

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и энергоэффективность в техносфере»

В. М. ОВЧИННИКОВ, Л. В. ШЕНЕЦ, М. П. МАЛАШЕНКО

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ БЕЛАРУСИ

*Одобрено методической комиссией строительного факультета
в качестве учебно-методического пособия по дисциплине
«Энергетическая стратегия государства» для студентов
специализации 1-43010606 «Энергоэффективные технологии
и энергетический менеджмент на транспорте»*

Гомель 2017

УДК 620.9(476)
ББК 31.15 (4Бен)
О-35

Р е ц е н з е н т – заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и экология» канд. техн. наук, доцент *А. В. Овсянник* (ГГТУ им. П. О. Сухого)

Овчинников, В. М.

О-35 Энергетическая стратегия Беларуси : учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников, Л. В. Шенец, М. П. Малашенко ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 99 с.
ISBN 978-985-554-705-2

Рассмотрены виды невозобновляемого углеродного топлива, приведены его характеристики, схемы традиционного производства тепловой и электрической энергии. Описываются перспективные возобновляемые источники энергии, теплонасосные установки. Подробно излагается материал по ядерной энергетике и о значении Белорусской АЭС для народного хозяйства республики. Анализируется нормативно-правовая база, направленная на обеспечение энергетической безопасности Беларуси.

Предназначено для студентов специализации 1-43010606 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент на транспорте». Может быть использовано и студентами других специальностей, а также инженерно-техническими работниками.

УДК 620.9(476)
ББК 31.15 (4Бен)

ISBN 978-985-554-705-2

© Овчинников В. М., Шенец Л. В.,
Малашенко М. П., 2017
© Оформление. БелГУТ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	10
1.1 Виды энергии	10
1.2 Единицы физических величин	11
1.2.1 Единицы, допускаемые к применению	14
1.2.2 Соотношения между единицами системы МКГСС и тепловыми единицами, основанными на калории, и единицами системы СИ	14
1.3 Фундаментальные физические константы	14
2 НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ	15
2.1 Традиционные органические топлива и их основная характеристика	17
2.2 Сравнение видов топлива	22
2.3 Горение углеводородного топлива	23
2.4 Состав продуктов сгорания при сжигании углеводородного топлива	26
2.5 Нетрадиционные природные источники энергии	29
3 ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ	34
3.1 Энергия биомассы	35
3.2 Гидроэнергетические ресурсы	52
3.3 Энергия ветра	55
3.4 Солнечная энергия	63
4 ТРАДИЦИОННОЕ ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ	75
4.1 Производство и транспорт электрической энергии	76
4.2 Производство тепловой энергии	79
4.3 Устройство для одновременной выработки электрической и тепловой энергии	82
5 ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ	85
5.1 Общие сведения о ядерной энергии	86
5.2 Белорусская АЭС	87
6 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОСУДАРСТВА	91
6.1 Состояние топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь	91
6.2 Тенденции развития топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	99

ПРЕДИСЛОВИЕ

Актуальность рационального, бережливого, эффективного, а следовательно, экономного потребления и распределения энергии возрастает во всем мире. Особенно это важно для Беларуси в связи с недостаточной обеспеченностью собственными природными энергоресурсами, что вызывает необходимость подготовки специалистов, имеющих квалификацию инженера-менеджера.

«Энергетическая стратегия государства» – это первая специальная дисциплина, с которой студент встретится уже на первом курсе. Поэтому считаем своим долгом дать ряд практических рекомендаций по рациональному усвоению знаний при обучении в университете.

Прежде всего, в чем принципиальное отличие обучения в вузе от средней школы? В средней школе просто учат вообще, а **в вузе учат учиться**. Это очень важно, что инженер должен учиться всю жизнь, да и само слово «инженер» (в переводе – способность, изобретательность) подразумевает человека творческого, способного к созданию нового.

В отличие от школы, в вузе не задают уроки «на завтра», но это не означает, что студент может не работать в течение семестра. Нужно приучить себя работать ежедневно по 3–4 часа, дополнительно к занятиям в аудитории.

Одним из основных видов учебных занятий в университете является лекция. Во время лекции наряду с изложением фактического материала студенту прививаются методы логического мышления. Задача лекции – дать студенту основы дисциплины, ясное представление о методологии изучаемой науки, указать на то, чем нужно заниматься дополнительно. Лекцию надо уметь слушать, именно слушать, а не записывать под диктовку или списывать формулы с доски. Наиболее важное в этом процессе – понять и усвоить идейное содержание излагаемого материала, а не только факты и формулы, и своими словами **з а к о н с п е к т и р о в а т ь** услышанное.

Неправильно поступают студенты, не ведущие конспекта, надеясь на учебник, в котором «все есть». Да, в учебнике есть многое, часто даже больше, чем нужно дать в лекции. Но лектор излагает основную канву, стержень предмета. *Конспектирование приучает к сосредоточению внимания на лекции.*

На **практических занятиях** студент, решая типовые задачи, закрепляет лекционный материал. Приступая к решению задачи, целесообразно

представить сначала весь ход решения задачи. Всегда следует приводить единицы физических величин, что поможет избежать ошибок и лучше понять физический смысл задачи. Полученный в результате решения задачи ответ должен быть всесторонне проанализирован. Иногда студент, не подумав, из-за допущенных ошибок в процессе решения задачи может получить величину, которая противоречит здравому смыслу. Например, эффективный КПД тепловой машины по выполненному студентом решению задачи может составлять 90–100 % и даже более. Но это невозможно, сегодня наибольшее значение эффективного КПД тепловой машины не превышает 55 %. Абсурдно выглядит в студенческих работах отрицательное значение абсолютной температуры, например, -486 K (указан «минус»). Аналогичных примеров можно привести много. Следовательно, необходимо анализировать полученный ответ и не давать повода для сомнений в технической грамотности студента (кстати, *языковая грамотность тоже важна – это показатель общей культуры человека*). Преодолеть возникшие трудности при решении задачи помогут преподаватели и соответствующая литература по данной дисциплине.

Лабораторные работы служат для иллюстрации и закрепления лекционного материала с помощью эксперимента. При этом осваивается измерительная техника, приобретается навык экспериментальных исследований.

Завершается изучение предметов **зачётом** или **экзаменом**. Причём зачёты предшествуют экзаменам; студенты, не сдавшие зачёты, к экзаменам не допускаются. Экзамен – это проверка не только знаний студента, но и его волевых качеств, умения быстро реагировать на поставленный вопрос, сообразительности. Это своего рода и тренировка человека перед дальнейшей инженерной деятельностью.

В результате обучения студент должен научиться мыслить творчески, критически, усвоить основные закономерности и методологию изучаемых предметов, свободно ориентироваться в своей специальности.

ВВЕДЕНИЕ

Последние два века, прошедшие с начала промышленной революции и момента изобретения двигателя внутреннего сгорания, прошли под знаком равенства между прогрессом и ростом благосостояния, с одной стороны, и увеличением энергопотребления – с другой. Действительно, энергия считается основой современной цивилизации. Есть даже афоризм: «Кто владеет энергией – тот владеет миром».

Одно из первых определений энергии дал в 1853 году В. Томсон (лорд Кельвин): «Под энергией материальной системы в заданном состоянии мы понимаем измеренную в механических единицах работы сумму всех действий, которая производится вне системы, когда переходит из этого состояния любым способом в произвольно выбранное нулевое состояние». Это формулировка включает толкование энергии как функции состояния системы («любым способом») и как меры её работоспособности.

В настоящее время **энергию** определяют более широко как единую скалярную меру различных форм движения материи, а **работу** – как изменение энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое за вычетом той части этого изменения, которая превращается в тепло.

Почти вся энергия, используемая на Земле, берет свое начало в недрах планеты. Ископаемое топливо сегодня, как и прежде, играет первостепенную роль в обеспечении человечества энергией. Поэтому обладание ископаемыми ресурсами, умение их извлекать и эффективно обрабатывать дает практически неограниченную экономическую и политическую власть. С течением времени человечество все глубже «зарывается» в землю для добычи сгораемых энергоресурсов: каменного угля, нефти и газа. Но запасы этого природного топлива убывают и не восполняются. К тому же резко повышается концентрация углекислого газа в атмосфере (именно его выделяется больше всего при сгорании ископаемого углеводородного топлива), которое регистрируется многими специализированными лабораториями. Так, если в 1960 г. концентрация углекислого газа в атмосфере не превышало 320 ppm (parts per million, т.е. частей на миллион), то в 2015 г. она превысила 400 ppm. Столь высокая концентрация углекислого газа отмечалась на Земле и миллионы лет назад. Но при тех же темпах увеличения потребления энергии и нынешних способах генерации энергии во второй половине XXI столетия следует ожидать повышение концентрации парниковых газов и, следовательно, температуры атмосферного воздуха на 6 °С, что приведет к

катастрофическим последствиям и может уничтожить нашу цивилизацию [1].

Поэтому все шире начинают использоваться альтернативные источники энергии. В основном, это ядерная энергия, биомасса, ветро-, гидро- и гелиоэнергия. Кроме того, эти источники энергии оказывают при использовании значительно меньшее воздействие на окружающую среду и практически не приводят к климатическим изменениям. Естественно, именно так называемые возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются главным в энергетической политике большинства государств мира.

Одновременно с термином «энергия» формировался и термин «энергетика». Исчерпывающее определение энергетики было дано советским академиком Г. М. Кржижановским: «Энергетика в широком смысле слова охватывает сложную совокупность всех видов трансформации энергии от источников (получения природных энергетических ресурсов, производство энергии, их транспортировку, распределение, потребление)». Такое понятие энергетики как одной из важных областей техники и науки сформировалось, когда взаимозаменяемость отдельных видов энергии, энергогенерирующих установок, средств транспорта и энергетических ресурсов стала технически осуществима и экологически целесообразна. Понятие «энергетика» охватывает всё многообразие методов получения и практического применения различных видов энергии для промышленных и бытовых нужд. Рост благосостояния стран определяется ростом удельного потребления энергии, которому пропорционален рост удельного (приходящего на одного человека в год) внутреннего (национального) валового продукта.

Без энергии не может быть ни движения, ни производства, ни самой жизни. Это было подтверждено крупнейшей энергетической аварией XX века, произошедшей 9 ноября 1965 года, которая потрясла Нью-Йорк и некоторые близлежащие к нему города. Произошло следующее. На одной из второстепенных линий электропередач, связывающих США с Канадой, возникли неполадки. Они привели к отключению других параллельных электрических линий, вследствие чего авария приняла лавинообразный характер. В результате отключились электростанции суммарной мощностью примерно 45 млн кВт (для сравнения: общая мощность электростанций Республики Беларусь – около 10 млн кВт). Электроэнергетическая сеть, снабжающая электричеством восемь штатов США и две провинции Канады, население которых примерно 40 млн человек, была лишена электроэнергии.

В тот вечер (авария произошла в часы «пик» 9 ноября) все населенные пункты окутала кромешная тьма. Особенно жутко это проявилось в таком мегаполисе, как Нью-Йорк. Выключенные светофоры вызвали пробки и аварии на транспорте. В метро остановились поезда на перегонах, выключилась вентиляция, нарушилась система откачки грунтовых вод –

люди оказались в ужасном положении, началась паника. Служба спасения не могла прийти на помощь, она была парализована.

Авария произошла при окончании рабочего времени бизнес-центров. Поэтому люди, покидавшие работу в офисах, размещенных в высотных зданиях, оказались запертыми в лифтах, лишенные притока воздуха (фактически лифты превратились в душегубки).

Вышли из строя холодильные хранилища. Нарушились технологические процессы на заводах и фабриках, что привело к авариям. Возникли пожары. Начались грабежи. Пожарные команды и полиция в сложившейся ситуации оказались бессильны. Нарушилась связь. Жизнь мегаполиса и других городов была парализована. Лишь на следующий день возобновилась работа электростанций. Много оказалось погибших, искалеченных и раненых людей. Избежавшие этой участи лишились крова, поскольку многие здания были охвачены пожарами. Урон, нанесенный аварией, был колоссальный.

Эта авария предельно четко, хотя конечно и очень зло, показала значение энергии для современного общества.

Таким образом, лишний раз приходится констатировать, что в нынешнем цивилизованном обществе без энергии не может быть ни движения, ни производства, ни, наконец, самой жизни. Следовательно, вся техника и вся продукция промышленности и сельского хозяйства есть в конечном итоге овеществленная энергия, и затраты последней определяют эффективность всего производства. Поэтому и всевозможные системы управления (по-английски «менеджмент»), широко внедряемые теперь всюду, преследуют, по существу, одну цель – экономии энергоресурсов.

Роль энергетики возрастает ещё больше в связи с прогрессирующим истощением обычных энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь и др.), и всё более заметным, иногда уже необратимым, изменением («загрязнением») окружающей среды, сопровождающим работу энергоустановок.

Последние 25 лет в Беларуси интенсивно идет потепление. За четверть века температура увеличилась на 1,3 градуса, а вот осадков стало на 2–6 % меньше (это официальная информация). На Гомельщине еще жарче: среднегодовая температура за это время выросла на 2,5–3 градуса. Относительно короткие и теплые зимы, частые засухи с температурными пиками, стирание сезонных переходов от зимы к лету и наоборот, непродолжительность снежного покрова – далеко не полный перечень примет климатической разбалансировки.

Как отметили в Гомельоблгидромете, основная опасность исходит от шквалистых ветров. Если раньше их максимальная скорость была 15–20 м/с, то сейчас 30 и больше. Следствия от таких экстремальных явлений – повреждение линий связи и электропередач, сорванные крыши и разрушения, сбои в работе транспорта и техники. В результате

климатических аномалий пересыхают колодцы, в реках становится воды «по колено», все чаще горят леса и торфяники, вслед за ельниками усыхают сосняки. Истощаются и ресурсы побочного лесопользования: в последние годы меньше становится грибов и ягод. Нарушается цепочка флоры и фауны: в наших лесах и реках появились чужаки – пришельцы в виде енотовидной собаки, американской норки, богомолов и других южных гостей, которые бесцеремонно вытесняют аборигенов. Смещение сезонности пор года меняют и привычные ритмы миграции, а также маршруты птичьих перелетов.

Еще одна примета изменения климата – смещение агроклиматических зон с юга на север нашей республики примерно на 100–120 км. Это заставило аграриев пересмотреть карту посевов.

Смягчить негативные последствия погодных аномалий могут и овощеводы, если сумеют взять на вооружения влагосберегающие технологии. В том числе и наладить орошение овощных площадей. Например, в КСУП «Мозырская овощная фабрика» в позапрошлом и прошлом годах сумели организовать полив овощей более чем на 2560 га. В результате почти наполовину увеличено производство моркови, капусты, лука и свеклы. КСУП «Брилево» Гомельского района начало выращивать сладкий перец и спаржевую фасоль, цветную капусту и брокколи, другие теплолюбивые овощи.

То, что человечество сильно меняет окружающую среду, видно невооруженным взглядом. Достаточно выглянуть из городского окна или полюбоваться дымом из труб ТЭЦ. Мы давно проверяем природу (и себя вместе с ней) на прочность. Окружающая среда нещадно эксплуатируется повсюду. Факт климатических изменений трудно оспаривать.

В заключении можно утверждать, что экономное и экологически чистое расходование энергии становится одной из основных задач инженерной деятельности в любой отрасли и по любой специальности.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Виды энергии

Производство и потребление энергии основано на использовании законов физики и химии, которые учтены при создании соответствующих технических устройств и оборудования. Видов энергии, по некоторым литературным источникам [2], более 15, но практическое значение имеют 10 из них.

Механическая энергия – это химическая энергия свободно движущихся макро- и микротел.

Химическая энергия – это энергия системы из двух или более реагентов, освобождающаяся в результате перестройки электронных оболочек атомов и молекул при химических реакциях.

Тепловая энергия – часть энергии хаотического теплового движения частиц тела – теплоты (тепла), которая освобождается при наличии разности температур между данным телом и телами окружающей среды; количество тепловой энергии эквивалентно количеству теплоты (тепла), заключенному в освобождающейся части энергии.

Электрическая энергия – энергия электрического тока во всех её формах.

Электромагнитная энергия – энергия излучений, переносимая фотонами электромагнитного поля.

Электростатическая энергия – потенциальная энергия взаимодействия электрических зарядов, т. е. запас энергии электрически заряженного тела, накапливаемый в процессе преодоления им сил электрического поля.

Магнитостатическая энергия – потенциальная энергия взаимодействия «магнитных зарядов», т. е. запас энергии, накапливаемый телом, способным преодолевать силы магнитного поля.

Гравитатическая энергия – потенциальная энергия (ультраслабая в земных условиях) взаимодействия всех тел, пропорциональная их массам и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними. Практическое значение имеет энергия, накапливаемая телами в процессе преодоления силы земного притяжения.

Упругостная энергия – потенциальная энергия механически упруго изменённых тел (твёрдых, жидких, газообразных), освобождающаяся при снятии нагрузки чаще в форме механической энергии.

Ядерная энергия – энергия связи нуклонов в ядре, освобождающаяся в различных видах при делении тяжёлых и синтезе легких ядер. Причём в последнем случае её принято называть «термоядерной».

Отмеченные виды энергии могут превращаться в конечном итоге в полезные виды энергии, т. е. те, которые непосредственно используются человеком: тепловая, механическая и световая. Анализ взаимопревращения видов энергии позволяет наметить возможные типы генераторов полезной энергии. В результате получим их техническую интерпретацию. Например, в тепловых машинах химическая энергия топлива в результате сгорания (окисления) углеводов превращается в тепловую энергию, которая затем преобразуется в механическую и далее может преобразовываться в электрическую энергию. Электрическая энергия, как самая удобная для передачи, распределения, автоматизации и превращения в любой полезный вид энергии, может по потребности преобразоваться либо в тепловую, либо в механическую, либо в световую (полезные виды) энергию. Причём каждый переход энергии из одного вида в другой связан с частичной ее потерей. Это потеря энергии при преобразовании оценивается коэффициентом полезного действия (КПД), причем чем меньше потеря, тем больше КПД. Отсюда следует вывод о сокращении цепочки преобразований, что повысит общую энергоэффективность.

1.2 Единицы физических величин

Таблица 1.1 – Важнейшие единицы Международной системы (СИ)

Величина	Единица измерения	Обозначение: между-народное/русское
<i>ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ</i>		
Длина	метр	м/м
Масса	килограмм	kg/кг
Время	секунда	s/c
Сила электрического тока	ампер	A/A
Термодинамическая температура	кельвин	K/K
Количество вещества	моль	mol/моль
Сила света	кандела	cd/кд
<i>ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ</i>		
Плоский угол	радиан (1 рад = 57°17')	рад
Телесный угол	стерадиан	ср
<i>ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ</i>		
<i>Единицы пространства и времени</i>		
Площадь	квадратный метр	м ²
Объем, вместимость	кубический метр	м ³
Скорость линейная	метр в секунду	м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²
Частота	герц	Гц

Продолжение таблицы 1.1

Величина	Единица измерения	Обозначение
Частота вращения	секунда в минус первой степени*	c^{-1}
Период	секунда	c
Угловая частота	радиан в секунду	рад/с
Угловое ускорение	радиан в секунду в квадрате	рад/с ²
<i>Единицы механических величин</i>		
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³
Момент инерции (динамический момент инерции)	килограмм-метр в квадрате	кг·м ²
Количество движения (импульс)	килограмм-метр в секунду	кг·м/с
Сила, сила тяжести (вес)	ньютон	Н
Удельный вес	ньютон на кубический метр	Н/м ³
Давление (напряжение механическое)	паскаль	Па
Работа (энергия)	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Кинетическая вязкость	квадратный метр на секунду	м ² /с
<i>Единицы световых величин</i>		
Световой поток	люмен	лм
Освещенность	люкс	лк
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м ²
<i>Единицы электрических и магнитных величин</i>		
Электрический заряд	кулон	Кл = А·с
Электрическое напряжение	вольт	В
Электрическая емкость	фарада	Ф = Кл/В
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Магнитный поток	вебер	Вб = В·с
Магнитная индукция	тесла	Тл = Вб/м ²
Индуктивность	генри	Гн = Вб/А
Активная электрической цепи мощность	вольт	Вт
Реактивная электрической цепи мощность	вар	вар

* Секунда в минус первой степени – частота равномерного вращения, при которой за время 1 с совершается один оборот тела.

Окончание таблицы 1.1

Величина	Единица измерения	Обозначение
Полная мощность электрической цепи	вольт-ампер	В·А
<i>Единицы тепловых величин</i>		
Количество теплоты	джоуль	Дж
Удельное количество теплоты	джоуль на килограмм	Дж/кг
Теплоёмкость системы, энтропия системы	джоуль на кельвин	Дж/К
Удельная теплоемкость, энтропия	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)
Тепловой поток	ватт	Вт
Коэффициент теплоотдачи, теплопередачи	ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м ² ·К)
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)
Температуропроводность	квадратный метр на секунду	м ² /с

Определение основных единиц:

метр – длина, равная $1\,650\,763,73$ длины волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86;
килограмм – масса, равная массе международного прототипа килограмма;
секунда – время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133;

ампер – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н;

кельвин – $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды;

моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ кг;

кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Кроме температуры Кельвина (обозначение – T) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение – t) определяемую выражением

$t = T - 27315$. Следовательно, разность температур Цельсия равна разности температур в кельвинах.

1.2.1 Единицы, допускаемые к применению

Величина	Единица измерения	Обозначение
Масса	центнер, тонна	ц, т
Время	минута, час, сутки	мин, ч, сут
Площадь	гектар	га
Объем	литр	л
Скорость	километр в час	км/ч
Частота вращения	оборотов в секунду	об/с
	оборотов в минуту	об/мин
Работа, энергия		кВт·ч
Количество электричества	ампер-час	А·ч
Объемный расход	метров кубических в час	м ³ /ч
Массовый расход	тонн в час	т/ч
	килограммов в час	кг/ч
Удельный расход топлива	граммов на киловатт-час	г/(кВт·ч)

1.2.2 Соотношения между единицами системы МКГСС и тепловыми единицами, основанными на калории, и единицами системы СИ

Единицы силы: 1 кгс = 9,81 Н, 1Н = 0,102 кгс.

Единицы давления: 1 кгс/см² = 735,6 мм рт. ст. = 10 м вод. ст. = 0,981 бар = 0,1 МПа.

Единицы работы и энергии: 1 кгс·м = 9,81 Дж; 1 кВт·ч = 3,6·10⁶ Дж.

Единицы мощности: 1 л.с. = 735,5 Вт; 1 кВт = 1,36 л.с. = 0,86 ккал/ч.

Тепловые единицы: 1 кал = 4,19 Дж; 1 кВт·ч = 860 ккал; 1 Гкал/ч = 1,163 МВт.

1.3 Фундаментальные физические константы

Скорость света в вакууме $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с \approx 300 тыс. км/с.

Абсолютный нуль температуры $T_0 = -273,15$ °С.

Ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с².

Постоянная Стефана-Больцмана $C = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К²).

Универсальная газовая постоянная $R_M = 8314$ Дж/(кмоль·К).

Энергетический эквивалент массы $*8,987 \cdot 10^{16}$ Дж/кг.

Объем 1 моля идеального газа при нормальных условиях 22 л.

Постоянная (число) Авогадро $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Масса покоя электрона $m_e = 0,911 \cdot 10^{-30}$ кг

Масса покоя протона $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг.

2 НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

Энергетические ресурсы – это материальные объекты, в которых сосредоточена возможная для использования энергия, которая крайне необходима для современного человека.

Из-за большого разнообразия ресурсов, встречающихся в природе, выделяют основные, используемые в больших количествах для практических нужд. Энергоресурсы разделяют на возобновляемые и невозобновляемые.

Рассмотрим сначала невозобновляемые ресурсы, начало образования которых уходит назад на десятки миллионов лет. В настоящее время человечество широко использует энергию именно этих природных горючих веществ. В результате вся современная мировая экономика зависит от богатств, накопленных еще во времена динозавров: угля, нефти, газа и прочих видов ископаемого топлива.

Уровень энергетической безопасности любого государства оценивается по состоянию индикаторов, количественно характеризующих состояние и степень угроз энергетической безопасности на основе:

- определения текущих и ожидаемых значений индикаторов;
- сопоставления значений индикаторов с пороговыми (предельно допустимыми) уровнями;
- определения качественного состояния энергетической безопасности, которое можно характеризовать как нормальное (Н), предкритическое (ПК) и критическое (К).

В «Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь» от 17.09.2007 приводится таблица 2.1, в которой даны текущие значения индикаторов энергетической безопасности, определенные на основе экспертных оценок, пороговые уровни и прогноз изменения значения этих индикаторов до 2020 года.

Таблица 2.1 – Индикаторы энергетической безопасности

Индикатор	Пороговые уровни		Значение индикаторов (характер ситуации) по годам		
	Н	К	2010	2015	2020
Энергоемкость ВВП, кг у.т./доллар	0,35	0,5	0,42 ПК	0,3 Н	0,24 Н
Доля собственных энергоресурсов в балансе КПП государства, %	30	15	22,5 ПК	27,5 ПК	31,6– 34,5 Н
Доля возможного собственного производства в общем объеме потребления электрической энергии, %	100	85	100 Н	100 Н	100 Н
Доля доминирующего энергоресурса (газа) в производстве тепловой и	65	90	68–54 ПК-Н	64–58 Н	57–43 Н

электрической энергии, % <i>Окончание таблицы 2.1</i>					
Индикатор	Пороговые уровни		Значение индикаторов (характер ситуации) по годам		
	Н	К	2010	2015	2020
Доля доминирующего поставщика энергоресурсов в потреблении валовых ТЭР, %	65	85	77–75 ПК	71–70 ПК	64–57 Н
Доля ТЭС, способных работать на двух и более взаимозаменяемых видах топлива, %	80	50	94,9 Н	76,2 Н	64,2 Н
Износ ОПФ предприятий ТЭК, %	45	75	53,6 ПК	48,3 ПК	43 Н
Обеспеченность емкостями для хранения запасов КПП (по газу и мазуту), сут	90	30	67,0 ПК	78,9 ПК	118,0 Н
<i>Примечание</i> – ВВП – внутренний валовый продукт; КПП – котельно-печное топливо; ТЭР – топливно-энергетические ресурсы; ТЭС – тепловая электрическая станция; ОПФ – основные производственные фонды; ТЭК – топливно-энергетический комплекс.					

Из таблицы 2.1 видно, что энергетическая безопасность Республики Беларусь в 2007–2010 гг. была недостаточной. Это послужило толчком к последующему ее усилению.

По данным Мирового энергетического агентства доля традиционных источников энергии (угля, нефти и природного газа) в 2012 г. составила 86,7%. Однако территориальное распределение выявленных горючих ископаемых крайне неравномерное (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Распределение мировых запасов углеводородного топлива

Страны и континенты	Уголь		Нефть		Газ	
	млрд т у.т.	%	млрд т у.т.	%	млрд т у.т.	%
Северная Америка	190,8	28,0	11,0	5,0	8,5	4,1
В том числе:						
США	185,0	27,1	5,4	2,4	6,2	3,0
Канада	4,9	0,7	3,1	1,4	1,8	0,9
Мексика	–	–	2,5	1,1	–	–
Южная и Центральная Америка	14,9	2,2	19,2	8,6	8,0	3,9
В том числе:						
Бразилия	7,6	1,1	2,2	1,0	–	–
Венесуэла	–	–	14,8	6,6	4,9	2,4
Колумбия	5,0	0,7	–	–	–	35
Европа и Евразия	215,3	31,6	26,0	12	73,0	36
В том числе:						
Чехия	4,2	0,6	–	–	–	–

Германия	5,1	0,7	–	–	–	–
----------	-----	-----	---	---	---	---

Окончание таблицы 2.2

Страны и континенты	Уголь		Нефть		Газ	
	млрд т у.т.	%	млрд т у.т.	%	млрд т у.т.	%
Норвегия	–	–	1,8	0,8	2,7	1,3
Азербайджан	–	–	1,3	0,6	1,6	0,8
Казахстан	25,7	3,4	7,3	3,3	3,4	1,7
Туркменистан	–	–	–	–	3,3	1,6
Польша	10,5	1,5	–	–	–	–
Российская Федерация	117,8	17,3	13,8	6,2	54,5	27
Украина	25,6	3,8	–	–	1,3	0,6
Узбекистан	–	–	–	–	2,1	1,0
Африка	37,8	5,4	21,2	9,5	16,4	8,0
В том числе:						
Южная Африка	36,6	5,4	–	–	–	–
Алжир	–	–	2,3	1,0	5,2	2,5
Ангола	–	–	1,7	0,8	–	–
Ливия	–	–	7,2	3,3	1,7	0,8
Нигерия	–	–	6,6	3,0	6,0	2,9
Азиатско-Тихоокеанский регион	222,7	32,7	7,4	3,4	16,9	8,3
В том числе:						
Австралия	58,9	8,6	–	–	2,9	1,4
Китай	85,9	12,6	3,0	1,3	2,7	1,3
Индия	69,3	10,2	–	–	1,3	0,6
Индонезия	–	–	–	–	3,1	1,5

Из приведенной таблицы 2.2 видно, что по запасам угля в мире лидируют США, Российская Федерация и Китай, по запасам нефти – Саудовская Аравия, Ирак и Иран (причем на Ближнем Востоке сосредоточено около 62 % мировых запасов нефти), по запасам природного газа – Российская Федерация, Иран и Катар.

2.1 Традиционные органические топлива и их основная характеристика

По определению Д. И. Менделеева, «топливом называется горючее вещество, умышленно сжигаемое для получения тепла». Практическая целесообразность топлива определяется его количественными запасами, удобством добычи, скоростью горения, теплотой сгорания (теплотворной способностью), возможностью длительного хранения и безвредностью продуктов сгорания для людей, растительного и

животного мира, а также оборудования. Существуют естественные (природные) и искусственные виды топлив.

Процесс освобождения химической энергии представляет собой реакцию окисления горючего. Поэтому химические топлива состоят из горючего и окислителя.

Горючие топлива бывают органического и неорганического происхождения. Те и другие могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Окислителями служат вещества, включающие элементы с незаполненными внешними атомными оболочками, например кислород, у которого не хватает двух электронов, фтор и хлор – по одному.

Все виды органического топлива (горючие) представляют собой углеводородные соединения, в которых входят небольшие количества других веществ [3].

К **твердому топливу** относят: антрацит, каменный и бурый уголь, торф, дрова, сланцы, отходы лесопильных заводов и деревообделочных цехов, а также растительные отходы сельскохозяйственного производства – солому, костру, лузгу, и др.

Твердые топлива используются в основном на ТЭС для получения электрической энергии, для отопления и технологических нужд промышленности, а также (в незначительной степени) для судовых и локомотивных двигателей.

К **жидкому топливу** относят нефть [4] и различные продукты ее переработки: бензин, керосин, лигроин, разнообразные масла и остаточный продукт нефтепереработки нефти – мазут. Искусственное жидкое топливо и горючие смолы, а также масла получают при переработке твердых топлив.

Ископаемым жидким топливом является сырая нефть – жидкий горючий минерал, который встречается в осадочных породах Земли. Состав нефти представляет собой сложную смесь многих сотен различных углеводородов и соединений, содержащих помимо углерода и водорода разные количества серы, азота, кислорода и металлов. По внешнему виду нефть – маслянистая жидкость от темного до светлого цвета в зависимости от содержания в ней смолистых веществ. Она легче воды, практически не растворима в ней, ее относительная плотность обычно от 0,80 до 0,92. Вязкость нефти значительно выше, чем воды. Температура кипения составляющих нефть разных углеводородов и фракций изменяется от 40–50 до 500–600 °С). Свое название нефть получила от персидского слова «нафата», что означает «просачивающаяся, вытекающая». Появление нефти на Земле до сих пор остается темой непрекращающихся научных дискуссий (в основном двух взаимоисключающих гипотез – ее органического и неорганического происхождения). Согласно *гипотезе неорганического происхождения нефти* (абиогенная гипотеза) углеводороды образовались в результате превращения неорганических соединений. Еще в 1805 г.

немецкий ученый А. Гумбольдт утверждал, что нефть происходит из примитивных горных пород, под которыми покоится энергия всех вулканических явлений. В 1876 г. французский химик М. Бертло, искусственно синтезировав углеводороды из неорганических веществ, высказал предположение, что нефть образовалась в недрах Земли из минеральных соединений. В 1876 г. русский ученый Д. И. Менделеев изложил свою «карбидную» гипотезу образования нефти, согласно которой вода, просачиваясь в недра Земли и взаимодействуя с карбидами металлов, в частности железа, под воздействием высоких температур и давления образует углеводороды и соответствующие оксиды металлов. Подтверждением абиогенной теории служили опыты по получению водорода и ненасыщенных углеводородов при воздействии серной кислоты (H_2SO_4) на чугуны, содержащий значительные количества углерода. В 1878 г. французские ученые, обрабатывая соляной кислотой (HCl) зеркальный чугун и водяными парами железа при белом калении, получили водород и углеводороды, которые даже по запаху напоминали нефть.

Сущность *органической гипотезы происхождения нефти* заключается в том, что нефть и газ появились из органического вещества, которое первоначально было в рассеянном состоянии в осадочных породах. Предполагается, что таким органическим веществом были отмершие остатки микрофлоры и микрофауны (планктон и др.), развивавшиеся в морской воде, к которым примешивались остатки животного и растительного мира. Основные процессы преобразования погребенного в осадочных породах органического вещества происходили после погружения на значительные глубины, где под воздействием высоких температур и давлений, а также из-за каталитического действия горных пород органическое вещество превращалось в углеводороды нефти. На это потребовались сотни (около 570) миллионов лет, что, однако, составляет всего около 10 % истории Земли. Еще в 1888 г. немецкие ученые Г. Гефер и К. Энглер получили предельные углеводороды, парафин и смазочные масла при перегонке рыбьего жира при температуре $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении порядка 1 МПа. В 1919 г. русский ученый академик Н. Д. Зелинский при переработке органического ила растительного происхождения (сапрпель из озера Балхаш) получил бензин, керосин, тяжелые масла, а также метан. Академик И. М. Губкин в своей книге «Учение о нефти» (1932 г.) в качестве исходного вещества для образования нефти также рассматривал сапрпель – битуминозный ил растительно-животного происхождения. Пласты, обогащенные органическими остатками, перекрываются более молодыми отложениями, предохраняющими ил от окисления кислородом воздуха с последующим его превращением под воздействием анаэробных бактерий. В пласте по мере тектонических перемещений его в глубину возрастают температура и давление, что приводит к преобразованию органики в нефть.

Взгляды И. М. Губкина на образование нефти лежат в основе современной гипотезы ее биогенного происхождения, согласно которой процесс формирования нефтяных месторождений включает в качестве основных стадии осадконакопления и преобразования органических остатков в нефть.

До 70 % и более жидких топлив используется на транспорте (авиация, автомобили, трактора, суда, тепловозы), около 30 % сжигается в виде мазута на тепловых электростанциях. Сырую нефть в качестве топлива в котельных не применяют.

К **газообразному топливу** относят природный газ, добываемый из недр Земли, попутный нефтяной газ, газообразные отходы металлургического производства (коксовый и доменный газ), крекинговый газ, а также генераторный газ, получаемый искусственным путем из твердого топлива в особых газогенераторных установках.

Газообразные топлива (горючие) сжигаются на ТЭС для получения электрической и тепловой энергии и в очень небольшом количестве используются на транспорте.

Газообразное топливо по своему происхождению разделяют на *природное* и *искусственное*. Природные газы делятся на собственно природные, добываемые из чисто газовых месторождений, и попутные, выделяемые при добыче нефтегазовых месторождений.

Природный газ после нефтяных кризисов на Ближнем Востоке, когда зародилось экологическое движение, превозносится как универсальное решение проблемы изменения климата и замена нефти. Это неудивительно, поскольку при сжигании природного газа для выработки электричества выделяется в два раза меньше двуокиси углерода, чем при сжигании угля.

Природный газ, добываемый на газовых месторождениях, состоит преимущественно из метана и примесей этана, пропана и бутана. Газообразное топливо сгорает при небольшом избытке воздуха, образуя продукты полного горения без тепла и копоти, не дает твердых остатков, удобно для транспортирования по газопроводам на большие расстояния и позволяет простейшими средствами осуществлять сжигание в теплоэнергетических установках различных конструкций и мощностей.

Газы обладают многими достоинствами, как горючее для двигателей внутреннего сгорания (ДВС): высокими антидетонационными свойствами, широкими пределами воспламенения (по избытку воздуха), хорошими условиями смесеобразования, приводит к меньшему, чем в ДВС на жидком горючем, износу, снижают требования к качеству горючих материалов и т. п. Однако все горючие газы имеют высокую температуру самовоспламенения и поэтому нуждаются в постороннем источнике зажигания или вспомогательном тяжелом жидком топливе для воспламенения основного газового топлива.

Основным показателем топлива является теплота сгорания (теплотворная способность). **Теплотой сгорания топлива** называется

количество теплоты, выделяемой при полном сгорании единицы массы (для твердого и жидкого) или единицы объема (для газообразного) топлива. Теплоту сгорания обозначают буквой Q и измеряют в кДж/кг (в системе МКГСС – в ккал/кг).

Теплоту сгорания газообразного топлива относят обычно к 1 м^3 , взятому при нормальных физических условиях ($0 \text{ }^\circ\text{C}$, 760 мм рт. ст.), и измеряют в кДж/м³.

Теплота сгорания зависит от химического состава топлива и условий его сжигания. Наибольший практический интерес представляет теплота сгорания рабочей массы топлива Q_r (указывается индекс «р»). *Рабочая масса* – это масса топлива в том виде, в котором оно поступает к потребителю, т. е. с учётом влагосодержания и загрязнения.

В продуктах сгорания топлива, содержащего водород и влагу, будет содержаться водяной пар H_2O , обладающий определенной энтальпией, равной примерно 2510 кДж/кг . Наличие в продуктах сгорания топлива водяного пара заставляет ввести понятия высшей теплоты сгорания Q_v .

Высшей теплотой сгорания рабочего топлива Q_v^p называют теплоту, выделяемую при полном сгорании 1 кг топлива, считая, что образующиеся при сгорании водяные пары конденсируются.

Низшей теплотой сгорания рабочего топлива Q_n^p называют теплоту, выделяемую при полном сгорании 1 кг топлива, за вычетом теплоты, затраченной на испарение как влаги, содержащейся в топливе, так и влаги, образующейся от сгорания водорода.

Теплоту сгорания рабочего топлива определяют в основном двумя методами:

– *калориметрическим* – сжигая навески топлива в сжатом кислороде в особой бомбе, погруженной в воду, и точно измеряя теплоту, поглощаемую водой;

– *аналитическим* – вычисляя по формулам, учитывающим химический состав топлива.

Определение теплоты сгорания калориметрическим методом требует специального оборудования; кроме того, этот метод довольно сложен. Поэтому чаще всего теплоту сгорания топлива определяют по формулам, учитывающим, что углерод С, водород Н и сера S, участвующие в горении, выделяют определенное количество теплоты. Наиболее распространена формула Д. И. Менделеева [3], которая дает достаточно точные результаты для самых разнообразных топлив. Эта формула для высшей теплоты сгорания твердых и жидких топлив, кДж/кг, имеет вид

$$Q_v^p = 338C^p + 1249H^p - 108,5(O^p - S_n^p). \quad (2.1)$$

Для низшей теплоты сгорания твердого и жидкого топлива, кДж/кг,

$$Q_n^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_n^p) - 25W^p, \quad (2.2)$$

где коэффициенты выражают теплоту сгорания отдельных горючих элементов, деленную на 100.

Низшую теплоту сгорания сухого газообразного топлива определяют как сумму произведений теплоты сгорания горючих газов на их объемное содержание в смеси, кДж/кг:

$$Q_n^c = 127CO_2 + 108H_2 + 358CH_4 + 591C_2H_6 + 911C_3H_8 + 234H_2S. \quad (2.3)$$

Точность формулы Д. И. Менделеева очень высока; по ней рекомендуется сверять результаты лабораторных определений теплоты сгорания.

2.2 Сравнение видов топлива

Различие теплоты сгорания для топлива разных видов и марок очень велико. Например, теплота сгорания твердых топлив колеблется от 8–12 МДж/кг у торфа, до 25–27 МДж у каменных углей; жидких топлив от 40 МДж/кг у мазутов, до 47 МДж/кг у бензинов. Еще больший разброс в теплоте сгорания у газов; если у доменного газа 3,3 МДж/м³, то у полупутных газов нефтяных месторождений – до 47 МДж/м³.

В силу этого обстоятельства учет и планирование расхода топлива, контроль за его экономичным потреблением сильно затруднены. Поэтому для сравнения различных топлив по теплоте сгорания все их приводят к единому эквиваленту, в качестве которого служит единица условного топлива.

Условное топливо (у.т.) – это эталонное топливо, теплота сгорания которого принята 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг).

Относительная ценность различных видов топлива рассматривается в сравнении с условным топливом с помощью топливных эквивалентов, которых существует два вида: калорийный и технический.

Калорийный топливный эквивалент \mathcal{E}_k – это отношение низшей теплоты сгорания рабочей массы реального топлива к теплоте сгорания условного топлива, равной 29,3 МДж/кг. Определяется калорийный эквивалент по формуле

$$\mathcal{E}_k = Q_n^p / 29,3, \quad (2.4)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания рабочей массы реального топлива, МДж/кг.

Калорийный топливный эквивалент применяют при планировании расхода топлива и в отчетности. Для топочного мазута калорийный эквивалент $\mathcal{E}_k = 1,37$, для дизельного топлива $\mathcal{E}_k = 1,45$. Калорийный

коэффициент не учитывает экономичности теплоиспользующих установок, которая оценивается коэффициентом использования теплоты $\eta_{\text{н}}$, различным для разных типов и марок оборудования.

Для сравнения экономичности разных топлив и их распределения по теплоиспользующим установкам применяют *технический топливный эквивалент* $\Theta_{\text{т}}$, при этом коэффициент использования теплоты при сжигании условного топлива принимается равным единице:

$$\Theta_{\text{т}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{т}} / 29,3 = \Theta_{\text{к}} \eta_{\text{т}}. \quad (2.5)$$

Здесь $\eta_{\text{т}}$ – КПД топливосжигающей установки.

Топливные эквиваленты позволяют производить перерасчеты расходов топлива из условного в реальное и наоборот.

2.3 Горение углеводородного топлива

Ископаемое углеводородное топливо, как известно, бывает трех видов: Твердое, жидкое и газообразное. Рассмотрим с **физической точки зрения** процесс горения каждого вида топлива.

Горение твердого топлива состоит из ряда последовательных стадий [3]. Сначала необходим подогрев твердого топлива до температуры, при которой начинается испарение влаги. Затем при температурах от 150–170 °С (бурые угли) до 400 °С (антрацит) происходит термическое разложение топлива с выходом летучих горючих веществ, происходящее вблизи поверхности твердого остатка и способствующее его прогреву и воспламенению. Время горения летучих веществ обычно составляет незначительную часть общего времени горения топлива. Основной стадией является горение коксового остатка (углерода). Продукты сгорания диффундируют в окружающее пространство, и наступает последняя стадия – образование шлака. Зола топлива переплавляется и преобразуется, поглощая некоторую часть теплоты, уменьшая горючую часть, а в ряде случаев затрудняя доступ окислителя к коксу. При температурах горения, превышающих температуру плавления шлаком, ухудшается доступ кислорода. При пористой структуре кокса горение происходит не только на поверхности, но и в объеме частицы. Чем больше пористость, тем большая масса одновременно участвует в химической реакции окисления и тем быстрее идет процесс горения.

Горение жидкого топлива [3] происходит в парогазовой фазе, т. е. температура воспламенения обычно значительно выше, чем температура кипения топлива. В горении жидкого топлива выделяют следующие стадии: подогрев, испарение влаги, возгонка летучих, горение летучих, дожигание углеродных частиц. Интенсивность испарения горючих веществ возрастает с увеличением поверхности контакта с воздухом и количества подводимой

теплоты, т. е. скорость горения зависит от тонкости распыла жидкого топлива.

Горение газообразного топлива [3] происходит наиболее просто. Оно не требует предварительной подготовки к сжиганию, легко образует горючие смеси с воздухом. Горение газа состоит из двух стадий: подогрева и горения летучих веществ.

Теперь рассмотрим процесс горения углеводородного топлива с **химической точки зрения**. При сгорании осуществляются химические реакции соединения горючих элементов (углерода, водорода и серы летучей) с кислородом воздуха. В результате образуются оксиды углерода, водорода, серы и выделяется энергия в форме теплоты. Таким образом при горении углеводородного топлива получается теплота. Выделившаяся тепловая энергия составляет около двух килокалорий на один грамм горючего вещества. Перевести в энергию большую долю веществ в химических реакциях невозможно. Объясняется это тем, что в химических реакциях участвуют только молекулы, а атомы в процессе горения не участвуют, остаются целыми. Следовательно, известное соотношение Эйнштейна $E = mc^2$ для химических реакций неприменимо.

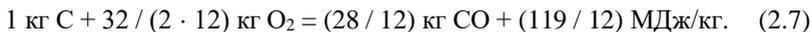
Рассмотрим процесс горения (окисления кислородом воздуха) углеводородного топлива. Данные для расчета могут быть получены в результате анализа элементарных реакций горения горючих элементов, содержащихся в топливе. Горение топлива может быть полным и неполным. Полное горение происходит при достаточном количестве окислителя и завершается полным окислением горючих элементов топлива. Продукты сгорания при этом состоят из CO_2 , SO_2 и H_2O . При недостаточном количестве окислителя происходит неполное сгорание углерода с образованием окиси углерода (угарного газа) CO .

Горение углерода с образованием углекислого газа можно представить уравнением



Следовательно, на 1 кг углерода приходится 2,67 кг, или 1,868 м³, кислорода (при нормальных условиях $\rho_{\text{O}_2} = 1,429 \text{ кг/м}^3$) и 3,67 кг, или 1,856 м³ (при нормальных условиях $\rho_{\text{O}_2} = 1,856 \text{ кг/м}^3$), диоксида углерода (углекислого газа) CO_2 .

Горение углерода с образованием оксида углерода CO :



В этом случае на 1 кг углерода приходится 1,33 кг или 0,933 м³ кислорода и 2,33 кг, или 1,867 м³, оксида углерода CO .

Горение оксида углерода с образованием диоксида углерода

$$1 \text{ кг CO} + 32 / (2 \cdot 28) \text{ кг O}_2 = (44 / 28) \text{ кг CO}_2 + (284 / 28) \text{ МДж/кг.} \quad (2.8)$$

Здесь на 1 кг оксида углерода приходится 0,57 кг, или 0,4 м³, кислорода и 1,57 кг, или 0,8 м³, диоксида углерода.

Горение водорода с образованием водяных паров

$$1 \text{ кг H}_2 + 32 / (2 \cdot 2) \text{ кг O}_2 = (18 / 2) \text{ кг H}_2\text{O} + 284 \cdot 2 / (238 \cdot 2) \text{ МДж/кг.} \quad (2.9)$$

В этом уравнении тепловой эффект реакции, данный в числителе (последнее слагаемое в уравнении), учитывает теплоту конденсации водяных паров, образующихся при сжигании водорода и охлаждении конденсата до 0 °С. В знаменателе этого слагаемого приведен тепловой эффект реакции при отсутствии конденсации паров воды. Здесь на 1 кг водорода приходится 8 кг, или 5,598 м³, кислорода и 9 кг, или 11,12 м³, водяного пара, приведенный к нормальным условиям.

Горение серы с образованием сернистого ангидрида:

$$1 \text{ кг S} + 32 / 32 \text{ кг O}_2 = (64 / 32) \text{ кг SO}_2 + 288 / 32 \text{ МДж/кг.} \quad (2.10)$$

Следовательно, на 1 кг серы приходится 1 кг, или 0,699 м³, кислорода и 2 кг, или 0,684 м³, сернистого ангидрида.

Горение метана СН₄ с образованием диоксида углерода и водяных паров можно представить уравнением

$$1 \text{ кг CH}_4 + 64 / 16 \text{ кг O}_2 = (44 / 16) \text{ кг CO}_2 + 36 / 16 \text{ кг H}_2\text{O} + (56,1 / 50,5) \text{ МДж/кг.} \quad (2.11)$$

На 1 кг метана приходится 4 кг, или 2,799 м³, кислорода, 2,75 кг, или 1,39 м³, диоксида углерода и 2,25 кг, или 2,798 м³, водяного пара, приведенных к нормальным условиям.

На основе указанных соотношений теоретически необходимое (стехиометрическое) количество кислорода для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива определяется по выражению

$$M_{\text{O}_2} = \frac{\left(\frac{8}{3C^p} + 8H^p + S_{\text{II}}^p - O^p \right)}{100}. \quad (2.12)$$

Так как горение происходит за счет кислорода атмосферного воздуха, необходимо знать процентное содержание кислорода в воздухе. Для технических расчетов принимают следующий состав сухого воздуха: объемная доля кислорода O₂ – 21 %, или массовая доля O₂ – 23,2 %; объемная доля азота N₂ – 79 %, или массовая доля N₂ – 76,8 %. Тогда количество сухого воздуха, кг/кг, теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива составит

$$M_{O_2} = \frac{\left(\frac{8}{3C^p} + 8H^p + S_l^p - O^p \right)}{100 \cdot 0,232}. \quad (2.13)$$

Разделив уравнение (2.13) на плотность воздуха ($\rho_v = 1,293 \text{ кг/м}^3$ при нормальных физических условиях), получим теоретический (стехиометрический) объемный расход воздуха:

$$V_{вз}^o = 0,0899(C^p + 0,375S_l^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p. \quad (2.14)$$

Теоретический объемный расход воздуха при сжигании 1 м^3 сухого газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$, определится из следующего выражения:

$$V_{вз}^o = 0,0478[0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n] - O_2]. \quad (2.15)$$

Например, для 1 кг дизельного топлива теоретически необходимое количество воздуха составляет около $14,5 \text{ кг}$, или $11,2 \text{ м}^3$, для бензина – почти 15 кг/кг , или $11,6 \text{ м}^3/\text{кг}$, для экибастузского угля марки СС $M_{вз}^o = 9,7 \text{ кг/кг}$, или $V_{вз}^o = 7,5 \text{ м}^3/\text{кг}$.

В реальных условиях для полного сгорания топлива требуется подавать воздуха больше теоретически необходимого (стехиометрического) количества.

Потеря кислорода вследствие сгорания топлива становится весьма ощутимой, если учесть мощность тепловых машин, а значит, потребление топлива. Так, при эксплуатации широко известных автомобилей с дизельным двигателем (мощность – 115 л.с. , или 85 кВт) Volkswagen Polo, Volkswagen Passat, Audi A4, Audi A6, Ford Galaxy за 1 час потребляется до 260 кг или 200 м^3 воздуха. При эксплуатации магистральных тепловозов серий 2ТЭ10У и 2ТЭ10М (составляющих большинство локомотивов на Белорусской железной дороге) мощностью 6000 л.с. , или 4400 кВт , при работе на полной мощности всего 15 мин затрачивается воздуха на сгорание топлива около 4000 м^3 . При работе Лукомльской ГРЭС в Витебской области мощностью 2890 МВт ежедневно потребляется около 260 млн м^3 воздуха. Для сравнения отметим, что потребность человека в кислороде примерно 500 л/сут , или в атмосферном воздухе около – $2,5 \text{ м}^3/\text{сут}$. Как известно, основным производителем кислорода является растительный мир. При этом 1 га смешанного леса выделяет в атмосферный воздух около 20 м^3 кислорода в день. В Беларуси лесами покрыта территория, площадь которой более $6,5 \text{ млн га}$.

В заключение необходимо подчеркнуть, что постепенное повышение КПД тепловых машин ведет не только к уменьшению потребления дефицитного углеводородного топлива, но и к сокращению сжигания кислорода, столь необходимого для человека. Кроме того, необходимо развивать энергетику, не требующую атмосферного кислорода (атомные электростанции, ветроэлектростанции и др.), а также новые транспортные средства (электромобили, гибридные автомобили и локомотивы и др.).

2.4 Состав продуктов сгорания при сжигании углеводородного топлива

При тепловом расчете топливосжигающих установок (паровых и водогрейных котлов, промышленных огневых печей, двигателей внутреннего сгорания), а также при обработке результатов их испытаний определяют следующие характеристики и величины:

– теоретический и действительный расходы воздуха V_t и V_d , необходимые для сгорания 1 кг твердого и жидкого топлива или 1 м³ газообразного топлива;

– состав и объем продуктов сгорания V_r (дымовых газов);

– энтальпию дымовых газов при требуемых температурах и коэффициентах избытка воздуха.

Для полного сгорания топлива требуется некоторый избыток воздуха против теоретического расхода, который характеризуется так называемым коэффициентом избытка (иногда называемым коэффициентом расхода воздуха). Он зависит от способа сжигания топлива, качества смесеобразования топлива с воздухом и ряда других факторов.

Коэффициент избытка воздуха представляет собой отношение действительного расхода воздуха к теоретическому:

$$\alpha_o = \frac{V_{\text{аг}}^{\text{д}}}{V_{\text{аг}}^{\text{т}}}. \quad (2.16)$$

При полном сгорании дымовые газы (продукты сгорания) состоят из CO₂ и SO₂, получившиеся при сгорании углерода и летучей серы; водяного пара, образующегося при испарении влаги топлива и сгорании его водорода; азота, подводимого в топку (камеру сгорания) с воздухом, и, наконец, кислорода, не использованного при горении.

Объем продуктов сгорания определяется по формуле

$$V_{\text{ор}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (2.17)$$

При проведении химического анализа дымовых газов содержание CO₂ и SO₂ определяется совместно, поэтому в расчетные формулы вводится сумма количества CO₂ и SO₂, обозначаемая символом RO₂. Тогда

$$V_{\text{ор}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{с.г}} + V_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (2.18)$$

где $V_{\text{с.г}}$ – объем сухих газов,

$$V_{\text{с.г}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (2.19)$$

В таблице 2.3 приведены расчетные формулы для определения объемов воздуха и продуктов полного сгорания для твердых, жидких и

газообразных топлив. В этих формулах $C_p, H_p, S_p, O_p, N_p, W_p$; $CO, CO_2, H_2, CH_4, \dots$ – содержание соответствующих элементов и компонентов в рабочем топливе, %; α_T – коэффициент избытка воздуха; d_b – влагосодержание сухого воздуха, $г/м^3$ (обычно принимается $10 г/м^3$).

В случае отсутствия элементного состава сжигаемого топлива при известных величинах Q_H^p и W^p можно пользоваться эмпирическими формулами таблицы 2.4.

Таблица 2.3 – Расчетные формулы для определения объемов воздуха и продуктов полного сгорания

Определяемые величины	Для твердого и жидкого топлива, $нм^3/кг$	Для газообразного топлива, $нм^3/м^3$
Теоретически необходимое количество воздуха	$V_T = [0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,2665H^p - 0,033O^p] \times (1 + 0,00124d_b)$	$V_T = 0,0476[0,05CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum(m + n/4) \times C_mH_n - O_2] \times (1 + 0,00124d_b)$
Действительное количество воздуха	$V_d = \alpha_T V_0$	
Количество продуктов полного сгорания	$V_{CO_2} = 0,0187C^p$; $V_{H_2O} = 0,112H^p + 0,0124W^p + 0,00124V_d d_b$; $V_{SO_2} = 0,07S^p$; $V_{O_2} = 0,21(\alpha_T - 1)V_0$; $V_{N_2} = 0,008N^p + 0,79V_d$	$V_{CO_2} = (CO + CO_2 + CH_4 + \sum m C_m H_n) \cdot 0,01$; $V_{H_2O} = (H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum (n/2 C_m H_n + 0,124 V_d d_b)) \cdot 0,01$; $V_{SO_2} = 0,01H_2S$; $V_{O_2} = 0,21(\alpha_T - 1)V_0$; $V_{N_2} = (N_2 + 79V_d) \cdot 0,01$
	$V_T = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}$	
Процентный состав продуктов сгорания	$CO_2 = (V_{CO_2}/V_T) \cdot 100$ % и т. д.	

Таблица 2.4 – Эмпирические формулы для определения V_0 и V_T $нм^3/кг$ или $нм^3/м^3$

Топливо	Теоретически необходимое количество воздуха	Действительное количество продуктов сгорания
Дрова	$V_T = 4,66(1 - W^p/1000)$	$V_T = 5,3 - 4,055 W^p/1000 + (\alpha - 1)V_0$
Уголь	$V_T = 0,24Q_H^p + 0,5$	$V_T = 0,21Q_H^p + 1,65 + (\alpha - 1)V_0$
Жидкое топливо	$V_T = 0,24Q_H^p + 2,0$	$V_T = 0,265Q_H^p + (\alpha - 1)V_0$
Газообразное топливо с $Q_H^p < 12$ МДж/м ³	$V_0 = 0,21Q_H^p$	$V_T = 0,17Q_H^p + 1,0 + (\alpha - 1)V_0$
То же $Q_H^p > 12$ МДж/м ³	$V_T = 0,26Q_H^p - 0,25$	$V_T = 0,27Q_H^p + 0,25 + (\alpha - 1)V_0$

Коксодоменная печь	$V_T = 0,24Q_H^P - 0,2$	$V_T = 0,225Q_H^P + 0,765 + (\alpha - 1)V_0$
<i>Примечание – Q_H^P в МДж/кг или МДж/м³ (1 ккал = 4,187 кДж).</i>		

Энтальпия газа H в общем виде вычисляется как произведение его объема при нормальных условиях на объемную теплоемкость при постоянном давлении и на температуру. Удельная энтальпия (кДж/кг) продуктов сгорания h рассчитывается для твердого и жидкого топлива, а объемная энтальпия (кДж/м³) – для газообразного. Выражается она в виде суммы энтальпий теоретического объема продуктов сгорания h_T и избыточного воздуха $(\alpha_T - 1)h_{\text{возд}}^0$:

$$h = h_T + (\alpha_T - 1)h_B . \quad (2.20)$$

2.5 Нетрадиционные природные источники энергии

Несколько лет назад США приняли доктрину, по которой они должны производить потребляемые энергоносители на своей территории (до этого США были главным мировым импортером природного углеводородного топлива). Дело в том, что средствами массовой информации США была запущена так называемая «сланцевая революция». США перестали импортировать природный газ, и в последние 2–3 года они усиленно удерживают первое-второе место в мире (сравнились с Российской Федерацией) по объемам добычи природного газа. Стремительно нарастает в этой стране и добыча нефти.

Все это стало возможным после разработки так называемых сланцевых газа и нефти на территории страны [5].

Сланцевая нефть вырабатывается из твердых полезных ископаемых органического происхождения («горючих сланцев»), которые образовались 450 млн лет назад из остатков растений и животных. Это вещество может использоваться не только для производства топлива, но и в нефтехимической промышленности. Многие страны – импортеры нефти, образно говоря, вытянули выигрышный сланцевый билет. На территориях США, Китая, Германии, Великобритании, Индии и Японии обнаружены крупные месторождения горючих сланцев.

Согласно мнению экспертов компании Pricewater house Coopers, к 2035 г. уровень добычи сланцевой нефти по всему миру составит 14 млн баррелей в день (более 800 млн м³ в год), что составит почти 12 % от сегодняшних объемов добычи традиционной нефти. Кстати, приведенная цифра заметно превышает объем современной добычи нефти в России. Отметим также, что в ряде стран, и в первую очередь в США, сланцевые месторождения освободили от налогов, т.е. добытчики сланцевого газа стали получать

весомую государственную поддержку. Это, естественно, явилось мощным стимулом для ускорения разработки соответствующих месторождений и повышения конкурентоспособности сланцевой нефти и газа на мировых рынках.

Справедливости ради следует указать, что помимо относительно высокой стоимости сланцевой нефти ее добыча сопряжена с двумя *экологическими рисками*: загрязнением подземных вод, которые во многих регионах мира являются единственным источником питьевой воды, и угрозой землетрясений магнитудой в 2–4 единицы по шкале Рихтера. Такие землетрясения наблюдались, например, в 2012 г. в Великобритании, в районах добычи сланцевых углеводородов. Как в России, так и в Европе запасы горючих сланцев расположены зачастую в густонаселенных районах, и поэтому добывать их может быть не очень безопасно, считают аналитики. Тем не менее многие эксперты, предполагая, что появление на мировых рынках больших объемов сланцевых нефти и газа неизбежно приведет к существенному уменьшению экспортных доходов России, настоятельно рекомендуют приступить к широкомасштабному освоению соответствующих месторождений.

Сланцевый газ является продуктом естественной переработки отмерших растительных и животных организмов, который накапливался в сланцевой породе миллионами лет. По составу он близок к природному газу. Накопилось его очень много, однако добывать его долго не удавалось. Одной из причин этого явилось то, что, в отличие от обычных газовых месторождений – пористого песчаника, – сланцевый пласт, содержащий сланцевый газ, «размазан» тонким слоем. Для его добычи нужно бурить сложные скважины (рисунок 2.1).

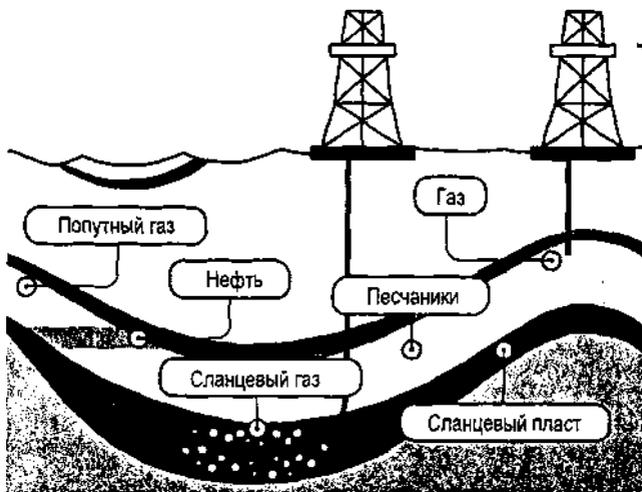


Рисунок 2.1 – Схема добычи сланцевого газа

Вначале (с 1981 г.) стали бурить обычные вертикальные скважины, но в течение почти 18 лет ничего не получалось. Однако инженер Д. Митчелл применил новую технологию – горизонтальные скважины с гидроразрывом пласта. Для этого под землю закачивалась под давлением смесь воды, песка и разных химикатов, и газ выдавливался из пласта.

Этой технологией фактически было положено начало «сланцевой революции». Запасы сланца на планете огромны, а новые технологии могут сделать его добычу выгодной.

У добычи газа из сланцев, конечно, есть *недостатки*. К примеру, скважина дает максимальный объем газа только в первый год освоения, а через несколько лет иссякает. Кроме того, в скважину для разрыва пласта необходимо закачивать вредные химикаты. Однако недавно в Канаде была разработана новая технология добычи сланцевого газа, которая более эффективна в плане экономики и снимает многие ограничения в экологическом аспекте. Правда, некоторые эксперты, и в их числе российские, считают, что прибыльность сланцевых скважин сильно преувеличена и «сланцевая революция» – всего лишь очередной «пузырь». Так ли это – покажет время. Между тем Франция, всегда позиционирующая себя как «зеленое» государство, вообще запретила данный метод добычи газа.

Газогидраты являются перспективным источником природного газа. Согласно современным геологическим данным, в донных осадках морей и океанов в виде твердых газогидратных отложений находятся огромные запасы углеводородного газа.

Газогидраты представляют собой маленькие белые, быстро тающие кристаллы; их упрощенная формула может быть представлена как $x\text{CH}_4 - y\text{H}_2\text{O}$. Газогидраты содержат в себе большое количество углеводородного газа: так, 1 м^3 природного метангидрата содержит около 164 м^3 (116 кг) метана CH_4 в газовой фазе и $0,87 \text{ м}^3$ воды.

Потенциальные запасы метана в газогидратах оцениваются величиной $2 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$, в то время как разведанные запасы природного газа по состоянию на конец 2008 г. составляли $1,77 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$, т. е. на два порядка меньше. Иначе говоря, газогидраты могут содержать 10^{12} т углерода, т. е. в два раза больше, чем вместе взятые мировые запасы угля, нефти и обычного природного газа (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Содержание углерода в известных мировых запасах углеводородов

Виды запасов углеводородов	Доля, %
Газовые гидраты	53

Разведанные и неразведанные ресурсы угля, нефти, газа	27
Почва	8
Растворенное в море органическое вещество	5
Наземная растительность	4
Торф, дегрированное органическое вещество, атмосфера и морские отложения	3

В 2007 г., например, добыча газа в мире составила $2,94 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$ (около $2,1 \cdot 10^9 \text{ т}$).

В 1974 г. советские ученые Б. П. Жижченко и А. Г. Ефремова, проводя натурные исследования дна Черного моря, обнаружили образцы газогидратов. В последующем они были найдены в Атлантическом и Тихом океанах, в Охотском и Каспийском морях, на Байкале и др. Исследования ученых различных стран, проведенные в последние два десятилетия, позволили сделать обоснованный вывод о практически повсеместном наличии крупных скоплений аквальных залежей газогидратов, из которых можно будет извлечь в промышленных масштабах метан.

К настоящему времени установлено, что около 98 % залежей газогидратов являются аквамаринными и сосредоточены на шельфе и континентальном склоне Мирового океана (у побережий Северной, Центральной и Южной Америки, Северной Азии, Норвегии, Японии и Африки, а также в Каспийском и Черном морях), на глубинах воды 200–700 м. Около 2 % газогидратов расположены в приполярных частях материков, в частности, в российской тундре.

Газовые гидраты являются пока единственным неразрабатываемым источником природного газа на Земле, который, по мнению экспертов, может в недалекой перспективе составить реальную конкуренцию традиционным углеводородам. Это обусловлено широким распространением газогидратов на планете, их относительно неглубоким залеганием и большим удельным содержанием метана.

Водород как топливо. Водород, самый простой и легкий из всех химических элементов, можно считать идеальным топливом. При сжигании водорода образуется вода, которую можно снова разложить на водород и кислород, причем этот процесс не вызывает никакого загрязнения окружающей среды. Водородное пламя не выделяет в атмосферу продуктов, которыми неизбежно сопровождаются горение любых других видов топлива: диоксида углерода, оксида углерода, диоксида серы, углеводородов, золы и других органических примесей. Водород обладает очень высокой теплотой сгорания $Q = 120 \text{ МДж/кг}$, тогда как теплота сгорания бензина и дизельного топлива – соответственно 47 и 42,5 МДж/кг.

Водород можно транспортировать и распределять по трубопроводам, как природный газ. Трубопроводный транспорт топлива – самый дешевый способ дальней передачи энергии. К тому же трубопроводы прокладываются под землей, что не нарушает ландшафта.

Несмотря на это, у водорода имеется ряд недостатков:

– он в восемь раз легче природного газа, и его объемная теплота сгорания меньше, чем у метана, в 3,3 раза;

– водород более взрывоопасен, чем природный газ, и образует с воздухом взрывоопасные смеси в большом диапазоне концентраций (4–75 %);

– температура сжижения водорода при атмосферном давлении очень низкая (–253 °С, или 20 К), что существенно ниже, чем у природного газа (у метана 108 К, или –165 °С);

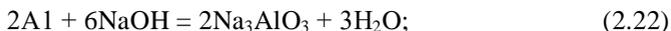
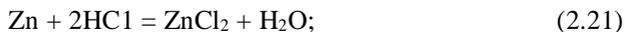
– водород дорог в производстве.

Водород – синтетическое топливо. Его можно получить из угля, нефти, природного газа либо путём разложения воды. Рассмотрим подробнее методы производства водорода.

Водород практически не встречается в природе в чистом виде (если не считать выделения его из разломов земной коры) и поэтому должен быть извлечен из водородсодержащих соединений (неорганических и органических) с помощью различных методов. Следует подчеркнуть, что разнообразие способов получения водорода является одним из главных преимуществ водородной энергетики, так как повышает энергетическую безопасность и снимает зависимость от отдельных видов сырья.

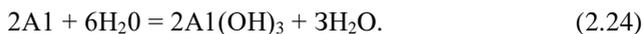
Водород может быть получен различными путями с использованием широкого диапазона технологий, выбор которых определяется требованиями чистоты продукта, его количеством и экономическими показателями производства.

В лабораторных условиях в небольших количествах водород можно получить *взаимодействием металлов с кислотами или щелочами*, например, цинка с соляной кислотой или алюминия с гидроксидом натрия, а магний бурно реагирует просто с горячей водой:



Реакция Al с NaOH применялась раньше для получения водорода в полевых условиях (для наполнения аэростатов). Так, для получения 1 м³ водорода (при 0 °С и 1 атм) требуется только 0,81 кг алюминия по сравнению с 2,9 кг цинка или 2,5 кг железа.

При взаимодействии порошкообразного алюминия с водой также выделяется водород. Эта реакция может быть использована для получения водорода в больших количествах и лежит в основе действия алюмоэнергетических установок:



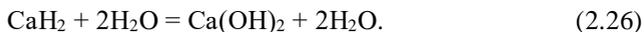
Действие натрия на воду приводит к образованию водорода:



Ввиду того, что чистый натрий реагирует в этом случае слишком энергично, его чаще вводят в реакцию в виде амальгамы натрия.

Аналогично натрию с водой реагируют и остальные щелочные и щелочноземельные металлы.

Действие гидрида кальция CaH_2 на воду также дает водород:



Этот метод удобен для получения водорода в полевых условиях. Для получения 1 м^3 водорода теоретически необходимо $0,94 \text{ кг}$ CaH_2 и кроме воды не требуется никаких других реактивов.

Для получения водорода *в промышленных масштабах* используются следующие технологии:

- паровая и парокислородная конверсия природного газа и углеводородов нефти;
- газификация угля;
- электролиз воды и водяного пара;
- термохимическое и термоэлектрохимическое разложение воды;
- плазмохимическое разложение воды и сероводорода;
- физические методы выделения водорода из смесей.

Из таблицы 2.6 видно, что в настоящее время 96 % водорода добывается из невозобновляемых ископаемых источников, что еще более осложняет решение экологических проблем.

Таблица 2.6. – Промышленное производство водорода

Сырье	Доля производимого	Сырье	Доля производимого
Природный газ	48	Уголь	18
Нефть	30	Вода (электролиз)	4

3 ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Мировое сообщество уже давно осознало ограниченность мировых запасов ископаемого топлива и отрицательное воздействие его использования в энергетике на экологию. Однако уменьшение потребления энергии, особенно электрической, в современном государстве приводит к снижению размера валового национального дохода, следовательно, ослаблению экономической и политической независимости страны.

По всему миру человечество ищет и постепенно находит замену ископаемому топливу, которое, как известно, начало образовываться миллионы лет назад и считается невозобновляемым энергетическим ресурсом. Внедряются программы перехода на экологически чистые и возобновляемые источники энергии.

Но перед **альтернативной энергетикой** возникает ряд проблем:

1) географического распределения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Ветряные электростанции строятся только в районах, где дуют сравнительно сильные и постоянные ветра, солнечные – где минимальное количество пасмурных дней, гидроэлектростанции – в горной местности и на крупных реках;

2) нестабильность ВИЭ. На ветряных электростанциях выработка зависит от ветра, который постоянно меняет скорость или вообще затихает. Солнечные электростанции неэффективно работают в пасмурную погоду и вообще не работают ночью. Решить проблему может только строительство огромных хранилищ энергии для аккумуляирования резерва энергии на случай низкой выработки. Однако это сильно удорожает всю систему;

3) децентрализация производственных мощностей. На первый взгляд, это положительно, так как значительно сократятся издержки производства (затраты на постройку линий электропередач, трансформаторов, содержание обслуживающего персонала и т. д.); а в дальнейшем эти сбережения превысят расходы, связанные с эксплуатацией небольших энергоблоков. Однако экономическая оценка мелкомасштабной возобновляемой энергетики показывает определенную несостоятельность ВИЭ. Централизованное крупномасштабное производство электроэнергии по-прежнему доминирует.

Мелкомасштабная возобновляемая энергетика не может снабжать энергией такие современные крупные энергопотребляющие отрасли как производство чугуна и стали, нефтеперерабатывающие и химические предприятия, производства цемента, стекла и др.

Следует также учесть, что сегодня более половины человечества живет в густонаселенных городах с огромной транспортной системой и

развитой промышленной сетью. Значит, этому населению нужна энергия, которая будет производиться на крупномасштабных централизованных энергопредприятиях.

Из-за этих и многих других сложностей замедляется развитие альтернативной энергетики в мире. Сжигать ископаемое углеводородное топливо по-прежнему проще и дешевле.

Однако если в масштабах мировой экономики ВИЭ и не дают большой выгоды, то в рамках отдельных потребителей энергии они могут быть предпочтительнее невозобновляемых энергоресурсов [6].

3.1 Энергия биомассы

Биомасса – это органические вещества, сохранившие в себе энергию Солнца благодаря процессу фотосинтеза.

В обобщенном виде эту реакцию можно представить как $n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} +$ + солнечная радиация = $n\text{O}_2 + (\text{CH}_2\text{O})n$.

Источниками топлива из биомассы являются наземная и водная растительность, отходы сельскохозяйственного и лесозаготовительного производства, муниципальные отходы и отходы животноводства. Она образуется в ходе работы пищевой цепочки. В первоначальном виде существует в форме растений, затем передается травоядным животным, а если их съедят – то и плотоядным. Человек тоже ест растения и животных.

Биомасса характеризуется способностью к возобновлению, низкой ценой, небольшим объемом выбросов, исключением повышения содержания CO_2 в атмосфере, но в то же время и неэкономичностью транспортировки на большие расстояния и сильной тенденцией образования нагара и шлака при сжигании.

При сгорании биомассы (древесины, высушенной растительности) освобождаются накопленная энергия и углекислый газ.

В принципе, биомасса – это любой материал органического происхождения, не только растения и животные, но и экскременты животных или остатки растений, такие как солома. Бумага и целлюлоза, отходы бойни, органические отходы, растительное масло и этанол – все это биомасса и может быть использовано для производства энергии.

Внимание, уделяемое в последние годы биомассе, связано как с постоянно растущим дефицитом ископаемых топлив, угля, нефти, природного газа, так и с поисками им замены. О том, что биомасса обладает достаточным энергетическим потенциалом, говорит хотя бы такой факт: только в континентальных лесах ее накапливается ежегодно до 70 млрд т. По энергосодержанию это значительно превышает современное потребление энергии в мире.

С энергетической проблемой тесно связана проблема экологическая. Интенсификация промышленного и сельскохозяйственного производства, а также дальнейшая урбанизация неизбежно приведут к тому, что концентрация разнообразных отходов в ближайшие десятилетия резко увеличится. А это значит: нужно будет принимать неотложные меры по их утилизации. Переработка отходов, т. е. биомассы, позволит в определенной степени решить и экологическую, и энергетическую проблемы.

Энергетическое использование биомассы реализуется по трем направлениям.

1 Биомасса непосредственно используется в качестве топлива путем сжигания растений, деревьев, водорослей, произрастающих в естественных условиях или быстрорастущих видов, специально выращиваемых в искусственных условиях. Этот энерготехнический метод называется термохимическим методом переработки биомассы.

2 Извлечение из биомассы таких энергоносителей, как биогаз или спирты. Этот энерготехнический метод называется биохимическим методом переработки биомассы. Биогаз в основном получают из отходов растениеводства и животноводства. Хотя он и не является высококачественным энергоносителем, но с успехом может быть использован в небольших фермерских хозяйствах. Во многих тропических странах сооружены заводы, где из растительных отходов извлекают спирт. Добавляя его в бензин, можно экономить нефть и уменьшать токсичность выхлопных газов.

Прямое сжигание растительной биомассы, будучи древнейшим источником получения энергии для человека, интенсивно используется и сейчас.

3 Прямое получение от растений жидких или твердых топлив. Такой метод называется агрохимическим методом переработки биомассы.

Термохимический метод переработки биомассы. Прямое сжигание биомассы. Простейшим методом получения полезной энергии из сухой биомассы является ее сжигание на воздухе. Теплота реакции составляет от 16 до 24 МДж/кг абсолютно сухой биомассы, в зависимости от ее типа. Если количество кислорода недостаточно для полного окисления горючего материала, тогда происходит образование углерода, оксида углерода, углеводородов и других газов, а теплота реакции снижается. Азот и другие элементы, присутствующие в биомассе, превращаются в газообразные продукты и золу.

Вода также снижает температуру пламени и скорость сжигания. Однако использование печей с псевдосжиженным слоем материала позволяет проводить сжигание при содержании воды до 55 %.

Были предложены регенеративные печи, повторно использующие тепло испарившейся воды и газообразных продуктов сгорания; в этих

условиях теоретически возможно сжигание материалов, насыщенных влагой. Сжигание в соответствующих камерах сгорания может явиться одним из наиболее эффективных методов использования энергетического потенциала биомассы.

В печах прямого нагрева и паровых котлах использование тепла составляет 85 %, однако многие установки на практике являются значительно менее эффективными.

Промышленная технология сжигания. Биомасса обычно используется в промышленности в качестве топлива только в тех случаях, когда она представляет собой остатки от переработки биологических материалов другие, более ценные, продукты. Это имеет частичное значение с точки зрения охраны окружающей среды, так как удаление остатков является часто затруднительным.

Два вида топлива биологического происхождения уже используются в промышленности, и методы сжигания их являются документально обоснованными: *солома*, получаемая в сельском хозяйстве, и *древесные отходы* деревообрабатывающей промышленности.

Сжигание соломы на фермах практикуется в некоторых районах, а печи для сжигания соломы производятся в Дании в широком масштабе.

Отрасли деревообрабатывающей промышленности используют древесные остатки для парообразования на месте производства. Пар используется для поддержания температурных условий процесса и для выработки электроэнергии. Горячие продукты сгорания могут применяться и для сушки.

Общие отходы деревообрабатывающей промышленности могут составлять до 50 % от массы сырья. Содержание влаги в отходах – 30–50 %. Паровые установки, использующие эти отходы, сжигают до 250 т/ч. Используется несколько типов бойлеров и печей, например, датские печи, печи с механической загрузкой, печи с наклонной решеткой.

Сжигается как влажная (до 30 % влаги), так и сухая древесина. Эффективность может быть такой же высокой, как и при сжигании других видов твердого топлива. Однако оборудование для сжигания часто включает высокоэффективные газовые и масляные установки (на случай отсутствия отходов).

Сжигание широко используется в целях *утилизации городских и промышленных отходов*. Несмотря на существование множества проектов по использованию полученного тепла для обогрева жилых домов, в большинстве случаев это тепло не используется. Стоимость сжигания может быть неожиданно высокой, но здесь первостепенное значение имеет борьба с загрязнением окружающей среды, а для некоторых отходов сжигание является единственно приемлемым способом их утилизации.

Применение газогенераторов. Газогенератор использует простой, хорошо проверенный способ преобразования твердого топлива в газообразное. В качестве исходного энергетического продукта могут использоваться: органическое топливо (бурый уголь, сланцы, торф и др.), древесные отходы, биобрикеты, сельскохозяйственные отходы (солома, растения и т.п.). При этом горючий газ, получаемый в газогенераторе, имеет несколько меньшую по сравнению с исходной биомассой энергию сгорания, но отличается большой универсальностью применения. На стадии газификации топливо и кислород воздуха, подаваемого в ограниченном количестве в камеру газообразования, нагреваются раскаленным реактором и вступают между собой в реакцию. В результате нее топливо разлагается на углерод, водяной пар, смолы и масла. Дальнейшая реакция между кислородом и углеродом обеспечивает температуру, достаточную для образования окиси углерода (СО) – главного горючего компонента вырабатываемого газа.

Смолы и масла разлагаются на газы, содержащие водород и некоторое количество метана. Минимальная теплотворная способность газа – 1100 ккал/м³. Газогенераторы позволяют при совместной работе с серийно выпускаемыми водогрейными или паровыми котлами, воздушными теплообменниками осуществлять теплоснабжение зданий и сооружений различного назначения, получать горячую воду, пар или горячий воздух для обеспечения технологических процессов (запарка кормов, стерилизация, сушка древесины, зерна и др.).

В качестве топлива для газогенераторов может применяться древесная щепа, кусковой торф (объем кусков – от 1 до 200 см³), смесь кускового торфа с опилками или стружками в соотношении примерно 1:1 по объему. Топливом могут быть и только опилки и стружка. Хорошим топливом для газогенераторов являются отходы гидролизной переработки древесины – лигнин, сформованный в топливный брикет (кусок).

Важной особенностью газогенераторов является их «всеядность». В них может использоваться топливо практически любой «сортности». Так, газогенераторы работают на измельченной древесине любых пород и любого качества (с корой, хвоей, подгнившая и т. п.). Существенную роль играет только влажность. Возможно применение топлива влажностью до 45–50 %.

Для наиболее эффективной работы и обеспечения максимального срока службы агрегата рекомендуется применять топливо с влажностью не выше 35 %.

Газогенератор – агрегат модульной конструкции, легко приспособляемый к работе с различными водонагревательными и воздухонагревательными устройствами. Он состоит из трех основных узлов: камеры газообразования, трубы горения и бункера для топлива.

Сухая перегонка, газификация и сжижение биомассы. Основной целью всех процессов повышения качества биомассы является превращение ее в стабильное транспортабельное топливо, способное заменить ископаемые виды топлива без использования специального оборудования для погрузочно-разгрузочных работ. Путем сочетания нагрева и частичного сжигания биологических материалов можно получить твердые, жидкие и газообразные соединения, обладающие, по крайней мере, некоторыми свойствами угля, нефти и природного газа

Производство газа для использования его в качестве топлива путем сухой перегонки и газификации угля и биомассы было начато почти 200 лет назад. Различные термические процессы повышения качества биомассы, предлагаемые в настоящее время и использовавшиеся в прошлом, имеет много общих черт. Схематически используемые процессы представлены на рисунке 3.1.

При нагревании биомассы происходит распад углеродсодержащих молекул с образованием ряда газообразных, жидких и твердых продуктов. Специфические продукты реакции определяются: температурой; тепловой мощностью; степенью измельчения; типом биомассы и присутствием неорганических веществ и катализатора.

Тепло, необходимое для осуществления этих изменений, носящих эндотермический характер, подводится или из внешнего источника, или путем введения воздуха или кислорода в реактор и сжигания части биологического материала.

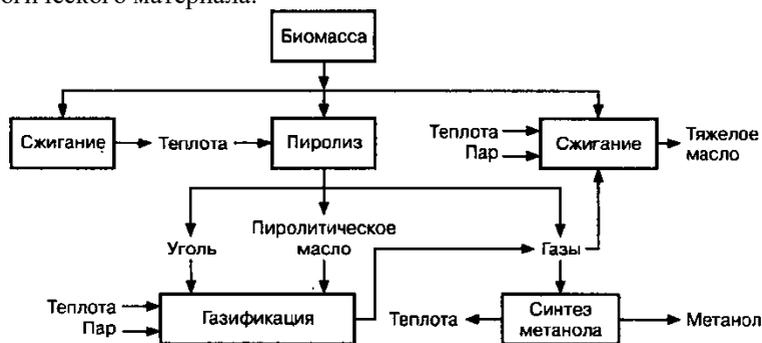


Рисунок 3.1 – Схема перегонки биомассы

Газификация и сжижение биомассы происходят как в присутствии, так и в отсутствие окислительных (O_2 , воздух) и восстановительных (CO , H_2) газов, обычно связанных с этими процессами.

Сухая перегонка. Она рассматривается отдельно как анаэробный процесс. Превращение биомассы в газы при сжигании на месте

рассматривается как газификация. Понятие «сжижение» охватывает восстановление биомассы до масел под действием восстановительных газов, полученных также из биомассы. Нагрев биомассы приводит к удалению влаги (ярко выраженный эндотермический процесс). При температуре выше 100 °С биомасса начинает разлагаться, а между 250 и 600 °С основными продуктами являются уголь и маслянистая кислая смесь дегтя и различных количеств метанола, уксусной кислоты, ацетона и следы других органических веществ. До развития нефтехимической промышленности источником этих соединений была перегонка древесины.

На рисунке 3.2 показан в качестве примера пиролиз целлюлозы. При температуре свыше 600 °С жидкие продукты пиролиза могут быть газифицированы, а свыше 800 °С газифицируется также и уголь в результате эндотермической реакции углеродсодержащих молекул с водой с образованием синтез-газа, смеси оксида углерода и водорода.

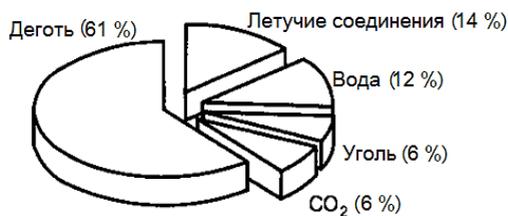


Рисунок 3.2 – Пиролиз целлюлозы

Сухая перегонка биомассы в развитых странах в промышленном масштабе не используется, за исключением производства высокоценного древесного угля. Древесный уголь обычно получают путем нагревания древесины до 350 °С в пиролитическом реакторе. Выход составляет около 35 %

топлива с энергоемкостью примерно 29 ГДж/т, то есть сохраняется около 50 % энергии древесины.

Пиролиз при 500–600 °С и давлении 2 МПа приводит к получению синтез-газа. Быстрый пиролиз сухой биомассы при 800 °С ведет к образованию олефинов, которые могут быть полимеризованы в автомобильный бензин (его заменитель).

Сырье должно быть высушено и тонко размолото. Теплота, необходимая для осуществления пиролиза, получается в результате реакции. Газы удаляются из угля в циклонном сепараторе до очистки от жидкостей и остающихся твердых частиц, а затем уголь и газы возвращаются в пиролизатор. Схематическая диаграмма этого процесса показана на рисунке 3.3.

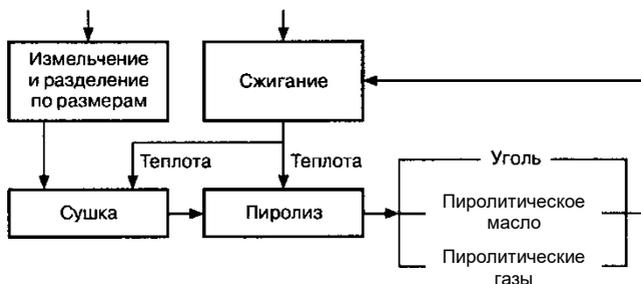


Рисунок 3.3 – Схема пиролиза сухой биомассы

В целях максимизации выхода жидкости время пиролиза сокращается до нескольких секунд. Выход пиролизического масла составляет около 40 % в расчете на сухое сырье. Пиролизическое масло не смешивается с топливной нефтью, имеет коррозионные свойства, аналогичные свойствам уксусной кислоты, и может храниться только в течение примерно двух недель вследствие продолжающихся химических реакций.

Для использования этого масла в качестве топлива необходимо специальное оборудование. Теплота сгорания пиролизического масла составляет около 53 % теплоты сгорания топливной нефти (по массе). Выход угля составляет от 20 до 50 %, содержание золы в угле – до 50 %. Газы имеют низкую теплоту сгорания и содержат до 65 % двуокиси углерода и до 8 % сероводорода.

Газификация. Газификация биомассы кислородом позволяет получить в среднем газ, состоящий из оксида углерода и водорода. Использование воздуха приводит к тому, что образующиеся горючие газы CO и H₂ разбавляются азотом N₂, и теплота сгорания полученного газообразного топлива снижается. Химический процесс газификации представляет собой сочетание химического процесса сжигания с реакциями пиролиза. Уголь, полученный в результате пиролиза, реагирует с паром или диоксидом углерода CO₂, с образованием синтез-газа.

Пиролизические масла претерпевают аналогичные реакции. При температуре выше 1000 °C единственно стабильными молекулами топливного газа являются молекулы CO и H₂. При более низких температурах стабильны молекулы этилена, метана и другие молекулы с небольшой массой.

Газификаторы классифицируют следующим образом: газификаторы восходящего тока, нисходящего тока, кипящего слоя и взвешенного потока. Схематические диаграммы газификаторов восходящего и нисходящего токов показаны на рисунке 3.4.

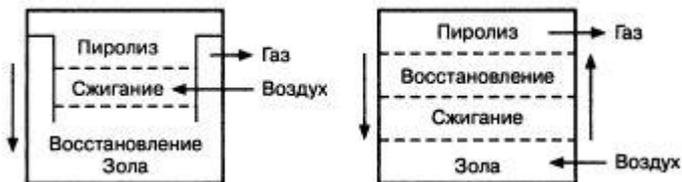


Рисунок 3.4 – Газификация способом нисходящего и восходящего потоков

Последний тип широко использовался в период Второй мировой войны на транспортных средствах, трейлерах и небольших силовых установках. Недавно газификаторы, работающие на угле, использовались на Филиппинах для различных форм транспорта. Такие газификаторы нуждаются в постоянном уходе и внимательном отношении при запуске, регулировании и техническом обслуживании.

Воздушные газификаторы нуждаются в постоянном уходе и внимательном отношении при запуске, регулировании и техническом обслуживании. Воздушные газификаторы представляются как первые биотопливные системы будущего для замены существующих бойлеров и обеспечения процессов необходимой теплотой с использованием отходов отраслей промышленности, перерабатывающих биомассу, например продовольствие и бумагу. Состав типичных газов, полученных с использованием кислородного газификатора, дает возможность химического их превращения, например в метанол и аммиак.

Сжижение биомассы. Разработаны способы превращения биомассы в жидкость, напоминающую тяжелую топливную нефть. Обычно такую горючую жидкость получают путём реакции биомассы с восстанавливающими газами (оксид углерода и водород) в присутствии катализатора. Например, древесину высушивают до влажности 4 %, размалывают в муку и смешивают с частью продуцированной нефти. В качестве катализатора добавляют карбонат натрия в количестве 5 % по массе. Смесь древесины, нефти, пара и катализатора подвергают первоначальному давлению 29 бар и нагревают до 300 °С в течение часа для обеспечения 99 %-ного превращения древесины и выхода нефти 56 %. Состав и свойства сжиженной нефти: углерод – 76,1 %, водород – 7,3 %, кислород – 16,6. Плотность – 1,1 г/см³. Энергоемкость – 31,4 ГДж/т. Схематически процесс показан на рисунке 3.5. Полученная нефть рекомендована для использования в качестве бойлерного топлива.

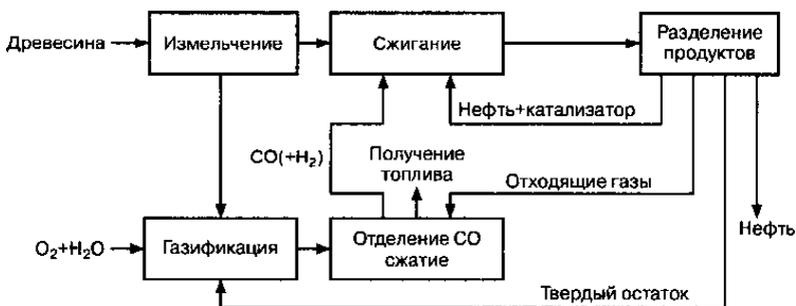


Рисунок 3.5 – Схема получения нефтяного топлива из древесины

Биохимический метод переработки биомассы. Выделяют два процесса переработки (разложения) биомассы в биотопливо:

- 1) ферментация;
- 2) анаэробное разложение.

Ферментация биомассы. Все виды растительной биомассы содержат моно- и полисахариды, служащие для аккумуляции энергии и углерода. Но промышленный характер носит получение сахара только из сахарного тростника и сахарной свеклы.

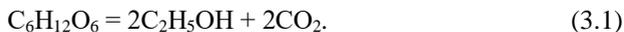
В таблице 3.1 представлены некоторые виды сахаров (мономеры, олигомеры и полимеры), полученные из различных видов растений и отходов биомассы.

Таблица 3.1 – Углеводы и источники их получения

Источник	Углевод
<i>Моносахариды и олигосахариды</i>	
Сахарный тростник и сахарная свекла	Сахароза
Отходы молочной промышленности	Лактоза, галактоза
<i>Полисахариды</i>	
Древесные и пожнивные остатки	Целлюлоза, гемицеллюлоза
Городские и бумажные отходы	Целлюлоза
Кукуруза и другие зерновые	Крахмал
Картофель	Крахмал

Выход углеводов колеблется в широком диапазоне (в расчете на сухую биомассу) и может составлять до 60 % (целлюлоза) в древесине и около 15–20 % (сахароза) в сахарном тростнике и сахарной свекле.

Ферментацией называется химический процесс, в результате которого под воздействием определенных микроорганизмов, таких как дрожжи и некоторые бактерии, из сахара получается спирт. Этот процесс может быть описан следующей химическим уравнением:



В деятельности это сложный механизм, здесь может образовываться ряд других веществ, особенно при высоких значениях pH, как это показано в таблице 3.2.

Кроме дрожжей, можно использовать другие организмы, включая некоторые виды грибов, бактерий и зеленых растений, которые в анаэробных условиях могут превращать сахара в спирт.

Некоторые микроорганизмы могут разлагать целлюлозу. Такие реакции протекают медленно, и выход спирта является низким. Кроме спирта, процессы брожения и перегонки дают остатки и смолы, которые следует удалять. Объем этих остатков в 15 раз больше объема произведенного спирта.

Таблица 3.2 – Продукты ферментации глюкозы

Продукт	Ферментировано углерода (глюкозы), %	
	pH 3,0	pH 7,6
Этанол	57,3	43,3
Двуокись углерода	30,2	24,8
Глицерон	3,10	16,0
2,3-Бутандиол	0,5	0,5
Молочная кислота	0,4	0,7
Янтарная кислота	0,3	0,5
Уксусная кислота	0,2	5,0
Муравьиная кислота	0,1	0,1

На рисунке 3.6 схематически показан типичный процесс получения топливного спирта из древесины. В литературе описано множество других вариантов с использованием иных источников углеводов, начиная от соломы и отходов бумажной промышленности, кончая городским мусором.

***Интересно знать.** В процессе получения вин превращение сахаров, содержащихся в виноградном соке, в этанол осуществляется благодаря наличию в кожице виноградин природных дрожжей. Если ферментацию проводить до полного завершения, получается сухое вино. Если ферментацию приостанавливать преждевременно, получается более сладкое вино (полусухие или полусладкие вина).*

Виски обычно получают перегонкой ферментированного суслу, которое приготавливают из зерен ячменя, ржи, овса, пшеницы или кукурузы. Характерный янтарный цвет и специфические вкусовые качества виски приобретают после выдержки их в дубовых обожженных бочках.

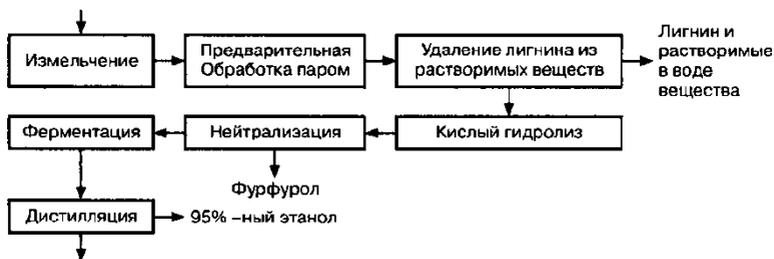


Рисунок 3.6 – Превращение древесины в спирт

Жидкое топливо из растений. *Алкоголь в топливных целях.* Лидером в данной энергетической отрасли является Бразилия: более половины бразильских автолюбителей ездили на безводном этаноле. Коммерческое производство этанола как вида топлива используется и в США.

Однако энергетическая ценность этанола составляет всего 65 % по сравнению с бензином. Поэтому для коммерческого производства топливного этанола уже сейчас понадобилось бы более 600 млн га земли, что превосходит все обработанные территории в тропиках и соответствует 40 % от всей площади обрабатываемых земель в мире. Поскольку к 2050 году эти земли должны будут прокормить 8,5–9 млрд человек, то это обрекает любые инициативы по производству биотоплива на провал.

Есть сторонники производства так называемого целлюлозного этанола – спирта, произведенного из глюкозы, образованной в результате разрушения макро-молекул целлюлозы.

Сегодня зерновое земледелие доминирует во всех развитых странах, современные сорта позволяют обеспечить соотношение между зернами и тем, что остается, равное 1:1. В ходе процесса получения целлюлозного этанола нарушаются законы термодинамики: получить больше энергии из меньшего или даже из ничего. Остатки по своей сути обладают низкой энергоёмкостью, она намного ниже, чем у сельскохозяйственных культур. Остатки порой очень трудно собирать и дорого перевозить. Кроме того, разрушить в молекуле целлюлозы прочные связи между остатками молекулы глюкозы очень сложно и энергоёмко. И, наконец, растительные остатки не являются бесполезными отходами. Вместе с переработанными растительными остатками возвращаются в почву химические соединения. Поступающие в почву вещества увлажняют её и предотвращают эрозию почвы. Кроме того, в бедных густонаселённых странах до сих пор растительные остатки используются как топливо и корм для животных.

Анаэробное разложение биомассы. Некоторые органические молекулы биомассы могут подвергаться анаэробному разложению в результате деятельности микроорганизмов. Основные продукты распада – диоксид углерода, метан и большое число микробных клеток. В природе этот процесс протекает в гнилой среде.

Крупные канализационно-очистные сооружения используют выделившийся метан как источник энергии. Небольшие очистные сооружения, имеющие реакторы, могут сжигать газ или использовать его для подогрева самих реакторов.

За последние годы была предложена технология удаления навоза на крупных предприятиях интенсивного животноводства; удаление стоков с предприятий, занимающихся переработкой биологических продуктов, например, переработкой продуктов питания; превращения биомассы в энергию. Эта технология – одна из наиболее простых среди технологий получения топлива из биомассы. В результате эта технология особенно пропагандировалась для использования в странах третьего мира, где устанавливается большое число реакторов.

На примере целлюлозы анаэробное разложение можно представить в виде следующего химического уравнения:



В 1970-х – начале 1980-х годов в Китае были построены и введены в эксплуатацию домашние биогазовые установки, которые стали идеальным воплощением возобновляемой энергетики.

Практика мелкомасштабной выработки биогаза была основана на применении доступного в бедных деревнях сырья: навоза, человеческих экскрементов, растительных остатков (стеблей, соломы, скошенной травы, листьев), мусора и сточных вод. Всё это изолировалось в кирпичных или бетонных контейнерах (автоклавах) для дальнейшего разложения. При анаэробном разложении (в этом процессе участвуют метаногенные бактерии) вырабатывается 55–70 % метана (CH_4) и 30–45 % углекислого газа (CO_2), при этом выделяемая энергия составляет 22–26 МДж/м³.

Этот энерготехнологический метод получения биогаза массово использовали в 1970-х годах сельские жители Китая использовали для приготовления пищи и освещения. Потребности семьи из пяти человек могла удовлетворить подобная биогазовая установка с автоклавом объемом 10 м³. Однако в результате реформ Дэн Сяопина распространение биогазовых установок перестало быть элементом политики Мао Цзэдуна. Уровень жизни в сельских районах Китая стал повышаться. Большая часть сохранившихся биогазовых установок была не в состоянии производить достаточно топлива даже для того, чтобы варить рис три раза в день на протяжении четырех сезонов года. Причины этого следующие. Хотя процесс выработки биогаза на первый взгляд довольно прост, на практике тяжело управлять его протеканием. Малейшая утечка может уничтожить анаэробные условия, необходимые для метаногенных бактерий. Кроме того, низкие температуры (ниже +20 °С), некачественное сырье, неправильный процесс перемешивания, а также нехватка соответствующих субстратов могут замедлить (или вообще остановить) процесс брожения, привести к

образованию нежелательных соединений углерода с азотом и высокому значению pH (высокая щёлочность среды), а также нежелательному пенообразованию. Следовательно, если не управлять надлежащим образом протеканием сложных процессов анаэробного разложения, то производство биогаза может свестись к дорогостоящим технологиям по утилизации отходов, а в итоге придется вообще отказаться от биогазовых установок.

На рисунке 3.7 приведена схема биогазовой установки для промышленной переработки отходов животноводства.

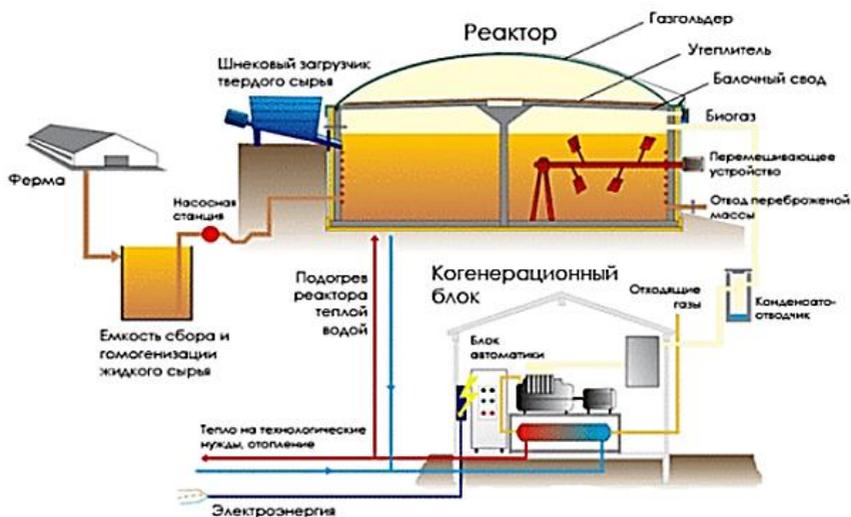


Рисунок 3.7 – Схема промышленной биогазовой установки

Современная очистная установка может быть вместимостью от 500 до 4500 м³. Крупные емкости строятся из бетона и стали. Стальные емкости покрывают изоляционным материалом, а поверхность, находящуюся в контакте с содержимым реактора, – эпоксидной смолой или аналогичным материалом. Содержимое перемешивают с помощью крыльчатки или винтового насоса, расположенных в емкости, а также путем прокачки жидкости через внешний обводной трубопровод или путем повторной циркуляции отходящих газов. Перемешивание и нагрев часто чередуются или осуществляются одновременно. Перемешивание служит в основном для предотвращения образования поверхностных корок, особенно при переработке сельскохозяйственных отходов. Нагревание необходимо потому, что при умеренной температуре окружающей среды реакция протекает слишком медленно. Нагрев до 30–45 °С одновременно обеспечивает высокую скорость реакции и в то же время позволяет

избежать чрезмерных расходов.

Для обеспечения непрерывной подачи материала устанавливается специальная емкость, а для отвода используется уровень. Небольшие очистные сооружения часто имеют систему загрузки партиями (при наличии первичных и вторичных сточных осадков). Время нахождения жидкости в реакторе обычно составляет от 10 до 30 дней. В случае трудно обрабатываемых материалов и при температурах, ниже оптимальных, эти сроки могут увеличиваться до нескольких месяцев.

Наиболее легко превращаемым в биотопливо материалом является навоз нежвачных животных, а также легкогидролизуемый крахмал, белки и моносахариды. Растительные остатки, отходы целлюлозы и навоз жвачных животных трудно разлагаются и требуют длительного нахождения в реакторе.

Загрузка реактора зависит от типа материала. Обычно поступающий материал содержит 3 % твердых частиц при максимальном их содержании 5 %.

Разлагаемая часть отходов (летучие твердые частицы) может составлять до 90 % общего количества твердых частиц, но обычно их доля составляет около 70 %.

Хранение биогаза обычно считается крайне дорогостоящим. Стоимость газометров может в 4 раза превышать капитальные затраты на строительство самого реактора.

Газ используется, прежде всего, для нагревания реактора до рабочей температуры. При наличии излишков биогаз может быть использован в силовых установках или в качестве топлива для двигателей. Для нагрева автоклавов могут также быть использованы вода, охлаждающая генераторы, или выделившееся тепло. Состав биогаза делает его малопригодным для подобного использования, так как он высокоагрессивен и приводит к разрушению большинства обычных насосов и трубопроводов. Сероводород способствует коррозии двигателя и должен быть удален; диоксид углерода и влага, содержащаяся в газе, снижает ценность топлива для двигателей внутреннего сгорания, которые не будут работать на смесях, содержащих более 45 % CO_2 . Состав газа, выделяющегося при анаэробном разложении: метан – 20–80 %, двуокись углерода – 15–16, вода – 2–3, азот – 0,5–1, сероводород – до 1 %.

Однако теплотворная способность биогаза обычно достаточна для использования его в модифицированных бойлерах, дизельных и карбюраторных двигателях, устанавливаемых, в частности, на крупных очистных сооружениях. Для транспортных средств необходимы компрессоры для снижения объема газа до приемлемого уровня.

Следует упомянуть о двух важных обстоятельствах, связанных с подготовкой и использованием биогаза при самостоятельном его изготовлении. Во-первых, смесь метана с воздухом взрывоопасна, и, во-

вторых, что более серьезно, сероводород, присутствующий в биогазе, крайне токсичен. В промышленных условиях применяются соответствующие меры безопасности, однако недостаточно осторожное обращение с этим газом может оказаться роковым.

Заключительной проблемой, связанной как с использованием энергии, так и с охраной окружающей среды, является удаление осадка из автоклава, объем которого может достигать 50–60 % исходного количества твердых частиц. Что касается коммунальных отходов, то этот объем составляет 10–15 %. Возможно, возникнет и необходимость транспортировки сброженных осадков в места отсыпки грунта и к морю. Для сокращения транспортных расходов используется отстаивание, коагуляция и другие методы обезвоживания.

Содержание меди, цинка и других токсичных металлов в сброженном осадке затрудняет его использование в качестве удобрения. Имеется предложения по переработке осадка в корм для животных; технически это осуществимо.

Агрохимический метод переработки биомассы. Многие растения содержат масла, а значит жидкие энергетические продукты, которые можно использовать как жидкое топливо для транспортных средств. Наиболее известные растения, от которых получают жидкие углеводороды (масла), это семена подсолнечника, копра кокосовых орехов (пальмовое масло), оливки, семена рапса, соевые бобы, листья эвкалипта, сок каучукового дерева.

Возможна организация сельскохозяйственных ферм по производству агрохимических топлив для легковых автомобилей, грузовиков, внедорожников, железнодорожного и водного транспорта. Но получаемые таким образом продукты по своим потребительским качествам могут быть гораздо ценнее, чем топливо и поскольку к 2050 году ожидается население от 8,5 до 9 млрд человек, то любые инициативы получения жидкого топлива из продуктов обрекаются на провал. Биотопливо не должно заменить горючее, производимое из нефти, в течение ближайших нескольких десятилетий. Некоторый интерес в настоящее время может представлять биодизельное топливо, особенно для Европы, где почти половина всех легковых автомобилей имеет дизельные двигатели.

Биотопливо на основе растительных масел для дизельных двигателей называют *биодизелем*. Нередко биодизель, или биодизельное топливо (БДТ), считают новым видом топлива, что не соответствует действительности. Этот вид моторного топлива был разработан англичанами Даффи и Патриком еще в 1853 г. Только спустя сорок с лишним лет Рудольф Дизель изобрел свой двигатель, который работал на арахисовом масле. Солярка в то время стоила дешевле, поэтому и стала на много лет основным видом топлива для дизельных двигателей. К идее использования БДТ вернулись вновь только в начале 90-х годов прошлого века.

Из растительных масел можно получать собственно топливо или биологические добавки к нему, при этом последние могут вырабатываться из масел более чем 50 масличных культур. К ним относятся, например, подсолнечное, рапсовое, соевое, хлопковое, льняное, пальмовое, арахисовое и другие растительные масла. По теплоте сгорания эти масла близки к дизельному топливу (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Сравнительные свойства некоторых растительных масел

Показатели	Масло						
	рапсовое	подсолнечное	хлопковое	соевое	пальмовое	арахисовое	льняное
Плотность при 20 °С, кг/м ³	915	924	916	923	913	917	932
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	77	63	84	25	–	81,5	29
Температура, °С: вспышки кристаллизации	305 –18	320 –16	318 –4	220 –11	295 –8	–	
Теплота сгорания (низшая/высшая), кДж/кг	37200	36981/ 39686	34000	39000	38000	37023/ 39638	37000
Цетановое число	36	33,4	41	27	–		36,6
Масло: содержание, % выход, л/кг извлечение, %	43 0,37 72,1	42 0,25 65,6		22 0,07 32,3		37 0,3 73,5	
Затраты энергии, Вт/кг	47	118,3		178,4		174	

Анализ данных таблица 3.3 доказывает, что физико-химические характеристики растительных масел существенно отличаются от дизельного топлива: повышенные плотность, вязкость, температура вспышки. По элементному составу растительные масла близки друг другу, а от нефтяного топлива отличаются присутствием кислорода (9,6–11,5 %). Недостатками растительных масел как топлива по сравнению с нефтепродуктами являются их меньшая теплота сгорания (на 7–10 %), более высокая вязкость (в 6 раз и более), повышенная склонность к нагарообразованию, низкая испаряемость и др. Поэтому большинство современных дизельных двигателей может работать на чистых растительных маслах непродолжительное время.

По молекулярному составу БДТ близко к дизельному топливу. Исходя из стоимости, доступности и физико-химических характеристик, наиболее подходящим для производства БДТ является рапсовое масло; оно может быть использовано в качестве основы или компонента топлива. Простой и

доступный способ использования рапсового масла в виде добавок – разбавление его дизельным топливом, в результате получается так называемая биодизельная смесь. Такие композиции называют еще «биодит» (смесевое топливо). Установлено, что с увеличением содержания рапсового масла в биодизельной смеси продолжительность ее сгорания увеличивается, а при содержании масла более 60 % процесс сгорания не успевает закончиться к моменту открытия выпускного клапана двигателя. Для уменьшения общей продолжительности сгорания в биодизельную смесь вводят активаторы сгорания, например органическое соединение железа – ферроцен.

Смесевое топливо, по сравнению с метиловым эфиром рапсового масла, имеет преимущества: несложная технология получения, высокая стабильность в хранении и растворении на молекулярном уровне. Сравнительные физико-химические характеристики рапсового масла, смесевого и дизельного топлив приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Сравнительная физико-химическая характеристика топлива

Показатели	Рапсовое масло	Смесь рапсового и дизельного топлива (75:25)	Дизельное топливо (ГОСТ 305–82 Л/З)
Нижшая теплота сгорания, МДж/кг	37,2	38,3	41,8
Плотность при 20 °С, кг/м ³	915	890	860/840
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	78	38,2	3,6/1,8–5
Температура, °С:			
помугнения	–9	–9	–5/–25
застывания	–18	–16	–10/–35
воспламенения	593	583	543
Цетановое число	41	42	45
Йодное число на 100 г, г	9,7–10,3	9	6
Кислотность, мг КОН/100 см ³	6,1	6	5
Содержание по массе, %:			
углерода	78,3	80,3	86,4
водорода	12,8	12,95	12,1
кислорода	8,895	6,52	0
Коксуемость 10 % остатка, %	0,43	0,4	0,3
Массовая доля серы, %	0,05	0,16	0,5
Содержание фактических смол на 100 см ³ , мг	–	–	40/30

По сравнению с дизельным топливом плотность чистого рапсового масла выше на 9 %, вязкость – в 25 раз, содержание серы меньше в 10 раз, температура застывания выше на 17 °С по сравнению с зимним топливом и на 10 °С ниже, чем летнего дизельного. Смесевое топливо по физико-

химическим показателям занимает промежуточное положение. Для приготовления смесового БДТ (75 % рапсового масла и 25 % дизельного топлива) требуется 250 кг дизельного топлива энергоемкостью 10,5 ГДж. В итоге получается 1 т смесового топлива энергоемкостью 39,8 ГДж. Указанная смесь признана оптимальной в условиях России.

3.2 Гидроэнергетические ресурсы

Примерно 23 % солнечной радиации уходят на испарение воды, выпадающей затем в виде дождя и снега. Образно говоря, Солнце действует как гигантский насос, выкачивающий воду из моря и сбрасывающий ее на сушу, с которой она снова стекает в море. Таким образом, **движение воды**, вызываемое солнечной энергией, представляет собой возобновляемый ресурс. Движущаяся вода является дешевым источником энергии. Когда вода течет или падает с определенной высоты, ее потенциальная энергия уменьшается; при этом совершается работа. Такой источник энергии выгоден тем, что он действует постоянно, не требуя топлива.

Вода была первым источником энергии, вероятно, первой машиной, в которой человек использовал энергию воды, была примитивная водяная турбина. Свыше 2000 лет назад горцы на Ближнем Востоке уже пользовались водяным колесом в виде вала с лопатками (рисунок 3.8). Суть устройства сводилась к следующему. Поток воды, отведенный из ручья или речки, давит на лопатки, передавая им свою кинетическую энергию. Лопатки приходят в движение, а поскольку они жестко скреплены с валом, вал вращается. С ним в свою очередь скреплен мельничный жернов, который вместе с валом вращается по отношению к неподвижному нижнему жернову.

Именно так работали первые «механизированные» мельницы для зерна. Но их сооружали только в горных районах, где есть речки и ручьи с большим перепадом и сильным напором. На медленно текущих потоках водяные колеса с горизонтально размещенными лопатками малоэффективны.

Шагом вперед было *водяное колесо Витрувия* (I в. н. э.), схема которого представлена на рисунке 3.9. Это вертикальное колесо с большими лопатками и горизонтальным валом. Вал колеса связан деревянными зубчатыми колесами с вертикальным валом, на котором сидит мельничный жернов. Подобные мельницы и сегодня можно встретить на Малом Дунае; они перемалывают в час до 200 кг зерна.

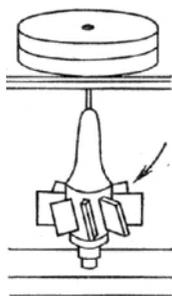


Рисунок 3.8 – Схема простого водяного колеса с вертикальным валом (стрелка указывает направление потока воды)

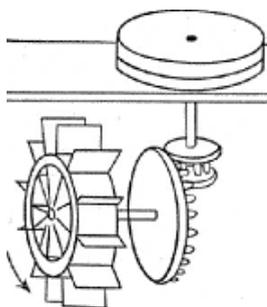


Рисунок 3.9 – Колесо Витрувия (стрелка указывает направление потока воды)

Почти полторы тысячи лет после распада Римской империи водяные колеса служили основным источником энергии для всевозможных производственных процессов в Европе, заменяя физический труд человека. До середины XIX века для этого применялись водяные колеса, преобразующие энергию движущейся воды в механическую энергию вращающегося вала. Позднее появились более быстроходные и эффективные *гидротурбины*.

До конца XIX века энергия вращающегося вала использовалась непосредственно, например, для размола зерна на водяных мельницах, для приведения в действие кузнечных мехов и молота. Но когда наступил золотой век электричества, произошло возрождение водяного колеса, правда, уже в другом обличье (в виде водяной турбины). Электрические генераторы, производящие энергию, необходимо было вращать, а это вполне успешно могла делать вода, тем более что многовековой опыт у нее уже имелся. Преимущества гидроэлектростанций очевидны:

- постоянно возобновляемый самой природой запас энергии;
- простота эксплуатации;
- отсутствие загрязнения окружающей среды.

Принцип работы ГЭС достаточно прост. Цепь гидротехнических сооружений обеспечивает необходимый напор воды, поступающей на лопасти гидротурбины, которая приводит в действие генераторы, вырабатывающие электроэнергию.

Максимальная мощность, развиваемая потоком падающей воды без учета потерь напора,

$$N_t = g\rho H_t Q,$$

где g – ускорение свободного падения;
 ρ – плотность воды;

H_t – теоретический напор, высота падения потока воды;

Q – объемный расход потока воды.

Необходимый напор воды образуется посредством строительства плотины и, как следствие, концентрации реки в определенном месте, или деривацией – естественным током воды. В некоторых случаях для получения необходимого напора воды используют совместно и плотину, и деривацию (рисунок 3.10).

С точки зрения превращения энергии, гидроэнергетика – технология с очень высоким КПД, зачастую превышающем более чем в два раза КПД обычных теплоэлектростанций. Причина в том, что объем воды, падающий вертикально, несет в себе большой заряд кинетической энергии, которую можно легко преобразовать в механическую (вращательную) энергию, необходимую для производства электричества.

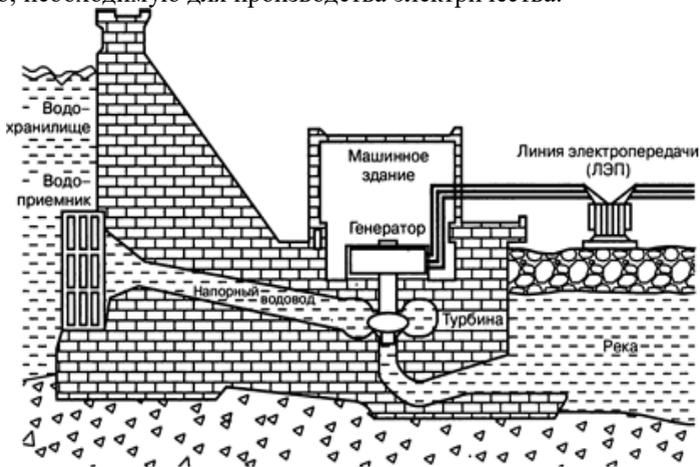


Рисунок 3.10 – Схема плотины ГРЭС

Оборудование для гидроэнергетики достаточно хорошо разработано, относительно простое и очень надежное. Поскольку никакая теплота в процессе не присутствует (в отличие от процесса горения), оборудование имеет продолжительный срок службы, редко случаются сбои. Срок службы ГЭ – более 50 лет. Многие станции, построенные в двадцатые годы XX века, – первый этап расцвета гидроэнергетики – все еще в действии.

Так как всеми существенными рабочими процессами можно управлять и контролировать их дистанционно через центральный узел управления, непосредственно на месте требуется небольшой технический персонал. В настоящее время накоплен уже значительный опыт по работе гидроэлектростанции мощностью от 1 кВт до сотен мегаватт.

Затраты на строительство ГЭС велики, но они компенсируются тем, что не приходится платить (во всяком случае, в явной форме) за источник энергии – воду. Однако строительство ГЭС на равнинных реках ведет к затоплению пойменной (наиболее плодородной) территории. Следовательно, наносится ущерб сельхозугодиям, а также рыбохозяйственному комплексу.

Малые гидроэлектростанции обычно обладают всеми преимуществами больших ГЭС, но при этом предоставляют возможность подавать энергию децентрализованно. Кстати, малые ГЭС выгодно отличаются и отсутствием некоторых недостатков, присущих большим станциям. Это, например, уменьшение или полное отсутствие негативного влияния на окружающую среду.

Малая энергетика позволяет каждому региону использовать собственные ресурсы. На сегодняшний день в мире эксплуатируется несколько тысяч малых гидроэлектростанций. Малые станции производят электроэнергию в тех случаях, когда уровень воды в реке достаточен для этого. Если малая гидроэлектростанция дополнена аккумуляторной системой, то существует возможность накопления полученной энергии, что помогает избежать перебоев в подаче электричества. Особый интерес малая гидроэнергетика представляет для развивающихся стран, поскольку не требует сложного и дорогостоящего оборудования.

Анализ строительства малых ГЭС в Беларуси был проведен для притоков первого и второго порядков бассейнов рек Западная Двина, Неман, Виляя, Припять и Западный Буг. В перспективе на притоках перечисленных рек могут быть построены малые ГЭС мощностью около 50 тыс. кВт и среднегодовой выработкой электроэнергии 160 млн кВт·ч. Представляется также целесообразным строительство каскада ГЭС на достаточно многоводных реках, таких как Западная Двина, Неман, Днепр. Так, практически без затопления прилегающих к руслу земель может быть сооружен каскад гидроэлектростанций на участке Верхнего Днепра, обеспечивающий ежегодную выработку до 20 млн кВт·ч электроэнергии.

На прудах и малых водохранилищах, напор на которых обычно 2–5 м, а расходы воды в пределах 0,5–1,0 м³/с, возможно применение гидроагрегатов малой мощности (микроГЭС). Такие микроГЭС мощностью 10–50 кВт могут строиться на существующих гидротехнических сооружениях водоемов мелиоративных и водохозяйственных систем. По ориентировочной оценке общая мощность микроГЭС на водохозяйственных системах республики может составить до 1 МВт.

Мировой уровень стоимости 1 кВт установленной мощности на микроГЭС составляет 2000–2500 долларов США. Стоимость оборудования, изготовленного в странах СНГ, – ниже и составляет 250–800 долларов США на 1 кВт.

Наиболее значительный объем электроэнергии может быть получен при строительстве каскада ГЭС на реках Западная Двина и Неман. Эти гидроэлектростанции при относительно небольшом затоплении пойменной территории позволят получить до 800 млн кВт в год электроэнергии при установленной мощности около 240 МВт.

3.3 Энергия ветра

Давление воздуха распределяется в атмосфере неодинаково, и Солнце с разной силой обогревает различные участки земной поверхности. В результате перепада давлений воздуха возникают ветры.

Оценка **энергии ветра** в глобальном масштабе внушительна – порядка $1 \cdot 10^5$ Вт, однако большая часть энергии сосредоточена в ветрах, дующих на заоблачных высотах, и, следовательно, недоступна для использования на поверхности суши. Устойчивые приповерхностные ветры обладают мощностью порядка $1 \cdot 10^{12}$ Вт, некоторая её часть может быть использована ветряками.

Чтобы охарактеризовать ветер, нужно указать его направление и скорость (силу), которая по шкале Бофорта измеряется в баллах (таблица 3.5).

Люди давно задумывались над тем, как использовать силу ветра для своих нужд. Еще в древние времена человек заставил ветер двигать лодки и корабли, переправлять по морю людей и грузы.

Таблица 3.5 – 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 неприятное ощущение	8,0–10,7
6	Сильный ветер	Слышен шум ветра	10,8–13,8
7	Крепкий ветер	Качаются небольшие 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 крыш	20,8–24,4
10	Буря (шторм)	Выворачивает деревья	24,5–28,4

11	Сильная буря (жесткий шторм)	Разрушает постройки	28,5–32,6
12	Ураган	Опустошает обширные местности	Свыше 32,6

На суше энергию ветра не использовали так широко, как на море, хотя достоверно известно о существовании ветряных колес за тысячи лет до нашей эры. Например, в районе Александрии сохранились остатки ветряных мельниц, которым не меньше трех тысяч лет. В Европу первые сведения о ветряных мельницах принесли крестоносцы. Во Франции ветряные колеса впервые появились в 1105 г., в Англии – в 1143 г. В Голландии ветряки достигли наибольшего технического совершенства, где их использовали не только для помола зерна, но и для того, чтобы пилить древесину, ткать полотно, давить масло, молотить табак и пряности.

В начале 1970-х годов человечеству пришлось вспомнить о ветряных двигателях. Заставил это сделать разразившийся энергетический кризис, в результате которого взлетели вверх цены на углеводородное топливо, прежде всего нефть. Наибольший интерес к ветровой энергии как возобновляемому источнику энергии проявили Германия, США и Дания. Немцы, в частности, удачно использовали особенности климата на севере страны (побережье моря), где ветры, довольно сильные, дуют постоянно. Действительно, установка с размахом лопастей около 100 м, размещенных на башне высотой порядка 60 м, при оптимальной скорости ветра дает мощность 2,5 тыс. кВт.

Как сектор энергетики, **ветроэнергетика** развивается сейчас более чем в 50 странах мира.

Целесообразность использования энергии ветра определяется его скоростью. В Беларуси среднегодовая скорость ветра по данным Гидромета не превышает 4,1 м/с. Среднемесячные максимальные значения скорости ветра изменяются от 4,6 до 4,9 м/с, причем максимальные среднемесячные значения достигаются зимой, а минимальные – летом.

Оценка энергетического потенциала ветра производится с помощью значений удельной мощности ветрового потока. Беларусь в осенне-весенний период включает две зоны: с удельной мощностью ветрового потока 75–125 и 125–250 Вт/м², а в летний период основная зона обладает потенциалом менее 75 Вт/м².

Подход к оценке перспективности использования энергии ветра базируется на выводе, что коммерческое применение ветроэнергетики становится выгодным при среднегодовых скоростях ветра не менее 5 м/с, согласно другому источнику – 5,3 м/с, третьему – 6,2 м/с. Следовательно, Беларусь не входит в разряд зон с высоким потенциалом

скоростей ветра и не обладает достаточным энергетическим потенциалом для создания мощных ветроэлектростанций. Вероятно, использование ветроэлектрических установок (ВЭУ) в республике может быть эффективным для автономных потребителей в сельской местности с достаточным ветроэнергетическим потенциалом. Основными направлениями использования ВЭУ в ближайшей перспективе может быть их применение в качестве привода насосных установок и в целях подогрева воды в сельскохозяйственном производстве. Эти области применения характеризуются минимальными требованиями к качеству электрической энергии (стабильности частоты и напряжения), что позволяет резко упростить и удешевить ВЭУ. Особенно перспективным представляется использование ВЭУ в сочетании с малыми ГЭС для прокачки воды.

Строить ВЭС за рубежом на данный момент времени заставляет не текущая рыночная конъюнктура, а экологические соображения и взгляд в будущее – дефицит традиционных энергоносителей, прежде всего углеводородных, в ближайшие десятилетия неизбежен.

Ветрогенератор (ветроэлектрическая установка или ветроэлектростанция) – устройство для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую. Устройство ветроэлектрической установки в упрощенном виде представлено на рисунке 3.11. Основными элементами ветряной энергетической установки (СВЭУ) является: ветровое колесо, электрогенератор и система управления электрической энергией в зависимости от изменения силы ветра и скорости вращения ветрового колеса. Система управления необходима для удовлетворения требованиям к частоте и напряжению электрической энергии. Одним из способов управления электрической ВЭУ является выпрямление переменного электрического тока ВЭУ, а затем его преобразование в переменный ток с заданными стабилизированными параметрами.

Ветрогенераторы можно разделить на две категории: промышленные и домашние (для частного использования). *Промышленные ветроэлектростанции* устанавливаются государством или крупными энергетическими корпорациями. Как правило, их объединяют в сети, в результате получается

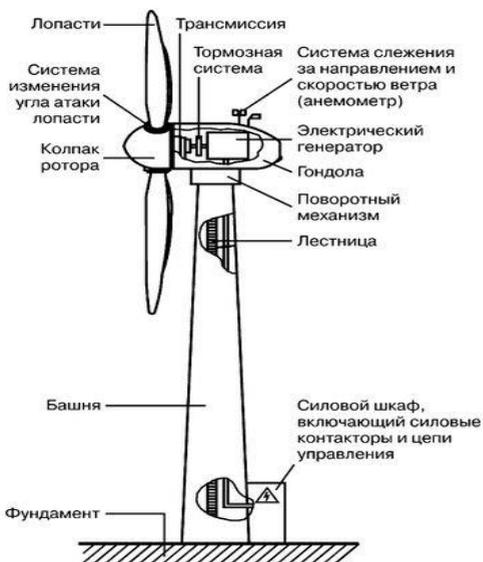


Рисунок 3.11 – Устройство ветроэлектрической установки

Беларусь бедна ветровыми ресурсами (рисунки 3.12, 3.13). Средняя скорость ветра в 4 м/с характерна для большинства промышленных районов. Малая скорость ветра означает малую мощность ветрового потока. И, кроме того, в Беларуси значительное количество безветренных дней. Поэтому ВЭУ в Беларуси в основном будут работать лишь треть или половину времени.

Ветрообильные районы – это, как известно, прибрежные территории, расположенные вдоль морей и крупных озер.

Мощность ветрового колеса можно определить по формуле

$$N_{а\acute{e}} = \hat{E}_1 m_{\tau} v_{\acute{a}}^2 / 2, \quad (3.3)$$

где K_M – коэффициент мощности, характеризующий эффективность использования энергии ветрового потока и зависящий от конструкции ветрового колеса;

v_B – скорость ветра, м/с;

m_{τ} – массовый расход воздуха кг/с,

$$m_{\tau} = \rho \frac{\pi D_k^2}{4} v_{\acute{a}}; \quad (3.4)$$

D_k – диаметр колеса, м.

ветряная электростанция. Ее основное отличие от традиционных (тепловых, атомных) – полное отсутствие как сырья, так и отходов. Единственное важное требование для ВЭС – высокий среднегодовой уровень ветра. Мощность современных ветрогенераторов достигает 6 МВт.

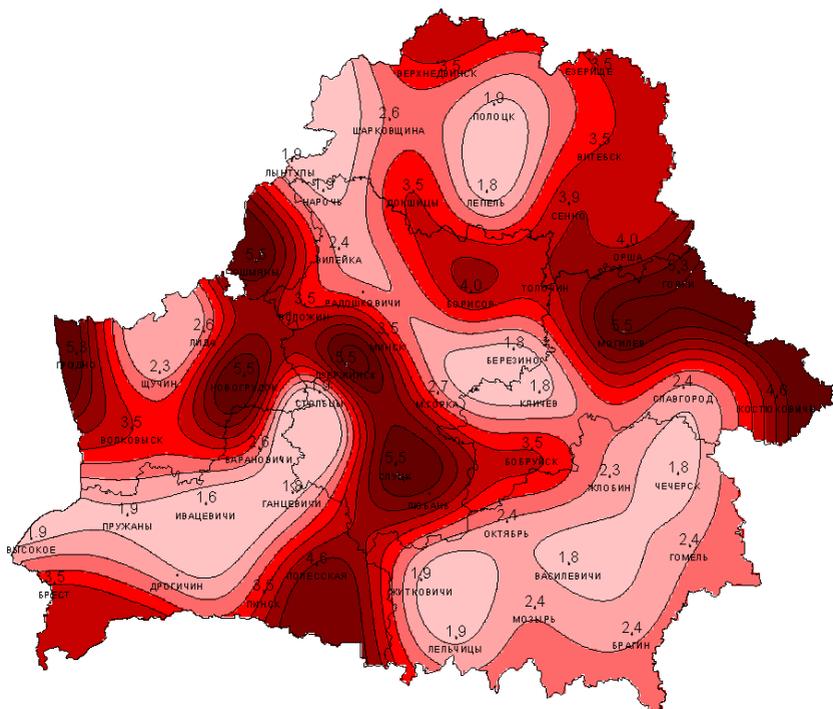


Рисунок 3.13 – Карта-схема ветроэнергетического потенциала территории Республики Беларусь на высоте установки ветроротора 100 м от поверхности земли

Время года. В большинстве регионов наблюдаются значительные сезонные изменения ветровых потоков. Причем в зимние месяцы скорость ветра обычно выше, чем летом. Дневные изменения скорости ветра наблюдаются, как правило, вблизи морей и больших озер.

Утром солнце нагревает землю быстрее, чем воду, поэтому ветер дует в направлении побережья. Вечером же земля остывает быстрее, чем вода, поэтому ветер дует от побережья.

Характер земной поверхности. Холмы или горные хребты, находящиеся на открытом ландшафте, обычно считаются превосходным местом для ветряка. На холмах скорость ветра выше по сравнению с окружающей равнинной территорией. Необходимо помнить, что ветер может менять свое направление прежде чем достигнет холма, так как область высокого давления фактически расширяется на некотором расстоянии перед холмом. Также необходимо помнить, что турбулентность, значение которой резко увеличивается в случае крутого холма или его неровной поверхности, может свести на нет преимущества более высокой скорости ветра (рисунок 3.14).

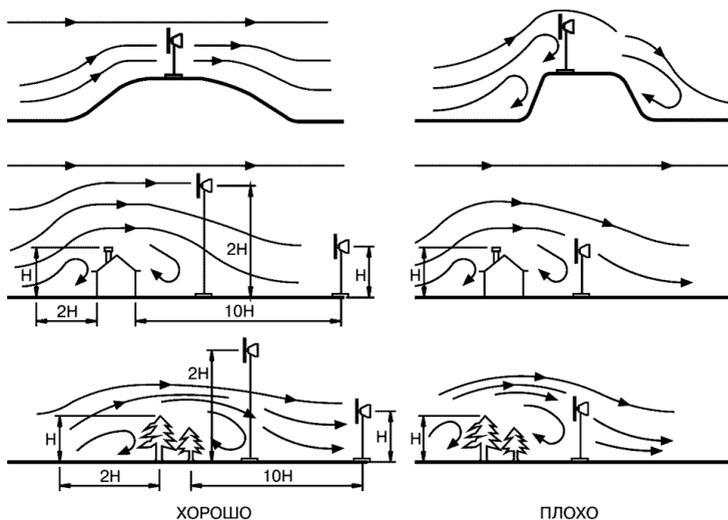


Рисунок 3.14 – Хорошие и плохие варианты размещения ветроэлектростанции

Секундная энергия, или мощность потока, пропорциональна кубу скорости, т. е. если скорость ветра увеличилась, например, в два раза, то энергия воздушного потока возрастает в $2 \times 2 \times 2 = 8$ раз. Мощность, развиваемая ветродвигателем, изменяется также пропорционально квадрату диаметра ветроколеса, т. е. при увеличении диаметра в 2 раза, мощность при той же скорости ветра увеличивается в 4 раза.

Однако в механическую работу можно превратить только часть энергии потока, протекающего через ветроколесо. Другая часть энергии теряется на трение воздушных частиц и различные потери, так как ветроколесо оказывает сопротивление движению воздушных частиц. Кроме того, значительная часть энергии содержится в воздушном потоке, уже прошедшем через ветроколесо. Это объясняется тем, что поток за ветроколесом также имеет некоторую скорость.

Следует также помнить, что чем меньше число лопастей, тем при прочих равных условиях ветроколесо имеет большее число оборотов. Вот почему малолопастные ветродвигатели называются быстроходными. Быстроходность является одним из серьезных преимуществ этих ветродвигателей, так как делает более простой передачу мощности таким быстроходным машинам, как, например, электрический генератор. Кроме того, *быстроходные ветродвигатели*, как правило, более легкие, чем тихоходные. Они имеют более высокий коэффициент использования энергии ветра. Однако у них имеется и недостаток, заключающийся в том, что их начальный момент трогания, т. е. вращающий момент, развиваемый

на неподвижном ветроколесе, при одинаковых диаметрах ветроколес и скорости ветра в несколько раз меньше, чем у тихоходных (многолопастных) ветроколес. Это очень важно для эксплуатации, так как возможное число часов работы ветродвигателя увеличивается.

Крыльчатые ветродвигатели работают за счет аэродинамических сил, возникающих на лопастях ветроколеса при набегании на них воздушного потока. Так же, как и на крыльях самолета, на крыльях ветроколеса возникают подъемная сила и сила сопротивления поверхности. Подъемная сила и создает вращающий момент на ветроколесе.

Для того чтобы лучше использовать энергию ветра, т. е. получить большую мощность, крыльям придают обтекаемые, аэродинамические профили, а углы заклинения делают переменными вдоль лопасти (на конце – меньше, а ближе к валу – большие углы).

Важно иметь в виду, что если лопасти выполнены одинакового качества и профиля, то мощность ветродвигателя практически очень мало зависит от числа лопастей. Ведь мощность ветродвигателя, как и любого другого двигателя, определяется произведением развиваемого двигателем вращающего момента M на угловую скорость ω . Момент, развиваемый ветродвигателем, с уменьшением числа лопастей падает, однако примерно в той же пропорции возрастает число оборотов, т. е. угловая скорость. Таким образом, произведение $M \times \omega$ остается почти постоянным, мало зависящим от числа лопастей.

Кроме ветродвигателей крыльчатого типа, известны *карусельные, роторные и барабанные ветродвигатели*. Однако ввиду их малой эффективности и громоздкости, а также вследствие того, что они очень тихоходны, эти двигатели не нашли применения в практике.

Ветрогенераторы современного типа имеют трехлопастное ветровое колесо, направляемое на ветер с помощью специальных двигателей, управляемых компьютерами. Высота промышленного ветрогенератора – от 60 до 100 м и выше. ВЭУ оснащены системой автоматической остановки на случай слишком сильных ветров (20–25 м/с).

Анализ ветрового потенциала Беларуси показал, что в настоящее время и в ближайшей перспективе наиболее актуальными являются следующие направления развития ветроэнергетики:

- малая автономная ветроэнергетика (с суммарной номинальной мощностью до 100 кВт на базе ВЭУ номинальной мощности 30 кВт, снабженных системами аккумулирования электроэнергии);

- автономная ветроэнергетика средней мощности (с суммарной мощностью 0,1–1 МВт на базе ВЭУ номинальной мощности 100–800 кВт, работающих параллельно с дизельными электростанциями, малыми ГЭС или в составе ветродизельных и гибридных энергетических комплексов;

- сетевая ветроэнергетика (с суммарной номинальной мощностью от 2 МВт и выше на базе ВЭУ номинальной мощности 1 МВт и более.

3.4 Солнечная энергия

Внутри Солнца происходят термоядерные реакции превращения водорода в гелий и ежесекундно 4 млрд кг материи преобразуется в энергию, излучаемую Солнцем в космическое пространство в виде электромагнитных волн различной длины. Атмосфера Земли отражает 35 % солнечной энергии обратно в космос, а остальная энергия расходуется на нагрев атмосферы земной поверхности, испарительно-осадочный цикл и образование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра.

Среднегодовое количество солнечной энергии, поступающей за 1 день на 1 м² поверхности Земли, колеблется от 7,2 МДж/м² на севере до 21,4 МДж/м² в пустынях и тропиках. Проходя через атмосферу Земли, **солнечное излучение** ослабляется вследствие отражения, рассеяния и поглощения частицами пыли и молекулами газа. Ту часть излучения, которая беспрепятственно проходит через атмосферу и попадает непосредственно на поверхность Земли, называют прямым солнечным излучением. Часть солнечного излучения, которая поглощается частицами пыли и молекулами газа, затем вновь излучается и попадает на поверхность Земли, не имея определенного направления, называют рассеянным солнечным излучением. Совокупное излучение, попадающее на поверхность Земли – это суммарное солнечное излучение. В наших широтах суммарное солнечное излучение при оптимальных условиях (безоблачное, ясное небо, середина дня) составляет максимум 1000 Вт/м². Использование лишь 0,01 % общего потока солнечной энергии могло бы полностью обеспечить мировые потребности в энергии. Подсчитано, что за год от Солнца на Землю поступает в 10 раз больше энергии, чем ее запасено во всех разведанных ископаемых энергоносителях.

Поступающая на Землю солнечная энергия может быть использована как в прямом, так и в косвенном виде. В прямом виде поступающая **солнечная энергия** преобразуется в термическую или электрическую энергию. В косвенном виде солнечная энергия, поступающая на Землю, используется в виде теплоты окружающей среды, а также в виде энергии: морской воды; движения воды в реках; ветра; приливов и отливов; при сжигании биомассы.

Сегодня для преобразования солнечного излучения в полезный для нас вид энергии мы располагаем двумя возможностями: использовать солнечную энергию как источник теплоты; преобразовать непосредственно солнечную энергию в электрический ток.

Солнечные коллекторы. Простейшим способом утилизации солнечной энергии является использование ее для нагрева. Все знают, как нагреваются

на солнце различные предметы. И чем темнее поверхность, тем больше нагрев. Именно на этом и основан принцип работы солнечного коллектора: солнечное тепло поглощается темной поверхностью (абсорбером) и передает теплоносителю. Далее полученное тепло либо накапливается в специальном теплоаккумуляторе, либо сразу используется для нагрева.

Принципы солнечного отопления известны на протяжении тысячелетий. Люди нагревали воду при помощи Солнца до того как ископаемое топливо заняло лидирующее место в мировой энергетике. Солнечный коллектор – наиболее известное приспособление, непосредственно использующее энергию Солнца, они были разработаны около двухсот лет назад. Можно выделить несколько основных типов солнечных коллекторов: плоские, вакуумные, концентраторы.

В плоских солнечных коллекторах за плоским абсорбером (чаще всего это металлическая пластина с темным поглощающим покрытием) находится система трубок, по которым пропускается теплоноситель. Чтобы предотвратить потери энергии в окружающую среду обратная сторона и торцы такого коллектора закрываются теплоизолирующим материалом.

Фронтальная часть накрывается стеклом. Солнечный свет практически беспрепятственно проходит через стекло, а вот инфракрасное излучение от нагретого абсорбера назад не проникает. Тепло как бы запирается внутри коллектора, работает парниковый эффект. Фронтальное стекло также в некоторой степени препятствует охлаждению коллектора за счет тепловой конвекции воздуха.

Самые качественные плоские солнечные коллекторы могут нагревать теплоноситель до температуры более 150 °С, но в большинстве конструкций температура не поднимается выше точки кипения воды. Поэтому считается, что плоские коллекторы можно оставлять на долгое время без присмотра.

Вакуумные коллекторы обязаны своим названием способу накопления тепла. В них теплопоглощающие элементы запаяны в стеклянные трубки, в которых создан вакуум. Стекло препятствует выходу инфракрасного излучения от нагретых элементов, а вакуум – идеальная среда для теплоизоляции, т. к. в нем охлаждение из-за конвекции просто отсутствует.

Вакуумные коллекторы эффективно работают даже в сильные морозы и в пасмурную погоду, а на солнце они способны нагревать теплоноситель до 300 градусов. Именно из-за этого системы с вакуумным коллектором обычно гораздо сложнее. Они включают в себя специальные контроллеры и клапаны, обеспечивающие сброс избыточного тепла при перегреве.

И, наконец, коллекторы-концентраторы представляют собой отдельный класс устройств, которые чаще всего используют, когда необходимо получить очень высокую температуру. Простейшим примером концентратора может служить обычная линза. Наверное, все мы, будучи

детьми, выжигали с ее помощью узоры на лавочках во дворе. Правда, в современных концентраторах линзы практически не используются. Там, в основном, применяют зеркала. Принцип тот же – солнечные лучи сводятся в одну точку параболическим зеркалом. В фокусе концентратора температура составляет несколько сотен градусов. Нагретый до такой высокой температуры теплоноситель используется для получения пара, который вырабатывает энергию уже в паровой турбине.

Плоский солнечный коллектор. Это самый распространенный вид солнечных коллекторов, используемых в бытовых водонагревательных и отопительных системах. Этот коллектор представляет собой теплоизолированную остекленную панель, в которую помещена пластина поглотителя. Пластина поглотителя изготовлена из металла, хорошо проводящего тепло, – меди или алюминия. Чаще всего используют медь, т. к. она лучше проводит тепло и меньше подвержена коррозии, чем алюминий. Пластина поглотителя обработана специальным высокоселективным покрытием, которое лучше удерживает поглощенный солнечный свет. Это покрытие состоит из очень прочного тонкого слоя аморфного полупроводника, нанесенного на металлическое основание, и отличается высокой поглощающей способностью в видимой области спектра и низким коэффициентом излучения в длинноволновой инфракрасной области.

Благодаря остеклению (в плоских коллекторах обычно используется матовое, пропускающее только свет, стекло с низким содержанием железа) снижаются потери тепла. Дно и боковые стенки коллектора покрывают теплоизолирующим материалом, что еще больше сокращает тепловые потери. Устройство плоского солнечного коллектора показано на рисунке 3.15. Рассмотрим принцип действия. Солнечный свет проходит через остекление и попадает на поглощающую пластину, которая нагревается, превращая солнечную радиацию в тепловую энергию. Это тепло передается теплоносителю – воде или антифризу, циркулирующему через солнечный коллектор. Теплоноситель нагревается и отдает затем тепловую энергию через теплообменник воде в емкостном водонагревателе. В нем горячая вода находится до момента ее использования.

Прямоточный вакуумированный трубчатый солнечный коллектор. Рассмотрим устройство коллектора. В каждую вакуумированную трубку встроен медный поглотитель с гелиотитановым покрытием, гарантирующим высокий уровень поглощения солнечной энергии и малую эмиссию теплового излучения.

Вакуумированное пространство позволяет практически полностью устранить теплопотери. На поглотителе установлен коаксиальный трубчатый прямоточный теплообменник, выходящий в коллектор. Протекающий через него теплоноситель забирает тепло от поглотителя.

К преимуществам этой системы можно отнести непосредственную передачу тепла воде, что позволяет сократить теплопотери. Так как полный коэффициент потерь в вакуумном коллекторе мал, теплоноситель в нем можно нагреть до температур 120–160 °С.

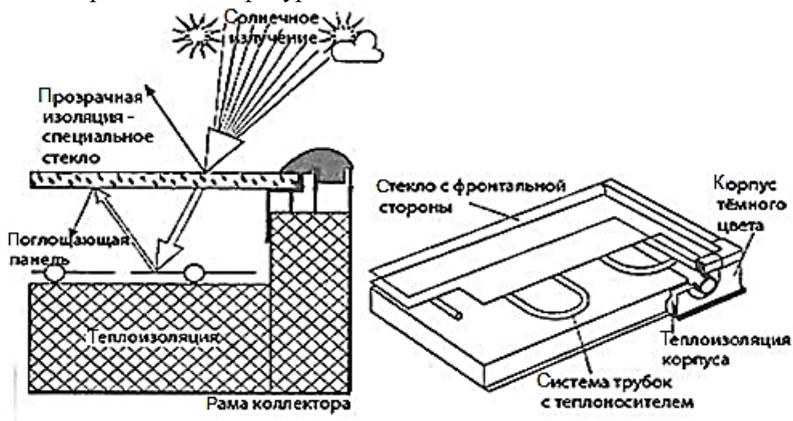


Рисунок 3.15 – Устройство плоского солнечного коллектора

Принцип действия таков. Солнечная радиация проходит сквозь вакуумированную стеклянную трубку, попадает на поглотитель и превращается в тепловую энергию. Тепло передается жидкости, протекающей по коаксиальному трубчатому прямоточному теплообменнику. Каждая трубка теплообменника соединена с накопительным баком так называемым «коллектором» системой из двух медных труб. По одной из них нагретая вода передается в бак-накопитель, по другой – холодная вода из бака-накопителя поступает на нагрев в вакуумированные трубки.

Вакуумированный трубчатый солнечный коллектор с тепловой трубкой. Его конструкция похожа на конструкцию термоса: одна стеклянная/металлическая трубка вставлена в другую большего диаметра. Между ними – вакуум, которой является отличным теплоизолятором, но не меняет излучающую способность нагретого тела и препятствует конвекционной передаче тепла. ИК-излучение задерживается стеклом трубки.

В каждую вакуумированную трубку встроена медная пластина поглотителя с гелиотитановым покрытием, гарантирующим высокий уровень поглощения солнечной энергии и малую эмиссию теплового излучения. Под поглотителем установлена тепловая труба, заполненная испаряющейся жидкостью. С помощью гибкого соединительного элемента

тепловая труба подсоединена к конденсатору, находящемуся в теплообменнике типа «труба в трубе». Соединение относится к так называемому «сухому» типу, что позволяет поворачивать или заменять трубки и при заполненной установке, находящейся под давлением.

Гелиосистемы состоят из солнечного коллектора, системы управления с насосами и бака-аккумулятора (рисунке 3.16).

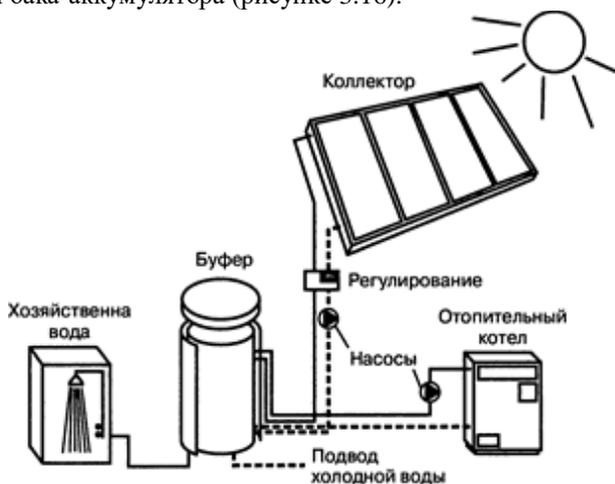


Рисунок 3.16 – Устройство гелиоустановки

Задачи, решаемые гелиосистемой:

- получение альтернативного источника неограниченной, экологически чистой бесплатной энергии;
- обеспечение потребностей в горячей воде для бытовых нужд (даже в местах отсутствия магистрального водопровода);
- полное или частичное обеспечение потребностей отопления (осенне-весенний период – до 80, а зимний – до 50 %);
- снижение уровня потребления традиционных энергоресурсов, а следовательно, и финансовых затрат.

В коллекторе (*лат.* накопитель) медная пластина аккумулирует солнечную энергию. Они рассмотрены выше. Под пластиной приварены медные трубы, по которым течет коллекторная жидкость. Она транспортирует тепло. Система управления с насосом обеспечивает циркуляцию коллекторной жидкости внутри установки. В хорошо изолированном баке-аккумуляторе тепло жидкости передается воде (теплообменник). Таким образом, в доме будет нагретая вода и ночью, и в дождливые дни.

Важной частью гелиоустановки является поддерживающая конструкция

для солнечных коллекторов. Она обеспечивает правильный угол наклона, а также необходимую жесткость конструкции. Комбинация поддерживающей конструкции с солнечными модулями должна выдерживать порывы ветра и другие неблагоприятные воздействия окружающей среды.

Варианты монтажа установки:

- наклонный (на крышу с любым углом наклона ската);
- горизонтальный (на плоскую крышу);
- свободностоящий (солнечный коллектор с опорной конструкцией).

Солнечная электроэнергетика. Солнечную энергию можно использовать как источник теплоты для выработки электроэнергии традиционными способами – нагревать воду с превращением ее в пар с высокими температурой и давлением, а затем с помощью турбогенераторов вырабатывать электрическую энергию. При этом нет парогенератора (парового котлоагрегата), в котором сжигается дорогое углеводородное топливо (уголь, мазут или природный газ) и не загрязняется вредными веществами окружающая среда.

Электростанция, использующая теплоту солнечного излучения, называется солнечной тепловой электрической станцией (СТЭС). В настоящее время наибольшее распространение получили три типа СТЭС:

– *башенного типа* с центральным приемником – парогенератором, на теплоприемной поверхности которого концентрируется солнечное излучение от зеркал – гелиостатов;

– *модульного типа*, у которых в фокусе параболоцилиндрических концентраторов размещены вакуумированные приемники – трубы с теплоносителем (парогенераторы);

– *комбинированные* – это солнечно-тепловые электростанции, в которых чисто солнечная ЭС того или иного типа объединяется с обычной теплоэлектростанцией.

Современные СТЭС, независимо от их типа, включают следующие элементы: гелиоконцентратор, теплоприемник, систему транспорта и аккумулирования теплоты, систему преобразования теплоты в работу.

Основным элементом СТЭС является *гелиоконцентратор* – устройство для концентрации лучистой энергии Солнца на относительно небольшом участке нагреваемого тела. Тем самым создается высокая плотность потока солнечных лучей и одновременно уменьшаются тепловые потери из-за сокращения теплоотдающей поверхности. Гелиоконцентраторы выполняются в виде плоских или вогнутых отражателей различной формы (рисунок 3.17), реже ими служат прозрачные оптические фокусирующие линзы.

На рисунке 3.18 показана (для примера) типовая параболическая гелиоустановка с концентратором диаметром 10 м. Здесь бак с

теплоносителем находится в фокусе зеркала. Она предназначена для получения горячей воды или пароводяной смеси.

В настоящее время разработаны солнечные ТЭС башенного типа, в которых рабочим телом служит сжатый воздух. В теплоприемнике воздух нагревается до температуры 1000 °С и направляется в *газовую турбину* с последующей выработкой электроэнергии.

В качестве теплоносителя предложено также термостойкое кремнийорганическое масло; проходя через теплообменник, оно нагревается до температуры 390 °С и передает теплоту воде и водяному пару. Теплоприемник выполнен в виде стальной трубы, окруженной стеклянной оболочкой; пространство между ними вакуумировано, а на поверхность самой трубы нанесено покрытие с высоким коэффициентом поглощения в видимой области спектра (400–760 нм) и низким коэффициентом излучения в ИК-области. Подобная конструкция теплоприемника обеспечивает минимальные потери теплоты в окружающую среду.

Рисунок 3.17 – Схемы гелиоконцентраторов:
a – параболического (параболоцилиндрического, цилиндрического);
б – конического; *в* – тороидального;
г – составного (из отдельных плоских зеркал); *д* – зеркально-линзового; *е* – с подвижным зеркалом и неподвижным концентратором

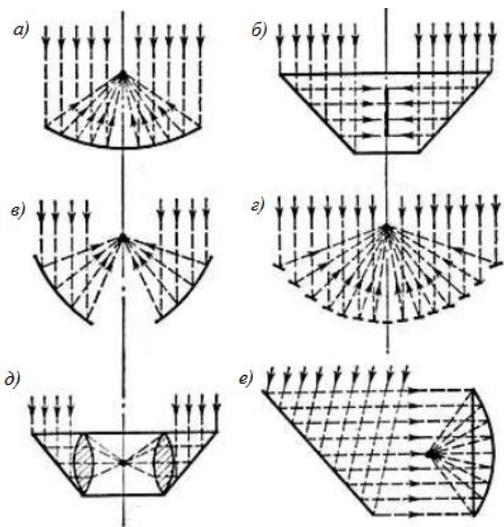




Рисунок 3.18 – Параболоидная гелиоустановка с концентратором

В ряде стран разрабатываются гелиоэнергетические установки с использованием солнечных прудов (рисунок 3.19). СЭС на базе солнечных прудов значительно дешевле СЭС других типов, так как они не требуют зеркальных отражателей со сложной системой ориентации, однако их можно соорудать только в районах с жарким климатом. В солнечном пруду происходит одновременное улавливание и накопление солнечной энергии в большом объеме жидкости.

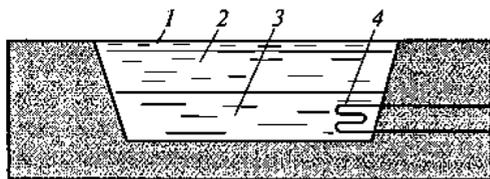


Рисунок 3.19 – Схема солнечного пруда:

1 – пресная вода; 2 – изолирующий слой с увеличивающейся к низу концентрацией; 3 – слой горячего раствора; 4 – теплообменник

Обнаружено, что в некоторых естественных соленых озерах температура воды у дна может достигать 70 °С. Это обусловлено высокой концентрацией соли. Обычно глубина пруда составляет 1–3 м. На 1 м² площади пруда требуется 500–1000 кг поваренной соли или хлорида магния.

В обычном водоеме поглощаемая солнечная энергия нагревает, в основном, поверхностный слой, и это тепло довольно быстро теряется, особенно в ночные часы и при холодной, ненастной погоде из-за испарения воды и теплообмена с окружающим воздухом. Солнечная энергия,

проникающая через всю массу жидкости в солнечном пруду, поглощается окрашенным в темный цвет дном и нагревает прилегающие слои жидкости. В результате этого температура ее может достигать 90–100 °С, в то время как температура поверхностного слоя остается на уровне 20 °С. Благодаря высокой теплоемкости воды в солнечном пруду за летний сезон накапливается большое количество тепла. Вследствие низких тепловых потерь падение температуры в нижнем слое в холодный период года происходит медленно, так что солнечный пруд служит сезонным аккумулятором энергии. Тепло к потребителю отводится из нижней зоны пруда.

Описанный эффект достигается благодаря тому, что по глубине солнечного пруда поддерживается градиент поваренной соли, направленный сверху вниз, т.е. весь объем жидкости как бы разделен на три зоны, Концентрация соли по глубине постепенно увеличивается и достигает максимального значения на нижнем уровне, толщина которого составляет примерно 2/3 общей глубины водоема. В нижнем конвективном слое концентрация соли максимальна и равномерно распределена в объеме жидкости. Плотность жидкости максимальна у дна пруда и минимальна у его поверхности в соответствии с распределением концентрации соли. Солнечный пруд служит одновременно коллектором и аккумулятором тепла и отличается низкой стоимостью по сравнению с обычными коллекторами солнечной энергии. Отвод теплоты из солнечного пруда может осуществляться либо посредством змеевика, размещенного в нижнем слое жидкости, либо отводом жидкости из этого слоя в теплообменник, в котором циркулирует теплоноситель. При первом способе меньше нарушается температурное расслоение жидкости в пруду, но второй способ теплотехнически более эффективен и экономичен.

Солнечные пруды могут быть использованы в гелиосистемах отопления и горячего водоснабжения жилых и общественных зданий, для получения технологической теплоты, в системах конденсирования воздуха абсорбционного типа, для производства электроэнергии.

Наиболее крупный из существующих солнечных прудов находится в местечке Бейт-Ха-Арава в Израиле. Площадь этого пруда составляет 250 000 м².

Фотоэлектрическое преобразование. Фотоэлектрическое, или прямое, преобразование солнечной энергии в электрическую является многообещающим для маломасштабного использования в сельских и отдаленных районах. Это преобразование осуществляется с помощью полупроводниковых фотоэлементов – солнечных батарей, или солнечных элементов (СЭ), изготавливаемых из материалов, которые напрямую преобразуют солнечный свет в электричество. Большая часть из коммерчески выпускаемых в настоящее время СЭ изготавливается из

кремния (химический символ Si). Устройство солнечного элемента показано на рисунке 3.20.

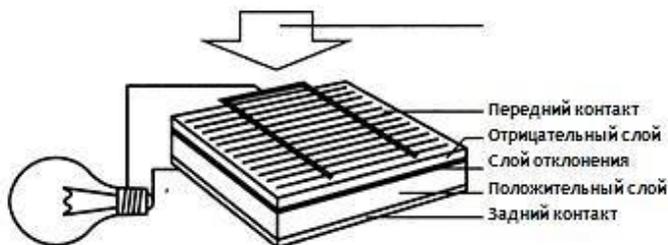


Рисунок 3.20 – Устройство солнечного элемента

Типы солнечных элементов: монокристаллический, поликристаллический, аморфный. Различие между этими формами в том, как организованы атомы кремния в кристалле. Различные СЭ имеют разный КПД преобразования энергии света. Моно- и поликристаллические элементы имеют почти одинаковый КПД, который выше, чем у СЭ, изготовленных из аморфного кремния.

Прежде всего, в СЭ имеется задний контакт и два слоя кремния разной проводимости. Сверху находится сетка из металлических контактов и антибликовое просветляющее покрытие, которое дает СЭ характерный синий оттенок.

В последние годы разработаны новые типы материалов для СЭ. Например, тонкопленочные СЭ из медь-индий-диселенида и из CdTe (теллурид кадмия). Эти СЭ в последнее время также коммерчески используются.

КПД солнечных элементов: монокристаллические – 12–15 %; поликристаллические – 11–14 %; аморфные – 6–7 %; теллурид кадмия – 7–8 %.

СЭ производит электричество, когда освещается светом. В зависимости от интенсивности света (измеряемой в Вт/м²), солнечный элемент производит больше или меньше электричества: яркий солнечный свет более предпочтителен, чем тень, и тень более предпочтительна, чем электрический свет.

Солнечные батареи были испытаны в полевых условиях на многих установках. Практика показала, что срок службы солнечных батарей превышает 20 лет. Фотоэлектрические станции, работающие в Европе и США около 25 лет, показали снижение мощности модулей примерно на 10 %.

Таким образом, можно говорить о реальном сроке службы солнечных монокристаллических модулей – 30 и более лет.

Поликристаллические модули обычно работают 20 и более лет. Модули из аморфного кремния (тонкопленочные, или гибкие) имеют срок службы от 7 (первое поколение тонкопленочных технологий) до 20 (второе поколение тонкопленочных технологий) лет. Более того, тонкопленочные модули обычно теряют от 10 до 40 % мощности в первые 2 года эксплуатации. Поэтому около 90 % рынка фотоэлектрических модулей в настоящее время составляют кристаллические кремниевые модули.

Другие компоненты системы имеют различные сроки службы: аккумуляторные батареи – от 2 до 15 лет, а силовая электроника – от 5 до 20 лет.

Возможно создание системы электроснабжения на солнечных батареях различной сложности. Наиболее простая система имеет на выходе низкое напряжение постоянного тока (обычно 12 или 24 В). Такие системы применяются для обеспечения работы освещения и небольшой нагрузки постоянного тока в доме – радио, телевизор, ноутбук, магнитофон и т. п. Можно использовать различные автомобильные аксессуары, вплоть до холодильников. Типовая схема такой системы приведена на рисунке 3.21. Обычно такие системы применяются, если максимальное расстояние от аккумулятора до самой дальней подключенной нагрузки не превышает 10–15 м, а ее мощность – не более 100 Вт.

Система электроснабжения автономного дома с выходом переменного и постоянного тока на базе фотоэлектрической солнечной батареи включает в себя практически те же компоненты, что и схема на рисунке 3.22, плюс контроллер заряда аккумуляторной батареи, а именно:

- солнечная батарея необходимой мощности;
- контроллер заряда аккумуляторной батареи, который предотвращает губительные для батареи глубокий разряд и перезаряд;
- батарея аккумуляторов (АБ);
- энергоэффективные нагрузки переменного тока;
- инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный.

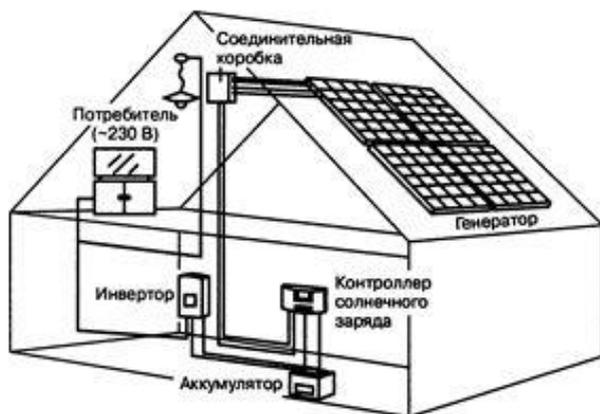


Рисунок 3.21 – Типовая схема простейшей системы

Инвертор – это преобразователь постоянного тока низкого напряжения от аккумуляторов в 220 В переменного тока. В этом случае вы сможете питать практически любую бытовую нагрузку суммарной мощностью, не превышающей мощность инвертора.

Для обеспечения надежного электроснабжения необходим резервный источник электропитания. В качестве такого источника может быть небольшой (2–6 кВт) бензо- или дизельэлектрогенератор. Введение такого резервного источника электроэнергии резко сокращает стоимость солнечной батареи из-за отсутствия необходимости рассчитывать ее на худшие возможные условия (несколько дней без солнца, эксплуатация зимой и т. п.). В этом случае в систему также вводится зарядное устройство для быстрого заряда (в течение нескольких часов) АБ от жидкотопливного электрогенератора. Возможно применение блока бесперебойного питания, в котором возможность заряда АБ уже встроена.

Солнечные энергоцентры (фермы). За рубежом солнечная энергетика, основанная на прямом преобразовании излучения Солнца в электричество, в зависимости от мощности и предназначения включает в себя крупные солнечные энергоцентры (солнечные фермы) и малые фотоэнергетические системы. Включая в свой состав тысячи (а иногда и сотни тысяч) отдельных фотоэлектрических ячеек, соединенных в сеть модулей, батарей и решеток, такие установки могут производить от нескольких сотен до многих тысяч киловатт энергии.

Современные солнечные энергоцентры имеют панели, которые способны при помощи компьютерной техники и автоматизированной системы управления «следовать» за солнцем в течение всего дня. Через инверторы (преобразователи постоянного тока в переменный) и

повышающие трансформаторы панели присоединяются к электросетям (рисунок 3.22).

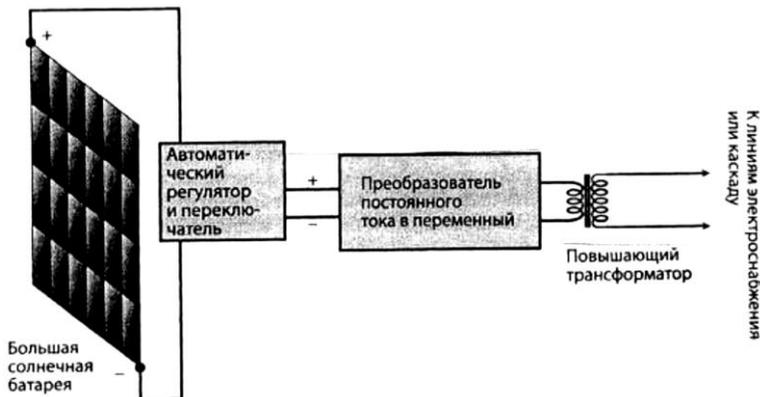


Рисунок 3.22 – Функциональная схема солнечного энергоцентра

Метод фотоэлектрического преобразования все в большей степени становится в мире привлекательным для выработки электроэнергии в крупных масштабах. Это вызвано тем, что СФЭС на его основе способствуют:

- достижению максимально возможной экологической безопасности преобразования энергии;
- получению энергии (тепловой и электрической) практически в любом районе, где достаточная для этого солнечная радиация;
- относительно малым эксплуатационным затратам;
- наращиванию мощностей (модульный принцип строительства).

Добавим, что СФЭС не шумят, относительно малозаметны, не портят пейзаж.

Более 30 стран мира, обладающие приемлемым для развития солнечной энергетики потенциалом, используют процесс преобразования излучения Солнца в электрическую энергию. Более того, появилась целая индустрия по производству ФЭП (как, например, в не очень солнечной Германии), которые экспортируются в другие страны, более одаренные солнечной активностью. Например, в Португалии, в местечке Серпа, одном из самых солнечных в Европе, в 2007 г. заработала одна из самых мощных солнечных ФЭС в мире. Её 52 тыс. солнечных батарей раскинулись на площади в 60 га. Мощность станции – 11 МВт, она способна обеспечить энергией 8 тыс. домов и предотвратить выбросы 30 тыс. т парникового газа – диоксида углерода. Правительство страны в развитие альтернативных электростанций

намерено инвестировать 10,8 млрд дол. США с тем, чтобы обеспечить в перспективе не менее 45 % потребностей в электроэнергии.

В США стоимость «солнечного» киловатт-часа колеблется в диапазоне от 13 до 20 центов, тогда как при использовании традиционных источников энергии 1 кВт·ч обходится потребителю в 4–6 центов. Американцы, однако, надеются, что появление новых технологий позволит сделать солнечную энергию более дешевой, и прогнозируют в ближайшие годы уменьшить стоимость киловатт-часа до 9–10 центов.

Естественно, что крупным солнечным энергоцентрам присущи и недостатки:

- они нерентабельны для мест, не получающих достаточной солнечной радиации;

- как и энергия ветра, солнечная энергия неустойчива. Ее трудно запастись в больших количествах;

- солнечная энергия не может сама по себе удовлетворить потребности в электричестве крупного города целиком. Это, прежде всего, дополнительный источник энергии;

- под солнечные энергоцентры необходим отвод больших площадей земель, которые трудно использовать в других целях.

Есть основания считать, что солнечные ФЭС в ближайшие годы получат распространение практически во всех странах, где есть к этому надлежащие условия.

4 ТРАДИЦИОННОЕ ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Известно, что полезными видами энергии являются тепловая, механическая и световая. Известно также, что электрическая энергия в современном мире легко преобразуется в любой отмеченный вид полезной энергии. Поэтому можно считать, что электрическая энергия является основной современной цивилизации. В качестве первичных, природных источников энергии в настоящее время человечество научилось использовать уголь, нефти и газ, т. е. так называемые невозобновляемые источники энергии. При использовании путем сжигания указанных топлив в окружающую среду поступают загрязняющие вещества. Причем загрязнение окружающей среды при сжигании угля большое, нефтепродуктов – меньшее, природного газа – самое наименьшее.

В Республике Беларусь на тепловых электростанциях в качестве топлива используется природный газ, а резервным топливом служит мазут (используется только при сбое в снабжении природным газом).

Кроме тепловых электростанций, которые преобразуют химическую энергию углеводородного топлива, есть электростанции, преобразующие в электрическую энергию другие виды энергии: энергию биомассы, воды и ветра, солнечную и атомную энергию. В Германии, например, в 2016 году действующие энергоустановки использовали различные источники первичной энергии: уголь – 28 %, ветер – 25 %, солнце – 21 %, газ – 15 %, атомную энергию – 5 %, биомассу – 3 %. В Беларуси же эти показатели составляют: газ – 97 %, биомасса – 1,6 %, ветер – 0,6 %, солнце – 0,4 %, гидроэнергия – 0,4 %.

Сравнение энергопроизводства из различных первичных видов энергии показывает, что традиционные тепловые электростанции в Беларуси работают на газе и генерируют 97 % электроэнергии, и только 3,0 % – основа возобновляемых источников энергии, а в Германии – работают на газе и угле и производят 42,4 % электроэнергии, 5,6 % электроэнергии производят атомные электростанции, 52,0 % (больше половины) – возобновляемые источники энергии.

4.1 Производство и транспорт электрической энергии

В Беларуси электрическая энергия в настоящее время производится главным образом на **тепловых электростанциях**. Топливом для них в основном служит природный газ, который покупается в Российской Федерации. Газ, добываемый в Беларуси, является попутным, получаемым при нефтедобыче. Этот нефтяной газ – высокоэффективный энергоноситель и ценное химическое сырьё. Однако годовой объём белорусского попутного газа составляет всего около 1 % объёма импортируемого природного газа.

Тепловые электростанции могут быть конденсационными, теплофикационными и газотурбинными. Крупные **к о н д е н с а ц и о н н ы е** электростанции (КЭС), которые обслуживают потребителей значительного региона страны, получили название *государственных районных электростанций* (ГРЭС). В Беларуси две ГРЭС – Лукомльская и Берёзовская.

Тепловые конденсационные электростанции строят по возможности в местах, удобных для водоснабжения, и выполняют из ряда блочных агрегатов (котёл – турбогенератор – повышающий трансформатор) мощностью от 200 до 1200 МВт, вырабатывают только электрическую энергию, которую отдают в сеть напряжением 110–750 кВ.

Особенность агрегатов КЭС заключается в том, что они недостаточно манёвренны: подготовка к пуску, разворот, синхронизация и набор нагрузки требуют от 3 до 6 часов. Но производство электроэнергии и потребление её различными пользователями – процессы тесно взаимосвязанные. Потребителю требуется днем электроэнергии больше, чем ночью; в рабочие

дни недели больше, чем в выходные дни; зимой больше, чем летом. Режим потребления энергии потребителем (предприятием, районом, городом, страной) в течение определенного отрезка времени (сутки, месяц, год) отражается с помощью графика нагрузки. Наличие графиков нагрузки позволяет планировать оптимальную работу энергоустановок, которые, как известно, имеют наибольший КПД на номинальном режиме. Но, как указывалось ранее, паровые котлы и турбины темповых электростанций допускают изменение нагрузки только на 10–15 %. Следовательно, задача регулирования мощности с помощью самих ТЭС не решается. Еще более нежелательны переменные режимы для атомной электростанции.

Пиковые нагрузки энергосистемы наблюдаются дважды в течение суток: утром, в 8–9 часов, при подъёме людей в начале рабочего дня и вечером, в 18–19 часов, при возвращении с работы и наступлением темноты. Наименьшая электрическая нагрузка наблюдается ночью: так называемый ночной провал.

Пиковые нагрузки энергосистемы покрываются газотурбинными установками или более эффективными парогазовыми установками, которые размещены на ТЭС. Газотурбинные и парогазовые установки маневренны, и набор полной мощности они осуществляют за 1–2 минуты. Такое размещение ГТУ или ПГУ на ТЭС широко применяется в белорусской энергосистеме.

Технологическая схема КЭС состоит (рисунок 4.1) из нескольких систем: топливоподдачи и топливоприготовления, основного пароводяного контура вместе с парогенератором и турбиной, циркуляционного водоснабжения, водоподготовки, золоулавливания и золоудаления, электрической части станции.

Наибольшие потери энергии на КЭС происходят в конденсаторе, где отработавший пар, содержащий еще большое количество тепла, затраченного на парообразование, отдаёт его циркуляционной воде. Это тепло теряется т. к. уносится циркуляционной водой в водоём. Эти потери в основном определяют КПД конденсационной электростанции.

Эффективность паротурбинной установки повышается с увеличением начальных параметров пара – давления и температуры. Максимальная температура пара ограничивается прочностью материала. Экономически целесообразна в настоящее время теплоустойчивая легированная сталь перлитного класса. Наибольшая температура пара составляет 570 °С.

Увеличение давления пара ограничивается допустимой степенью влажности пара в конце расширения в турбине; повышенная влажность приводит к эрозии лопаток турбины. В настоящее время в основном используют давления пара, равное 23,5 МПа (240 кгс/см²).

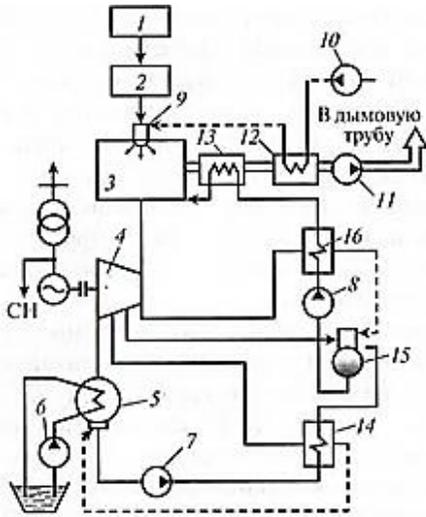


Рисунок 4.1 – Принципиальная технологическая схема КЭС:

- 1 – склад топлива и система топливоподдачи;
- 2 – система топливоприготовления;
- 3 – котел; 4 – турбина; 5 – конденсатор;
- 6 – циркуляционный насос; 7 – конденсатный насос; 8 – питательный насос;
- 9 – горелки котла; 10 – вентилятор;
- 11 – дымосос; 12 – воздухоподогреватель;
- 13 – водяной экономайзер; 14 – подогреватель низкого давления; 15 – деаэрактор;
- 16 – подогреватель высокого давления;
- СН – собственные нужды

Эффективность паротурбиной установки увеличивается также при уменьшении энтальпии на выходе пара из турбины, а это значение энтальпии определяется давлением и соответствующей температурой воды. Понижение давления в конденсаторе более чем до 3,5–4 кПа, чему соответствует температура насыщения (конденсации) 26,2–28,6 °С, ограничивается прежде всего температурой охлаждающей воды, колеблющейся в зависимости от климатических условий от 0 до 25–30 °С.

Из изложенного выше следует, что при применении пара высокого давления его влажность в турбине в конце процесса расширения становится значительной. Но работа турбины на влажном паре недопустима, т. к. она вызывает увеличение потерь и износ (эрозию) турбинных лопаток в результате механического воздействия на них взвешенных в паре частиц влаги. Поэтому пар на некоторой стадии расширения следует отводить из турбины и подвергать повторному перегреву в специальном паронагревателе, после чего повторно перегретый пар вновь вводится в турбину, где и заканчивается процесс его расширения. В результате этого при окончательном расширении пара до принятых на практике давлений влажность его не превышает допустимых значений.

Паротурбинные установки, в которых используется указанный метод, называют установками с промежуточным перегревом пара. При правильном выборе давления отбора пара и температуры промежуточного перегрева предотвращается чрезмерное увлажнение пара в конце расширения и

достигает некоторое увеличение КПД установки, т. е. увеличивается её энергоэффективность.

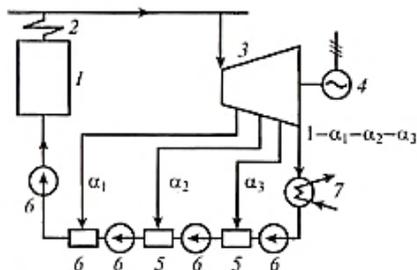
Для повышения экономичности работы паротурбинных установок, кроме повышения параметров пара, применяют так называемый *регенеративный цикл* (рисунок 4.2).

В этой технологической схеме питательная вода до её поступления в котельный агрегат подвергается предварительному нагреву паром, отбираемым из промежуточных ступеней паровой турбины.

На нижеприведенном рисунке представлена принципиальная схема паросиловой установки с регенеративным подогревом питательной воды. Причём обозначения α_1 , α_2 и α_3 – это доли отбираемого пара из турбины.

Рисунок 4.2 – Регенеративный подогрев питательной воды в цикле Ренкина в T, s -координатах:

1 – котел; 2 – пароперегреватель; 3 – паровая турбина с промежуточными отборами пара; 4 – электрогенератор; 5 – регенеративные подогреватели; 6 – насосы; 7 – конденсатор



Следует отметить, что потеря работы в результате отборов пара будет значительно меньше, чем увеличение энтальпии питательной воды, поскольку при получении работы используется лишь часть теплоты пара, не включающая теплоту парообразования. В результате в целом КПД цикла возрастает.

4.2 Производство тепловой энергии

С помощью пара осуществляется выработка электрической энергии на тепловых электростанциях, что было рассмотрено в предыдущем разделе. Но пар требуется и в промышленности для привода таких машин-орудий, как прессы, молоты, насосы и т. п. С помощью пара в промышленности осуществляется значительное количество технологических процессов: сушка, варка, разогрев и т. п.

Тепловая энергия широко используется для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения.

Для получения пара заданного давления и температуры в заданном количестве служит котельный агрегат, или **парогенератор**. Если конечным продуктом является горячая вода заданных параметров (давления и температуры), используемая в промышленных технологических процессах

и для отопления промышленных, общественных и жилых зданий, то устройство называют **водогрейным котлом**.

Паровые котлы по характеру движения воды, пароводяной смеси и пара подразделяются на барабанные с естественной и с многократной принудительной циркуляцией, а также прямоточные.

В *барабанных котлах* с естественной циркуляцией (рисунок 4.3, а) движение пароводяной смеси происходит вследствие разности плотностей в экранных (подъёмных – ПОД) трубах и жидкости в водоопускных (ОП) трубах. Причем в экранных трубах движение пароводяной смеси происходит вверх, а воды в опускных трубах – вниз.

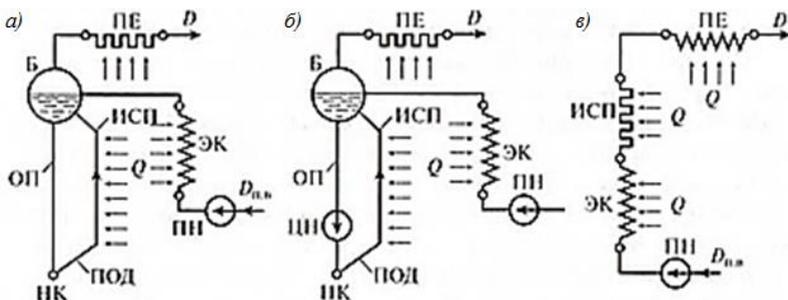


Рисунок 4.3 – Схемы генерации пара в паровых котлах:

- а – естественная циркуляция; б – многократная принудительная циркуляция;
- в – прямоточная схема; Б – барабан; ИСП – испарительные поверхности; ПЕ – пароперегреватель; ЭК – водяной экономайзер; D , $D_{п.в}$ – расход пара и питательной воды;
- ПИ, ЦН – питательный и циркуляционный насосы; НК – нижний коллектор;
- Q – подвод тепла; ОП, ПОД – опускные и подъемные трубы

Разность весов двух столбов жидкостей (воды в опускных трубах и пароводяной смеси в подъемных трубах) создаёт движущий напор циркуляции воды в трубах котла

$$\Delta p = gh (\rho_v - \rho_{см}),$$

где ρ_v и $\rho_{см}$ – плотность воды и пароводяной смеси;

h – высота контура.

Движущий напор циркуляции расходуется на преодоление сопротивления движения по трубам воды и пароводяной смеси, а также на сообщение ускорения пароводяной смеси в связи с ростом объема, происходящим при парообразовании в подъемных трубах.

В *котлах с принудительной циркуляцией* движение воды и пароводяной смеси (рисунок 4.3, б) осуществляется принудительно с помощью циркуляционного насоса ЦН, движущий напор которого рассчитан на преодоление сопротивления всей системы.

В *прямоточных котлах* (рисунок 4.3, в) нет циркуляционного контура и многократной циркуляции воды, отсутствует барабан, вода прокачивается питательным насосом ПН через экономайзер ЭК, испарительные поверхности ИСП и пароперегреватель ПЕ, включенные последовательно.

П а р о п р о и з в о д и т е л ь н о с т ь парогенератора выражают в тоннах в час (т/ч) или в килограммах в секунду (кг/с). Поскольку парогенератор предназначен для превращения теплоты, заключенной в топливе, в потенциальную энергию пара, он представляет собой разновидность преобразователя энергии, а потому его можно характеризовать также по мощности, выраженной в киловаттах (КВт) или мегаваттах (МВт).

В котельных агрегатах производят либо насыщенный, либо перегретый пар. В настоящее время в котлах высокого давления температура пара достигает 570 °С.

Водогрейные котлы предназначены для получения горячей воды заданных параметров, главным образом для целей отопления. Они работают по прямоточной схеме с постоянным расходом воды. Конечная температура нагрева определяется условиями поддержания стабильной температуры в жилых и рабочих помещениях, обогреваемых отопительными приборами, через которые и циркулирует вода, подогретая в водогрейном котле. Поэтому при постоянной поверхности отопительных приборов температуру воды, подаваемой в них, повышают при снижении температуры окружающей среды и понижают – при повышении температуры наружного воздуха. Обычно воду тепловой сети в котлах подогревают от 70 до 150 °С.

Во избежание конденсации водяных паров из уходящих из котлоагрегата газов и связанной с этим наружной коррозии поверхностей нагрева температура на входе в агрегат должна быть выше точки росы для продуктов сгорания. В этом случае температура стенок труб в месте ввода воды также будет не ниже точки росы. Поэтому температура воды на входе не должна быть ниже 60 °С при работе на природном газе, 70 °С – при работе на малосернистом мазуте (в Беларуси мазут – это резервное топливо). Поскольку в теплосети вода может охлаждаться ниже 60 °С, перед входом в агрегат к ней подмешивается некоторое количество уже нагретой в котле (прямой) воды.

Водогрейные котлы характеризуют по их теплопроизводительности, температуре и давлению подогретой воды, а также по роду металла, из которого изготовлен котёл. Чугунные водонагревательные котлы предназначают для отопления отдельных зданий и выполняют на небольшую теплопроизводительность (до 1,2–1,6 МВт), для подогрева воды до температуры 115 °С (давление не выше 0,3–0,4 МПа). Стальные водогрейные котлы выполняют на большую теплопроизводительность (до 240 МВт) и устанавливают в крупных квартальных и районных котельных для теплоснабжения больших жилых массивов.

Все котлоагрегаты, как те, которые применяются для получения электричества, так и те, которые используют для получения тепла, весьма активно воздействуют на окружающую среду. Влияние на атмосферу сказывается в большом потреблении кислорода воздуха для горения углеводородного топлива и в выбросе значительного количества продуктов сгорания. Это, в первую очередь, газообразные оксиды углерода, серы, азота, часть из которых имеет высокую химическую активность. Летучая зола загрязняет воздух. Наименьшее загрязнение атмосферы отмечается при сжигании газа. Необходимо учесть также большие уносы тепла в атмосферу, а также электромагнитные поля, создаваемые электрическими установками высокого и сверхвысокого напряжения.

4.3 Устройства для одновременной выработки электрической и тепловой энергии

Одним из основных способов эффективного энергохозяйствования является создание систем, где энергетическое обеспечение технологического процесса на производственном предприятии требует минимального потребления внешнего первичного энергоресурса при небольшом воздействии на окружающую среду. Наиболее известный и яркий пример энерготехнологии появился в СССР в 1930-е годы под названием **теплоэлектростанции (ТЭЦ)**.

Как было отмечено ранее, при максимальной температуре водяного пара паросиловой установки (ПСУ) до 600 °С, которая экономически целесообразна при использовании жаропрочной легированной стали перлитного класса, в реальных установках значение КПД не превышает 40 %.

В результате стоимость полученной электроэнергии (на обычных тепловых электростанциях только электрическая энергия получается в результате преобразования топлива) довольно велика, а также загрязняется тепловыми сбросами окружающая среда. Учитывая, что в стране около четверти потребляемого топлива затрачивается на производство электроэнергии, проблема повышения преобразования энергии, закрепленной в дорогом для страны топливе, является очень важной. В этих условиях было принято решение поднять температуру холодного источника с 30 до 100 °С и более. Это обеспечит многочисленных потребителей, поскольку для них требуется поток теплоты именно при температурах ≈ 100 °С. Термический КПД цикла ПСУ при этом, понятно, снижается и, следовательно, на полученное того же количества электроэнергии сжигается больше топлива, но коэффициент использования возрастает примерно в два раза. В этом случае теплота, передаваемая теплоприемнику, не выбрасывается в окружающую среду, а полезно используется на коммунальные и технологические нужды.

Противники теплофикации и централизованного теплоснабжения оперируют высокими потерями (до 25–30 %) при транспортировке тепловой энергии и частыми ремонтами теплотрасс (постоянное рытьё улиц и дорог, оставление потребителей без горячей воды и пр.). Здесь следует отметить, что даже при таком высоком уровне рассеяния энергии в тепловых сетях (25–30 %) оно все же в два раза ниже, чем рассеяние энергии в конденсаторах тепловых электростанций. Сегодня же применение новых материалов и технологий сводят к минимуму как рассеяние энергии в тепловых сетях (2–3 %), так и последующие ремонтные работы и расходы.

С энергетической точки зрения система отопления зданий вне теплофикации энергетически расточительна, поскольку сжигается высококалорийное топливо с получением температуры более 2000 °С, чтобы в конечном счете повысить температуру при отоплении зданий на 20–30 °С. Ни крышные, ни подвальные котельные не устранят главный термодинамический недостаток: эксергетический КПД такой системы отопления зданий не достигает 1 %. Поэтому ни в коем случае не отвергая достижения советской энергетики, нужно повышать качество выполнения теплоизоляционных и монтажных работ, поддерживать тепловое хозяйство на современном уровне.

В определённых случаях автономное энергосбережение является более эффективным, чем централизованное. При этом в качестве топлива наряду с традиционным углеводородным (природным) топливом могут использоваться горючие отходы промышленности и сельского хозяйства: древесные отходы, отслужившие срок железнодорожные шпалы, промасленная ветошь, отработанное масло, старые автопокрышки, солома, ботва и др. Многие промышленные предприятия потребляют как тепловую энергию на технологические нужды, генерируемую в виде пара, так и электрическую энергию, необходимую для технологических нужд потребителей, освещения, систем сжатого воздуха, вентиляции и кондиционирования воздуха в зданиях и других нужд. В этих случаях следует извлекать все преимущества теплофикации, развивая её на новой базе – на базе тепловых машин: двигателей внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинных (ГТУ) и паросиловых (ПСУ) установок. Такое направление в промышленной энергетике получило название – **когенерация**.

Использование тепловых двигателей для комбинированного (когенерационного) производства энергии позволяет значительно расширить круг тепловых потребителей. Если традиционная паросиловая теплофикация предусматривалась (например, в бывшем СССР) лишь для городов с населением более 100 тыс. человек, что связано с большой стоимостью строительства ТЭЦ, то когенерация возможна и оправдана в применении на отдельном предприятии, вплоть до отдельного дома. В

когенерационной установке может производиться и электрическая, и тепловая энергия комбинированным способом и без сетей централизованного теплоснабжения. При когенерации возможна интеграция тепловых двигателей с теплотехнологиями, где требуется тепловая обработка при температурах до 600 °С.

Когенерационная система позволяет увеличить коэффициент использования топлива в тепловой машине (ДВС, ГТУ или ПСУ) с 35–40 % более чем в два раза (80–90 %). Следовательно, для выработки полезной энергии в виде электрической и тепловой в когенерационной установке будет сжигаться топлива в полтора раз меньше, чем при выработке электроэнергии на традиционной тепловой электростанции и тепловой энергии в котельной. Причем при когенерации тепловое и экологическое загрязнение окружающей среды сводится к минимуму.

Когенерационная система характеризуется коэффициентом выработки электроэнергии C_3 , определяемым отношением электрической мощности к вырабатываемой мощности тепловой энергии, диапазон мощностей установок, типичной мощностью системы $N_{тип}$ и типом используемого топлива. Указанные данные когенерационных установок приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры базовых систем когенерации

Характеристика	Тепловая машина когенерационных систем		
	ДВС	ГТУ	ПСУ
C_3	Больше 1	0,6–1,0	0,1–0,2
$N_{min} - N_{max}$, МВт	0,01–16	0,02–300	0,01–400
$N_{тип}$, МВт	1,0	5,0	10,0
Топливо	Бензин, дизельное топливо, природный газ, биогаз	Природный газ, керосин	Природный газ, уголь, нефть, биомасса, древесина, твердые бытовые и промышленные отходы

Система когенерации способствует повышению эффективности использования первичной энергии. Стоимость топливной составляющей при использовании когенерационной системы снижается на 30–40 % (в зависимости от цены энергии).

В третьем тысячелетии при использовании газа как топлива при производстве тепловой и электрической энергии вода и пар как рабочее тело уступят место газу и продуктам его сгорания. Горение газа в топках котлов сегодня допустимо лишь как временное явление, пока нет достаточного количества ГТУ и ГПА (газопоршневой агрегат, который

является когенерационной установкой на базе ДВС), замещающих старые котлы.

Проблема обеспечения промышленного объекта энергоносителями и правильного выбора их вида и параметров во всем мире считается одной из приоритетных.

Полезной продукции в виде электрической и тепловой энергии в когенерационных установках будет вырабатываться столько же, сколько было раньше в коммунальной энергетике, но газа при этом сжигаться будет в полтора раза меньше, причем тепловое и экологическое загрязнение окружающей среды сводятся к минимуму. Весьма острой и актуальной проблемой является стоимость строительства указанных установок. Сроки окупаемости их на базе ГТУ или ДВС в 5–7 раз меньше, чем для тепловых конденсационных электростанций (КЭС). Следовательно, 1 МВт мощности когенерационной установки в 5–7 раз дешевле, чем на КЭС. Кроме того, при строительстве когенерационных установок в местах энергопотребления отпадает необходимость строительства новых линий и подстанций, доставляющих электроэнергию потребителям. В результате снижаются почти в два раза (свыше 10 %) потери электроэнергии в сетях. Применение большого числа распределенных по значительной территории когенерационных установок вместо нескольких высокомоощных генерирующих источников энергии увеличивает надежность и устойчивость энергосистемы и энергоснабжения потребителей.

В Республике Беларусь проблема снижения удельных затрат энергоносителей на производство единицы товарного продукта имеет особую актуальность, что связано с двумя обстоятельствами: острым дефицитом собственных первичных энергоресурсов и большой энергоёмкостью производимой продукции. Поэтому выбор энергоисточника должен производиться исходя из условий глубокого анализа, а не из принципа наибольшей доступности. Энергосберегать топливо нужно до его сжигания, используя предварительный научный анализ выбора топлива и термодинамической системы, в которой это топливо сжигается. В этом главный смысл необходимости энергосбережения.

5 ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

Энерговооруженность любого государства во многом определяет его настоящее положение и дальнейшее развитие. Как показывают аналитические исследования, на долгосрочную перспективу сохраняется доминирование ископаемых видов топлива. В нашей стране в настоящее время около 80 % первичных энергоносителей импортируется, причём для выработки 95 % электрической и тепловой энергии используется один источник – природный газ, как наиболее удобное, углеводородное топливо.

Поэтому при возрастании энерговооруженности Беларуси естественно увеличивается количество импортируемого природного газа.

Кроме того, мировое сообщество обеспокоено опасным процессом постоянного повышения среднегодовой температуры атмосферы Земли и Мирового океана.

Некоторым решением указанных проблем и выхода из «энерго-экологического тупика» может дать атомная энергетика. В мире, по данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), примерно 17 % электричества вырабатывается на АЭС. Этот показатель близок к российскому (16 %), для США – несколько выше (20 %), а во Франции – значительно выше (78 %). После ввода в эксплуатацию Белорусская АЭС будет вырабатывать около 25 % электроэнергии.

5.1 Общие сведения о ядерной энергии

При сгорании природного газа, угля, нефтепродуктов осуществляется химические реакции соединения углерода (главным образом) и водорода с кислородом воздуха. В результате образуются углекислый газ, пары воды, выделяется энергия в форме теплоты, для чего и осуществляется процесс горения. При горении в энергию превращается всего лишь одна десятиллиардная (10^{-10}) доля массы реагирующих веществ. Выделившаяся энергия при этом составляет около двух килокалорий на грамм, хотя согласно известному соотношению Эйнштейна ($E = mc^2$), энергия должна составлять в миллиарды раз больше. Перевести в энергию большую долю веществ в химических реакциях невозможно. Объясняется это тем, что в химических реакциях участвует только молекулы, а атомы остаются целыми и не участвуют в процессе горения. А ведь именно из атома может быть извлечена энергия.

Изучение свойств атома на основе известной планетарной модели показывает, что почти все вещество, составляющее атом, сконцентрировано в ядре атома. Вокруг ядра вращаются отрицательно заряженные электроны, образующие так называемую электронную оболочку. Взаимодействие именно электронных оболочек определяет характер химических реакций. Причем масса покоя электрона очень мала ($m_e = 0,91 \cdot 10^{-30}$ кг). Ядро же атома состоит из двух других элементарных частиц: протонов ($m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг) и нейтронов ($m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг). В атоме урана, например, содержится 92 протона, 143 нейтрона и 92 электрона. Следовательно, в ядре урана сосредоточено вещество, которое по массе значительно превышает электронную оболочку.

Содержащиеся в ядре ^{235}U протоны (несут положительные электрические заряды) должны отталкиваться друг от друга, однако ядро не

разваливается. Это происходит потому, что внутри его есть короткодействующие силы, которые притягивают друг к другу частицы ядра и гасят силы электрического отталкивания протонов, не давая ядру самопроизвольно распастся.

В пределах ядра составляющие его части находятся в непрерывном движении. Если же ввести в ядро некоторое избыточное количество энергии, то элементарные частицы станут двигаться быстрее и смогут преодолеть соединяющие их ядерные силы и «изнутри» взорвать, разделить ядро.

Легче всего поддаются делению тяжёлые ядра. Для ^{235}U величина энергии возбуждения равна всего 5 МэВ (напомним, что $1\text{ МэВ} \approx \approx 4 \cdot 10^{-14}\text{ кал} = 1,6 \cdot 10^{-13}\text{ Дж}$). При распаде ядра ^{235}U выделяется та энергия, которая была причиной образования этого элемента в процессе эволюции Вселенной. Существует концепция, согласно которой при трансформации вещества и энергии во Вселенной образование ядер элементов тяжелее железа происходит с поглощением энергии. Значит, значительные запасы этой энергии накоплены (скрыты) внутри атомов. Следовательно, нужно извлечь эту энергию и таким образом получить новый источник энергии.

5.2 Белорусская АЭС

В 2016 году во всем мире работало около 400 ядерных реакторов. Главными ядерными державами остаются США и Франция. В США работает 99 ядерных реакторов, во Франции 58, в Японии – 43, Китае – 35, России – 35, Южной Кореи – 25, Индии – 22, Канаде – 19, Украине 15, Великобритании – 15.

Сейчас в мире возводятся 64 ядерных реактора, больше всего атомных электростанций строится в Китае – 22 ядерных реактора.

Для Белорусской АЭС выбран наиболее безопасный реактор ВВЭР-1000 (к сведению: на Чернобыльской АЭС были установлены ядерные реакторы другого типа – РБМК). Сегодня в мире эксплуатируется 54 энергоблока типа ВВЭР, и никаких аварий на этих блоках не происходило.

Энергоемкость урана во много раз превышает органическое топливо. Так, 1 кг низкообогащенного урана (до 4 % по урану-235), используемому в ядерном топливе, при полном расщеплении ядер урана-235 выделяет энергию, эквивалентную сжиганию 60 т мазута. В природном уране-238 содержится только 0,7 % урана-235.

Тепловая мощность реактора – 3200 МВт.

Электрическая мощность – 1200 МВт.

Габариты реактора (высота × диаметр) – 10,9×4,25 м.

КПД АЭС – 37 %.

Срок службы оборудования реакторной установки – 60 лет (при превышении этого срока есть опасность снижения прочности металла реактора из-за структурных преобразований. Следовательно, это может привести к аварии).

Отработанное топливо удаляется из активной зоны в бассейн выдержки, который находится внутри гермооболочки. Эта операция выполняется с помощью специальной перегрузочной машины. Пока активность и тепловыделение отработавшего ядерного топлива высоки, они хранятся в бассейне выдержки, снижая радиоактивность. Только после выдержки в течении 3–5 лет такого хранения становится возможным его вывоз с площади АЭС.

Перевозка отработанного ядерного топлива осуществляется автомобильным и железнодорожным транспортом в специальных транспортных контейнерах.

Аварии на АЭС. Первая в мире крупнейшая авария на АЭС произошла на станции *Три-Майл-Айленд в США в 1979 году*. Психологический эффект, произведённый ею на население в окрестности АЭС и, как результат, на весь Запад, был просто огромен. Большой урон был нанесен самой атомной электростанции. Однако не было жертв, облучение оказалось незначительным, так как радиоактивность (практически вся) была эффективно ограничена бетонным контейнментом станции.

26 апреля 1986 года на Чернобыльской атомной электростанции в СССР (территория нынешней Украины) произошла самая крупная и тяжелая в истории развития мировой атомной энергетики катастрофа. Чернобыльская авария на Украине имела глобальный характер: её последствия почувствовали практически все континенты и страны. По международной шкале оценки ядерных событий (INES) взрыву на Чернобыльской АЭС была присвоена седьмая – самая высокая категория опасности.

11 марта 2011 года в результате землетрясения, и случившегося после этого цунами, в Японии из строя вышли системы охлаждения на двух крупнейших АЭС мира – «Фукусима-1» и «Фукусима-2». Наибольший ущерб был нанесен станции «Фукусима-1», на всех четырёх реакторах которой произошла серия взрывов и последующие пожары. Авария привела к крупной утечке радиации, в первую очередь в Тихий океан. Уровень опасности на «Фукусиме-1» был оценен в конечном итоге так же, как и авария на Чернобыльской АЭС, – в семь баллов из семи по международной шкале ядерных аварий.

Первая в Беларуси атомная электростанция будет построена в Гродненской области, в г. Островец. Основной партнёр Беларуси в проекте по строительству АЭС – российская компания «Атомстройэкспорт», в

качестве субпоставщиков будут выступать белорусские производственные организации.

31 января 2008 г. было подписано постановление правительства «О развитии атомной энергетики в Республике Беларусь». В соответствии с принятым решением в стране будет осуществлено строительство атомной электростанции, состоящей из двух энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-1200(В-491) мощностью до 1200 МВт каждый (рисунок 5.1).

Проектируемая мощность АЭС составляет 2,4 тыс. МВт. Первый энергетический блок планируется ввести в эксплуатацию в 2019 году, второй – в 2020 г.



Рисунок 5.1 – Макет Белорусской АЭС в г. Островце

Принцип действия ядерного реактора. На рисунке 5.2 показана схема работы атомной электростанции с двухконтурным водо-водяным энергетическим реактором. Энергия, выделяемая в активной зоне реактора, передаётся теплоносителю первого контура. Далее теплоноситель поступает в теплообменник (парогенератор), где нагревает до кипения воду второго контура. Полученный при этом пар поступает в турбины, вращающие электрогенераторы. На выходе из турбин пар поступает в конденсатор, где охлаждается большим количеством воды, поступающим из водохранилища.

Достоинства АЭС. Главное преимущество – практическая независимость от источников топлива из-за небольшого объёма используемого топлива. Например, 54 тепловыделяющих сборок общей

массой 41 т на один энергоблок с реактором ВВЭР-1000в работают 1–1,5 года.

Огромным преимуществом АЭС является её относительная экологическая чистота. На ТЭС суммарные годовые выбросы вредных веществ на 1000 МВт установленной мощности составляют от примерно 13 000 т в год на газовых и до 165 000 т на пылеугольных ТЭС. Подобные выбросы на АЭС полностью отсутствуют. ТЭС мощностью 1000 МВт потребляет 8 млн т кислорода в год для окисления топлива, АЭС же не потребляют кислорода вообще. Кроме того, большой удельный (на единицу произведенной электроэнергии) выброс радиоактивных веществ даёт угольная станция. В угле всегда содержатся природные радиоактивные вещества, при сжигании угля они практически полностью попадают во внешнюю среду. При этом удельная активность выбросов ТЭС в несколько раз выше, чем АЭС.

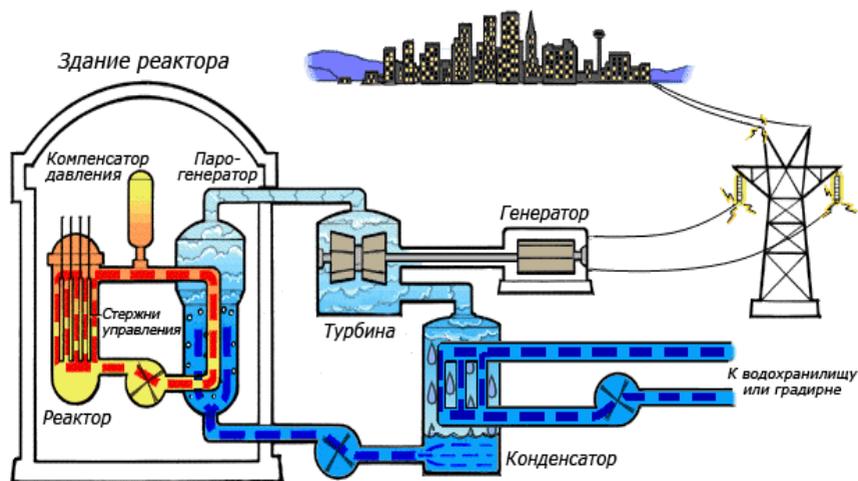


Рисунок 5.2 – Схема работы ядерного реактора ВВЭР

Недостатки. Единственный фактор, в котором АЭС уступают в экологическом плане традиционным КЭС, – тепловое загрязнение, вызванное большими расходами технической воды для охлаждения конденсаторов турбин, которое у АЭС несколько выше из-за более низкого КПД (не более 35 %), однако этот фактор важен для водных экосистем, а современные АЭС в основном имеют собственные, искусственно созданные водохранилища-охладители или вовсе охлаждаются градирнями.

Главный недостаток АЭС – тяжелые последствия аварий, для исключения которых АЭС оборудуются сложнейшими системами безопасности с многократными запасами и резервированием, обеспечивающими исключение расплавления активной зоны даже в случае

максимальной проектной аварии (местный полный поперечный разрыв трубопровода циркуляционного контура реактора).

Серьёзной проблемой для АЭС является их ликвидация после выработки ресурса, по оценкам она может составить до 20 % от стоимости их строительства.

По ряду технических причин для АЭС крайне нежелательна работа в манёвренных режимах, то есть покрытие переменной части графика электрической нагрузки.

Показатели реализации проекта по строительству АЭС:

- среднегодовой отпуск электроэнергии – 17 млрд кВт·ч;
- доля выработки электроэнергии в общем балансе республики – 22 %;
- ежегодное замещение 5 млрд м³ природного газа. Снижение выбросов парниковых газов в год – 7–10 млн т;
- в балансе электроэнергии страны будет отсутствовать импорт.

Интеграция АЭС внесёт следующие изменения:

- применение электродвигателей для выработки тепловой энергии в ночные часы отопительного периода;
- организация теплоснабжения вновь вводимых жилых районов будет осуществляться за счёт электрифицированного обогрева;
- организация полномасштабного перевода всех потребителей на дифференцированный по зонам суток тариф на электроэнергию;
- будет организован экспорт электроэнергии в ночные часы;
- создание энергоёмких производств, работающих в ночные часы суток (электрический железнодорожный транспорт, развитие электромобильного транспорта с аккумуляторными батареями).

6 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОСУДАРСТВА

Уровень энергетической безопасности любого государства оценивается следующими показателями:

- долей собственных энергетических ресурсов;
- долей электрической энергии, генерированной в стране (этот вид энергии легко преобразуется в любую полезную энергию: тепловую, механическую и световую);
- долей наиболее экологичного топлива в общем объеме потребления;
- наличием или отсутствием доминирующего экспортера (поставщика) углеводородного топлива;
- износом основного производственного оборудования предприятий топливно-энергетического комплекса государства.

6.1 Состояние топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) является важнейшей структурной составляющей национальной экономики Беларуси и включает системы добычи, транспорта, хранения, производства и распределение основных видов энергоносителей: природного газа, нефти и продуктов её переработки, твердых видов топлива, электрической и тепловой энергии.

В ТЭК Беларуси выделяют:

- топливную промышленность (нефтяную, газовую, торфяную);
- электрическую промышленность, включая высоковольтные линии электропередач, сеть нефтепроводов и газопроводов.

Энергоресурсы импортируются главным образом (90 %) из союзного государства – Российской Федерации. Причем основными видами импортируемого углеводородного топлива являлись природный газ и нефть.

В настоящее время, по данным Мирового энергетического агентства, во всемирном потреблении энергоресурсов доля горючих ископаемых веществ (природного углеводородного топлива) составляет 86,7 %. Однако территориальное распределение горючих ископаемых крайне неравномерное (см. таблицу 2.2).

В Республике Беларусь в 2015 г., имеющей население 9,505 млн человек, валовое потребление составляло примерно 36,46 млн т условного топлива. При этом доля собственных энергоресурсов – 13,9 %.

Добыча собственной **нефти** производится в Речицком и Светлогорском районах и составляет (2016 год) около 1,6 млн т.

Нефть в месторождениях залегает на глубине в среднем 3–4 км. Месторождения – средние и малые по величине (разведано 65 месторождений, 40 из них разрабатываются). Дебит скважин небольшой, основной способ добычи – насосный.

Нефтеперерабатывающие заводы (Мозырский НПЗ и Новополоцкий «Нафтан») перерабатывают в настоящее время (2016 г.) около 18 млн т нефти в год.

Поставки сырой нефти на нефтеперерабатывающие заводы осуществляются из России с использованием системы магистральных нефтепроводов ОАО «Гомельтранснефть Дружба» и железнодорожного транспорта. Трубопроводный транспорт используется и для перекачки нефтепродуктов по территории Беларуси и на экспорт.

Мозырский нефтеперерабатывающий завод производит широкий ассортимент нефтепродуктов:

- бензины автомобильные (АИ-98-К5-Евро, АИ-95-К5-Евро, АИ-92-К5-Евро); дизельное топливо (ДТ-Л-К4(К5); ДТ-З-К4(К5));

- дизельное топливо для холодного и арктического климата (ДТ-3-К5 класс 2 и ДТ-А-К5 класс 3);
- топливо печное бытовое, топочный мазут;
- кровельные нефтяные битумы, строительные нефтяные битумы, битумы дорожные;
- газы углеводородные сжиженные топливные марки СПБТ для коммунально-бытового потребления и газы углеводородные сжиженные, соответствующие европейскому стандарту PN-EN 589:2009;
- серу техническую;
- керосин экологический улучшенный;
- бензол нефтяной.

Нефтеперерабатывающее производство ОАО «Нафтан» имеет топливно-масляноароматический профиль переработки нефтяного сырья, который позволяет осуществлять комплексную переработку углеводородного сырья с получением следующих основных продуктов:

- топлива, в том числе бензины, дизельное топливо, печное топливо, топлива для реактивных двигателей РТ и Jet A-1, судовое и печное топлива, тормозной мазут;
- индивидуальные ароматические углеводороды (бензол, толуол, ортоксилол, параксилол);
- смазочные масла (моторные, трансмиссионные, компрессорные, индустриальные, базовые);
- дорожные, строительные, кровельные битумы;
- другие продукты нефтепереработки, включая различного рода нефтяные растворители, продукт остаточный гидрокрекинга, вакуумный газойль, нефтяной газ и серную кислоту.

Торфяная промышленность производит добычу торфа на топливо, для сельского хозяйства и химической переработки. Торф используется как топливо прежде всего в коммунально-бытовой сфере. Основными видами продукции являются: торфяные брикеты, торф кусковой, и сфагновый (содержит до 70 % сфагновых мхов).

Электроэнергетика осуществляет выработку, передачу и распределение электрической, а также тепловой энергии. Белорусская энергосистема представлена крупными тепловыми электростанциями, районными котельными, включает более 250 тыс. км линий электропередач высокого напряжения и более 2 тыс. км тепловых сетей. Среди тепловых энергостанций различают *конденсационные* (вырабатывают только электрическую энергию и имеют высокий КПД) и *теплоэлектроцентрали* (генерируют электрическую и тепловую энергию).

Самая крупная электростанция Беларуси – Лукомльская конденсационная электрическая станция (ГРЭС), которая расположена вблизи города Новолукомля Витебской области на берегу Лукомльского

озера. Установленная мощность после технического перевооружения электростанции составляет 2898,5 МВт.

Вторая по мощности тепловая электростанция Беларуси, имеющая установленную мощность 1385 МВт, расположена вблизи города Бреста, на берегу озера Белого, которое служит для электростанции источником технического водоснабжения и озером-охладителем циркуляционной воды. Среди теплоэлектростанций по выработке электрической энергии выделяются: Минские ТЭЦ-4, ТЭЦ-3, ТЭЦ-5, Гомельская ТЭЦ-2, Могилевская ТЭЦ-2, Светлогорская ТЭЦ, Мозырская ТЭЦ и Бобруйская ТЭЦ-2. Теплоэлектроцентрали и районные котельные вырабатывают около 60 % тепловой энергии.

Действуют несколько тысяч малых энергетических установок, которые по сравнению с вышеуказанными электростанциями, имеют низкие технико-экологические характеристики и большее негативное воздействие оказывают на окружающую среду.

Небольшая часть электрической и тепловой энергии в Беларуси производится на установках, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ). В таблице 6.1 приведены установки на ВИЭ, их количество и установленная мощность по состоянию на 2016 год.

Таблица 6.1 – Энергетические установки Республики Беларусь, работающие за счет возобновляемых источников энергии

Вид установки ВИЭ	Количество	Мощность, МВт
Энергисточники на местных видах топлива	3265	Более 6000 (МВт) тепловой энергии
В т. ч. мини-ТЭЦ на древесном топливе	22	129 электроэнергии 345 тепловой энергии
Биогазовые установки	17	25,7
Гидроэлектростанции	49	33,5
Ветроэнергетические установки	65	56,7
Тепловые насосы	118	10
Фотоэлектрические станции	31	37
Гелиоводонагревательные установки	287	3,8

Из таблицы 6.1 видно, что наибольшую электрическую и тепловую мощность имеют энергоустановки на местных видах топлива (главным образом дрова, топливная щепка и древесные отходы). По тепловой энергии количество энергоустановок на ВИЭ составляет 3692 (включая мини-ТЭЦ), по электроэнергии – 184 установки. Из полной установленной мощностью Белорусской энергосистемы в 2016 году 9851 МВт суммарная мощность энергоустановок на ВИЭ составила 97 МВт, или 1,7 %.

В стране разрабатывается несколько нефтяных месторождений, все они относятся к Припятской нефтегазовой впадине. Промышленные запасы месторождений оцениваются в 63 млн т нефти и 35 млрд м³ попутного газа.

Геологические запасы торфа в стране оцениваются в размере 4,3 млрд т, экономические – 1 млрд т. Торфяное топливо играет важную роль в обеспечении потребностей населения и коммунально-бытовых предприятий республики в твердом топливе. Торфодобывающие и торфоперерабатывающие предприятия ежегодно добывают 3 млн т торфа, причем 2,8 млн т используется для производства торфяных брикетов и 0,2 млн т для приготовления торфяных питательных смесей и отправки на экспорт. В последние годы Беларусь увеличила поставки торфобрикета в Европу на 30 %.

В Припятском прогибе отмечаются запасы горючих сланцев в промышленном объеме 3 млрд т (эквивалентных 660 млн т у.т.) и 150 млн т бурых углей.

6.2 Тенденции развития топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь

При развитии ТЭК Беларуси необходимо обеспечить надежность и безопасность государства при потреблении топливно-энергетических ресурсов с учетом их рационального использования.

Основными направлениями развития ТЭК, учитывая требования охраны окружающей среды и потребности страны, являются:

1 Обеспечение энергетической безопасности и усиление энергетической независимости Беларуси. С этой целью увеличивается доля вторичных энергетических ресурсов (горючих, тепловых и избыточного давления). Шире вовлекаются в топливно-энергетический баланс местные виды топлива (дрова, топливная щепка, древесные отходы, солома и прочие виды). Увеличивается доля возобновляемых источников энергии (гидроэлектростанции, ветроэнергетические установки, тепловые насосы, фотоэлектрические станции, гелиоводонагревательные и биогазовые установки). Диверсифицируются импортируемые первичные топливно-энергетические ресурсы. Создаются стратегические запасы основных видов энергоносителей (подземные газовые хранилища, нефте- и мазутохранилища).

2 Расширяется электрификация, поскольку электрическая энергия является наиболее удобным видом энергии и по праву может считаться основой современной цивилизации, обеспечивающей большинство технических средств механизации и автоматизации производственных процессов (оборудование, приборы, ЭВМ), замену человеческого труда машинным.

Широкое использование электрической энергии обусловлено следующими факторами:

- возможностью выработки электроэнергии в больших количествах на одном генерирующем предприятии и транспортировки ее на дальние расстояния при сравнительно небольших потерях;
- возможностью трансформации в другие виды энергии: механическую, химическую, тепловую, световую;
- отсутствием загрязнения окружающей среды при использовании;
- возможностью применения на её основе принципиально новых прогрессирующих технологических процессов с высокой степенью автоматизации.

3 Реконструкция и модернизация действующих, а также замена выработавших срок энергетических мощностей с использованием новых технологий. Так, на тепловых электростанциях широкое применение получили парогазовые установки. В них объединены общим технологическим циклом паротурбинная и газотурбинная установки. В результате КПД парогазовой установки выше по сравнению с отдельно взятыми паротурбинной и газотурбинной установками. Простейшая схема такой ПГУ представлена на рисунке 6.1.

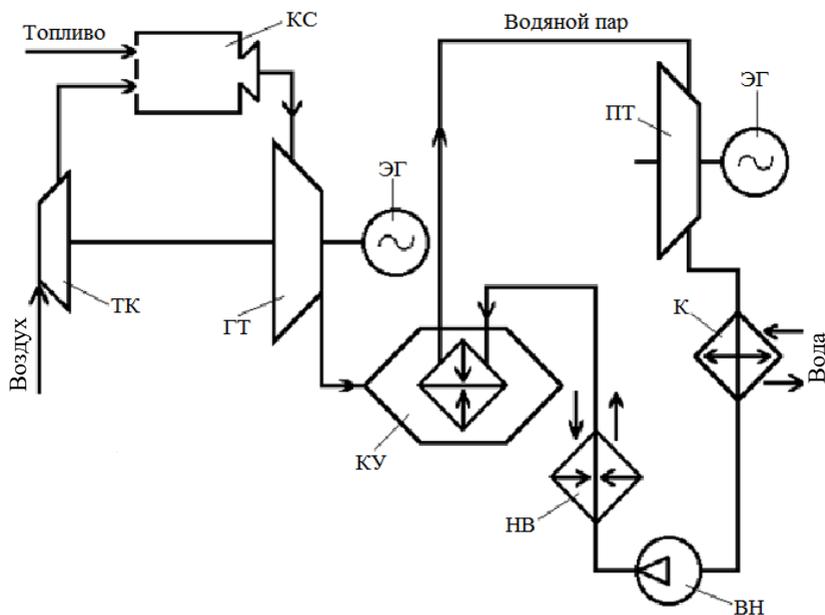


Рисунок 6.1 – Принципиальная схема парогазовой установки:

ТК – турбокомпрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ЭГ – электрические

генераторы; ПТ – паровая турбина; К – конденсатор водяного пара; ВН – водяной насос;
НВ – нагреватель воды; КУ – котел-утилизатор

Применение парогазовой установки, имеющей КПД, равный 44–46 %, позволяет повысить общий КПД тепловой электростанции, а значит эффективный расход топлива.

4 Развитие прогрессивных технологий в нефтепереработке, повышающих её глубину и качество нефтепродуктов. Как известно, в Беларуси два современных нефтеперерабатывающих предприятия: Новополоцкий («Нафтан») и Мозырский. Их продукты нефтепереработки являются весомой долей в экспорте страны. Увеличить эту долю можно, либо повысив общий объём переработки нефти (она ограничена импортером, т. е. внешним государством), либо при прежнем объёме переработки улучшить технологию, увеличив глубину переработки сырой нефти (зависит только от Беларуси).

5 Увеличение объёма транзитных услуг при передаче энергетических ресурсов и самой энергии. Это транзит сырой нефти и продуктов нефтепереработки, природного газа и электрической энергии.

6 Снижение энергоёмкости внутреннего валового продукта (ВВП) на основе реализации передовых мировых достижений в области технологического, структурного и организационных потенциалов энергосбережения. При этом снижение ВВП предусматривается осуществить прежде всего за счет реализации технологического потенциала энергосбережения. Проблеме энергосбережения посвящены основополагающие нормативные правовые документы, принятые в Республике Беларусь. Среди них необходимо особо выделить Закон Республики Беларусь 08.01.2015 № 239-З «Об энергосбережении». В Законе указывается, что регулирование вопросов энергосбережения, учитывая первостепенную важность этой проблемы, осуществляется Президентом Республики Беларусь, Советом Министров Республики Беларусь, республиканскими органами государственного управления, местными исполнительными и распорядительными органами. Уполномоченным Республиканским органом государственного управления в сфере энергосбережения является Департамент по энергоэффективности. Он проводит единую государственную политику, обеспечивает экспертизу энергоэффективности, разрабатывает республиканские программы энергосбережения, согласовывает отраслевые и региональные программы, организует пропагандистскую работу по энергосбережению.

Для осуществления политики энергосбережения и энергоэффективности следует в организациях, потребляющих ТЭР, регулярно проводить энергетическое обследование (энергоаудит). Причём в обязательном порядке ему подлежат организации с годовым потреблением ТЭР 1,5 тыс. т

у.т. и более. Этот энергоаудит должен проводиться не реже одного раза в 5 лет. В отношении организаций, годовое потребление которых менее 1,5 тыс. т у.т., энергоаудит может проводиться в добровольном порядке.

Энергоаудит в праве оказывать только те внешние организации, которые имеют сертификат соответствия на оказание услуг по энергетическому обследованию, подтверждающий их компетентность.

В результате энергообследования разрабатываются энергосберегающие мероприятия и энергетический паспорт объема обследования. Устанавливаются **целевой показатель энергосбережения** (например, для предприятий Белорусской железной дороги в 2017 году целевой показатель составляет 8,1, т.е. на 8,1 % необходимо уменьшить энергопотребление по сравнению с предыдущим годом) и **показатель по использованию местных видов топлива** (для предприятий Белорусской железной дороги в 2017 г. показатель по использованию МВТ составляет 16,3, т. е. 16,3 % энергопотребления предприятия должны составлять местные виды топлива).

При планировании производства продукции необходимо осуществлять нормирование расхода ТЭР. Причем нормирование должно основываться на современных достижениях науки и техники в сфере энергосбережения и систематически пересматриваться с учетом планируемого развития производства и достижения наиболее экономичных показателей использования ТЭР.

Нормы расхода ТЭР устанавливаются для организации с годовым потреблением ТЭР 100 т у.т. и более, а также организаций, имеющих генераторы тепловой энергии производительностью 0,5 Гкал/ч. Норма расхода ТЭР для организаций устанавливаются территориальными органами по надзору за рациональным использованием ТЭР и Департаментом по энергоэффективности Республики Беларусь.

В сфере энергосбережения разрабатываются, утверждаются и реализуются республиканские, отраслевые и региональные **программы энергосбережения**, а также программы отдельных организаций. Они могут быть долгосрочными и краткосрочными.

Надзор и оценку деятельности организации в сфере энергосбережения осуществляют территориальные органы (областные управления и Минское городское управление) по надзору за рациональным использованием топлива, электрической и тепловой энергии, реализацией мер по экономии и соблюдению норм расхода ТЭР.

В Республики Беларусь не допускаются строительство и ввод в эксплуатацию объектов, в том числе после реконструкции, модернизации или капитального ремонта, не соответствующих требованиям об энергосбережении.

Энергосбережение стимулируется в виде:

- государственной поддержки (посредством предоставления из республиканского бюджета финансовой помощи или возмещения части расходов по процентам за пользование банковскими кредитами);
 - финансирования программ за счет средств республиканского и местных бюджетов;
 - приобретения производимой электроэнергии на объектах, работающих на местных ТЭР;
 - проведения гибкой тарифной политики платежей, стимулирующей экономию ТЭР;
 - предоставления налоговых, таможенных и иных льгот для импортного технологического оборудования при осуществлении инвестиционных проектов в сфере энергосбережения;
 - проведение ежегодного соревнования по энергосбережению среди организаций с выплатой денежных премий победителям;
 - созданных условий для распространения идей и передового опыта учреждений образования в сфере энергосбережения;
 - создание условий для мотиваций к оптимизации работы по энергосбережению.
- Учитывая важность проблемы энергоэффективности и энергосбережения, учебные программы профессионально-технического, среднего специального и высшего образования должны обязательно включать изучение основ энергосбережения.

В целях реализации государственной политики энергосбережения должны осуществляться подготовка и повышение квалификации специалистов в области применения энергоэффективных технологий и осуществления энергетического менеджмента.

В сфере энергосбережения Республика Беларусь осуществляет международное сотрудничество. Основными направлениями являются:

- взаимодействие в рамках международных договоров;
- участие в международных выставках, конференциях и других мероприятиях;
- взаимовыгодный обмен информацией;
- реализация проектов международной технической помощи;
- привлечение иностранных инвестиций для реализации проектов по повышению энергоэффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Смил, В. Энергетика: мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики / В. Смил. – М. : АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2012. – 272 с.
- 2 Алексеев, Г. Н. Энергия и энтропия / Г. Н. Алексеев. – М. : Знание, 1978. – 192 с.

3 **Овчинников, В. М.** Основные виды и характеристика энергетических ресурсов : учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников, Л. В. Шенец, В. В. Макеев. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 117 с.

4 **Агабеков, В. Е.** Нефть и газ: технологии и продукты переработки / В. Е. Агабеков, В. И. Косяков. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 459 с.

5 Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учеб. пособие / под ред. В. В. Денисова. – Ростов н/Д : Феникс, 2015. – 382 с.

6 **Германович, В.** Альтернативные источники энергии и энергосбережение / В. Германович, А. Турилин. – СПб. : Наука и техника, 2014. – 320 с.

7 **Вавилов, А. В.** Топливо и нетрадиционных энергоресурсов / А. В. Вавилов. – Минск : СтройМедиаПроект, 2014. – 88 с.

8 **Быстрицкий, Г. Ф.** Основы энергетики : учеб. / Г. Ф. Быстрицкий. – М. : КНОРУС, 2013. – 352 с.

9 **Зарецкий, А. И.** Атомная электростанция: преимущества и перспективы / А. И. Зарецкий. – Минск : Беларусь, 2013. – 119 с.

10 **Зубрев, Н. И.** Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / Н. И. Зубрев, М. В. Устинова. – М. : ФГБОУ, 2015. – 392 с.

11 Закон Республики Беларусь 27.12.2010 № 204-3 «О возобновляемых источниках энергии». – Минск, 2010. – 11 с.

12 Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23.12.2015 № 1084. – Минск, 2015. – 27 с.

Учебное издание

*ОВЧИННИКОВ Вячеслав Михайлович
ШЕНЕЦ Леонид Васильевич
МАЛАШЕНКО Михаил Петрович*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ БЕЛАРУСИ

Учебно-методическое пособие

Редактор И. И. Эвентов
Технический редактор В. Н. Кучерова

Подписано в печать 29.12.2017 г. Формат 60×84¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 6,37. Тираж 50 экз.
Зак. № 10. Изд. № 64

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель