphi$ – коэффициент мощности равный 0,8. Частота вращения гидрогенератора выбирается из числа синхронных частот вращения (об/мин), которые для частоты тока 50 Гц определяют по формуле $n_s = 3000/2p$, где p – число пар полюсов.

3.2. Классификация малых ГЭС

В зависимости от напора принята следующая классификация малых ГЭС: низконапорные $H < 20$ м; средненапорные $H = 20$ м; высоконапорные $H > 20$ м.

По режиму работы: работающие параллельно с энергосистемой на изолированного потребителя, на изолированного потребителя параллельно с другими энергосистемами (например, дизельной, ветровой, солнечной);

По степени автоматизации: полуавтоматизированные (работающие при наличии дежурного персонала), автоматические (работающие без дежурного персонала);

По условиям создания: стационарные, мобильные (микро ГЭС);

По характеру использования стока: на бытовом или зарегулированном стоке;

По участию в графике нагрузок: пиковые, полупиковые, базисные;

По расположению в составе гидроузла: русловые, приплотинные, деривационные, (деривация – от лат. derivation – отклонение, отведение, совокупность сооружений для отвода воды из реки).

По способу создания напора малые ГЭС подразделяются на плотинные, деривационные, смешанные (плотино-деривационные) и малые ГЭС при готовом напорном фронте (на перепадах каналов, в системах водоснабжения).

Плотинные схемы малых ГЭС могут быть использованы на малых реках. В зависимости от типа речной долины равнинной реки и напора, плотинная схема энергетического использования может осуществляться в двух вариантах: без выхода подпорного уровня на пойму и с выходом на нее.

Для рек с широкой поймой и глубоко врезанным руслом целесообразно назначать отметку подпора так, чтобы нормальный подпорный уровень воды не выходил из основного русла реки (рис. 12). Для такой схемы характерны русловая компоновка зданий ГЭС с напорами от 1,5 до 4,5 м и небольшой мощностью (до 2000 кВт).

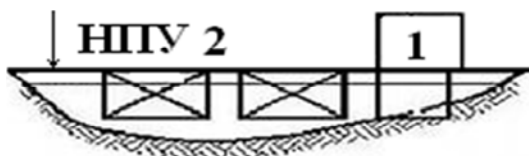


Рис. 12. Плотинная ГЭС без выхода отметок НПУ на пойму:
1 – здание ГЭС; 2 – водосборная плотина

Вследствие небольшого напора отдельных ГЭС характерной особенностью энергетического использования малых рек являются многоступенчатые каскады при небольшом расстоянии между створами, что позволяет использовать суммарный напор каскадов 20 м и более.

На равнинных реках с относительно широкой глубоко врезанной поймой и слаборазвитым руслом, возможно создание малой ГЭС (или каскада малых ГЭС) с водохранилищем недельного или сезонного регулирования, с выходом на пойму (затоплением) (рис. 13).

Недостатком этой схемы малой ГЭС является затопление пойменных земель, повышенный объем строительных работ и стоимость сооружений.

С целью снижения ущерба от затопления, основную регулируемую емкость каскада малых ГЭС целесообразно располагать в верхних течениях реки (см. рис. 12).

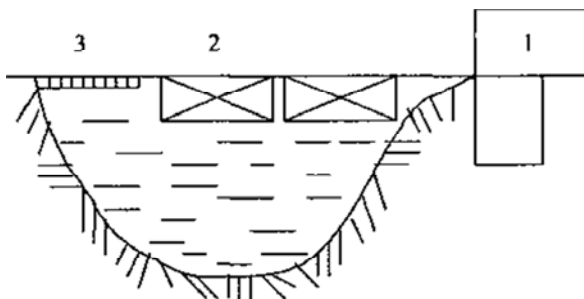


Рис. 13. Плотинная схема малой ГЭС с затоплением поймы:
 1 – здание ГЭС; 2 – водосбросная плотина; 3 – глухая плотина

Основными энергетическими параметрами малых ГЭС являются: установленная мощность, число гидроагрегатов, годовая выработка электроэнергии, расчетный напор, расчетный расход.

Установленная мощность ГЭС определяется на основании энергоэкономических расчетов, кроме того, должны учитываться уровни и режимы электрических нагрузок, степень регулирования стока.

Напоры ГЭС ($H_{ГЭС}$, м) в каждый момент времени определяются как разность уровней верхнего (УВБ) и нижнего (УНБ) бьефов за вычетом потерь напора в проточном тракте Δh :

$$H_{ГЭС} = \text{УВБ} - \text{УНБ} - \Delta h.$$

Уровни воды в верхнем бьефе в каждый момент времени определяются по графику уровней в водохранилище, уровни воды в нижнем бьефе – расходами воды в нижнем бьефе по кривой $Q = f(z)$.

За расчетный напор ГЭС (H_p , м) принимается средневзвешенный напор нетто:

$$H_{\text{срвзв}} = \frac{\sum H_i P_i t}{\sum P_i t}.$$

Значение H_p уточняется при выборе гидротурбин. H_i – напор в каждый момент времени t_i . Расчетный расход вычисляется по формуле:

$$Q_p = P_{\text{уст}} / 8H_p.$$

Установленная мощность малой ГЭС включает в себя гарантированную обеспеченность 95 %, резервную и сезонную (дублированную) мощность

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{гар}} + P_{\text{пер}} + P_{\text{сез}}$$

3.3. Гидроэнергетика в Республике Беларусь

В связи с ростом цен на энергоресурсы и необходимостью снижения загрязнения окружающей среды, существенно увеличивается конкурентоспособность малой энергетики. Малые ГЭС в этом случае могут играть определенную роль в энергосбережении республики.

Потенциальная мощность всех водотоков республики составляет 850 МВт, в том числе технически доступны 520 МВт, а экономически целесообразны 250 МВт. За счет гидроресурсов к концу прогнозируемого периода возможна выработка 0,8–0,9 млрд кВт·ч электроэнергии и соответственно вытеснено 250 тыс. т.у.т.

Малая гидроэнергетика в республике может развиваться за счет сооружения каскада ГЭС на реках Западная Двина – Витебская (50 МВт), Бешенковичская (30,5 МВт), Полоцкая (23 МВт), Верхнедвинская (29 МВт), Неман – Гродненская (24,5 МВт) и Немновская (20,5 МВт), а также восстановления ранее существовавших малых ГЭС путем капитального ремонта и частичной замены оборудования. До 1957 года в республике насчитывалось 162 ГЭС общей установленной мощностью 11 854 кВт. Следует по видимому считать целесообразным сооружение новых малых ГЭС на водохранилищах неэнергетического назначения, а также бесплотинных русловых ГЭС на реках со значительными расходами воды, но для этого необходимо предварительно составить технико-экономическое обоснование.

Все восстанавливаемые и сооружаемые малые ГЭС должны работать параллельно с энергосистемой.

Бесплотинные малые и микроГЭС, водоподъемные устройства позволяют регулировать ход руслообразующего процесса в реках.

В республике созданы и в дальнейшем будут создаваться водохранилища, обеспечивающие перераспределение стока рек. Кроме того, при сооружении малых ГЭС должны решаться не только энергетические, но также социально-культурные и экологические проблемы.

3.4. Гидравлический таран

Гидравлический таран представляет собой водоподъемное устройство, в котором давление создается за счет гидравлического удара, возникающего в напорном трубопроводе, вызванного мгновенным изменением скорости течения жидкости. Увеличение давления при гидравлическом ударе определяется в соответствии с теорией Жуковского по формуле:

$$\Delta p = \rho(u_0 - u_1)c,$$

где Δp – увеличение давления;

ρ – плотность жидкости;

u_0, u_1 – средние скорости в трубопроводе до и после закрытия задвижки;

c – скорость распространения ударной волны вдоль трубопровода.

При абсолютно жестких стенках скорость распространения ударной волны равна скорости звука в жидкости (в воде 1400 м/с). В трубах с упругими стенками:

$$c = \sqrt{E\delta/\delta + \varepsilon D},$$

где D – диаметр трубы;

δ – толщина стенок трубы;

E, ε – модуль упругости материала стенок трубы и жидкости.

При очень большом увеличении давления гидравлический удар может вызвать разрушение трубы.

Таким образом, гидравлический таран, используя кинетическую энергию потока, позволяет поднимать его на значительную высоту. Поток с напором в 2 м может поднять 10 % своего расхода на высоту 12 м.

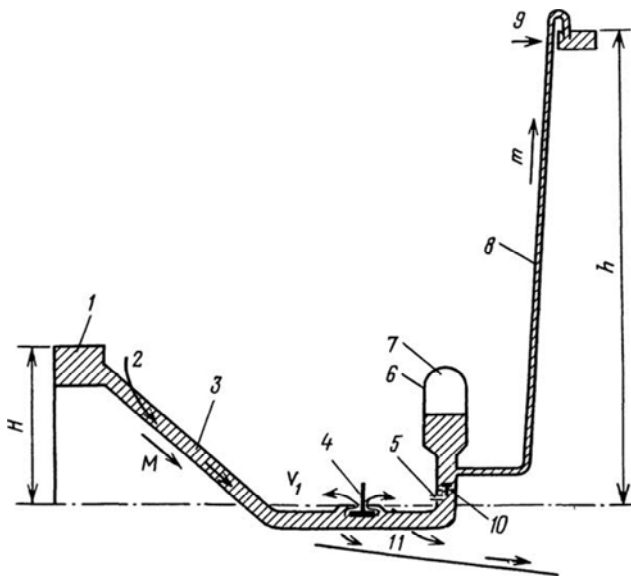


Рис. 14. Схема гидравлического тарана:

- 1 – источник; 2 – поток воды из источника; 3 – питающий трубопровод;
 4 – ударный отбойный клапан; 5 – воздушный клапан; 6 – напорный колпак;
 7 – воздух; 8 – закачиваемая вода, нагнетательный трубопровод;
 9 – верхний бак; 10 – напорный клапан; 11 – сток воды через клапан 4

Вода из реки подается вниз по наклонному питающему трубопроводу, ее потенциальная энергия MgH превращается сначала в кинетическую, а затем снова в потенциальную MgH . Этот процесс протекает следующим образом:

1. В момент, когда отбойный клапан 4 открыт, а напорный клапан 10 закрыт, вода из реки вытекает наружу через клапан 4. В этом случае потенциальная энергия MgH превращается в кинетическую согласно уравнения Вернули:

$$\left(\frac{p_1}{\rho} \right) + gH_1 + \frac{1}{2}u_1^2 = \left(\frac{p_2}{\rho} \right) + gH_2 + \frac{1}{2}u_2^2,$$

или вдоль линии тока

$$\frac{p}{\rho} + H + \frac{u^2}{2} = \text{const},$$

где p_1 – давление в источнике;

H_1 – высота источника;

u_1 – скорость воды в питающем трубопроводе;

p_2 – давление в нагнетательном трубопроводе;

u_2 – скорость воды в нагнетательном трубопроводе;

H_2 – высота подъема;

g – ускорение сила тяжести;

ρ – плотность жидкости.

2. Давление, действующее в этот момент на клапан, превосходит силу тяжести клапана, и он быстро закрывается.

3. Вода, продолжающая по инерции поступать в питающую трубу, начинает сжимать находящуюся в ней воду.

4. Давление в трубе резко повышается, напорный клапан открывается, пропуская воду в напорный колпак.

5. Вода, поступающая в колпак, сжимает находящийся в нем воздух.

6. Некоторая часть воды массой m поступает в нагнетательный трубопровод под действием давления воды и воздуха в колпаке.

7. Скорость потока в питающем трубопроводе резко уменьшается в результате процессов 5 и 6. Напорный клапан закрывается, и вода в питательном трубопроводе совершает волнообразное обратное движение.

8. Давление в результате возвратного движения на внутренней поверхности ударного клапана спадает, он открывается, выпуская воду наружу и весь процесс начинает повторяться.

9. Воздушный клапан открывается одновременно с клапаном, выпуская небольшую порцию воздуха, который потом вместе с водой попадает в напорный колпак, восполняя потери воздуха в нем из-за поглощения его водой.

Описанный цикл непрерывно повторяется с частотой около 1 Гц. КПД тарана равен $m\dot{h}/M\dot{H}$ и может достигать 60 %.

3.5. Влияние малых ГЭС на экологию

Гидроэнергетика, в особенности на равнинных реках, негативно влияет на окружающую среду. Это связано с затоплением больших сельхозугодий, воздействием на рыбное хозяйство, климат и т. д.

Малые ГЭС также, как и большие, оказывают влияние на окружающую среду. В отличие от крупных водотоков малые реки тесно связаны с окружающей природной средой. Поэтому каждое изменение ландшафта водосбора малой реки (сведение леса, распашка земель и другое хозяйственное освоение) отражается на стоке реки и, как следствие, на режиме ее питания. Меньшее подземное питание малых рек – одна из причин более неравномерного внутригодового распределения стока.

Неравномерность стока оказывает влияние на гидрохимический режим малых рек. Это особенно сильно сказывается в межень (ежегодно повторяющиеся сезонное стояние низких уровней воды в реках). Так, к примеру, паводковый сток, находясь в русле малой реки даже непродолжительное время (от нескольких суток или даже часов), может изменить химический состав воды так, что река под влиянием естественных биохимических процессов за такое короткое время не успевает очиститься от загрязнений. Вследствие чего загрязненность малых рек, даже при относительно небольших поступлениях загрязнения может превысить допустимый уровень.

При строительстве малых ГЭС необходимо сохранить рекреационное значение малых рек, являющихся местом отдыха. На формирование природы малых водохранилищ существенно сказываются гидрологические условия, определяющие гидродинамическое развитие внутри водоемных процессов: водообмен водохранилища, режим течений, водный и тепловой балансы, термический режим в нижнем бьефе, уровневый и волновой режимы.

При создании водохранилища малых ГЭС необходимо учитывать возможность береговой абразии (разрушение берегов под действием волн). Эти процессы интенсивно протекают в приплотинной части. Установлены три стадии развития береговой абразии: становление, стабилизация и отмирание. На первой стадии интенсивно идет процесс обрушения берегов, формирование прибрежных отмелей, выравнивание береговой линии. Становление берегов малых водохранилищ происходит к 15–20 годам, но может продолжаться 100 и более лет.

Береговая абразия, волновая активность, ветровая эрозия, водная растительность оказывают сильное влияние на заиление малых водохранилищ, что может превратить их в болото.

В отличие от водоемов природного образования, искусственные водохранилища малых ГЭС за короткий период могут нарушить ход естественного развития природных комплексов. В результате подтопления происходит повышение уровня грунтовых вод, изменение их режима, химического состава, характера питания и состава почв, микроорганизмов, растительности. Развитие подпора грунтовых вод происходит в две стадии: интенсивного (5–10 лет) и замедленного (15–20 лет) подъема. В зависимости от характера регулирования (суточного, недельного, сезонного, многолетнего) водохранилища малых ГЭС могут привести к изменениям речного стока.

3.6. Технико-экономические показатели малых ГЭС

Экономические показатели малых ГЭС зависят от целого ряда факторов: установленной мощности, наличия готового напорного фронта, степени автоматизации и др. Первоначальные удельные затраты при сооружении малых ГЭС ниже, чем для электростанций других типов (крупных ГЭС).

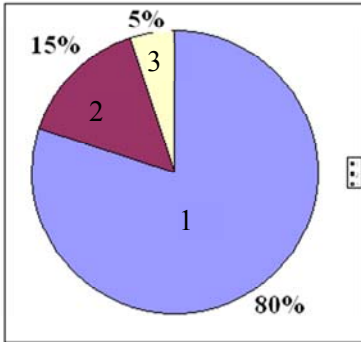
В США удельные капиталовложения в малые ГЭС достигают 1400 долл/кВт. Для малых ГЭС, сооружаемых в составе действующих гидроузлов, удельные капиталовложения снижаются до 500 долл/кВт и полученная электроэнергия имеет стоимость 1,8–2,4 цент/кВт·ч.

Для малых ГЭС характерна иная структура затрат на строительство. Удельные затраты на технологическое оборудование малых ГЭС сопоставимы со стоимостью строительно-монтажных затрат. На рис. 15 приведены средние данные по распределению затрат на строительство малых ГЭС для случая их сооружения в составе готового напорного фронта и строительства нового гидроузла с малой ГЭС.

Технико-экономические показатели малых ГЭС существенно улучшаются при комплексном использовании гидротехнических сооружений. Приближенная структура затрат по малым ГЭС мощностью 150–2000 кВт в %: строительные работы – 42–65, оборудование – 31–48, строительство ЛЭП – 4–14.

На рис. 15, 16 представлена структура затрат на строительство ГЭС.

а) крупная ГЭС (P=626 МВт, Н=16м)



б) малая ГЭС (P=1,5 МВт, Н=14м)

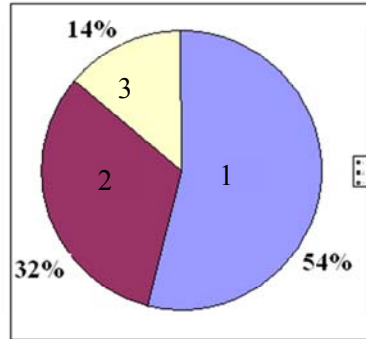
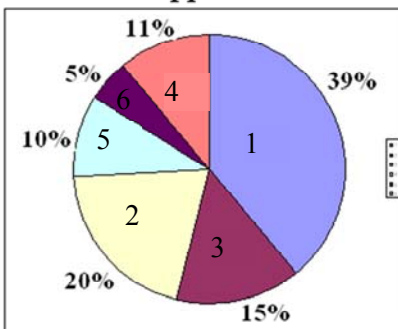


Рис. 15. Сравнение распределения стоимости:

1 – строительные-монтажные работы; 2 – оборудование; 3 – проектирование

а) при готовом напорном фронте



б) в новом створе

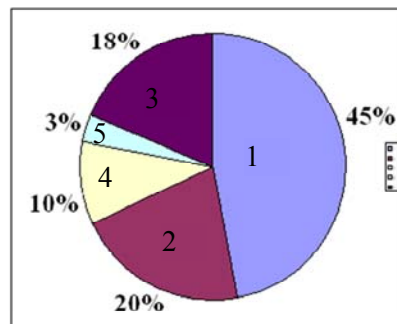


Рис. 16. Структура затрат на малые ГЭС:

1 – строительная часть; 2 – гидротурбина-генератор;
 3 – вспомогательное электрическое оборудование; 4 – прочее оборудование;
 5 – проектно-изыскательские работы;
 6 – увеличение затрат за период строительства

Значительного снижения стоимости малых ГЭС можно достигнуть за счет внедрения стандартного оборудования и унификаций сооружений, сокращения сроков проектирования и строительства.

Целесообразность строительства малых ГЭС вызывается, прежде всего, стремлением к вовлечению в топливно-энергетический ба-

ланс как можно больше возобновляемых источников энергии в целях экономии энергетического топлива. Кроме того, в результате строительства малых ГЭС, появляется также мощный эффект.

Для предварительного определения капиталовложений в малую ГЭС можно воспользоваться формулой, основанной на статистической обработке данных по малым ГЭС:

$$K_{\text{ГЭС}} = 1200 \frac{P}{\rho} + H + \frac{u^2}{2} = \text{const},$$

где P – мощность ГЭС, кВт;

H – напор, м.

Определить ежегодные эксплуатационные издержки можно по формуле:

$$S_{\text{ГЭС}} = 996P^{0,543}.$$

Экономическую эффективность сооружения малой ГЭС можно оценить:

$$T_{\text{ок}} = (K_{\text{ГЭС}} - K_a) / (S_a - S_{\text{ГЭС}}),$$

где $K_{\text{ГЭС}}$, K_a – единовременные капиталовложения в варианте строительства ГЭС и альтернативном варианте;

S_a , $S_{\text{ГЭС}}$ – годовые эксплуатационные издержки в варианте ГЭС и альтернативном решении.

Эффективность сооружения малых ГЭС определяется по величине чистого дисконтированного дохода:

$$\text{ЧДД} = \sum^T (R_t - z_t) \frac{1}{(1+r)^t} - K > 1,$$

где R_t – результаты, достигаемые на t -том шаге,

z_t – затраты на t -том шаге при условии, что в них не входят капиталовложения;

K – сумма дисконтированных капитальных вложений, т. е.

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \frac{1}{(1+r)^t},$$

где K_t – капиталовложения на t -ом шаге;

r – ставка дисконтирования (уровень ссудного процента).

4. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

4.1. Ресурсы глубинного тепла Земли

В недрах Земли сосредоточено большое количество тепловой энергии. Считается, что мощность теплового потока от центра Земли к ее периферии примерно в 4000 раз меньше мощности солнечной радиации, поступающей на Землю, но почти в 30 раз больше мощности всех электростанций мира.

«Твердая» сфера Земли условно состоит из трех сфер: земной коры, имеющей толщину от 7 (под океанами) до 30 км; мантии, простирающейся до глубины около 2900 км; ядра. Радиус твердой сферы Земли около 6371 км.

Установлено, что с увеличением глубины Земных слоев температура повышается. На глубине 50 км она составляет около 700–800 °С, в центре Земли, т. е. на глубине 6371 км, – 2200–5000 °С.

В отдельных местах толщина земной коры настолько мала, что тепло вырывается наружу.

Известны пять типов месторождений глубинного тепла Земли: парогидротермы (месторождения пара и самоизливающейся паровой смеси), гидротермы (месторождения самоизливающейся горячей воды), термоаномальные зоны (месторождения тепла, имеющие повышенный температурный градиент в водонасыщенных проницаемых горных породах, петрогеотермические зоны или тепло сухих горных пород (зоны, имеющие на доступных глубинах нагретые до достаточно высоких температур малообводненные и слабопроницаемые горные породы), магма (нагретые до 1300 °С расплавленные горные породы). Тепловая энергия, поступающая из недр на поверхность Земли, является рассеянной (в среднем 0,05 Вт на квадратный метр при температурном градиенте 30 °С/км. Имеются

также районы с повышенными градиентами температуры, где потоки тепла составляют $10\text{--}20 \text{ Вт/м}^2$.

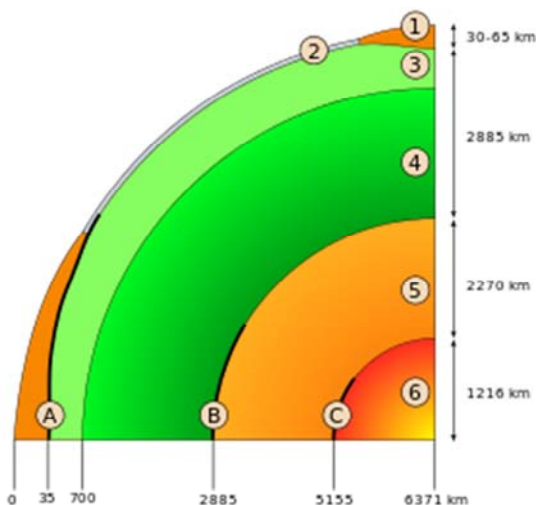


Рис. 17. Схематическое изображение внутренней структуры Земли:
1 – континентальная кора; 2 – океаническая кора; 3 – верхняя мантия;
4 – нижняя мантия; 5 – Внешнее ядро; 6 – Внутреннее ядро; А – Поверхность Мохоровичича; В – Разрыв Гутенберга; С – разрыв Леманн-Буллен

Запас геотермальной энергии составляет около $4 \cdot 10$ кДж или $1,4 \cdot 10$ т.у.т. В настоящее время практически единственным источником геотермальной энергии являются парогидротермы и гидротермы, которые используются для получения как электрической энергии (при температурах пара и пароводяной смеси выше $150 \text{ }^\circ\text{C}$), так и тепловой энергии (при температуре $30\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$).

Количество геотермальной энергии обычно невысокое, поэтому лучше ее использовать непосредственно для отопления зданий и других сооружений или же для предварительного подогрева в технологических процессах. Наиболее просто использовать тепло земных пород с помощью тепловых насосов.

Геотермальные источники в некоторых случаях используют для выработки электроэнергии, как наиболее ценного продукта, хотя более перспективным считается комбинированное использование – производство электроэнергии и тепла. Выработка электроэнергии

представляет интерес в том случае, если теплоноситель имеет температуру свыше 300 °С.

Использование геотермальной энергии связано с проблемой разработки техники ее извлечения.

В настоящее время освоение глубинного тепла связано с развитием буровой техники. При этом геотермальные скважины, как правило, в 2–5 раз дороже аналогичных нефтяных, а на бурение и обустройство скважин приходится около половины общих капиталовложений в геотЭС.

Получают развитие методы бурения тепловым дроблением, которое позволяет сократить затраты на 45–49 %. В настоящее время наиболее успешно реализованы проекты с пробуренными скважинами в подземные коллекторы геотермальных районов. Выделены три класса геотермальных районов.

Гипертермальный. Температурный градиент – свыше 80 °С/км. Эти районы расположены в тектонической зоне вблизи границ континентальных плит. Все из существующих геотЭС размещены в таких районах. Первая геотЭС для производства электроэнергии была построена в 1904 вблизи Лардерелло (Италия).

Полутермальный. Температурный градиент составляет 40–80 °С/км. Эти районы связаны, главным образом, с аномалиями, которые расположены в стороне от платформ. Извлечение тепла осуществляется из естественных водоносных пластов, а также из раздробленных пород.

Нормальный. Температурный градиент составляет 40 °С/км. В этих районах тепловые потоки составляют около 0,06 Вт/м², поэтому маловероятно, чтобы извлечение тепловой энергии из недр было экономически выгодным.

Из перечисленных классов можно извлекать тепловую энергию за счет:

– естественной гидротермальной циркуляции, при которой вода проникает в глубоко залегающие породы, где превращается в сухой пар, пароводяную смесь или просто нагревается до высокой температуры. Если на глубине давление возрастает в результате парообразования, то могут возникать гейзеры. Такие гейзеры имеются на Камчатке, в Исландии;

– искусственный перегрев пара, связанный с охлаждением полурасплавленной магмы, застывшей в виде лавы; охлаждение сухих

скальных пород, которые вследствие низкой теплопроводности в течение миллионов лет могли накапливать тепло, а затем его отдавать. Поэтому, прокачивая через них воду можно отбирать тепло и использовать для технологических и других потребителей.

4.2. Геотермальные электростанции

Все действующие геотЭС работают на парогидротермальных источниках тепла. При температурах свыше 150 °С можно получить электроэнергию с помощью отсепарированного пара, приводящего в движение паровую турбину. Такие геотЭС при современных ценах на топливо эффективны и успешно могут конкурировать с традиционными ТЭС на тех же параметрах. Лидирующее место в этой области занимают США (2012 МВт). На юге Камчатки на реке Паужетка действует Паужетская геотЭС мощностью 11 МВт. В районе геотЭС была пробурена 21 скважина глубиной от 220 м до 480 м. Каждая скважина давала 10 кг/с пароводяной смеси с энтальпией 170 ккал/кг. Температура пароводяной смеси в устье скважины достигала 144–220 °С, а давление 0,2–0,4 МПа. Общая минерализация воды 1,3–3,4 г/л. Пароводяная смесь поступает в сепаратор, а из него в турбину мощностью 2,5 МВт.

Искусственные пароциркулирующие системы, размещенные в водонасыщенных термоаномальных зонах, имеют большое значение в процессе освоения глубинного тепла сухих горных пород и использования его для производства электроэнергии. В этих системах геотермальный носитель отводится с помощью скважин. Отработанная жидкость через реинжекционные скважины закачивается обратно в пласт. Температура воды в некоторых скважинах достигает 200 °С, и пластовое давление – 40–45 МПа. Общая минерализация достигает 250 мг/л. Такие пласты находятся на глубине до 4000 м. В геотЭС с пониженными параметрами теплоносителя применяется ступенчатое испарение пара в расширителях, что позволяет увеличить количество пара, подаваемого в турбины.

Геотермальные воды с температурой ниже 150 °С могут быть использованы с помощью паротурбинных установок, работающих с низкокипящими рабочими телами, в качестве которых могут применяться хладон-114, изобутан др.

Схема извлечения тепла из сухих горных пород включает нагнетательную и водозаборную скважины, которые создаются с помощью гидровзрыва холодной водой на глубине до 7 км. После дробления горной породы вода нагнетается через нагнетательную скважину, при этом она фильтруется проходя через дробленую породу и нагревается до 250 °С. Этот процесс показан на рис. 18.

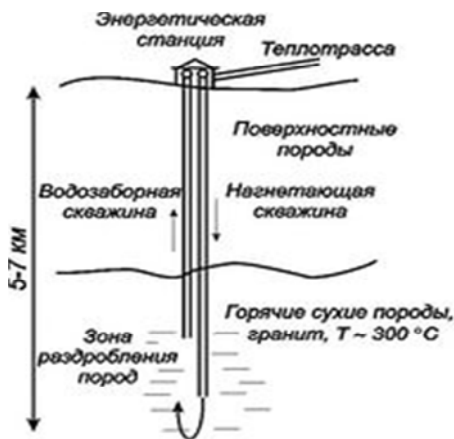


Рис. 18. Схема извлечения тепла из горячих горных пород

На рис. 19 представлена схема геотЭС с одним рабочим телом, в качестве которого используются низкокипящие жидкости: хладон, фреон и др.

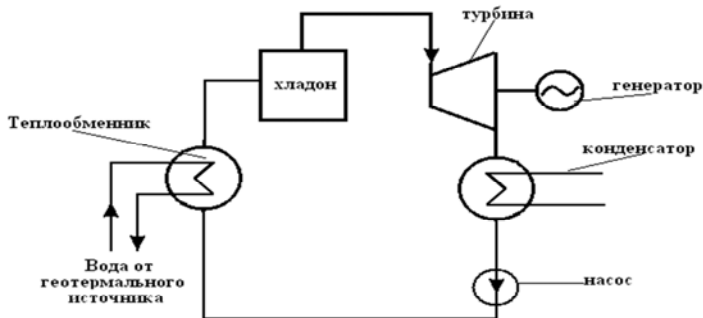


Рис. 19. Схема геотЭС с хладоном

Как отмечалось ранее, большие трудности возникают в теплообменниках из-за высокой концентрации химических веществ в воде, поступающей из скважин. Поэтому пар перед поступлением в теплообменник должен быть очищен от химических веществ, которые затем могут быть использованы в других технологиях.

Пар непосредственно из природного источника через редуктор поступает в сепаратор после чего в турбину, а затем в конденсатор, где превращается в воду; из полученной воды извлекают полезные химические элементы (рис. 20).

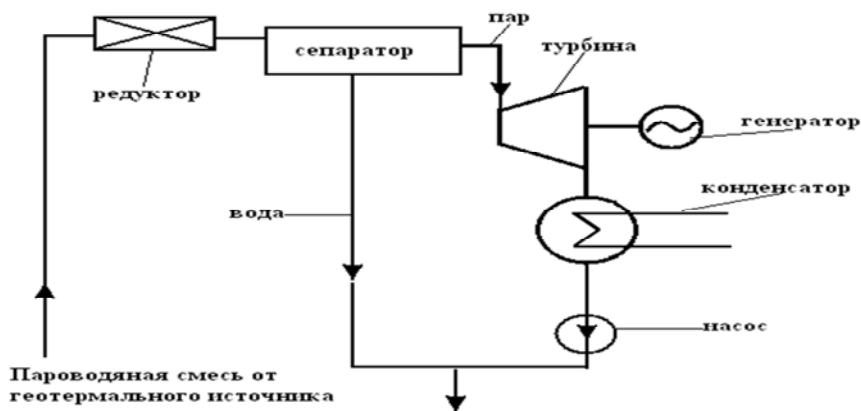


Рис. 20. Схема геотЭС с прямым паровым циклом

Вода и пар, поступающие из геотермальной энергетической системы, содержат в себе ряд вредных веществ, поэтому значительному загрязнению подвергается воздушный бассейн в геотермальных местностях.

С точки зрения охраны жизненной среды необходимо учитывать другие проблемы, связанные с эксплуатацией геотермальных энергетических систем, к примеру:

- 1) образование туманов и их влияние на микроклимат;
- 2) горячие стоки геотЭС повышают температуру в реках.

4.3. Геотермальная энергия в Республике Беларусь

В грунте Беларуси на глубине 10 м и ниже по данным института тепло- и массообмена АН РБ в течение года поддерживается постоянная температура 10–12 °С независимо от сезонных колебаний температуры воздуха. Эта тепловая энергия может быть использована для получения электроэнергии в специальных установках с низкотемпературной кипящей жидкостью.

Температура грунтовых вод также на протяжении года практически остается постоянной и находится в пределах 8–12 °С. В Беларуси открыты термальные воды на глубине 1000 м с температурой 30–35 °С около Орши и Бреста, с температурой воды 89 °С около Мозыря, Речицы, Ельска. Дебит отдельных скважин составляет 70 м³/ч.

Между поверхностными водами, атмосферой, подземными водами и грунтами, находящимися на разной глубине существуют перепады температур, которые с помощью тепловых насосов можно использовать для проведения технологических процессов.

Темы рефератов

1. Виды радиоактивных отходов АЭС.
2. Виды ветроустановок и влияние на окружающую среду.
3. Влияние водопотребления на окружающую среду.
4. Влияние возобновляемых источников энергии на окружающую среду.
5. Влияние добычи жидких и твердых топлив на окружающую среду.
6. Влияние малых ГЭС на окружающую среду.
7. Влияние радиационных отходов на окружающую среду.
8. Влияние солнечных источников энергии на окружающую среду.
9. Влияние твердых выбросов на атмосферу.
10. Воздействие ГЭС на окружающую среду.
11. Использование ВЭР и охрана окружающей среды.
12. Источники образования тепловых выбросов.
13. Контроль и надзор в области охраны окружающей среды.
14. Методика расчета экологического налога.
15. Методы очистки дымовых газов от твердых выбросов.
16. Повышение эффективности использования топлива.
17. Показатели качества атмосферы.
18. Принцип работы ветроустановки.
19. Принцип работы солнечного коллектора.
20. Пути создания малоотходных и безотходных технологий.
21. Пути утилизации радиоактивных отходов.
22. Регулирование использования природных ресурсов.
23. Роль энергосбережения в повышении экологического эффекта.
24. Рост энергопотребления и воздействие энергопотребления на окружающую среду.
25. Система экологического просвещения.
26. Тепловое загрязнение водных бассейнов.
27. Типы солнечных коллекторов.
28. Утилизация твердых выбросов энергетических объектов.
29. Утилизация твердых отходов жилищно-коммунального хозяйства.
30. Утилизация топливных выбросов и обеспечение экологического эффекта.

31. Утилизация топливных выбросов и обеспечение экономического эффекта.
32. Экологическая ценность топлива.
33. Экологическая экспертиза.
34. Экономическая оценка эффективности использования нетрадиционных источников энергии.
35. Экономический механизм защиты окружающей среды.
36. Энергетическая ценность топлива.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Возобновляемая энергия / Ю. Д. Арбузов [и др.] // Вестник энергосбережения Южного Урала. – 2002. – Июнь.
2. Борисова, С. Возможности гидроэнергетического потенциала Свердловской области для развития малой гидроэнергетики региона. Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / С. Борисова [и др.]. – Ухта: УГТУ, 2001.
3. Бородуля, В. А. Денсифицированное биотопливо-энергетическая альтернатива для Беларуси: потенциал, проблемы и перспективы / В. А. Бородуля, Г. И. Пальченко // Энергоэффективность. – 2002. – №11, 12.
4. «Биоэнергетика – водородная или углеродная?» / В. А. Бородуля [и др.] // Минск, международный форум по тепло- и массообмену. – Минск: 2004.
5. Возобновляемая энергетика - альтернативная в электрификации удаленных районов. Эффективная энергетика / Данилов Н. И. [и др.]. – Изд. УГТУ, 2001.
6. Ермашкевич, В. Н. Биомасса – топливно-энергетические ресурсы Беларуси / В. Н. Ермашкевич, Е. В. Мещерякова. – Минск: Права и энергия, 2001. – 80 с.
7. Лосюк, Ю. А. Возобновляемые источники энергии / Ю. А. Лосюк. – Минск: Технонология, 2001. – 80 с.
8. Лятхер, В. М. Развитие ветроэнергетики / В. М. Лятхер // Журнал «Малая энергетика». – 2006. – № 1–2 (4–5).
9. Олешкевич, М. М. Нетрадиционные источники энергии / М. М. Олешкевич, Ю. А. Лосюк. – Минск: БГПА, 2001. – 127 с.
10. Пицунова, О. Н. Виды нетрадиционных возобновляемых источников энергии и технологии их освоения / О. Н. Пицунова // Вестник энергосбережения Южного Урала. – 2002. – Июнь.
11. Щелкунов, Г. Солнечная энергетика. Глобальные проекты / Г. Щелкунов // Электроника. НТБ. – 2002. – № 6.
12. Ермашкевич, В. Н. Возобновляемые источники энергии Беларуси: прогноз, механизмы реализации: учебное пособие / В. Н. Ермашкевич, Ю. Н. Румянцева. – Минск: НО ООО «БИП-С», 2004. – 121 с.

Заключение

В практикуме дано описание производства электрической энергии из возобновляемых источников; рассмотрены вопросы влияния производства электроэнергии из возобновляемых источников на окружающую среду; приведены некоторые технико-экономические показатели производства электрической энергии за счет использования возобновляемых источников.

Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) приобретает для Республики Беларусь особую значимость. Экономия становится не просто обязательным принципом хозяйствования, но и важнейшим требованием поддержания национальной безопасности страны. Собственными традиционными энергоресурсами наша республика обеспечена менее чем на 20 %. Поэтому одной из стратегических задач развития экономики Беларуси является сокращение импорта энергоносителей. Решить эту задачу возможно посредством активизации применения в сельскохозяйственном производстве страны альтернативных источников энергии и местных видов топлива.

Освоение и эффективное использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии имеет принципиальное значение, поскольку в ближайшей перспективе именно они представляют реальный потенциал местных топливно-энергетических ресурсов, которые могут быть рационально вовлечены в экономику страны. Это позволит сформировать конкурентную среду и обеспечить качество отпускаемой электро- и теплоэнергии.

Учебное издание

**ЭКОНОМИКА НЕТРАДИЦИОННЫХ
И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Практикум
для студентов специальности
1-27 01 01-10 «Экономика и организация
производства (энергетика)»

Составители:
БОКУН Иван Антонович
КОРСАК Екатерина Павловна

Редактор *В. И. Акуленок*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 24.12.2019. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,43. Уч.-изд. л. 2,68. Тираж 100. Заказ 675.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

