

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических устройств

**Г. В. Барченко**

## ***ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ***

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
«Радиотехника» и «Радиоинформатика»  
всех форм обучения

Минск 2007

УДК 621.311(076)  
ББК 31.26 я 7  
Б 26

**Р е ц е н з е н т**  
доц. кафедры защиты информации БГУИР,  
канд. техн. наук Н. И. Шатило

**Барченко, Г. В.**  
Б 26      Основы энергосбережения : учеб.-метод. пособие для студ. спец.  
«Радиотехника» и «Радиоинформатика» всех форм обуч. / Г. В.  
Барченко. – Минск : БГУИР, 2007. – 72 с. : ил.  
ISBN 978-985-444-069-9

Приведен краткий обзор современного состояния энергетического комплекса мира и Беларуси, даны основы теплотехнического расчета тепловых потерь ограждающих конструкций зданий и сооружений, энергосберегающих технологий, нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов.

**УДК 621.311(076)**  
**ББК 31.26 я 7**

**ISBN 978-985-444-069-9**

© Барченко Г. В., 2007  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

# 1. СУЩНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ

## 1.1. Мировое потребление энергетических ресурсов

Энергия всегда играла важную роль в жизни человечества. Все виды жизнедеятельности связаны с затратами энергии. На протяжении веков производству энергии предшествовало развитие научной мысли, причем доступные виды энергии, а также способы ее использования оказывали непосредственное влияние на общество.

Так, в XIX в. повсеместное использование угля, изобретение паровой машины, достижения в области химии и сталелитейной промышленности явились предпосылкой для первой промышленной революции. Открытие электричества оказало глубочайшее воздействие на жизнь всего человечества и содействовало зарождению и росту крупнейших городов мира. В XX в. разработка все более быстрыми темпами других видов ископаемого топлива – нефти и природного газа – наряду с развитием гидроэнергетики и освоение энергии атома позволила промышленно развитым странам осуществить грандиозные преобразования, которые и сформировали современный мир со всеми его противоречиями, проблемами и надеждами. Но каждый виток вверх по спирали исторического развития сопровождается более высоким уровнем потребления энергии.

Проблемы отыскания и использования соответствующих видов энергии всегда интересовали людей, однако наибольшую значимость они приобрели сегодня. Мировое потребление энергии стало соизмеримым с запасами горючих ископаемых – базой современной энергетики. То, что природой создавалось на протяжении геологических эпох (миллионов лет), расходуется в течение нескольких десятилетий. Люди осознают: во взаимодействии Человека с Природой происходит нечто очень серьезное, возможно, необратимое.

Если до 1980 г. в мире было добыто 150 млрд тнэ (условное топливо в нефтяном эквиваленте), то за 20 последних лет XX в. – почти в 1,2 раза больше. Это грозит не только исчерпанием дешевых легкодоступных месторождений, но и серьезными экологическими осложнениями.

Для выживания человеку необходимо примерно 8000 кДж в день. Однако в среднем расход на душу населения в 15 раз больше, а в США, например, эта цифра достигает 800 000 кДж. Теоретически доказано, что для стабилизации ситуации человечество должно потреблять не более 1 % от энергопотребления биосферы – около 1 млрд кВт постоянно. В противном случае деградация биосферы, а следовательно, и человечества неизбежна. Таким образом, в настоящее время каждый житель планеты должен потреблять не более 18 000 кДж в сутки (независимо от источника энергии). Это предел, к которому надо стремиться, создавая всеобъемлющий комплекс комфортного жизнеобеспечения (питание, перемещение, обогрев, развлечения, производственная деятельность и т.п.).

Сколько энергии потребуется человечеству в ближайшем и более отдаленном будущем? Как долго нынешние способы производства энергии будут удовлетворять потребность в ней? Может ли топливно-энергетический комплекс нарушить экологическое равновесие планеты? Каким видам энергии суждено стать главными в будущем? Как решать энергетическую проблему в настоящее время? Эти и другие аналогичные вопросы беспокоят сегодня не только ученых и экономистов. История помнит не один «энергетический кризис». Столкнувшись в очередной раз с нехваткой энергии, люди не опускали руки, не возвращались к пещерному образу жизни, а восходили на новый, более высокий виток технического прогресса.

Испытав нехватку мускульной силы рабов, жители Древнего Рима создали удивительную систему акведуков, приводящую в движение мельницы и другие механизмы. Люди изобрели водяное колесо, заставили служить себе энергию угля, нефти, газа, создав для этого паровую машину, двигатель внутреннего сгорания. И что интересно: каждый раз человек искал не энергию (источники ее были известны), а способы ее превращения. История повторяется: аналогичная ситуация сложилась и теперь. Человечеству необходимо выбирать: каким видам энергии отдать предпочтение, на чем сосредоточить основные усилия, во что вкладывать средства.

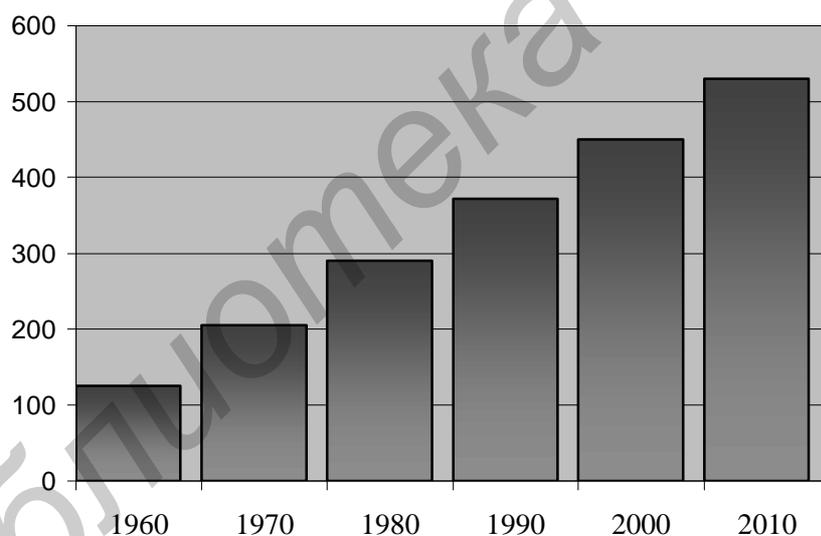


Рис. 1.1. Рост мирового потребления энергоресурсов

На рис. 1.1 представлен график мирового потребления энергетических ресурсов с историческим и прогнозным (до 2010 г.) участками. Интересно отметить, что представленные данные как в исторической его части (начиная с 1960 г.), так и в прогнозной (по средним значениям 10 наиболее авторитетных энергетических центров мира) достаточно точно описываются прямой линией, т.е. представляют собой линейную функцию времени, которую можно выразить формулой

$$E_t = E' + 8t, \quad (1.1)$$

где  $E_t$  – потребление энергоресурсов в год  $t$ -й, начиная с 1960 г.;

$E'$  – потребление в 1960 г., равное 125 ЭДж; ( $1 \text{ Э} = 10^{18}$ );

$t$  – количество лет, начиная с 1960 г.

На основании (1.1) можно получить и суммарное потребление энергоресурсов за определенный промежуток времени.

К примеру, легко подсчитать, что в период между 1980 и 2000 гг. потребление составило 175 млрд тнэ, или, как указано выше, существенно больше, чем за всю предыдущую историю.

Правда, в общее количество энергопотребления входят не только органические виды топлива, но также и гидроэнергия, и атомная, и другие виды энергии. Что же касается нефти, газа и угля, то рост их потребления до 1980 г., практически описываемый формулой (1.1) с погрешностью, не превышающей 4 %, затем несколько снизился.

Если экстраполировать прогноз потребления энергии до 2030 г. по средним значениям, то окажется, что в 2030 г. оно будет в два раза превосходить потребление 1990 г., т.е. за 40 лет произойдет удвоение потребления энергии.

С 1990 по 2030 гг. потребление энергии может выразиться величиной 20 540 ЭДж, или примерно 490 млрд тнэ, что превышает суммарный ресурс нефти и газа.

## 2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Закон Республики Беларусь «Об энергосбережении» определяет следующие основные понятия:

- энергосбережение – организационная, научная, практическая, информационная деятельность государственных органов, юридических и физических лиц, направленная на снижение расхода (потерь) топливно-энергетических ресурсов в процессе их добычи, переработки, транспортировки, хранения, производства, использования и утилизации;

- топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) – совокупность всех природных и преобразованных видов топлива и энергии, используемых в республике;

- эффективное использование топливно-энергетических ресурсов – использование всех видов энергии экономически оправданными, прогрессивными способами при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдении законодательства;

- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии – источники электрической и тепловой энергии, использующие энергетические ресурсы рек, водохранилищ и промышленных водостоков, энергию ветра, солнца, редуцируемого природного газа, биомассы (включая древесные отходы), сточных вод и твердых бытовых отходов;

- вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) – энергия, получаемая в ходе любого технологического процесса в результате недоиспользования

первичной энергии или в виде побочного продукта основного производства и не применяемая в этом энергетическом процессе.

*Энергетика* – область человеческой деятельности, связанная с производством, передачей потребителям и использованием энергии.

В мире наиболее развито производство электрической энергии, что обусловлено совершенством и сравнительной простотой преобразователей этой энергии в механическую, тепловую и другие виды энергии, управляющей ее мощностью аппаратуры, возможностью транспортировки и дробления для использования многими разнородными потребителями, а также экологической чистотой использования электроэнергии в подавляющем большинстве производств. К недостаткам электроэнергии следует отнести несовершенство и громоздкость устройств для хранения и накопления электроэнергии, а также серьезную опасность для человека, обусловленную тем, что человек не имеет органолептического восприятия электрического напряжения.

Поскольку большая часть электроэнергии вырабатывается на теплоэлектростанциях, к энергетике относят и топливдобывающие предприятия. Обычно рассматривают топливно-энергетический комплекс страны. Энергосбережение направлено на экономное расходование топливно-энергетических ресурсов, запасы которых на Земле ограничены.

## 2.1. Источники энергии

Источники энергии подразделяются на возобновляемые и истощаемые. *Возобновляемые* источники энергии характеризуются отсутствием естественных возможностей накопления энергии, и поэтому их использование возможно по мере их поступления. Эти источники можно разделить на две группы:

1) естественные, в основе производства которых постоянное получение энергии Солнца (гидроэнергетика, ветроэнергетика, воспроизводимая биомасса);

2) антропогенные, куда входят тепловые, органические и другие отходы деятельности человечества.

*Истощаемые* энергетические ресурсы – это естественно образовавшиеся и накопившиеся в недрах планеты запасы веществ, способные при определенных условиях высвободить заключенную в них энергию. Это все виды ископаемого топлива (уголь, нефть, газ, торф), при сгорании которого расходуется кислород, выделяются используемые прямо либо косвенно тепло и вредные продукты сгорания: газообразные (СО, СО<sub>2</sub>, окислы серы, азота и др.) и твердые (пылевидные и компактные). Процесс получения энергии из топлива негативно влияет в первую очередь на экологию атмосферы (например, возрастание содержания СО<sub>2</sub> вызывает климатические изменения – парниковый эффект, уменьшение содержания О<sub>2</sub> – одна из причин образования озоновых дыр – окон, через которые опасные для всего живого ультрафиолетовые излучения достигают Земли).

Особыми видами истощаемых энергетических ресурсов являются расщепляющиеся (радиоактивные) вещества, находящиеся в недрах нашей планеты. На первый взгляд, ядерное топливо – очень привлекательный источник энергии, поскольку выделение энергии тепла происходит без вовлечения в этот процесс расходуемых элементов атмосферы. В идеале атомная электростанция – экологически чистый источник энергии. Наша цивилизация уже прошла пик эйфории по этому поводу. Практически оказалось, что экологическая безопасность АЭС относительна и зависит не только от соблюдения технологических режимов и надежности элементов оборудования. Срок службы оборудования АЭС оказался по этой причине в 2...3 раза меньше расчетного. Демонтаж, замена элементов этого оборудования более дороги, чем сооружение новых станций. Практически не решена проблема захоронения радиоактивных отходов и изношенного оборудования радиоактивной зоны. Опыт Чернобыля является убедительной иллюстрацией дорогой цены, которую приходится платить за использование АЭС.

Другим (альтернативным) способом использования энергии расщепляющихся материалов является использование тепла земных недр.

## 2.2. Топливо

Органическое топливо состоит из горючих веществ, негорючих минеральных примесей и влаги.

*Древесное* топливо представляет собой в основном клетчатку ( $C_6H_{10}O_5$ ), образующую стенки клеток, и межклеточное вещество со сложной молекулярной структурой – лигнин. Содержание в древесине клетчатки достигает 50...70 %, лигнина – 20...30 %, остальное – воски, смолы, жирные кислоты.

*Ископаемые твердые* виды топлива характеризуются общностью происхождения горючей части. Они произошли в основном из растительной массы, но содержат также большее или меньшее количество белковых и жировых веществ животного происхождения.

Начальные стадии разложения в толще отмершей многоклеточной растительности, происходящие в заболоченных местах, где слой воды препятствует свободному доступу воздуха, называются *оторфенением*. Процесс оторфенения приводит к образованию темно-бурой массы – торфа, в котором встречаются остатки неразложившихся частей растений (листьев, стеблей).

Дальнейшие процессы преобразования торфяной массы приводят к образованию бурых углей. Продуктами последующих процессов преобразования бурых углей являются каменные угли и антрацит.

К твердым ископаемым видам топлива относятся и горючие сланцы. Они представляют собой минеральные породы, пропитанные органическими веществами.

Естественным жидким топливом является нефть – смесь жидких углеводородов различных молекулярных весов и групп. Кроме того, в ней содержится некоторое количество жидких кислородных, сернистых и азотистых соединений.

Природный газ чисто газовых месторождений состоит в основном из метана  $\text{CH}_4$  (95...98 %). В искусственных газообразных видах топлива (газ доменных и коксовых печей, генераторный газ) метана содержится мало. Горючими составляющими в них являются в основном водород  $\text{H}_2$  и окись углерода  $\text{CO}$ .

Горючая часть топлива содержит углерод  $\text{C}$  и водород  $\text{H}_2$ .

Основным элементов горючей части всех видов топлива является углерод  $\text{C}$ . Однако чем больше углерода в топливе, тем труднее оно воспламеняется. При сгорании же водород выделяет на единицу веса примерно в 4,4 раза больше тепла, чем углерод.

Кислород и азот в топливе – органический балласт. Кислород, находясь в соединении с водородом или углеродом топлива, снижает количество теплоты, выделяющейся при сгорании. Азот при сжигании топлива в атмосфере воздуха не окисляется и переходит в продукты сгорания в свободном виде.

Вредная примесь топлива – сера. При горении серы теплоты выделяется примерно в 3,5 раза меньше, чем при горении углерода. Содержание серы в топливе приводит к сильной коррозии низкотемпературных поверхностей нагрева.

Негорючие минеральные примеси – балласт топлива.

В газообразном топливе – это углекислый газ  $\text{CO}_2$ , азот  $\text{N}_2$  и водяные пары  $\text{H}_2\text{O}$ .

В твердых видах топлива (кроме сланцев) примеси состоят в основном из глины  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , свободного кремнезема  $\text{SiO}_2$  и железного колчедана  $\text{FeS}_2$ .

В горючих сланцах примеси – это в основном карбонаты.

В нефти негорючие примеси – это различные соли и окислы железа.

Второй составляющей балласта топлива является влага. Влага может попадать в топливо при его добыче и при транспортировке. Разновидностью влаги является капиллярная влага, которая заполняет капилляры и поры твердого топлива. В твердых видах топлива содержится также коллоидная и гидратная влага. Последняя химически связана с минеральными примесями топлива ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и глиной.

Различают высшую и низшую теплоту сгорания топлива.

*Высшей теплотой сгорания* топлива  $Q^p_v$  называется количество тепла, выделяющееся при полном сгорании 1 кг твердого (жидкого) или  $1\text{ м}^3$  нормального газообразного топлива. В высшую теплоту сгорания входит тепло, выделяющееся при конденсации водяных паров, которые содержатся в продуктах сгорания топлива.

При температуре уходящих газов котельных агрегатов влага в продуктах сгорания находится в парообразном состоянии. Поэтому при тепловом расчете котельных агрегатов обычно пользуются *низшей теплотой сгорания* топлива  $Q_{н}^p$ , которая не учитывает скрытую теплоту парообразования водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания топлива.

Теплоту сгорания топлива определяют экспериментально. Для этого служат специальные приборы – калориметры.

Теплота сгорания основных видов органического топлива колеблется от 6200...7500 кДж/кг (многозольные сланцы, высоковлажный торф, бурый уголь) до 25 000...29 000 кДж/кг (высококалорийный каменный уголь) и 33 000...42 000 кДж/кг (нефтепродукты и газ). В расчетах широко используется понятие условного топлива с теплотой сгорания 29 309 кДж/кг (7000 ккал/кг).

*Цепная ядерная реакция* представляет собой деление ядра на две части, называемые осколками деления, с одновременным выделением нескольких (2...3) нейтронов, которые, в свою очередь, могут вызвать деление следующих ядер. Такое деление происходит при попадании нейтрона в ядро атома исходного вещества. Образующиеся при делении ядра осколки деления обладают большой кинетической энергией. Торможение осколков деления в веществе сопровождается выделением большого количества тепла. Осколки деления – это ядра, образовавшиеся непосредственно в результате деления. Осколки деления и продукты их радиоактивного распада обычно называют продуктами деления. Ядра, делящиеся нейтронами любых энергий, называют *ядерным горючим* (как правило, это вещества с нечетным атомным числом). Существуют ядра, которые делятся только нейтронами с энергией выше некоторого порогового значения (как правило, это элементы с четным атомным числом). Такие ядра называют *сырьевым материалом*, т.к. при захвате нейтрона пороговым ядром образуются ядра ядерного горючего. Комбинация ядерного горючего и сырьевого материала называется *ядерным топливом*. Ниже приведено распределение энергии деления ядра  $^{235}\text{U}$  между различными продуктами деления (в МэВ):

Таблица 2.1

Составляющие энергии деления ядерного топлива

Кинетическая энергия осколков деления	162
Кинетическая энергия нейтронов деления	5
Энергия $\gamma$ -излучения, сопровождающего захват нейтронов	10
Энергия $\gamma$ -излучения продуктов деления	6
Энергия $\beta$ -излучения продуктов деления	5
Энергия, уносимая нейтрино	11

Природный уран состоит из трех изотопов:  $^{238}\text{U}$  (99,282 %),  $^{235}\text{U}$  (0,712 %) и  $^{234}\text{U}$  (0,006 %). Он не всегда пригоден как ядерное топливо, особенно если конструкционные материалы и замедлитель интенсивно поглощают нейтроны. В этом случае ядерное топливо готовят на основе обогащённого урана. В энергетических реакторах на тепловых нейтронах используют уран с обогащением менее 10 %, а в реакторах на быстрых и промежуточных нейтронах обогащение урана превышает 20 %. Обогащённый уран получают на специальных обогатительных заводах. Ядерное топливо делится на два вида:

*природное урановое*, содержащее делящиеся ядра  $^{235}\text{U}$ , а также сырьё  $^{238}\text{U}$ , способное при захвате нейтрона образовывать плутоний  $^{239}\text{Pu}$ ;

*вторичное топливо*, которое не встречается в природе, в том числе  $^{239}\text{Pu}$ , получаемый из топлива первого вида, а также изотопы  $^{233}\text{U}$ , образующиеся при захвате нейтронов ядрами тория  $^{232}\text{Th}$ .

По химическому составу ядерное топливо может быть:

- металлическим, включая сплавы;
- оксидным (например  $\text{UO}_2$ );
- карбидным (например  $\text{PuC}_{1-x}$ );
- нитридным ;
- смешанным ( $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$ ).

Ядерное топливо используется в ядерных реакторах, где оно обычно располагается в герметично закрытых тепловыделяющих элементах (ТВЭЛх) в виде таблеток размером в несколько сантиметров.

К ядерному топливу предъявляются высокие требования по химической совместимости с оболочками ТВЭЛов, у него должна быть достаточная температура плавления и испарения, хорошая теплопроводность, небольшое увеличение объёма при нейтронном облучении, технологичность производства. Металлический уран сравнительно редко используют как ядерное топливо. Его максимальная температура ограничена 660 °С. При этой температуре происходит фазовый переход, в котором изменяется кристаллическая структура урана. Фазовый переход сопровождается увеличением объёма урана, что может привести к разрушению оболочки ТВЭЛов. При длительном облучении в температурном интервале 200...500 °С уран подвержен радиационному росту. Это явление заключается в том, что облучённый урановый стержень удлиняется. Экспериментально наблюдалось увеличение длины уранового стержня в полтора раза. Использование металлического урана, особенно при температуре больше 500 °С, затруднено из-за его распухания. После деления ядра образуются два осколка деления, суммарный объём которых больше объёма атома урана (плутония). Часть атомов-осколков деления являются атомами газов (криптона, ксенона и др.). Атомы газов накапливаются в порах урана и создают внутреннее давление, которое увеличивается с повышением температуры. За счёт изменения

объёма атомов в процессе деления и повышения внутреннего давления газов уран и другие ядерные топлива начинают распухать. Под распуханием понимают относительное изменение объёма ядерного топлива, связанное с делением ядер. Распухание зависит от выгорания и температуры ТВЭЛов.

Количество осколков деления возрастает с увеличением выгорания, а внутреннее давление газа – с увеличением выгорания и температуры. Распухание ядерного топлива может привести к разрушению оболочки ТВЭЛа. Ядерное топливо менее подвержено распуханию, если оно обладает высокими механическими свойствами. Металлический уран как раз не относится к таким материалам. Поэтому применение металлического урана в качестве ядерного топлива ограничивает выгорание, которое является одной из главных оценок экономики атомной энергетики. Радиационная стойкость и механические свойства топлива улучшаются после легирования урана, в процессе которого в уран добавляют небольшое количество молибдена, алюминия и других металлов. Легирующие добавки снижают число нейтронов деления на один захват нейтрона ядерным топливом. Поэтому легирующие добавки к урану стремятся выбрать из материалов, слабо поглощающих нейтроны. К хорошим ядерным топливам относятся некоторые тугоплавкие соединения урана: окислы, карбиды и интерметаллические соединения. Наиболее широкое применение получила керамика – двуокись урана  $UO_2$ . Её температура плавления равна  $2800\text{ }^\circ\text{C}$ , плотность –  $10,2\text{ т/м}^3$ . У двуокиси урана нет фазовых переходов, она менее подвержена распуханию, чем сплавы урана. Это позволяет повысить выгорание до нескольких процентов. Двуокись урана не взаимодействует с цирконием, ниобием, нержавеющей сталью и другими материалами при высоких температурах. Основным недостатком керамики — низкая теплопроводность. Кроме того, горячая керамика очень хрупка и может растрескиваться. Плутоний относится к низкоплавким металлам. Его температура плавления равна  $640\text{ }^\circ\text{C}$ . У плутония плохие пластические свойства, поэтому он почти не поддаётся механической обработке. Технология изготовления ТВЭЛов усложняется ещё токсичностью плутония. Для приготовления ядерного топлива обычно используют двуокись плутония, смесь карбидов плутония с карбидами урана, сплавы плутония с металлами. Высокими теплопроводностью и механическими свойствами обладает дисперсионное топливо, в котором мелкие частицы  $UO_2$ ,  $UC$ ,  $PuO_2$  и других соединений урана и плутония размещают гетерогенно в металлической матрице из алюминия, молибдена, нержавеющей стали и др. Материал матрицы и определяет радиационную стойкость и теплопроводность дисперсионного топлива. Например, дисперсионное топливо первой АЭС состояло из частиц сплава урана с 9 % молибдена, залитых магнием.

Урановое ядерное топливо получают переработкой руд. Процесс происходит в несколько этапов.

Для бедных месторождений:

- в современной промышленности в силу отсутствия богатых урановых руд (исключения составляют канадские месторождения, где концентрация урана доходит до 30 % и австралийских с содержанием урана до 3 %) используется способ подземного выщелачивания руд. Это исключает дорогостоящую добычу руды. Предварительная подготовка идёт непосредственно под землёй. Через трубы под землю над месторождением закачивается серная кислота, иногда с добавлением солей трёхвалентного железа (для окисления урана U(IV) до U(VI)), хотя руды часто содержат железо и пиролюзит, которые облегчают окисление. Через откачные трубы специальными насосами раствор серной кислоты с ураном поднимается на поверхность. Далее он непосредственно поступает на сорбционное, гидрометаллургическое извлечение и одновременное концентрирование урана;

- для рудных месторождений: используют обогащение руды и радиометрическое обогащение руды;

- гидрометаллургическая переработка – дробление, выщелачивание, сорбционное или экстракционное извлечение урана с получением очищенной закиси-оксида урана  $U_3O_8$  или диураната натрия  $Na_2U_2O_7$ , или диураната аммония;

- перевод урана из оксида в тетрафторид  $UF_4$  или из оксидов непосредственно для получения гексафторида  $UF_6$ , который используется для обогащения урана по изотопу 235;

- обогащение методами газовой термодиффузии или центрифугированием;

-  $UF_6$ , обогащенный по 235 изотопу, переводят в двуокись  $UO_2$ , из которой изготавливают «таблетки» ТВЭЛов или получают другие соединения урана с этой же целью.

Торий в настоящее время в качестве сырья для производства ядерного топлива не применяется в силу следующих причин:

1) запасы урана достаточно велики;

2) извлечение тория сложнее и дороже из-за отсутствия богатых месторождений;

3) образование  $^{232}U$ , который, в свою очередь, образует  $\gamma$ -активные ядра  $^{212}Bi$ ,  $^{208}Tl$ , затрудняющие производство ТВЭЛов;

4) переработка облучённых ториевых ТВЭЛов сложнее и дороже переработки урановых.

Плутониевое ядерное топливо в настоящее время также не применяется, что связано с его крайне сложной химией. За многолетнюю историю атомной промышленности неоднократно предпринимались попытки использования плутония как в виде чистых соединений, так и в смеси с соединениями урана, однако успехом они не увенчались. Топливо для АЭС, содержащее плутоний, называется МОХ-топливо. Применение его в водо-водяных реакторах (ВВЭР) нецелесообразно из-за уменьшения примерно в 2 раза периода разгона, на что не рассчитаны штатные системы управления реактором.

При работе ядерного реактора топливо выгорает не полностью, имеет место процесс воспроизводства отдельных изотопов (Pu). В связи с этим отработанные ТВЭЛы направляют на переработку для регенерации топлива и повторного его использования.

В настоящее время для этих целей наиболее широко применяется пьюрекс-процесс, суть которого состоит в следующем: ТВЭЛы разрезают на части и растворяют в азотной кислоте, далее раствор очищают от продуктов деления и элементов оболочки, выделяют чистые соединения U и Pu. Затем полученный диоксид плутония PuO<sub>2</sub> направляют на изготовление новых сердечников, а уран – либо на изготовление сердечников, либо на обогащение <sup>235</sup>U.

Переработка и регенерация высокорadioактивных веществ – сложный и дорогостоящий процесс. ТВЭЛы после извлечения из реакторов проходят выдержку в течение нескольких лет (обычно 3...6) в специальных хранилищах. Трудности вызывают также переработка и захоронение отходов, непригодных к регенерации.

### **2.3. Запасы органических видов топлива**

Энергетика, образно говоря, мускулы современной экономики. Нефть и газ – ее основная пища. Но запасы их близки к истощению и, к сожалению, не возобновляются.

Из маловажного источника энергии, которым она являлась в начале XX в., нефть превратилась в ресурс, на долю которого к середине 70-х гг. приходилось уже около половины мирового потребления энергии. Удобства ее использования, транспортировки и переработки, низкая стоимость добычи, а также иллюзия о практически бесконечных запасах привели к такому скачку в потреблении нефти, который явился беспрецедентным в истории с точки зрения его скорости и масштабов.

Нефть – «кровь современной цивилизации». Сегодня невозможно представить себе мир без нефти. Нефть – это не только тепловые станции, автомобили, самолеты, но и синтетические волокна, моющие средства, пластмассы, удобрения, красители, лаки, душистые вещества и лекарства. Наличие или отсутствие «черного золота» определяет внутреннюю и внешнюю политику государств.

Природный газ – неизменный спутник нефти. Самый чистый и удобный из всех ископаемых видов топлива, газ полноправно «прописался» в наших квартирах, сделался незаменимым и необходимым помощником. Однако не ему выпала честь решать энергетическую проблему. Судьба газа еще более тревожна, чем нефти. Если в начале XX в. его практически вообще не применяли, и в 1955 г. доля газа в энергетическом балансе планеты составляла лишь 3 %, то уже в 1972 г. она достигла 18 %. Согласно МИРЭК в 1985 г. производство газа равнялось 1,85, а в 2000 г. составило 3,43 млрд тнэ.

В то же время его традиционные ресурсы, представляющие собой сумму доказанных (65 трлн м<sup>3</sup>) и неразведанных запасов (212 трлн м<sup>3</sup>), которые могут быть извлечены при нормальном развитии технологии разведки и добычи, – 270 трлн м<sup>3</sup>.

Уголь был известен человеку с давних времен, но история техники свидетельствует, что в качестве нового вида топлива его использовали приблизительно 900 лет назад в Англии. Настоящая промышленная добыча его началась только в конце XVIII в. в связи с развитием металлургии. Популярность угля, спасшего мир от «энергетического кризиса», буквально в считанные десятилетия стала столь велика, что он был провозглашен «черным королем». Однако за головокружительным взлетом последовало стремительное падение. Нефть и газ составили настолько серьезную конкуренцию, что для него наступили черные дни. Повальное увлечение нефтью и газом сделало уголь грубой, второстепенной «пищей» для промышленности. Его потребление резко упало. Например, в США с 1920 г. по 1972 г. потребление угля сократилось с 78 до 17 %, а в мировой энергетике его удельный вес в 1972 г. достиг лишь 12 %. И вот, стойко преодолев превратности судьбы, уголь снова пользуется спросом. Например, с 1975 г. по 1979 г. его добыча возросла с 3,2 до 3,5 млрд т, и тенденция роста обещает сохраняться и впредь.

В тех же Соединенных Штатах Америки потребление угля с 1974 г. по 1988 г. возросло с 350 Мтнэ до 474 Мтнэ, т.е. в полтора раза.

Подобный сдвиг в сторону угля в топливно-энергетическом балансе характерен для многих стран мира.

В настоящее время разведанные запасы каменного угля составляют 87 % всех горючих ископаемых источников энергии на планете. Если предположить, что человечество откажется от всех других источников энергии и будет использовать только каменный уголь, то с учетом ежегодного роста потребления энергии (в последнее время 2...2,5 %), а также неизбежных энергетических потерь человечеству хватит угля примерно на 200 лет.

Однако современный уголь – уже далеко не тот добрый старый знакомый, который заполнял подземные кладовые несколько десятков лет тому назад. Энергетике предстоит включить в свой «рацион» «трудный» и «грязный» уголь. Чтобы успешно сжигать его в топках котельных агрегатов, не засоряя при этом окружающую среду, нужна совершенно новая технология. Многообещающие перспективы в этом плане открывает так называемый кипящий слой, хорошо известный в процессах химической технологии.

### **3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Энергетическая проблема, актуальная сегодня практически во всех странах мира, особенно остро ощущается в Беларуси, лишь на 10...13 % способной удовлетворить потребности собственными топливно-энергетичес-

кими ресурсами и располагающей такими энергетическими отраслями промышленности, как химия и нефтехимия, машиностроение и металлообработка, производство строительных материалов.

Анализируя энергетическую проблему после первого нефтяного кризиса, необходимо констатировать, что общее энергопроизводство в мире в целом (эквивалент валовому потреблению энергии) увеличивалось с 1970 г. по 2000 г. примерно в 2 раза (см. рис. 1.1).

Нефть остается все еще основным источником энергии, хотя ее доля в общем мировом энергетическом балансе упала с 49 % в 1974 г. до 38 % в 1992 г.

Вторым наиболее важным источником является твердое топливо, которое сохраняет свою постоянную долю в общем мировом производстве на уровне, примерно 25 %.

Природный газ занимает третье место (21 % в 1992 г.) в удовлетворении мировых энергетических потребностей с постоянным ростом производства, равным 3 % ежегодно.

Возобновляемые источники энергии имели средний годовой прирост в размере 3 % и увеличили свое участие в мировом энергетическом балансе с 8 % в 1974 г. до 10 % в 1992 г.

Атомная энергетика развивалась наиболее высокими темпами (16 % в год) вплоть до 1986 г. Этот темп роста снизился до 6 % в период между 1986–1991 гг., а также еще небольшое падение в 1,5 % произошло в 1992 г.

Производство электроэнергии в период между 1974 и 1991 гг. возросло во всем мире в среднем на 4 % ежегодно. Основная часть электроэнергии генерируется на тепловых станциях, хотя их доля уменьшилась с 73 % в 1974 г. до 64 % в 1991 г. Производство электричества атомными станциями увеличивалось в среднем на 13 % в год до 1990 г., достигнув почти такого же удельного веса, как и гидростанциями. После 1990 г. рост производства электроэнергии атомными станциями существенно замедлился в основном из-за недостатка инвестиций в Западной Европе и Северной Америке. Генерирование электроэнергии гидростанциями, которое возросло до 1990 г. почти на 3 % в год, в начале 90-х гг. демонстрировало лишь очень умеренный рост.

Производство электричества осуществлялось в основном на твердом топливе, причем, если в 1974 г. последнее составляло 50 % среди всех используемых ресурсов, то в 1991 г. его доля увеличилась до 59 %. Нефть, наоборот, достигнув пика в использовании в 1980 г., приобрела стабильную тенденцию к падению (2,6 % в год). Применение газа для генерирования электроэнергии постоянно росло, примерно на 4 % в год. С 1986 г. газ стал более важным, чем нефть. Подводя итоги, можно констатировать, что в 1991 г. доли различных видов топлива, используемых для производства электроэнергии, составляли: твердое топливо – 59 %; газ – 23 %, нефть – 16 % и возобновляемые источники (геотермальные и биомасса) – 2 %.

Европейский Союз в мировом энергопотреблении занимает особое место как по обеспеченности топливно-энергетическими ресурсами, так и по эффективности их использования.

Энергопотребление в промышленности Европейского Союза стабильно снижалось с 1974 г. по 1991 г. Лишь в 1992 г. произошло увеличение на 0,6 %. Такая эволюция соответствовала значительному росту энергоэффективности, хотя рост промышленного производства неуклонно повышался до 1990 г. В 1991 г., несмотря на некоторый спад промышленной активности, энергоемкость продолжала падать, хотя и чуть медленнее.

Анализ энергоемкости валового национального продукта (ВНП) и ее динамики в период с 1974 г. по 1992 г. достаточно сложный. Не только прогрессивные технологии здесь сыграли решающую роль, но и структурные изменения оказали сильное воздействие. Действительно, после второго нефтяного шока перестройка европейской промышленности стала ускоренно уводить ее от энергоемких отраслей, таких как производство чугуна и стали. Энергопотребление в этих двух отраслях в 1992 г. уменьшилось по сравнению с 1974 г. на 41, 17 и 25% соответственно.

Энергопотребление в жилищном и общественном секторах выросло с 1974 г. по 1997 г. в общем на 11 %, но этот рост не был монотонным. Как известно, потребление энергии в этих секторах хотя и является функцией народонаселения, числа домовладений, личных доходов и эволюции сервисного обслуживания, но зависит в значительной мере от климатических погодных условий (отопление, кондиционирование). Кроме электричества, вследствие статистических трудностей невозможно дать полную картину распределения энергии между жилищным сектором и сферой обслуживания. Хотя можно полагать, что 13 % общего роста потребления в основном обусловлены запросами последней, в основном ее коммерческой части (супермаркеты, торговые центры и т.п.).

Два основных энергетических критерия – энергопотребление на душу населения и энергоемкость валового национального продукта – широко используются в анализе. Однако определенная оговорка необходима. Хотя энергопотребление на душу населения в большей степени отражает благосостояние и жилищный уровень государств, выводы, сделанные на основе их сопоставления, в ряде случаев могут привести к недоразумению. Действительно, равенство этого показателя в двух государствах, особенно относящихся к разным регионам, необязательно отражает одинаковый жизненный уровень или состояние экономического развития. Различные структуры экономики, типы применяемых технологий, уровни эффективности энергетического оборудования зачастую ведут к различным уровням энергоемкости даже при одинаковом энергопотреблении на душу населения. Например, среди стран, имеющих централизованную плановую экономику, существует группа с достаточно высоким энергопотреблением на душу населения, но с относительно низкими доходами и высокой энергоемкостью, отличающаяся от других регионов мира. Экономическое развитие этих стран в основном базировалось на энергоемкой

промышленности с низкоэффективным энергооборудованием в других секторах экономики. В Латинской Америке, с другой стороны, энергоемкость почти такая же, как в странах Североамериканского региона (Канада, США, Мексика), но энергопотребление невысокое и доходы значительно ниже. Низкое энергопотребление на душу населения там объясняется мягким климатом, исключающим использование большого количества энергии в жилищно-бытовом секторе.

Вообще следует отметить, что роль энергоемкости ВВП как главного критерия не только энергетической эффективности экономики, но и состояния научно-технического прогресса, и уровня благосостояния населения не бесспорна. Вышеприведенный пример с Латинской Америкой и другие свидетельствуют о неоднозначности этого критерия. Вместе с тем, как правило, страны с более низкими доходами на душу населения имеют более высокую энергоемкость ВВП.

Общая закономерность представляется такой, что страны с развитой экономикой имеют технические, технологические и финансовые возможности понизить энергоемкость ВВП, в то время как странам с низким экономическим уровнем достаточно сложно изыскать средства для структурной перестройки, перехода к новым технологиям, более высоким требованиям к бытовым приборам и более жестким стандартам на энергопотребляющее оборудование. Но гипотетически перспектива представляется оптимистичной, так как страны с низким развитием экономики должны стараться уменьшить ее энергоемкость с ростом доходов, а страны с высоким уровнем развития, которые многого достигли в области энергоэффективности, стремиться стабилизировать энергоемкость в соответствии с требованиями их высоких жизненных стандартов и конкурентоспособности.

Естественно, до 1991 г., т.е. до распада СССР, энергетическая ситуация в мире и Европейском Союзе в том числе не оказывала заметного влияния на потребление энергоресурсов в бывшем СССР и Республике Беларусь в частности, хотя общие тенденции находили свое отражение и здесь, в первую очередь сказываясь на энергетической политике. Однако после распада СССР в связи с обострением энергетической проблемы практически во всех новых независимых государствах явления и процессы, протекающие в энергетической сфере остального мира, не могут не затрагивать жизненно важные интересы их экономики. При этом весь комплекс вопросов – от цен на топливно-энергетические ресурсы до энергетических стандартов на выпускаемую продукцию и норм потребления технологическими процессами – неотъемлемым звеном входит в число условий решения экономических задач. Мировой и европейский опыт представляется важным и полезным при определении энергетической стратегии, выборе оптимального пути развития собственной экономики.

Безусловно, более глубокий анализ требует большего объема информации. Сопоставим основные энергетические показатели Республики Беларусь с развитыми странами мира (табл. 3.1).

## Основные энергетические показатели различных стран

Страна	Энергоемкость валового национального продукта, кг ут/USD	Потребление ТЭР на душу населения, чел.	Потребление электроэнергии на душу населения, кВт·ч/чел.	Потребление электроэнергии в коммунальном быту на душу населения, кВт·ч/чел.	Установленная мощность электростанций на душу населения, кВт/чел.	Доля электроэнергии в общем потреблении, %
Беларусь	2,07	5,42	4794	903	0,675	24,2
СССР бывший	3,21	7,3	6450	976	1,34	22
США	0,75	11,1	12240	3600	3,04	37,9
Франция	0,33	5,2	5790	1800	1,79	47,4
Япония	0,37	4,5	6000	Нет данных	1,5	44,3

Несмотря на то, что Республика Беларусь находится в более суровых климатических условиях, чем другие представленные в таблице страны, энергопотребление на душу населения в ней ниже, за исключением стран с совершенно мягким климатом. Но даже при этом энергоемкость ВВП существенно, в 5...6 раз, выше, чем в остальных странах. В первую очередь это свидетельствует о низкой эффективности использования топливно-энергетических ресурсов промышленностью, значительно преобладающей в структуре потребления энергоресурсов в республике, что также отличает Беларусь. Несмотря на более суровые климатические условия, а следовательно, и значительно больший расход энергии на отопление, потребление на душу населения в жилищно-бытовом секторе в Беларуси ниже, чем в развитых странах. Этот факт подчеркивает скромный быт белорусского населения, ограниченность применения бытовой техники. Уступает Беларусь развитым странам и по производству электроэнергии на душу населения.

В чем же основные причины такого положения? Они общеизвестны:

- преобладающий долгие годы экстенсивный характер развития нашей экономики, и, как следствие, во многом отсталые технологии и энергетически малоэффективное оборудование;
- психология людей, сформировавшаяся на представлениях о неисчерпаемости и дешевизне топливно-энергетических ресурсов в бывшем СССР;
- недостаточно серьезное отношение к энергосбережению, которое в развитых странах давно рассматривается как самостоятельный источник

энергии, по своим масштабам и экономическому значению конкурентоспособный наращиванию энергетических мощностей.

Более того, энергосбережение обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными источниками энергии. С его помощью может быть уменьшен дефицит республики в топливе и, как следствие, улучшен бюджетный баланс. Им стимулируется научно-технический прогресс и технологическое перевооружение производства, открываются новые наукоемкие направления развития экономики, создаются дополнительные рабочие места, особенно необходимые в условиях растущей безработицы, воспитывается рачительное отношение к ресурсам, повышается культура производства, прививается новая психология – психология хозяина.

Так как основным потребителем энергетических ресурсов в Беларуси является промышленность, от изменения ситуации в ней зависит в первую очередь смягчение энергетической проблемы. Показательны усилия развитых западных стран по снижению энергоемкости промышленного производства. Можно сделать вывод, что процесс подъема энергоэффективности промышленности занял примерно 10...12 лет, после чего началась стагнация с незначительным ростом эффективности. Принятые меры, особенно в Великобритании, Ирландии, Люксембурге, позволили совершить достаточно резкий скачок, повысив энергоэффективность на 25...32 % уже к 1980 г.

Республика Беларусь относится к экономическим районам, где ощущается острый дефицит топливно-энергетических ресурсов. В 1990 г. в республике добыто 2 млн т нефти, 0,3 млрд м<sup>3</sup> газа, 4,5 млн т торфа; в коммунально-бытовом секторе использовались отходы лесоперерабатывающей промышленности (0,56 млн т нефтяного эквивалента). Потребление собственных топливных ресурсов составило 3,3 млн т при суммарном годовом потреблении энергии 32,6 млн т, т.е. 10 %. Следует вывод, что энергетическая система Беларуси базируется в основном на импортируемом топливе.

Около 72 % годового потребления энергоресурсов использовалось для производства электричества и тепловой энергии, из них: 13,3 % затрачивалось на технологические нужды промышленности, 12,8 % – на коммунально-бытовые нужды, 1,7 % – на сельское хозяйство и транспорт. Кроме того, в годовом энергопотреблении необходимо учесть 1,06 млн т газа, используемого в качестве сырья для химической промышленности, и 0,96 млн т – на прочие расходы и потери.

Установленная мощность электростанций в республике покрывала менее 75 % общего потребления электричества. Остальная часть электроэнергии поступала от двух крупнейших АЭС, находящихся за пределами республики: Игналинской (Литва) и Смоленской (Россия).

По удельному потреблению электроэнергии на душу населения Республика Беларусь значительно отстала от промышленно развитых стран. Так, в 1990 г. этот показатель составил 4,79 кВт·ч/чел. против 12,24 кВт·ч/чел.

для США. В 1995 г. годовой объем потребления энергоресурсов составил 24,0 млн т, что по сравнению с 1990 г. меньше на 38 %. За этот период сократилось потребление:

- электроэнергии 35 %,
- тепловой энергии 39 %,
- котельно-печного топлива 38 %,
- светлых нефтепродуктов 39 %.

Объем переработки нефти в Беларуси за этот период уменьшился в 3,2 раза, импорт электричества – в 3,5 раза, поставки природного газа – на 16 %. Использование собственных топливных ресурсов в энергетическом секторе увеличилось на 15 %.

В объеме всего импорта доля энергоресурсов в денежном эквиваленте достигает 60 % (около 1,5 млрд US \$), что соизмеримо с величиной годового государственного бюджета республики.

Установленная мощность электростанций составляет 7,1 млн кВт. Около 55 % оборудования электростанций выработало свой ресурс, по прогнозам к 2010 г. этот показатель достигнет 80 %. Из белорусских электростанций только одна Лукомольская, мощностью 2,4 млн кВт, работает в чисто конденсационном режиме, остальные производят как электричество, так и тепло. Суммарная мощность отпускаемого тепла белорусской энергосистемой составляет 9,7 млн кВт, 65 % топлива электростанций и котельных.

## **4. НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

### **4.1. Термодинамика как теоретическая база анализа энергоэффективности**

Для реализации энергосберегающей политики существуют четыре пути.

Первый – уменьшить потребление посредством самоограничения либо принудительно, с помощью административного регулирования или экономических средств.

Второй – повысить энергоэффективность используемых технологий и оборудования. Этот путь требует наличия альтернативной технологии и экономической целесообразности ее применения.

Третий – заменить один вид топлива или энергии другими, выиграв при этом в стоимости или избежав эксплуатации труднодоступного источника.

И, наконец, четвертый – разумно сочетать три предыдущих.

Естественно, среди первых трех предпочтения заслуживает второй путь, ведущий к более эффективной экономике, не имеющей границ совершенствования. Но выбор его связан с разработкой новых или использованием передовых существующих неэнергоемких технологий, процессов, оборудования. Для их реализации демилитаризованные

конверсионные зоны представляют собой и прекрасную мастерскую, и благодатный полигон. Но чтобы принять полноценное решение о сфере приложения усилий, необходимо получить представление о наиболее распространенных процессах и направлениях совершенствования оборудования по энергетическим характеристикам. Кроме того, прежде всего, нужен инструмент, позволяющий определять степень энергетической эффективности процессов, оборудования, устройств и т.п.

Другими словами, для успешного проведения активной энергосберегающей политики в первую очередь необходим научно обоснованный анализ всего комплекса энергетических превращений, имеющих место в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, в общественном и коммунально-бытовом секторе. Анализ должен начинаться с первичных энергоресурсов и сырья, а завершаться на стадии использования вторичных ресурсов и отходов с учетом их экономического воздействия.

Основой для такого анализа служит, прежде всего, современная термодинамика. *Термодинамика* – это наука о закономерностях превращения энергии.

*Энергия* – свойство материи, которое может выражаться во многих формах. Очевидно наиболее фундаментальным является представление энергии, присущей массе:

$$E = mc^2, \text{ Дж}, \quad (4.1)$$

где  $m$  – масса, кг;

$c$  – скорость света (300 000 000 м/с).

Другие хорошо знакомые формы:

кинетическая энергия:

$$E = \frac{1}{2} mv^2,$$

где  $v$  – скорость массы  $m$ , м/с;

потенциальная энергия

$$E = mgh.$$

Здесь  $g$  – ускорение, обусловленное силой тяготения (9,81 м/с<sup>2</sup>);

$h$  – высота подъема массы  $m$ , м,

а также химическая энергия, электрическая, магнитная и т.д.

Энергия может превращаться из одной формы в другую. Широко известны такие превращения, как

химическая энергия – теплота – механическая работа;

электрическая энергия – теплота – освещение;

механическая энергия – теплота;

ядерная энергия – теплота – электричество – механическая работа и т.п.

Широко известно определение энергии как способности выполнять работу. Поэтому единицы измерения энергии точно такие же, как и работы:

джоуль (Дж) – работа силы в 1 Н (ньютон) при перемещении точки ее приложения на 1 м: 1 Дж = 1 Н·м;

ватт-секунда (Вт·с) – работа, которая производится в течение 1 с при мощности 1 Вт;

киловатт·час (кВт·ч) –

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Вт}\cdot 3600 \text{ с} = 3600000 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 3\,600\,000 \text{ Дж};$$

мегаватт·час (МВт·ч) –

$$1 \text{ МВт}\cdot\text{ч} = 1\,000\,000 \text{ Вт}\cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000\,000 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 3\,600\,000\,000 \text{ Дж}.$$

Всякая машина, используемая для совершения работы, характеризуется *мощностью*, которая равна отношению совершенной работы к промежутку времени, в течение которого она совершается.

Если мощность обозначить через  $N$ , то  $N = L/t$ , откуда видно, что единицей мощности является 1 Дж/с (джоуль в секунду), называемый ваттом (Вт).

$$1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт}; \quad 1 \text{ МВт} = 1\,000\,000 \text{ Вт}.$$

Весьма символично, что термодинамика возникла из потребностей теплотехники, развитие которой стимулировало ее создание. Широкое применение в начале XIX в. паровой машины поставило перед наукой задачу теоретического изучения тепловых машин с целью повышения их коэффициента полезного действия. Это побудило французского физика и инженера Сади Карно провести исследования, позволившие впоследствии сформулировать один из основных законов термодинамики – *второе начало*. А в 40-х г. XIX в. Майер и Джоуль установили механический эквивалент теплоты. На этой основе был открыт закон сохранения и превращения энергии, называемый в термодинамике ее *первым началом*.

Но возникает естественный вопрос: если энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает, а количество ее сохраняется и остается неизменным, как гласит закон сохранения и превращения энергии, то почему ее не хватает и зачем заниматься энергосбережением? Ответ находится в самой формулировке закона сохранения: ...она переходит из одной формы в другую. А это значит, что несмотря на изобилие энергии, лишь небольшая часть ее содержится в форме, пригодной для использования, по крайней мере, на данном этапе развития техники.

Все ископаемые виды топлива, хранящиеся в Земле, в любой момент времени представляют собой запас высокопотенциальной энергии, которую можно выделить при горении. Если бы все они сразу сгорели, то результирующее энергосодержание Земли, рассматриваемой как изолированная система (на самом деле это можно предполагать лишь с огромной натяжкой, так как Земля поглощает энергию Солнца и, в конечном счете, повторно излучает ее в космическое пространство), не изменилось, поскольку температура окружающей среды повысилась бы на величину, в точности соответствующую выделению энергии ископаемых видов топлива. Мы израсходовали бы весь запас высокопотенциальной энергии на повышение температуры окружающей среды. Не потеряв в действительности энергии, мы стали бы, тем не менее «энергетическими банкротами».

Энергия на уровне окружающей среды бесполезна для совершения работы. В холодный зимний день воздух температурой 30 °С может обогревать дома. Но в теплый день тот же самый воздух бесполезен, так как

он находится в энергетическом равновесии с окружающей средой. Холодная вода температурой 4 °С пригодна для охлаждения, горячая температурой 50 °С может использоваться для стирки, но стоит их смешать поровну, и смесь окажется почти бесполезной.

## 4.2. Первое начало термодинамики

Первое начало термодинамики является математическим выражением количественной стороны закона сохранения и превращения энергии. Нагрев воду в изолированном сосуде путем перемешивания, используя трение между железными блоками, при помощи электрического тока, охлаждением сжатого газа, Джоуль установил, что энергия, выделяемая гидравлической, механической, электрической и пневматической системами, может превращаться в тепловую в совершенно определенном количественном соотношении.

Большая часть двигателей (машин) на Земле – тепловые двигатели, т.е. устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую.

Понятие внутренней энергии макроскопических тел играет важнейшую роль при исследовании тепловых явлений. Оно лежит и в основе открытия и толкования закона сохранения энергии. *Внутренняя энергия макроскопического тела* равна сумме кинетических энергий хаотического движения всех молекул (или атомов) относительно центра масс тела и потенциальных энергий взаимодействия их друг с другом.

Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, носит название первого закона термодинамики, который математически записывается в следующем виде:

$$U = L + Q, \quad (4.2)$$

т.е. постулирует, что изменение внутренней энергии системы при переходе из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе. Или другими словами, количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системной работы над внешними телами.

Отсюда вытекает невозможность создания вечного двигателя первого рода – устройства, способного совершать неограниченное количество работы без подвода теплоты извне.

В реальных двигателях часть энергии неизбежно теряется из-за сил трения. Теряется в том смысле, что часть энергии посредством работы сил трения преобразуется во внутреннюю энергию, что приводит к нагреванию двигателя.

Джоулем были получены тепловой эквивалент работы, равный 0,002345 ккал/кГм, и механический эквивалент тепла, равный 427 кГм/ккал, но при выражении количеств теплоты и работы в джоулях необходимость в них отпадает. Следует отметить, что, несмотря на широкое применение в

нашей стране международной системы единиц Си, калории традиционно пользуются «правами гражданства» при измерении количества теплоты (гигакалории) и теплотворной способности топлива.

### 4.3. Второе начало термодинамики

Превращение механической энергии в энергию теплового движения, или, как часто говорят, превращение работы в теплоту, не представляет никакой проблемы. Реализация противоположных преобразований потребовала преодоления многих технических трудностей. Но никакие ухищрения все-таки не дают возможности превратить в полезную работу внутреннюю энергию полностью. Оказывается, часть внутренней энергии системы принципиально не может быть превращена в работу. Существование этого универсального принципа связано с необратимостью всех происходящих процессов.

Итак, чтобы определить, какая доля внутренней энергии системы может быть превращена в полезную работу, а какая является недоступной для технического использования, надо знать количественную меру необратимости природных процессов.

Мерой необратимости процесса в замкнутой системе является изменение новой функции состояния – *энтропии*, существование которой в равновесной системе устанавливает первое положение второго начала термодинамики (о невозможности вечного двигателя второго рода).

Тепловая машина представляет собой систему, которая периодически повторяет тот или иной круговой процесс и в результате преобразует тепловое движение в механическое. Отсюда следует, что для создания идеальной машины необходимо выполнение следующих условий:

1) она должна состоять из таких элементов, как источник количества теплоты – нагреватель, рабочее тело – газ, например, который, расширяясь при нагревании, может двигать поршень или вращать ротор турбины, так как непосредственное преобразование теплоты в работу невозможно, и, наконец, теплоприемник – холодильник;

2) цикл машины, чтобы быть обратимым и давать максимально возможную работу, должен включать четыре процесса: две изотермы (т.е. два процесса, протекающих при постоянных температурах) и две адиабаты (два процесса, протекающих без теплообмена с окружающей средой). Для их реализации поршень перемещается в цилиндре с теплонепроницаемыми стенками и заслонкой, нагреватель и холодильник имеют настолько большую теплоемкость, что их температуры остаются неизменными, хотя от одного отнимается, а другому передается какое-то количество теплоты, кроме того, можно считать, что перепад температуры между рабочим телом и нагревателем, рабочим телом и холодильником бесконечно мал.

Эти условия, наиболее эффективные для работы теплового двигателя, т.е. при которых будет достигаться максимальный коэффициент полезного действия (КПД), были сформулированы французским инженером и ученым

Сади Карно. КПД такой идеальной машины выражается следующим образом:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (4.3)$$

где  $T_1$  температура нагревателя, а  $T_2$  – холодильника.

Эта формула дает теоретический предел для максимального значения КПД тепловых двигателей и показывает, что тепловой двигатель тем эффективнее, чем выше температура нагревателя и ниже температура холодильника. Лишь при температуре холодильника, равной абсолютному нулю,  $\eta = 1$ . Но температура холодильника практически не может быть намного ниже температуры окружающего воздуха, а температура нагревателя ограничивается жаропрочностью материала. Так, для паровой турбины начальные и конечные температуры пара примерно составляют  $T_1 = 800$  К и  $T_2 = 300$  К, а следовательно, максимальное значение КПД при этих температурах –

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx 0,62, \text{ или } 62 \ \%.$$

Действительное же значение КПД паровой турбины составляет примерно 40 %.

Повышение КПД тепловых двигателей, приближение его к максимально возможному – важнейшая техническая задача.

Смысл второго начала термодинамики нуждается в более подробном разъяснении. Существует более десятка различных его формулировок. Все они эквивалентны друг другу, хотя проверить это бывает не всегда просто. Познакомимся сначала с самыми простыми и очевидными. *Тепло само собой всегда переходит от более нагретого тела к более холодному.* Действительно, если привести в соприкосновение горячее и холодное тела, то горячее будет остывать, а холодное нагреваться. На первый взгляд, из приведенного утверждения мало что можно извлечь. Однако в этой формулировке содержатся слова «само собой». Это значит, что тепло может быть передано от холодного тела к горячему, но для этого необходимо затратить некоторую энергию, как это происходит, например, в домашнем холодильнике. Обойти требование затратить энергию для дальнейшего охлаждения холодного тела невозможно никаким способом.

Приведем другую, тоже достаточно простую формулировку: *Невозможен вечный двигатель второго рода.* Хорошо известна история безуспешных попыток создать вечный двигатель первого рода, машину, которая производила бы работу, не потребляя энергии. Закон сохранения энергии иногда формулируют как невозможность создания такой машины. Вечный двигатель второго рода не нарушает закон сохранения энергии. Он должен работать за счет энергии окружающей среды, но без разности температур, единственным результатом его работы должно быть превращение тепловой энергии в другую, например механическую. Так же как и в первой формулировке, важно условие отсутствия других изменений, ведь может работать, например, электромотор, подключенный к

аккумулятору, или поршневой двигатель от баллона со сжатым воздухом, но итогом работы таких двигателей будет помимо работы изменение состояния источника энергии, а не температуры окружающей среды. Некоторые формулировки второго начала опираются на понятие необратимого процесса, т.е. процесса, который невозможно провести в обратном направлении через те же самые промежуточные состояния. Дело в том, что все реальные процессы необратимы, сопровождаются невосполнимыми потерями энергии, превращением ее в тепло, и никаким способом предотвратить эти потери невозможно. Создатель термодинамики как самостоятельной науки немецкий ученый XIX в. Рудольф Клаузиус ввел количественную меру этой деградации энергии – энтропию. Любой необратимый процесс увеличивает энтропию, т.е. рассеивает энергию. Клаузиус дал следующую формулировку законов термодинамики: *энергия замкнутой системы остается постоянной, энтропия замкнутой системы возрастает*. В этой формулировке используется понятие замкнутой системы, не обменивающейся с другими телами ничем – ни энергией, ни веществом. Для такой системы возрастание энтропии описывает процесс установления равновесия.

Очевидно, термодинамически равновесное состояние соответствует максимально возможному значению энтропии. Рассматривая всю Вселенную как замкнутую систему, Клаузиус пришел к выводу о неизбежности «тепловой смерти» Вселенной, ее перехода в состояние теплового равновесия. Возникает вопрос: почему этого еще не произошло, если Вселенная существует вечно. Были предприняты многочисленные, но неудачные попытки решить эту проблему в рамках классической физики, были даже попытки доказать таким способом существование Творца. Современная физика сняла эту проблему, определив возраст Вселенной.

Все формулировки второго начала в тех или иных словах выделяют *тепловую энергию*, отмечая, что переход любого вида энергии в тепловую является обесцениванием, деградацией энергии. Возникает вопрос, в чем же суть этого явления? Ответ найден молекулярной физикой и состоит в том, что в отличие от всех других видов тепловая энергия – это энергия беспорядочного движения, суть ее деградации состоит в потере порядка, переходу от порядка к беспорядку. Именно своей беспорядочностью тепловая энергия хуже других видов. Количественная мера деградации энергии – энтропия – это мера потери упорядоченности. Так как в любом массовом явлении можно наблюдать процессы упорядочивания и разупорядочивания, то для описания таких процессов в явлениях самой различной природы, в том числе экономических и социальных, второе начало термодинамики применимо в равной степени.

Необходимо подчеркнуть, что разрушение порядка является следствием внутреннего, можно сказать «микроскопического» движения, и происходит тем быстрее, чем это движение интенсивнее. В молекулярной физике мерой интенсивности внутреннего движения служит температура. Наглядный пример простой модели системы с внутренним движением – это ящик, в котором находится несколько шариков. Ящик непрерывно

встряхивают, интенсивность тряски моделирует температуру системы. Тряска разрушает порядок в расположении шариков, без тряски этот порядок сохраняется.

Существует шуточная, но совершенно точная формулировка второго начала, подчеркивающая неизбежность разрушения порядка – закон Мэрфи. *Все что может испортиться, портится.* Более того, следствие закона усиливает формулировку. *Если что-то не может испортиться, оно портится все равно.* Хорошо известно, что поддержание, а тем более установление порядка требует затрат и усилий, причем подчас немалых.

Во всех формулировках второго начала можно отыскать связь с потерей упорядоченности. Действительно, наличие разности температур – это некоторый порядок, выравнивание, а не увеличение этой разности – потеря порядка. Существование необратимых процессов означает невозможность самопроизвольного возникновения порядка из беспорядка. Количественную связь меры необратимости процессов – энтропии – с беспорядком установил австрийский ученый Людвиг Больцман. Знаменитая формула Больцмана, высеченная на его памятнике, имеет вид.

$$S = k \ln W, \quad (4.4)$$

где  $S$  – энтропия системы;  $k$  – известная постоянная Больцмана, определяющая единицы измерения энтропии;  $W$  – в современной терминологии статистический вес состояния системы, число способов, которыми реализуется наблюдаемое состояние системы, число «микросостояний», соответствующих наблюдаемому «макросостоянию».

Это не просто возможные микросостояния, за счет внутреннего движения система все время беспорядочно «кочует» по ним, и  $W$ , а следовательно, и  $S$  действительно являются мерой неопределенности, неупорядоченности состояния. Поясним это на примере рулетки, на которой имеется  $V$  черных и  $W$  белых ячеек. Эти числа являются статистическими весами для выпадения соответствующего цвета. Неопределенность состоит в том, что черный цвет может выпасть на любой из  $V$  ячеек, а белый – на любой из  $W$ , беспорядок заключается в том, что ячейки выпадают одна за другой в любом порядке. Можно показать, что минимальные затраты энергии, необходимые для восстановления порядка в молекулярной системе, определяются выражением  $TS$ , т.е. произведением интенсивности внутренних процессов, приводящих к разрушению порядка, на величину этих разрушений.

Понятие энтропии как меры неопределенности, неупорядоченности используется современной наукой для описания массовых явлений любой природы. Смысл закона возрастания энтропии в замкнутых системах состоит в неизбежности самопроизвольного разрушения порядка. Сохраняется вывод о существовании минимального уровня затрат на поддержание или восстановление порядка. Важное значение этого закона для любых, без исключения, массовых процессов, в том числе экономических, социальных,

природных, очевидно. *Термодинамическое равновесие* – это состояние беспорядочного, максимально хаотического внутреннего движения. Для всех без исключения массовых явлений возрастание энтропии означает переход к подвижному, максимально хаотическому динамическому равновесию внутренних процессов. Регулирование процессов в массовых системах, поддержание, а тем более установление порядка невозможно без соответствующих затрат. Очевидно, величина этих затрат не может быть меньше минимального значения, определяемого, как и в случае молекулярной системы, произведением интенсивности внутреннего движения на величину возникающего беспорядка.

## 5. ОСНОВЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

### 5.1. Ограждающие конструкции зданий и сооружений

Теплота распространяется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

*Теплопроводность* представляет собой процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела, имеющих различные температуры. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц тела.

Под *конвекцией* понимают процесс переноса тепловой энергии при перемещении объемов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос тепла неразрывно связан с переносом самой среды.

*Тепловое излучение* – это процесс распространения тепловой энергии путем электромагнитных волн. При тепловом излучении происходит двойное превращение энергии: тепловая энергия излучающего тела переходит в лучистую и обратно, лучистая энергия, поглощаясь телом, переходит в тепловую.

В природе и технике элементарные процессы распространения тепла – теплопроводность, конвекция и тепловое излучение – очень часто происходят совместно.

В технике и быту часто происходят процессы теплообмена между различными жидкостями (газами), разделенными стенкой. Процесс передачи тепла от горячей жидкости (газа) к холодной через разделяющую их стенку называется *теплопередачей*.

Математически процесс теплопроводности записывается следующим образом:

$$Q = -kS \Delta T / \delta, \quad (5.1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, Вт;

$k$  – коэффициент теплопроводности,  $(\text{Вт}\cdot\text{м})/\text{м}^2, \text{С}$ ;

$S$  – площадь,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta T$  – разность температур,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\delta$  – толщина материала,  $\text{м}$ .

Знак минус указывает на то, что направление теплового потока и градиента температур (перепад температур на единицу длины) противоположны.

Конвективный перенос теплоты описывается уравнением

$$Q = hS\Delta T, \quad (5.2)$$

где  $h$  – коэффициент конвективного переноса,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ;

$S$  – поверхность теплообмена,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta T$  – разность температур между стенкой (поверхностью) и жидкостью (газом),  $^{\circ}\text{C}$ .

Процесс теплопередачи имеет аналитическое описание в следующем виде:

$$Q = \alpha F(T_1 - T_2), \quad (5.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ;

$T_1$  – температура горячей жидкости (газа),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_2$  – температура холодной жидкости (газа),  $^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент  $\alpha$  характеризует интенсивность передачи тепла от одной жидкости (газа) к другой через разделяющую их стенку и численно равен количеству теплоты, которое передается через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между жидкостями (газами) в один градус.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется полным термическим сопротивлением теплопередачи.

Полное термическое сопротивление однослойной стенки:

$$R_t = 1/\alpha = 1/h_1 + \delta/k + 1/h_2, \text{ м}^2 \cdot \text{C}/\text{Вт}, \quad (5.4)$$

откуда видно, что по аналогии с законом Ома термические сопротивления слоистой среды складываются, чтобы составить полное термическое сопротивление. В данном случае:

$R_1 = 1/h_1$  – термическое сопротивление теплоотдачи от горячей жидкости (газа) к поверхности стенки;

$R_c = \delta/k$  – термическое сопротивление теплопроводности стенки;

$R_2 = 1/h_2$  – термическое сопротивление теплоотдачи от стенки к холодной жидкости (газу).

Поскольку общее термическое сопротивление состоит из частных, то совершенно очевидно, что в случае многослойной стенки нужно учитывать сопротивление каждого слоя. Полное термическое сопротивление теплопередачи через многослойную стенку при этом равно

$$R_t = 1/\alpha = 1/h_1 + \delta_1/k_1 + \delta_2/k_2 + \dots + \delta_n/k_n + 1/h_2. \quad (5.5)$$

Перенос теплоты излучением от одного тела к другому можно выразить формулой

$$Q = \varepsilon BS (T_1^4 - T_2^4), \quad (5.6)$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность;  
 $B$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  
 $S$  – площадь поверхности тела, м<sup>2</sup>.

Кондуктивный перенос теплоты (теплопроводностью) может быть представлен и в альтернативной форме:

$$Q = - \Delta T/R_t, \quad (5.7)$$

где  $R_t$  – сопротивление теплопроводности или термосопротивление, С/Вт.

Термическое сопротивление, или R-величина, часто используется как средство оценки изоляционных свойств различных материалов:

$$R_t = \delta/(kS). \quad (5.8)$$

Ограждающие конструкции зданий (жилых домов) состоят из таких элементов, как стены, крыша, полы, двери, окна.

Основные расчетные уравнения для определения теплотерь через них представлены выше. Но они включают коэффициенты, представление о величине которых может быть получено из табл. 5.1, 5.2.

Таблица 5.1

Характерные величины теплопроводности различных материалов

Материал	Характерные величины теплопроводности, (Вт·м)/м <sup>2</sup> ·С
Обычный кирпич	0,41
Бетон	1,04
Оконное стекло	0,73
Древесина	0,12
Стекловолокно	0,047
Сталь	45
Лед	2,2
Вода	0,59
Воздух	0,0254
Алюминий	220
Бумага	0,140

Вата	0,04
Войлок	0,09

Таблица 5.2

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху при различных условиях

Условия	Коэффициент теплоотдачи от стенки воздуху, Вт/(м <sup>2</sup> ·С)
Воздух относительно неподвижный:	
- горизонтальная поверхность (тепловой ток вверх)	9,25
- вертикальная поверхность	8,25
Воздух движущийся:	
скорость ветра 24 км/ч	34,0
скорость ветра 12 км/ч	22,7

В качестве примера рассмотрим вертикальную бетонную стенку толщиной 20 см, декорированную досками из ели толщиной 2,5 см. Каким будет результирующий коэффициент теплопередачи? Определить также тепловой поток, если температура внутри помещения поддерживается на уровне 20 °С, а снаружи температура составляет – 5 °С.

Принимаем скорость ветра с внешней стороны стенки 24 км/ч. Тогда

$$R_2 = 1/h_2 = 0,029 \text{ (С·м}^2\text{)/Вт.}$$

Внутри помещения воздух неподвижный и коэффициент теплоотдачи от него к вертикальной поверхности

$$h_1 = 8,25 \text{ Вт/(м}^2\text{·С)} \text{ и } R_1 = 1/h_1 = 0,12 \text{ (С·м}^2\text{)/ Вт.}$$

Термосопротивление теплопроводности в бетонной части стены

$$R_c = \delta_b/k_b = 0,2 : 1,04 = 0,19 \text{ (С·м}^2\text{)/Вт.}$$

Термосопротивление теплопроводности в деревянной части стены

$$R_c = \delta_d/k_d = 0,025 : 0,12 = 0,21 \text{ (С·м}^2\text{)/Вт.}$$

Общее термосопротивление

$$R_t = 0,549 \text{ (С·м}^2\text{) Вт.}$$

Следовательно, результирующий коэффициент теплопередачи

$$\alpha = 1/R_t = 1,82 \text{ Вт/(м}^2\text{·С).}$$

Тепловой поток

$$g = \alpha \Delta T = 1,82 \cdot (20 - (-5)) = 45,5 \text{ Вт/м}^2.$$

Окна представляют собой весьма важный элемент ограждающей здание конструкции с точки зрения величины теплотерь. В приведенной ниже таблице даны примерные величины теплотерь через окна различной конструкции.

Величина теплопотерь через различные типы окон

Тип окна	Величина потерь, Вт/(м <sup>2</sup> ·С)
Одиночное стекло	5,6
Двойное, с воздушным зазором, мм:	
3	4,0
6	3,4
12	3,0
20 (и более)	2,9
Тройное, с воздушным зазором между соседними стеклами, мм:	
3	3,0
6	2,5
12	2,1
20 (и более)	2,0

Таблица 5.4

Влияние материалов оконных переплетов на теплопотери через окна

Оконный переплет	Площадь, занятая рамой, %	Величина теплопотерь, Вт/(м <sup>2</sup> ·С)
1	2	3
Одиночное стекло:		
металлический переплет	20	5,6
деревянный переплет	30	4,3
Двойное, с воздушным зазором 20 мм:		
металлический переплет	20	3,2
деревянный переплет	30	2,5

Тип оконной рамы вносит свою лепту в потери тепла. Алюминиевые оконные рамы дают теплопотери, составляющие до 25 % от общей величины потерь через окно, в то время как деревянные, как правило, создают теплопотери в два раза меньше.

Другим значительным источником теплопотерь в зданиях является инфильтрация (рис. 5.1). Инфильтрация представляет собой проникновение холодного воздуха через открытые двери и окна, щели, трещины, зазоры вокруг дверей или окон. Инфильтрация также может быть вызвана перепадом давления внутри и снаружи дома, обусловленного, например, естественной тягой через дымоход, или давлением воздуха, созданным ветром. *Эксфильтрация* – воздух покидает помещение, что происходит, когда давление внутри выше, чем снаружи. Инфильтрационные и эксфильтрационные потери могут быть уменьшены при следующих условиях:

- держать окна и двери закрытыми;
- устранить всевозможные щели и неплотности;
- использовать двойные двери или тамбур;
- установить ветролом, посадить деревья вдоль дома для защиты от ветра.

Чтобы оценить теплопотери от инфильтрации, в обычной практике рекомендуется определить площадь всех щелей, возможных для инфильтрации. Это называется *щелевым* методом.

Второй способ – оценить число смен воздуха в час, а затем подсчитать потери тепла.

При этом используются следующие стандартные данные для воздуха (при 760 мм рт.ст. и 20 °С): плотность – 1,22 кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость – 1,0 кДж/(кг·С) и 1,22 Вт·с/(м<sup>3</sup>·С).

Можно также ориентироваться на следующие допустимые нормы по инфильтрации:

- окна (м<sup>3</sup> ч/м оконных переплетов) – 2,0;
- двери в жилых помещениях (м<sup>3</sup>·ч/м<sup>2</sup> площади дверей) – 6,8;
- двери нежилых помещениях (м<sup>3</sup>·ч/м<sup>2</sup> площади дверей):
  - одиночная дверь (скользящая, поворачивающаяся) – 6,8;
  - двойная дверь (вращающаяся) – 18,3.

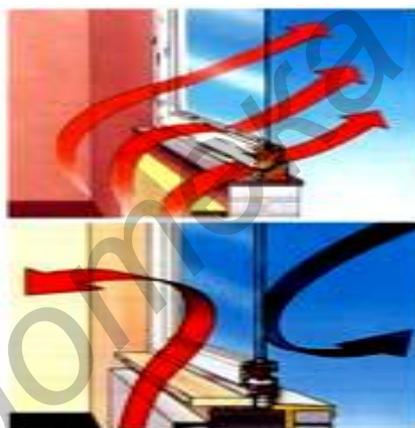


Рис. 5.1. Проблема утечки тепла легко разрешима в современных окнах

*Теплоизоляция* – одна из основных функций окна, которая обеспечивает комфортные условия внутри помещения. Тепловые потери помещения определяются двумя факторами:

- трансмиссионные потери, складывающиеся из потоков тепла, которое помещение отдает через стены, окна, двери, потолок и пол;
- вентиляционные потери, под которыми понимается количество тепла, необходимое для нагрева до температуры помещения холодного воздуха, проникающего через негерметичности окна и в результате вентиляции.

В Беларуси для оценки теплозащитных характеристик конструкций принято сопротивление теплопередачи  $R_t$  (м<sup>2</sup>·°С/Вт), величина, обратная коэффициенту теплопроводности  $k$ , который принят в нормах DIN. Коэффициент теплопроводности  $k$  характеризует количество тепла в ваттах

(Вт), которое проходит через 1 м<sup>2</sup> конструкции при разности температур по обе стороны в один градус по шкале Кельвина (К), единица измерения Вт/м<sup>2</sup> К. Чем меньше значение k, тем меньше теплопередача через конструкцию, т.е. выше ее изоляционные свойства. К сожалению, простой пересчет k в R<sub>0</sub> (k = 1/R<sub>0</sub>) не вполне корректен из-за различия методик измерений в Беларуси и других странах. Однако если продукция сертифицирована, то производитель обязан представить заказчику именно показатель сопротивления теплопередаче. Основными факторами, влияющими на значение приведенного сопротивления теплопередаче окна, являются:

- размер окна (в т.ч. отношение площади остекления к площади оконного блока);
- поперечное сечение рамы и створки;
- материал оконного блока;
- тип остекления (в т.ч. ширина дистанционной рамки стеклопакета, наличие селективного стекла и специального газа в стеклопакете);
- количество и местоположение уплотнителей в системе рама/створка.

От значения показателей R<sub>0</sub> зависит и температура поверхности ограждающей конструкции, обращенная внутрь помещения. При большой разнице температур происходит излучение тепла в сторону холодной поверхности.

Плохие теплозащитные свойства окон неизбежно приводят к появлению холодного излучения в зоне окон и возможности появления конденсата на самих окнах или в зоне их примыкания к другим конструкциям и створкам. Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций нормируется СНБ 2.04.01-97 «Строительная теплотехника». В соответствии с этим документом при проектировании приведенное сопротивление теплопередачи окон и балконных дверей R<sub>0</sub> следует принимать не менее требуемых значений, R<sub>(t)</sub><sup>тп</sup> (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Приведенное сопротивление теплопередаче окон и балконных дверей

Здания и сооружения	Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП), °С сут	Сопротивление теплопередаче окон и балконных дверей не менее R <sub>(t)</sub> <sup>тп</sup> , м <sup>2</sup> С <sup>0</sup> /Вт
Жилые, лечебно-профилакти-	2000	0,30

ческие и детские учреждения, школы, интернаты	4000	0,45
	6000	0,60
	8000	0,70
	10 000	0,75
	12 000	0,80
Общественные, кроме указанных выше, административные и бытовые, за исключением помещений с влажностным или мокрым режимом	2000	0,30
	4000	0,40
	6000	0,50
	8000	0,60
	10 000	0,70
Производственные с сухим и нормальным режимом	12 000	0,80
	2000	0,25
	4000	0,30
	6000	0,35
	8000	0,40
	10 000	0,45
	12 000	0,50

*Примечания:*

1. Промежуточные значения  $R_{(t)}^{тр}$  следует определять интерполяцией.
2. Нормы сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций для помещений производственных зданий с влажностным или мокрым режимом, с избытками явного тепла от  $23 \text{ Вт/м}^3$ , а также для помещений общественных, административных и бытовых зданий с влажностным или мокрым режимом следует принимать как для помещений с сухим и нормальным режимами производственных зданий.

3. Приведенное сопротивление теплопередачи глухой части балконных дверей должно быть не менее чем в 1,5 раза выше сопротивления теплопередачи светопрозрачной части этих изделий.

4. В отдельных обоснованных случаях, связанных с конкретными конструктивными решениями заполнения оконных и других проемов, допускается применять конструкции окон, балконных дверей и фонарей с приведенным сопротивлением теплопередаче на 5 % ниже устанавливаемого в таблице.

Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) следует определять по формуле

$$\text{ГСОП} = (t_{в} - t_{от.пер})Z_{от.пер}, \quad (5.9)$$

где  $t_{в}$  – расчетная температура внутреннего воздуха, сооружений;

$t_{от.пер}$  и  $Z_{от.пер}$  – средняя температура,  $^{\circ}\text{C}$ , и продолжительность, сут., периода со средней суточной температурой воздуха ниже или равной  $8^{\circ}\text{C}$ .

## 5.2. Теплотехнический расчет наружной монолитной стены из несъемной опалубки из ППС (пенополистирола)

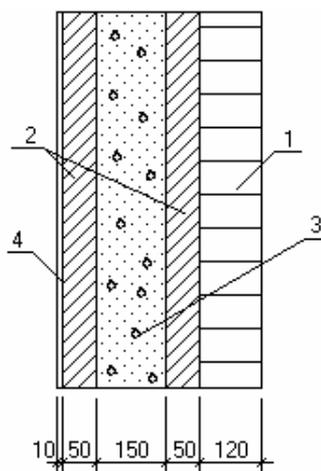


Рис. 5.2. Устройство наружной монолитной стены из несъемной опалубки из ППС

Таблица 5.6

Характеристика многослойной ограждающей конструкции (рис. 5.2)

Название	Толщина, м	Теплопроводность материала, Вт/(м·°С)
1. Кирпич керамический облицовочный на цементно-песчаном растворе плотностью 1300 кг/м <sup>3</sup>	$\delta_1 = 0,12$	$\lambda_1 = 0,41$
2. Несъемная опалубка из пенополистирола (ГОСТ 15588-70*), плотностью 26 кг/м <sup>3</sup>	$\delta_2 = 0,10$	$\lambda_2 = 0,036$
3. Железобетон плотностью 2500 кг/м <sup>3</sup>	$\delta_3 = 0,15$	$\lambda_3 = 1,69$
4. Лист гипсовый облицовочный (сухая штукатурка) плотностью 800 кг/м <sup>3</sup>	$\delta_4 = 0,012$	$\lambda_4 = 0,15$

Определим требуемое сопротивление ограждающей конструкции  $R_{(t)}^{TP}$  исходя из ГСОП:

$$\text{ГСОП} = (t_{в} - t_{ср}) \cdot Z_{от. пер.},$$

где  $t_{в} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – температура внутреннего воздуха для жилых зданий ;

$t_{ср} = -1,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – средняя температура воздуха за отопительный период по Минской области (см. СНБ 2.04.01-97);

$Z_{от. пер.} = 202$  – число суток отопительного периода по Минской области (см. СНБ 2.04.01-97).

$$\text{ГСОП} = (20 + 1,6) \cdot 202 = 4363,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$$

Из СНиП 11-3-79 выпишем значения ГСОП и  $R_{(t)}^{TP}$  для жилых зданий (табл. 5.7).

Таблица 5.7

ГСОП	2000	4000	6000
$R_{(t)}^{TP}$	2,1	2,8	3,5

$$R_{(t)}^{TP} = (5181,5 - 4000)(3,5 - 2,8)/(6000 - 4000) + 2,8 = 3,21 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Согласно формуле (5.5) фактическое термическое сопротивление ограждающей конструкции  $R_0$ :

$$R_0 = 1/\alpha_n + 1/\alpha_v + \Sigma R_i,$$

где  $\alpha_n = 8,7$  (Вт /м<sup>2</sup> · °С) – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей поверхности ;

$\alpha_v = 23$  (Вт /м<sup>2</sup> · °С) – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей поверхности;

$\Sigma R_i = \Sigma(\delta_i / \lambda_i)$  – сумма термических сопротивлений многослойной ограждающей конструкции.

$$R_0 = 1/8,7 + 1/23 + 0,12/0,41 + 0,10/0,036 + 0,15/1,69 + 0,012/0,15 = 3,398 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

**Вывод.** Условие  $R_0 \geq R_{(t)}^{TP}$  полностью соблюдается. Стена, выполненная с использованием несъемной опалубки (рис. 5.2), имеет запас сопротивления теплопередачи 6 %.

### 5.3. Теплотехнический расчет наружной кирпичной стены

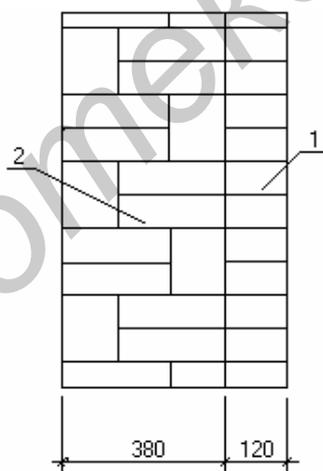


Рис. 5.3. Устройство наружной кирпичной стены

Сведем теплотехнические данные о материалах стены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Характеристика двухслойной ограждающей конструкции

Название	Толщина, м	Теплопроводность материала, Вт/(м·°с)
1. Кирпич керамический	$\delta_1 = 0,12$	$\lambda_1 = 0,41$

облицовочный на цементно-песчаном растворе плотностью 1300 кг/м <sup>3</sup>		
2. Кирпич глиняный обыкновенный на цементно-песчаном растворе, плотностью 1800 кг/м <sup>3</sup>	$\delta_2 = 0,38$	$\lambda_1 = 0,56$

Согласно формуле (5.5) фактическое термическое сопротивление ограждающей конструкции  $R_t$ :

$$R_o = 1/\alpha_n + 1/\alpha_v + \Sigma R_i,$$

где  $\alpha_n = 8,7$  (Вт /м<sup>2</sup> · °С ) – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей поверхности;

$\alpha_v = 23$  (Вт /м<sup>2</sup> · °С ) – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей поверхности;

$\Sigma R_i = \Sigma(\delta_i / \lambda_i)$  – сумма термических сопротивлений многослойной ограждающей конструкции.

$$R_o = 1/8,7 + 1/23 + 0,12/0,41 + 0,38/0,56 = 1,130 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

*Вывод.* Условие  $R_o \geq R_{(t)}^{тр}$  не соблюдается. Кирпичная стена (рис. 5.3) имеет в 2,8 раза меньшее термическое сопротивление, чем это необходимо по ГСОП, и в более чем 3 раза меньшее по сравнению со стеной, выполненной с использованием несъемной опалубки.

#### 5.4. Сравнительный анализ ограждающих конструкций

Выполним сравнительный анализ ограждающих конструкций, сделанных из различных материалов, с определением толщины при их одинаковом термическом сопротивлении (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Сравнение ограждающих конструкций

Состав и описание ограждающей конструкции	Термическое сопротивление, м <sup>2</sup> · °С/Вт	Толщина, м	Теплопроводность материала, Вт/(м · °С)
---	---	------------	---

1. Стена, выполненная с использованием несъемной опалубки из ППС	3,398	0,25	–
2. Стена из обыкновенного глиняного кирпича плотностью 1800 кг/м <sup>3</sup>	3,398	$\delta_1$	$\lambda_1 = 0,56$
3. Стена из сосны плотностью 500 кг/м <sup>3</sup>	3,398	$\delta_2$	$\lambda_2 = 0,09$

Определим  $\delta_1$ :

$$R_0 = 1/\alpha_n + 1/\alpha_v + \sum R_i,$$

$$R_0 = 1/8,7 + 1/23 + \delta_1 / 0,56 = 3,398 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

$$\delta_1 = (3,398 - 1/8,7 - 1/23) \cdot 0,56 = 1,81 \text{ м}.$$

Определим  $\delta_2$ :

$$R_0 = 1/8,7 + 1/23 + \delta_2 / 0,09 = 3,398 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

$$\delta_2 = (3,398 - 1/8,7 - 1/23) \cdot 0,09 = 0,3 \text{ м}.$$

*Вывод.* При одинаковой теплопроводности со стеной, выполненной из несъемной опалубки, ограждающая конструкция из сосны толще на 20 %, а стена из глиняного кирпича толще в 7,2 раза.

## 6. ВАЖНЕЙШИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Очевидное следствие рассмотренных примеров – экономически обоснованное повышение термического сопротивления ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Осуществляемые ныне при новом строительстве и реконструкции зданий высокзатратные энергосберегающие мероприятия, связанные с повышением теплозащиты стеновых ограждений, совершенствованием источников тепла и инженерных систем, не могут изменить существующего положения в целом, поскольку ими ежегодно охватывается не более 1,2 % жилищного фонда. В сложившейся ситуации эти преобразования носят точечный характер. Поэтому актуально первоочередное массовое внедрение достаточно эффективных мало- и средnezатратных энергосберегающих мероприятий, к которым относится применение энергоэффективных окон и управляемых тепловых пунктов.

### 6.1. Энергоэффективные окна на основе стеклопакетов

Стеклопакет (рис. 6.1) – это своего рода слоеный пирог из стекла и воздушных камер. Стекла соединены друг с другом герметично (склеены по

периметру). Поэтому не только грязь, но и влага не проникает во внутреннюю часть стеклопакета. Если внутри стеклопакета образовался конденсат, это значит, что он разгерметизировался и его следует заменить. Обычный срок службы стеклопакетов – 10 лет. Стеклопакеты отличаются друг от друга степенью защиты помещений от холода и шума. Например, однокамерные стеклопакеты (с одной воздушной прослойкой между двумя стеклами) лучше всего подходят для местностей с теплым климатом, а также для обустройства балконов и лоджий. Однако в большинстве регионов Беларуси температура нередко опускается ниже 15... 20 градусов мороза, что вынуждает прибегать к двухкамерным стеклопакетам (с тройным остеклением).

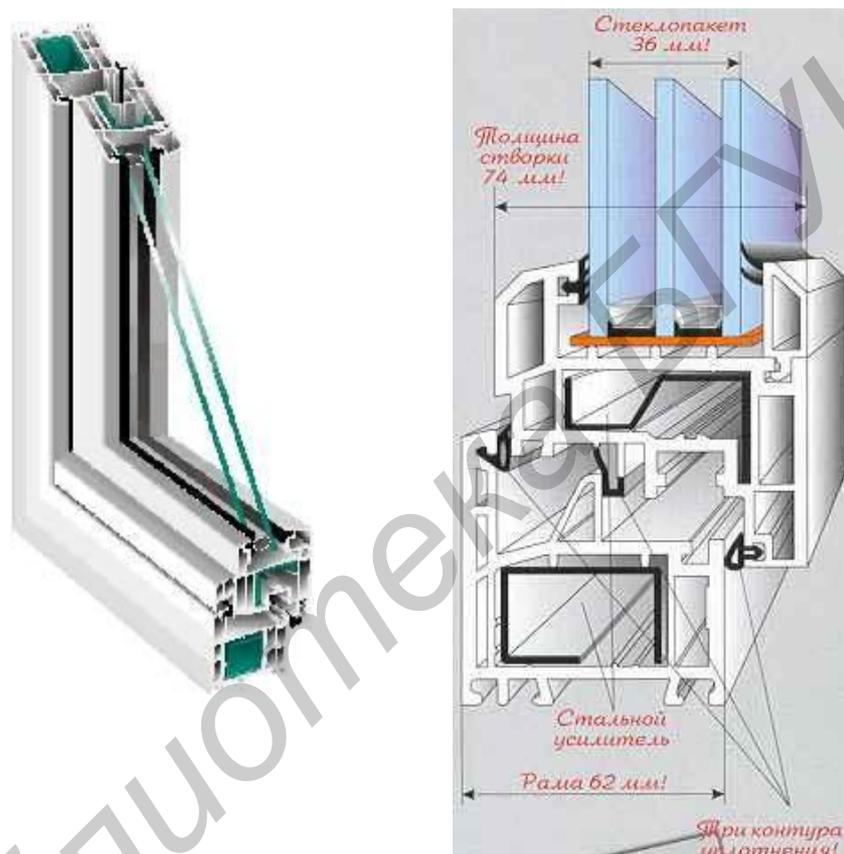


Рис. 6.1. Устройство энергоэффективного окна

Однако стеклопакеты могут комплектоваться и не только «обычными» стеклами. При желании можно заказать стекла с какими-либо особыми свойствами. Например, если нужно оснастить загородный дом автономной отопительной системой, то следует задуматься и о будущем расходе топлива. Насколько значительна утечка тепла через оконные проемы? В среднем это 40... 50 % от суммарного количества теплопотерь. Но оказывается значительной их части можно избежать. Для этого нужно лишь установить стеклопакеты с энергосберегающим стеклом, которое препятствует выходу тепла на улицу, переизлучая (то есть отражая) его обратно в комнату. Это происходит благодаря тому, что поверхность такого стекла покрыта

тончайшим слоем окислов металлов (так называемое k-стекло) или чередующимися слоями серебра и диэлектриков (так называемое i-стекло). Причем i-стекло обладает несколько лучшими теплосберегающими свойствами.

Испытания и расчеты показывают, что однокамерный стеклопакет с одним энергосберегающим стеклом имеет сопротивление теплопередачи выше, чем двухкамерный с простыми. Однако, конечно, не будем забывать, что он хуже защищает от шума. Энергосберегающие стекла стоят дороже, но зато сохраняют тепло лишь немногим слабее каменных стен. А летом они лучше удерживают прохладу, поскольку препятствуют проникновению инфракрасного солнечного излучения в комнаты (пропуская при этом ультрафиолет). Правда, нужно помнить и еще одну вещь. Энергосберегающие стекла хуже пропускают свет. Например, характерный показатель светопропускания обычного стеклопакета находится на уровне 80 %, а стеклопакета с внутренним энергосберегающим стеклом – около 75 %. А если использовать максимальный вариант – двухкамерный стеклопакет с энергосберегающим стеклом со стороны комнаты, то можно наслаждаться лишь 68 % исходного (т.е. «уличного») светового потока.

Для того чтобы повысить тепло- и звукоизоляционные характеристики стеклопакетов, их заполняют инертным газом – чаще всего аргоном (он дешевле), реже ксеноном или криптоном. Такая мера в совокупности с энергосберегающими стеклами позволяет увеличить термосопротивление окна на 30 % по сравнению с простым «воздушным». Если же использовать инертный газ с обычными (не энергосберегающими) стеклами, то эффект наблюдается на порядок ниже – всего лишь 3... 5 %.

Энергосберегающее стекло и газонаполнение практически решают проблему «плачущих» окон, т.е. предотвращают выпадение конденсата на их поверхности со стороны комнаты. Энергосберегающее стекло характеризуется большей температурой на своей поверхности по сравнению с обычным стеклом. Поэтому для появления конденсата на энергосберегающем стекле требуется более низкая температура за бортом. Например, при наружной температуре  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  и фиксированных условиях отопления температура стекла однокамерного стеклопакета с аргоном со стороны комнаты составит  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при использовании энергосберегающего стекла без аргона температура будет около  $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а с аргоном она повысится до  $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Температурные образования конденсата на внутреннем стекле окна и области применения различных стеклопакетов представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Области применения различных стеклопакетов

Тип стеклопакета	Температура образования конденсата (при температуре	Сфера применения
------------------	---	------------------

	в комнате +20 °С и влажности 50 %)	
Простой однокамерный	- 8 °С	Области с мягким климатом
Простой двухкамерный	- 18 °С	Дома на оживленной городской магистрали, средняя полоса России
Двухкамерный с заполнением криптоном	- 29 °С	Дома, расположенные в зонах высокого шумового фона и в холодной местности
Однокамерный с k-стеклом	- 30 °С	Тихий пригород в холодной местности
Двухкамерный с k-стеклом	- 39 °С	Дома на оживленной городской магистрали
Двухкамерный с k-стеклом и аргоном	- 112 °С	Дома в экстремальных климатических и шумовых условиях

Естественно, образование конденсата зависит от температуры и влажности воздуха в помещении. Если печется пирог, готовится плов и кипятятся два чайника, то буквально на любом стеклопакете обнаружится конденсат. Что делать в таких случаях? Открыть окно и включить вытяжку над плитой.

В последние десятилетия XX в. человечество все с большим усердием пытается устроить свой быт экономно и экологично. Одним из способов обустройства своего жилища по принципу «двух эко» стала борьба за повышение эффективности оконного и фасадного остекления. Общеизвестен тот факт, что именно эти ограждающие конструкции являются, пожалуй, самым «слабым» местом любого жилого или административного здания. Именно через окна и витрины происходит максимальная утечка тепла (до 60 % от общих теплопотерь) и проникновение шума и вредных составляющих спектра солнечного света.

Сейчас в России применяется несколько вариантов повышения эффективности систем остекления. Практически традиционными уже стали одно- и двухкамерные стеклопакеты. В большинстве новых жилых и административных зданий строители пытаются использовать именно эту систему. Ее плюсы общеизвестны – уровень тепло- и звукоизоляции по отношению к «советскому» двойному или тройному остеклению в среднем повышается в 1,5 раза. Однако прогресс не стоит на месте, появляются новые технологии, позволяющие удовлетворить все более возрастающие требования потребителей. Для повышения теплоизоляционных свойств стеклопакеты стали накачивать инертными газами. Чаще всего для этих целей используется аргон. Так, у однокамерного стеклопакета, заполненного

аргоном, коэффициент теплопроводности равен  $2,3 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$  вместо  $2,8$  по сравнению с обычным. Коэффициент теплопроводности стекла марки Planiterm Futur равен  $1,72 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ , а у k-стекла  $-2,0, \text{ Вт/м}^2 \text{°С}$ .



Рис. 6.2. Библиотека в г. Болдер, штат Колорадо, США

Совсем недавно на российском рынке появилась еще одна технология под названием «Тепловое зеркало» («Heat Mirror»), разработанная американской компанией SouthWall Technologies еще в 80-е гг. (рис. 6.3). Принцип этой новинки сводится к следующему: в камере стеклопакета между обычными стеклами натягивается прозрачная мембрана с низкоэмиссионным покрытием, которое может наноситься как на одну, так и на обе стороны. Такая мембрана устанавливается и закрепляется между двумя дистанционными рамками из стали. В результате получается двухкамерный стеклопакет, по весу равный однокамерному, обладающий рядом потребительских свойств, не достигаемых для других систем. Так, например, стеклопакет имеет коэффициент теплопроводности всего  $1,13 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ . Применение же комбинированных стеклопакетов с одновременным использованием и «теплого зеркала», и селективных стекол позволяет добиться коэффициента теплопроводности  $0,5 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ , это при коэффициенте прохождения видимого света  $0,59$ ! Но это еще не предел – применение так называемых Quad-систем, когда ставятся две мембраны параллельно, позволяет получить коэффициент теплопроводности стеклопакета  $0,4 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ . И это все без значительного увеличения веса остекления. Именно малый вес в сочетании с высокими теплоизоляционными свойствами делает стеклопакеты с «тепловым зеркалом» наиболее приемлемым решением для остекления световых фонарей и зимних садов (рис. 6.2).

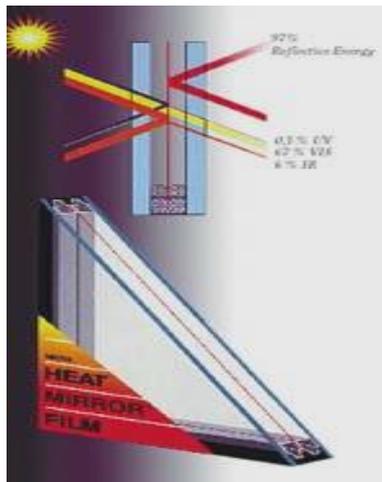


Рис. 6.3. Конструкция и принцип работы теплового зеркала:  
UV, VIS, IR – соответственно ультрафиолетовая,  
видимая и инфракрасная составляющие солнечного спектра

Рассмотрим структуру энергопотребления (энергобаланса) отечественных жилых зданий массовой застройки в (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Структура энергопотребления (энергобаланса) отечественных жилых зданий массовой застройки

Статьи затрат	Энергозатраты расходной части энергобаланса здания, %
Наружные стены	8 ...20
Чердак	4... 5
Пол	2... 3
Окна	12... 14
Инфильтрация	30... 48
Горячее водоснабжение	22... 30

Следующим по эффективности мероприятием будет внедрение систем автоматизации пунктов теплоснабжения зданий.

## 6.2. Автоматизация тепловых пунктов зданий

Автоматизация тепловых пунктов осуществляет автоматическое регулирование расхода тепла на отопление (стабилизацию температуры внутреннего воздуха, либо изменение температуры по заданной программе с учетом тепловых характеристик данного здания) (табл. 6.3) и стабилизацию температуры воды в системе горячего водоснабжения (табл. 6.4).

Таблица 6.3

**Ступени автоматического управления в системах централизованного теплоснабжения**

Ступени	Ступени управления	Место осуществления управления	Объект управления
I	Центральное	Котельная, ТЭЦ	Система теплоснабжения, магистральные тепловые сети
II	Районное	Контрольно-распределительный пункт (КРП)	Район теплоснабжения, распределительные тепловые сети микрорайона
III	Групповое	Центральный тепловой пункт (ЦТП)	Теплоснабжение группы зданий, внутриквартальные тепловые сети
IV	Местное	Индивидуальный тепловой пункт (ИТП)	Система теплоснабжения одного здания или блок-секции здания
V	Позонное (пофасадное)	Индивидуальный тепловой пункт (ИТП)	Отдельные ветви систем отопления и вентиляции, отдельные зоны здания
VI	Индивидуальное	Нагревательный прибор в отапливаемом помещении	Отдельное отапливаемое помещение

Таблица 6.4

**Задачи автоматического управления в системах централизованного теплоснабжения**

Задачи оптимизации	Достигаемая цель	Краткая характеристика (состав) задачи
Производство тепловой и электрической энергии	Минимизация суммарных затрат на производство теплоты (различными теплоисточниками) и электроэнергии (в ОЭЭС)	Оперативное перераспределение тепловых нагрузок между источниками в зависимости от режима тепло- и электропотребления в рамках ОЭЭС. Обеспечение базисного режима работы более экономичных источников и пикового – менее экономичных
Режимы отпуска теплоты потребителям	Обеспечение требуемого режима теплопотребления с минимальными затратами на производство, транспортировку и распределение тепловой энергии	Оперативное управление отпуском теплоты на тепловом источнике, в КРП, в тепловых пунктах потребителей в зависимости от метеорологических условий, времени суток, технологического режима предприятий и других факторов

Задачи оптимизации	Достижимая цель	Краткая характеристика (состав) задачи
Потокораспределение в тепловых сетях	Обеспечение устойчивой работы тепловых сетей, снабжаемых от нескольких источников, с минимальными затратами электроэнергии на транспортировку теплоносителя	Оперативное управление гидравлическим режимом тепловой сети при перераспределении нагрузки между источниками, а также потребителями теплоты в зависимости от давлений в определяющих точках сети и других факторов.
Режимы работы основного технологического оборудования, источников тепловой энергии	Минимизация затрат на производство теплоты (данным теплоисточником)	Оперативное перераспределение нагрузок между отдельными агрегатами (котлами, насосами, деаэраторами и др.) в зависимости от изменения общей нагрузки. Обеспечение работы теплового источника с максимально возможным коэффициентом полезного действия
Режимы работы системы теплоснабжения в аварийных ситуациях	Минимизация ущерба от нарушений снабжения теплом потребителей при авариях	Обнаружение и локализация аварий. Управление гидравлическим и тепловым режимами в аварийных ситуациях

Автоматизация тепловых пунктов может осуществляться по зависимой схеме с установкой водоструйных насосов с регулируемым сечением сопла или насосов смешения с электроприводом либо по независимой схеме с установкой теплообменников, разделяющих внешний контур тепловой сети и внутренний контур отопления здания.

С целью сохранения городской инженерной инфраструктуры, сложившейся в течение десятилетий, представляется целесообразным установить в существующем тепловом пункте (ЦТП или ИТП) пиковый теплоисточник: либо газовый котел, либо емкостный водонагреватель. Помимо покрытия дополнительной тепловой нагрузки установка пикового теплоисточника решит задачу обеспечения требуемых температурных условий в здании при недостаточной подаче тепла от систем централизованного теплоснабжения в период резкого похолодания либо при аварийном прекращении подачи тепла. Кроме того, решается задача круглогодичного горячего водоснабжения на время летних испытаний тепловой сети или профилактического ремонта. При применении пикового емкостного электронагревателя последний включается в работу в ночное время, когда действует сниженный тариф на электроэнергию, и накапливает за это время тепло, которое расходуется в остальное время суток. Помимо сокращения затрат на покупку теплоносителя программное регулирование отпуска тепла позволяет снизить общий объем теплотребления в зданиях (в общественных и промышленных на 30... 40 %), а также снизить

неравномерность суточного графика электрической нагрузки, что улучшает экономические показатели работы энергосистемы.

При недостаточной пропускной способности тепловых сетей представляет интерес применение автоматизированных тепловых пунктов с использованием низкопотенциальной тепловой энергии обратного трубопровода тепловой сети.

## **7. НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

В последние десятилетие стало совершенно очевидным, что дальнейшее интенсивное развитие современной энергетики и транспорта ведет человечество к крупномасштабному экологическому кризису. Стремительное сокращение запасов ископаемого топлива будет принуждать индустриально развитые страны расширять сеть атомных энергоустановок, которые во все возрастающей степени станут повышать опасность их эксплуатации. Резко обострится проблема утилизации радиоактивных отходов.

Учитывая эту тревожную тенденцию, многие ученые и практики определенно высказываются в пользу ускоренного поиска альтернативных нетрадиционных источников энергии.

### **7.1. Геотермальная энергия**

Объем Земли составляет примерно  $1083 \cdot 10^{12} \text{ км}^3$ . За исключением тонкого слоя земной коры, вся она имеет очень высокую температуру. Если учесть ещё и теплоёмкость пород Земли, то станет ясно, что геотермальная теплота представляет собой несомненно самый крупный источник энергии, которым в настоящее время располагает человек. Причём это энергия в чистом виде, так как она уже существует как теплота, и поэтому для её получения не требуется сжигать топливо или создавать реакторы.

В некоторых районах природа доставляет геотермальную энергию к поверхности в виде пара или перегретой воды, вскипающей и переходящей в пар при выходе на поверхность.

Природный пар можно непосредственно использовать для производства электроэнергии. Имеются также районы, где геотермальными водами из источников и скважин можно обогревать жилища и теплицы. Однако в целом, особенно с учётом величины глубинного тепла Земли, использование геотермальной энергии в мире крайне ограничено.

Для производства электроэнергии с помощью геотермального пара от этого пара отделяют твёрдые частицы, пропуская его через сепаратор, и затем направляют в турбину.

«Стоимость топлива» такой электростанции определяется капитальными затратами на продуктивные скважины и систему сбора пара и

является относительно невысокой. Стоимость самой электростанции при этом также невелика, так как последняя не имеет топки, котельной установки и дымовой трубы. В таком удобном естественном виде геотермальная энергия является экономически выгодным источником электрической энергии.

К сожалению, на Земле редко встречаются поверхностные выходы природного пара или перегретых (то есть с температурой гораздо выше 100 °С) вод, вскипающих с образованием достаточного количества пара.

## 7.2. Управляемый термоядерный синтез

Управляемый термоядерный синтез использует ядерную энергию, выделяющуюся при слиянии легких ядер, таких как ядра водорода или его изотопов – дейтерия и трития. Ядерные реакции синтеза широко распространены в природе, будучи источником энергии звезд.

Ближайшая к нам звезда – Солнце – это естественный термоядерный реактор, который уже многие миллиарды лет снабжает энергией жизнь на Земле. Ядерный синтез уже освоен человеком, но не для производства мирной энергии, а для производства оружия – используется в водородных бомбах. Начиная с 50-х гг. в нашей стране и во многих других странах проводятся исследования по созданию управляемого термоядерного реактора.

С самого начала стало ясно, что управляемый термоядерный синтез не имеет военного применения. В 1956 г. исследования были рассекречены и с тех пор проводятся в рамках широкого международного сотрудничества. В то время казалось, что цель близка и что первые крупные экспериментальные установки, построенные в конце 50-х гг., получат термоядерную плазму. Однако потребовалось более 40 лет исследований, чтобы создать условия, при которых выделение термоядерной мощности сравнимо с мощностью нагрева реагирующей смеси. В 1997 г. самая крупная термоядерная установка – Европейский токамак JET – получила 16 МВт термоядерной мощности и вплотную подошла к этому порогу.

Что же явилось причиной такой задержки? Оказалось, что для достижения цели физикам и инженерам пришлось решить массу проблем, о которых и не догадывались в начале пути. В течение этих 40 лет была создана наука – физика плазмы, которая позволила понять и описать сложные физические процессы, происходящие в реагирующей смеси. Инженерам потребовалось решить не менее сложные проблемы, в том числе научиться создавать глубокий вакуум в больших объемах, разработать большие сверхпроводящие магниты, мощные лазеры и источники рентгеновского излучения, инжекторы, способные создавать мощные пучки нейтральных атомов, методы высокочастотного нагрева смеси и многое другое.

Первое поколение термоядерных реакторов, которые пока находятся в стадии разработки и исследований, по-видимому, будет использовать реакцию синтеза дейтерия с тритием:



в результате которой образуются ядро гелия, He, и нейтрон. Необходимое условие для того, чтобы такая реакция пошла, это достижение высокой температуры смеси (100 млн °C). Только в этом случае реагирующие частицы могут преодолеть электростатическое отталкивание при столкновении, хотя бы на короткое время приблизиться друг к другу на расстояние, при котором возможна ядерная реакция. При такой температуре смесь изотопов водорода полностью ионизируется и превращается в плазму – смесь электронов и ионов.

Кроме высокой температуры для положительного выхода энергии нужно, чтобы время удержания высокотемпературной плазмы  $t$ , помноженное на плотность реагирующих ионов  $n$ , было достаточно велико:

$$nt > 5 \cdot 10^{15} \text{ с/см}^3.$$

Последнее условие называется *критерием Лоусона*.

Основная физическая проблема, с которой столкнулись исследователи на первых шагах на пути к термоядерному синтезу, – это многочисленные плазменные неустойчивости, приводящие к плазменной турбулентности. Именно они сокращали время жизни плазмы в первых установках до величины на много порядков меньше ожидаемой и не позволяли достигнуть выполнения критерия Лоусона. За 40 лет исследований удалось найти способы борьбы с плазменными неустойчивостями и построить установки, способные удерживать турбулентную плазму.

Существуют два принципиально различных подхода к созданию термоядерных реакторов, и пока не ясно, какой из них окажется наиболее выгодным. В так называемом инерционном термоядерном синтезе несколько миллиграмм дейтериево-тритиевой смеси сжимаются оболочкой, ускоряемой за счет реактивных сил, возникающих при испарении оболочки, с помощью мощного лазерного или рентгеновского излучения. Энергия выделяется в виде микровзрыва, когда в процессе сжатия в смеси дейтерия с тритием достигаются необходимые условия для термоядерного горения. Время жизни такой плазмы определяется инерционным разлетом смеси, и поэтому критерий Лоусона для инерционного удержания принято записывать в терминах произведения  $nr$ , где  $n$  – плотность реагирующей смеси и  $r$  – радиус сжатой мишени. Для того чтобы за время разлета смесь успела выгореть, нужно, чтобы  $nr \geq 3 \text{ Г/см}^2$ . Отсюда следует, что критическая масса топлива  $M$  будет уменьшаться с ростом плотности смеси, а следовательно, и энергия микровзрыва будет тем меньше, чем большей плотности смеси удастся достичь при сжатии. Ограничения на степень сжатия связаны с небольшой, но всегда существующей неоднородностью падающего на оболочку излучения и с несимметрией самой мишени, которая

еще и нарастает в процессе сжатия из-за развития неустойчивостей. В результате появляется некая критическая масса мишени и, следовательно, критическая энергия, которую нужно вложить в оболочку для ее разгона и получения положительного выхода энергии. По современным оценкам, в мишень с массой топлива около 5 мг и радиусом 1... 2 мм нужно вложить около 2 МДж за время  $5 \dots 10 \cdot 10^{-9}$  с. При этом энергия микровзрыва будет на уровне всего  $5 \cdot 10^8$  Дж (эквивалентно около 100 кг обычной взрывчатки) и может быть легко удержана достаточно прочной камерой.

Предполагается, что будущий термоядерный реактор будет работать в режиме последовательных микровзрывов с частотой в несколько герц, а выделяемая в камере энергия будет сниматься теплоносителем и использоваться для получения электроэнергии. За прошедшие годы достигнут большой прогресс в понимании физических процессов, происходящих при сжатии мишени и взаимодействии лазерного и рентгеновского излучения с мишенью. Более того, современные многослойные мишени уже были проверены с помощью подземных ядерных взрывов, которые позволяют обеспечить требуемую мощность излучения, были получены зажигание и большой положительный выход термоядерной энергии. Поэтому нет сомнений, что этот способ в принципе может привести к успеху. Основная техническая проблема, с которой сталкиваются исследователи, работающие в этой области, создание эффективного импульсного драйвера для ускорения оболочки. Требуемые мощности можно получить, используя лазеры, но КПД лазеров слишком мал для того, чтобы можно было рассчитывать на положительный выход энергии. В настоящее время разрабатываются и другие драйверы для инерционного синтеза, основанные на использовании ионных и электронных пучков. За последнее время здесь также достигнут существенный прогресс.

Другое направление в управляемом термоядерном синтезе – это *термоядерные реакторы*, основанные на магнитном удержании. Магнитное поле используется для изоляции горячей дейтериево-тритиевой плазмы от контакта со стенкой. В отличие от инерционных реакторов магнитные термоядерные реакторы – это стационарные устройства с относительно низким объемным выделением энергии и относительно большими размерами. За 40 лет термоядерных исследований были предложены различные системы для магнитного удержания, среди которых токамак занимает сейчас лидирующее положение. Другая система для магнитного удержания плазмы – это стелларатор. Крупные стеллараторы строятся в настоящее время в Японии и Германии.

В токамаке горячая плазма имеет форму тора и удерживается от контакта со стенкой с помощью магнитного поля, создаваемого как внешними магнитными катушками, так и током, протекающим по самой плазме. Характерная плотность плазмы в токамаке  $100\ 000\ 000\ 000\ 000$  частиц в  $\text{см}^3$ , температура  $T = 10 \dots 20$  кеВ (1 еВ –  $12\ 000$  °С) и давление 2... 3 атм. Для того чтобы удержать это давление, требуется магнитное поле с индукцией  $B = 1$  Т. Однако плазменные неустойчивости ограничивают

допустимое давление плазмы на уровне нескольких процентов от магнитного давления, требуемое магнитное поле оказывается в несколько раз выше, чем то, которое нужно для равновесия плазмы. Для избежания энергетических расходов на поддержание магнитного поля оно будет создаваться в реакторе сверхпроводящими магнитами. Такая технология уже имеется в нашем распоряжении, один из крупнейших экспериментальных токамаков Т-15, построенный несколько лет назад в России, использует сверхпроводящие магниты для создания магнитных полей.

Токамак-реактор будет работать в режиме самоподдерживающегося термоядерного горения, при котором высокая температура плазмы обеспечивается за счет нагрева плазмы заряженными продуктами реакции – альфа-частицами (ионами He). Для этого, как видно из условия Лоусона, нужно иметь время удержания энергии в плазме не меньше 5 с. Большое время жизни плазмы в токамаках и других стационарных системах достигается за счет их размеров, и поэтому существует некий критический размер реактора. Оценки показывают, что самоподдерживающаяся реакция в токамаке возможна в том случае, если большой радиус плазменного тора будет 7...9 м. Соответственно токамак-реактор будет иметь полную тепловую мощность на уровне 1 ГВт. Удивительно, что эта цифра примерно совпадает с мощностью минимального инерционного термоядерного реактора.

За прошедшие годы достигнут впечатляющий прогресс в понимании физических явлений, ответственных за удержание и устойчивость плазмы в токамаках. Разработаны эффективные методы нагрева и диагностики плазмы, позволившие изучить в нынешних экспериментальных токамаках те плазменные режимы, которые будут использоваться в реакторах. Нынешние крупные экспериментальные машины – JET (Европа), JT60-U (Япония), Т-15 (Россия) и TFTR (США) были построены в начале 80-х гг. для изучения удержания плазмы с термоядерными параметрами и получения условий, при которых нагрев плазмы сравним в полном выходе термоядерной мощности.

Два токамака, TFTR и JET, использовали DT-смесь и достигли соответственно 10 и 16 МВт термоядерной мощности. В экспериментах с DT-смесью JET получил режимы с отношением термоядерной мощности к мощности нагрева плазмы  $Q = 0,9$ , и токамак JT60-U на модельной DD-смеси достиг

$Q = 1,06$ . Это поколение токамаков практически выполнило свои задачи и создало все необходимые условия для следующего шага – строительства установок, нацеленных на исследование зажигания ( $Q = 5$ ) и уже обладающих всеми чертами будущего реактора.

Существуют огромные запасы топлива для термоядерной энергетики. Дейтерий – широко распространенный в природе изотоп, который может добываться из морской воды. Тритий будет производиться в самом реакторе из лития. Запасов дейтерия и лития хватит для производства энергии в течение многих тысяч лет, и это топливо, как и продукт реакций синтеза – гелий, не радиоактивно. Радиоактивность возникает в термоядерном реакторе

из-за активации материалов первой стенки реактора нейтронами. Известны низкоактивирующиеся конструкционные материалы для первой стенки и других компонентов реактора, которые за 30...50 лет теряют свою радиоактивность до полностью безопасного уровня.

Можно представить, что реактор, проработавший 30 лет и выработавший свой ресурс, будет законсервирован на следующие 30...50 лет, а затем конструкционные материалы будут переработаны и вновь использованы в новом термоядерном реакторе. Кроме дейтерий-тритиевой реакции, которая имеет высокое сечение при относительно низкой температуре и, следовательно, легче всего осуществима, можно использовать и другие реакции. Например, реакции D с  $\text{He}^3$  и P с  $\text{B}^{11}$  не дают нейтронов и не приводят к нейтронной активации первой стенки. Однако условия Лоусона для таких реакций более жесткие, и поэтому нынешняя термоядерная программа в качестве первого шага нацелена на использование DT-смеси. Несмотря на большие успехи, достигнутые в этом направлении, термоядерным реакторам предстоит еще пройти большой путь прежде, чем будет построен первый коммерческий термоядерный реактор. Развитие термоядерной энергетики требует больших затрат на развитие специальных технологий и материалов и на физические исследования. При нынешнем уровне финансирования это произойдет не ранее 2020–2040 гг.

### 7.3. Топливные элементы

Топливные элементы (ТЭ) осуществляют прямое превращение энергии топлива (например, водород + кислород) в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения. Это электрохимическое устройство в результате высокоэффективного «холодного» горения топлива непосредственно вырабатывает электроэнергию с КПД до 70 %.

Биохимики установили, что биологический водородно-кислородный топливный элемент «вмонтирован» в каждую живую клетку. Источником водорода в организме служит пища – жиры, белки и углеводы. В желудке, кишечнике, клетках она расщепляется до мономеров, которые, в свою очередь, после ряда химических превращений дают водород, присоединенный к молекуле-носителю. Кислород из воздуха попадает в кровь через легкие, соединяется с гемоглобином и разносится по всем тканям. Процесс соединения водорода с кислородом составляет основу биоэнергетики организма. То есть в мягких условиях (комнатная температура, нормальное давление, водная среда) химическая энергия с высоким КПД преобразуется в тепловую, механическую (движение мышц), электричество (электрический скат), свет (насекомые, излучающие свет). Человек в который раз повторил созданное природой устройство получения энергии. В то же время этот факт говорит о перспективности направления. Все процессы в природе очень рациональны, поэтому шаги по реальному использованию ТЭ вселяют надежду на энергетическое будущее.

Открытие в 1838 г. водородно-кислородного топливного элемента принадлежит английскому ученому У. Грову. Исследуя разложение воды на водород и кислород, он обнаружил побочный эффект – электролизер вырабатывал электрический ток. Ископаемое топливо (уголь, газ и нефть) состоит в основном из углерода. При сжигании атомы топлива теряют электроны, а атомы кислорода воздуха приобретают их. Так, в процессе окисления атомы углерода и кислорода соединяются в продукты горения – молекулы углекислого газа. Этот процесс идет энергично: атомы и молекулы веществ, участвующих в горении, приобретают большие скорости, а это приводит к повышению их температуры. Они начинают испускать свет – появляется пламя. Химическая реакция сжигания углерода имеет вид  $C + O_2 = CO_2 + \text{тепло}$ . В процессе горения химическая энергия переходит в тепловую энергию благодаря обмену электронами между атомами топлива и окислителя. Этот обмен происходит хаотически. Горение – обмен электронов между атомами, а электрический ток – направленное движение электронов. Если в процессе химической реакции заставить электроны совершать работу, то температура процесса горения будет понижаться. В ТЭ электроны отбираются у реагирующих веществ на одном электроде, отдают свою энергию в виде электрического тока и присоединяются к реагирующим веществам на другом. Основа любого химического источника тока (ХИТ) – два электрода, соединенные электролитом. ТЭ состоит из анода, катода и электролита. На аноде окисляется, т.е. отдает электроны, восстановитель (топливо  $CO$  или  $H_2$ ), свободные электроны с анода поступают во внешнюю цепь, а положительные ионы удерживаются на границе анод-электролит ( $CO^+$ ,  $H^+$ ). С другого конца цепи электроны подходят к катоду, на котором идет реакция восстановления (присоединение электронов окислителем  $O_2$ ). Затем ионы переносятся электролитом к катоду. В ТЭ сведены вместе три фазы физико-химической системы: газ (топливо, окислитель); электролит (проводник ионов); металлический электрод (проводник электронов). В ТЭ происходит преобразование энергии окислительно-восстановительной реакции в электрическую, причем процессы окисления и восстановления пространственно разделены электролитом. Электроды и электролит в реакции не участвуют, но в реальных конструкциях со временем загрязняются примесями топлива. Электрохимическое горение может идти при невысоких температурах и практически без потерь. В ТЭ поступает смесь газов ( $CO$  и  $H_2$ ), т.е. в нем можно сжигать газообразное топливо. Таким образом, ТЭ оказывается «всеядным». Усложняет использование ТЭ то, что для них топливо необходимо «готовить». Для некоторых ТЭ водород получают путем конверсии органического топлива или газификации угля. Поэтому структурная схема электростанции на ТЭ кроме батарей ТЭ, преобразователя постоянного тока в переменный и вспомогательного оборудования включает блок получения водорода ( для солнечной энергетики это *гидролизёр*).

### 7.3.1. Два направления развития ТЭ

Существуют две сферы применения ТЭ: автономная и большая энергетика.

Для автономного использования основными являются удельные характеристики и удобство эксплуатации. Стоимость вырабатываемой энергии не является основным показателем.

Для большой энергетике решающим фактором является экономичность. Кроме того, установки должны быть долговечными, не содержать дорогих материалов и использовать природное топливо при минимальных затратах на подготовку.

Наибольшие выгоды сулит использование ТЭ в автомобиле. Здесь как нигде проявляется компактность ТЭ. При непосредственном получении электроэнергии из топлива экономия последнего составит порядка 50 %.

Впервые идея использования ТЭ в большой энергетике была сформулирована немецким ученым В. Освальдом в 1894 г. Позднее получила развитие идея создания эффективных источников автономной энергии на основе топливного элемента. После этого предпринимались неоднократные попытки использовать уголь в качестве активного вещества в ТЭ. В 30-е гг. немецкий исследователь Э. Бауэр создал лабораторный прототип ТЭ с твердым электролитом для прямого анодного окисления угля. В это же время исследовались кислородно-водородные ТЭ. В 1958 г. в Англии Ф. Бэкон создал первую кислородно-водородную установку мощностью 5 кВт. Но она была громоздкой из-за использования высокого давления газов (2...4 МПа). С 1955 г. в США К. Кордеш разрабатывал низкотемпературные кислородно-водородные ТЭ. В них использовались угольные электроды с платиновыми катализаторами. В Германии Э. Юст работал над созданием неплатиновых катализаторов. После 1960 г. были созданы демонстрационные и рекламные образцы.

Первое практическое применение ТЭ нашли на космических кораблях «Аполлон». Они были основными энергоустановками для питания бортовой аппаратуры и обеспечивали космонавтов водой и теплом. Основными областями использования автономных установок с ТЭ были военные и военно-морские применения. В конце 60-х гг. объем исследований по ТЭ сократился, а после 80-х гг. вновь возрос применительно к большой энергетике. Фирмой VARTA разработаны ТЭ с использованием двусторонних газодиффузионных электродов. Электроды такого типа называют «Янус». Фирма Siemens разработала электроды с удельной мощностью до 90 Вт/кг. В США работы по кислородно-водородным элементам проводит United Technology Corp. В большой энергетике очень перспективно применение ТЭ для крупномасштабного накопления энергии, например получение водорода. Возобновляемые источники энергии (солнце и ветер) отличаются рассредоточенностью. Их серьезное использование, без которого в будущем не обойтись, немислимо без емких аккумуляторов, запаасающих энергию в той или иной форме. Проблема накопления актуальна уже сегодня: суточные и недельные колебания нагрузки энергосистем заметно снижают их эффективность и требуют так называемых маневренных

мощностей. Один из вариантов электрохимического накопителя энергии – топливный элемент в сочетании с электролизерами и газгольдерами (газгольдер [газ + англ. holder держатель] – хранилище для больших количеств газа).

### *7.3.2. Первое поколение ТЭ*

Наибольшего технологического совершенства достигли среднетемпературные ТЭ первого поколения, работающие при температуре 200...230 °С на жидком топливе, природном газе либо на техническом водороде (технический водород – продукт конверсии органического топлива, содержащий незначительные примеси окиси углерода). Электролитом в них служит фосфорная кислота, которая заполняет пористую углеродную матрицу. Electroды выполнены из углерода, а катализатором является платина (платина используется в количествах порядка нескольких граммов на киловатт мощности). Одна из таких электростанций введена в строй в штате Калифорния в 1991 г. Она состоит из восемнадцати батарей массой по 18 т каждая и размещается в корпусе диаметром чуть более 2 м и высотой около 5 м. Продумана процедура замены батареи с помощью рамной конструкции, движущейся по рельсам. Две электростанции на ТЭ США поставили в Японию. Первая из них была запущена еще в начале 1983 г. Эксплуатационные показатели станции соответствовали расчетным. Она работала с нагрузкой от 25 до 80 % от номинальной. КПД достигал 30...37 %, это близко к современным крупным ТЭС. Время ее пуска из холодного состояния от 4 ч до 10 мин, а продолжительность изменения мощности от нулевой до полной составляет всего 15 с.

Сейчас в разных районах США испытываются небольшие теплофикационные установки мощностью по 40 кВт с коэффициентом использования топлива около 80 %. Они могут нагревать воду до 130 °С и размещаются в прачечных, спортивных комплексах, на пунктах связи и т.д. Около сотни установок уже проработали в общей сложности сотни тысяч часов. Экологическая чистота электростанций на ТЭ позволяет размещать их непосредственно в городах. Первая топливная электростанция в Нью-Йорке, мощностью 4,5 МВт, заняла территорию в 1,3 га. Теперь для новых станций с мощностью в два с половиной раза большей нужна площадка размером 30 х 60 м. Строятся несколько демонстрационных электростанций мощностью по 11 МВт. Поражают сроки строительства (7 месяцев) и площадь (30 х 60 м), занимаемая электростанцией. Расчетный срок службы новых электростанций – 30 лет.

### *7.3.3. Второе и третье поколение ТЭ*

Лучшими характеристиками обладают уже проектирующиеся модульные установки мощностью 5 МВт со среднетемпературными топливными элементами второго поколения. Они работают при температурах 650...700 °С. Их аноды делают из спеченных частиц никеля и хрома, катоды – из спеченного и окисленного алюминия, а электролитом служит расплав смеси карбонатов лития и калия. Повышенная температура помогает решить две крупные электрохимические проблемы: снизить «отравляемость» катализатора окисью углерода и повысить эффективность процесса восстановления окислителя на катоде. Еще эффективнее будут высокотемпературные топливные элементы третьего поколения с электролитом из твердых оксидов (в основном двуокиси циркония). Их рабочая температура – до 1000 °С. КПД энергоустановок с такими ТЭ близок к 50 %. Здесь в качестве топлива пригодны и продукты газификации твердого угля со значительным содержанием окиси углерода. Не менее важно, что сбросовое тепло высокотемпературных установок можно использовать для производства пара, приводящего в движение турбины электрогенераторов. Фирма Vestingaus занимается топливными элементами на твердых оксидах с 1958 г. Она разрабатывает энергоустановки мощностью 25...200 кВт, в которых можно использовать газообразное топливо из угля. Готовятся к испытаниям экспериментальные установки мощностью в несколько мегаватт. Другая американская фирма Engelgurd проектирует топливные элементы мощностью 50 кВт, работающие на метаноле с фосфорной кислотой в качестве электролита. В создание ТЭ включается все больше фирм во всем мире. Американская United Technology и японская Toshiba образовали корпорацию International Fuel Cells. В Европе топливными элементами занимаются бельгийско-нидерландский консорциум Elenko, западногерманская фирма Siemens, итальянская Fiat, английская Jonson Metju. В сочетании с солнечными фотоэлектрическими батареями, гидролизёрами, водородными аккумуляторами и инверторами (которые переводят постоянный ток 12 В в переменный ток: 50 Гц, 220 В) топливные элементы могут являться частью уже вполне реальных работающих солнечных электростанций.

#### **7.4. Фотовольтаика**

Альтернативным и возобновляемым источникам энергии, таким, как энергия ветра и солнечного света, гидро- и геотермальная энергия, во всем мире уделяют все больше внимания. Растущий интерес к ним вызван экологическими соображениями, с одной стороны, и ограниченностью традиционных земных ресурсов, с другой. Особое место среди альтернативных и возобновляемых источников энергии занимают фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии, изучение которых

превратилось в отдельное научное направление – фотовольтаику. Однако высокая стоимость солнечных элементов до недавнего времени закрывала им путь в области, где без них можно обойтись. Но времена меняются, и экономически передовые государства в своих национальных программах уже стимулируют массовое применение солнечных батарей.

Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция – каждую секунду на Солнце  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  кг водорода превращается в гелий. Дефект массы при этом составляет 4000 кг, что согласно соотношению Эйнштейна  $E = mc^2$  приводит к выделению  $4 \cdot 10^{20}$  Дж энергии. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне 0,2...3 мкм. Поскольку полная масса Солнца  $\sim 2 \cdot 10^{30}$  кг, оно должно пребывать в достаточно стабильном состоянии свыше 10 млрд лет с постоянным выделением энергии. Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солнцем, называется солнечной постоянной. Ее величина –  $1373 \text{ Вт/м}^2$ . При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется в основном из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения – озоном – и рассеяния излучения частицами атмосферной пыли и аэрозолями. Показатель атмосферного влияния на интенсивность солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, называется «воздушной массой» (AM). AM определяется как секанс угла между Солнцем и зенитом.

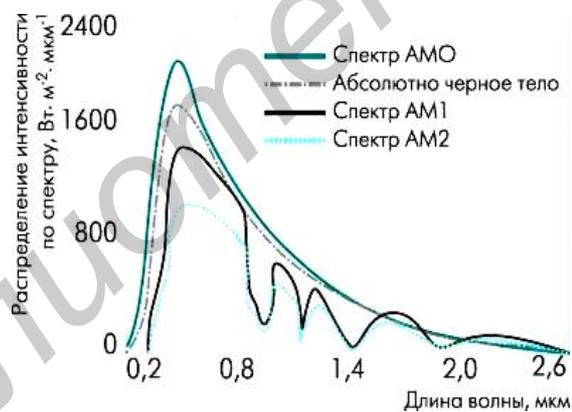


Рис. 7.1. Распределение интенсивности по спектру солнечного излучения

На рис. 7.1 показано спектральное распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях. Верхняя кривая (AM0) соответствует солнечному спектру за пределами земной атмосферы (например на борту космического корабля), т.е. при нулевой воздушной массе. Она аппроксимируется распределением интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 5800 К. Кривые AM1 и AM2 иллюстрируют спектральное распределение солнечного излучения на

поверхности Земли, когда Солнце в зените и при угле между Солнцем и зенитом  $60^\circ$  соответственно. При этом полная мощность излучения – соответственно порядка 925 и 691 Вт/м<sup>2</sup>. Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения при  $AM = 1,5$  (Солнце – под углом  $45^\circ$  к горизонту).

Таким образом, при использовании высокоэффективных методов преобразования энергии Солнце может обеспечивать бурно растущие потребности в ней практически вечно.

#### 7.4.1. Основные принципы работы солнечных батарей

Простейшая конструкция солнечного элемента (СЭ) – прибора для преобразования энергии солнечного излучения – на основе монокристаллического кремния показана на рис. 7.2. На малой глубине от поверхности кремниевой пластины р-типа сформирован р-n-переход с тонким металлическим контактом. На тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.

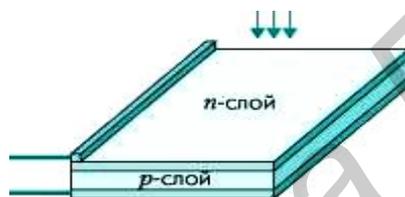


Рис. 7.2. Конструкция солнечного элемента

Когда СЭ освещается, поглощенные фотоны генерируют неравновесные электронно-дырочные пары. Электроны, генерируемые в р-слое вблизи р-n-перехода, подходят к р-n-переходу и существующим в нем электрическим полем выносятся в n-область. Аналогично и избыточные дырки, созданные в n-слое, частично переносятся в р-слой (рис. 7.3, а). В результате n-слой приобретает дополнительный отрицательный заряд, а р-слой – положительный.

Снижается первоначальная контактная разность потенциалов между р- и n-слоями полупроводника, и во внешней цепи появляется напряжение (рис. 7.3, б). Отрицательному полюсу источника тока соответствует n-слой, а р-слой – положительному.

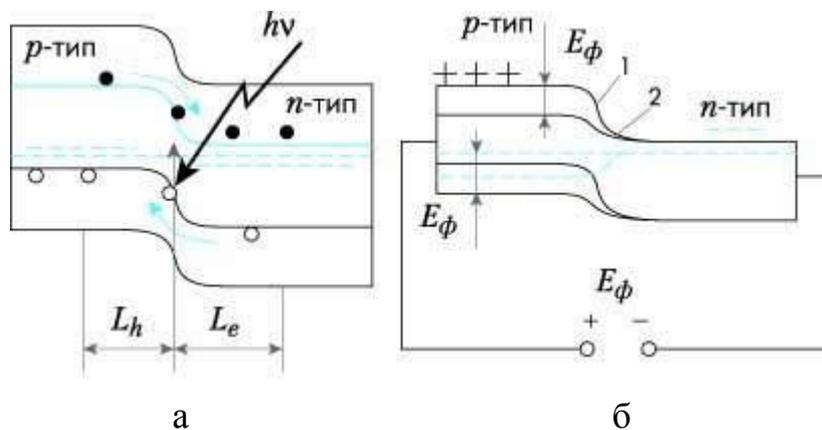


Рис. 7.3. Зонная модель разомкнутого р-п-перехода:  
 а – в начальный момент освещения;  
 б – изменение зонной модели под действием постоянного освещения и возникновение фотоЭДС

Величина установившейся фотоЭДС при освещении перехода излучением постоянной интенсивности описывается уравнением вольт-амперной характеристики (ВАХ) (рис. 7. 4):

$$U = (kT/q)\ln((I_{ph}-I)I_s/+1),$$

где  $I_s$  – ток насыщения, а  $I_{ph}$  – фототок.

ВАХ поясняет эквивалентная схема фотозлемента (рис. 7.5), включающая источник тока  $I_{ph} = S_q N_0 Q$ , где  $S$  – площадь фотозлемента, а коэффициент собирания  $Q$  – безразмерный множитель ( $<1$ ), показывающий, какая доля всех созданных светом электронно-дырочных пар ( $SN_0$ ) собирается р-п-переходом. Параллельно источнику тока включен р-п-переход, ток через который равен  $I_{ph} = I_s[e^{qU/kT}-1]$ ; р-п-переход шунтирует нагрузку, и при увеличении напряжения ток через него быстро возрастает. В нагрузку (сопротивление  $R$ ) отбирается ток  $I$ .

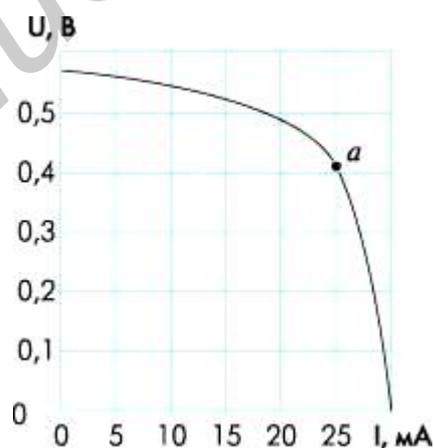


Рис. 7.4. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

Уравнение ВАХ справедливо и при освещении фотоэлемента светом произвольного спектрального состава, изменяется лишь значение фототока  $I_{ph}$ . Максимальная мощность отбирается в том случае, когда фотоэлемент находится в режиме, отмеченном точкой  $a$  (см. рис. 7.4).

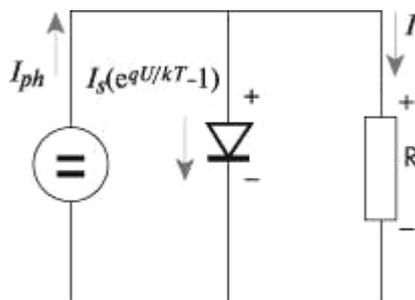


Рис. 7.5. Эквивалентная схема солнечного элемента

Максимальная мощность, снимаемая с  $1 \text{ см}^2$ , равна

$$P = I_{ph} \cdot U = x \cdot I_{к.з} \cdot U_{х.х},$$

где  $x$  – коэффициент формы или коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики,  $I_{к.з}$  – ток короткого замыкания,  $U_{х.х}$  – напряжение холостого хода.

#### 7.4.2. Конструкции и материалы солнечных элементов

Для эффективной работы солнечных элементов необходимо соблюдение ряда условий:

- оптический коэффициент поглощения активного слоя полупроводника должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить поглощение существенной части энергии солнечного света в пределах толщины слоя;
- генерируемые при освещении электроны и дырки должны эффективно собираться на контактных электродах с обеих сторон активного слоя;
- солнечный элемент должен обладать значительной высотой барьера в полупроводниковом переходе;
- полное сопротивление, включенное последовательно с солнечным элементом (исключая сопротивление нагрузки), должно быть малым для того, чтобы уменьшить потери мощности (джоулево тепло) в процессе работы;
- структура тонкой пленки должна быть однородной по всей активной области солнечного элемента, чтобы исключить закорачивание и влияние шунтирующих сопротивлений на характеристики элемента.

Производство структур на основе монокристаллического кремния, удовлетворяющих данным требованиям, – процесс технологически сложный

и дорогостоящий. Поэтому внимание было обращено на такие материалы, как сплавы на основе аморфного кремния (a-Si:H), арсенид галлия и поликристаллические полупроводники.

Аморфный кремний выступил в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому. Первые СЭ на его основе были созданы в 1975 г. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки a-Si:H толщиной 0,5...1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300-мкм подложек. Кроме того, благодаря существующим технологиям получения тонких пленок аморфного кремния большой площади не требуется операции резки, шлифовки и полировки, необходимых для СЭ на основе монокристаллического кремния. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a-Si:H производят при более низких температурах (300 °С): можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сократит расход кремния в 20 раз.

Пока максимальный КПД экспериментальных элементов на основе a-Si:H – 12 % – несколько ниже КПД кристаллических кремниевых СЭ (~15 %). Однако не исключено, что с развитием технологии КПД элементов на основе a-Si:H достигнет теоретического потолка – 16 %. Наиболее простые конструкции СЭ из a-Si:H были созданы на основе структуры металл–полупроводник (диод Шотки). Несмотря на видимую простоту, их реализация достаточно проблематична – металлический электрод должен быть

прозрачным и равномерным по толщине, а все состояния на границе металл/a-Si:H – стабильными во времени. Чаще всего солнечные элементы на основе a-Si:H формируют на ленте из нержавеющей стали или на стеклянных подложках, покрытых проводящим слоем.

#### *7.4.3. Расчёт фотоэлектрической системы*

Все фотоэлектрические системы (ФЭС) можно разделить на два типа: автономные и соединенные с электрической сетью. Станции второго типа отдают излишки энергии в сеть, которая служит резервом в случае возникновения внутреннего дефицита энергии.

Автономная система в общем случае состоит из набора солнечных модулей, размещенных на опорной конструкции или на крыше, аккумуляторной батареи (АКБ), контроллера разряда – заряда аккумулятора, соединительных кабелей. Если потребителю необходимо иметь переменное напряжение, то к этому комплексу добавляется инвертор-преобразователь постоянного напряжения в переменное.

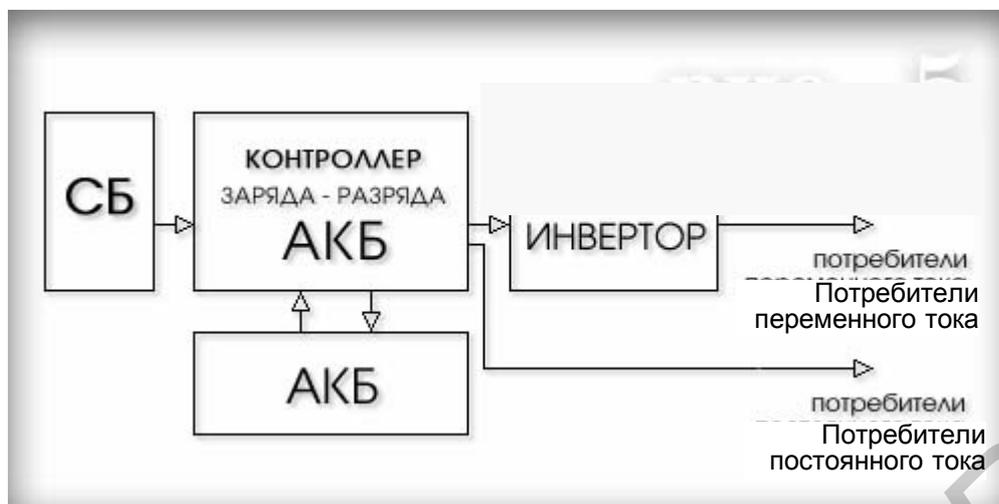


Рис. 7.6. Структурная схема фотоэлектрической системы

Под расчетом ФЭС понимается определение номинальной мощности модулей, их количества, схемы соединения; выбор типа, условий эксплуатации и емкости АКБ; мощностей инвертора и контроллера заряда разряда; определение параметров соединительных кабелей.

Прежде всего, надо определить суммарную мощность всех потребителей, подключаемых одновременно. Мощность каждого из них измеряется в ваттах и указана в паспортах изделий. На этом этапе уже можно выбрать мощность инвертора, которая должна быть не менее чем в 1,25 раза больше расчетной. Следует иметь в виду, что компрессорный холодильник в момент запуска потребляет мощность в 7 раз больше паспортной. Номинальный ряд инверторов 150, 300, 500, 800, 1500, 2500, 5000 Вт. Для мощных станций (более 1кВт) напряжение станции выбирается не менее 48 В, т.к. на больших мощностях инверторы лучше работают с более высоких исходных напряжений.

Следующий этап – это определение емкости АКБ. Емкость АКБ выбирается из стандартного ряда емкостей с округлением в сторону, большую расчетной. А расчетная емкость получается простым делением суммарной мощности потребителей на произведение напряжения АКБ и значения глубины разряда аккумулятора в долях.

Например, если суммарная мощность потребителей 1000 Вт·ч в сутки, а допустимая глубина разряда АКБ 12 В 50 %, то расчетная емкость составит :

$$1000 / (12 \cdot 0,5) = 167 \text{ А}\cdot\text{ч.}$$

При расчете емкости АКБ в полностью автономном режиме необходимо принимать во внимание и наличие в природе пасмурных дней, в течение которых аккумулятор должен обеспечивать работу потребителей.

Последний этап – это определение суммарной мощности и количества солнечных модулей. Для расчета потребуется значение солнечной радиации,

которое берется в период работы станции, когда солнечная радиация минимальна.

Взяв значения солнечной радиации за интересующий нас период и разделив его на 1000, получим так называемое количество пикочасов, т.е. условное время, в течение которого солнце светит как бы с интенсивностью  $1000 \text{ Вт/м}^2$ .

Например, для широты Минска в июле значение солнечной радиации составляет  $167 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$  при ориентации площадки на юг под углом  $40^\circ$  к горизонту. Это значит, что среднестатистически солнце светит в июле 167 ч (5,5 ч в день) с интенсивностью  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , хотя максимальная освещенность в полдень на площадке, ориентированной перпендикулярно световому потоку, не превышает  $700 \dots 750 \text{ Вт/м}^2$ .

Модуль мощностью  $P_w$  в течение выбранного периода выработает следующее количество энергии :

$$W = k P_w E / 1000,$$

где  $E$  – значение инсоляции за выбранный период;

$k$  – коэффициент, равный 0,5 летом и 0,7 – в зимний период.

Коэффициент  $k$  делает поправку на потерю мощности солнечных элементов при нагреве на солнце, а также учитывает наклонное падение лучей на поверхность модулей в течение дня. Разница в его значениях зимой и летом обусловлена меньшим нагревом элементов в зимний период.

Исходя из суммарной мощности потребляемой энергии и приведенной выше формулы, легко рассчитать суммарную мощность модулей, а поделив ее на мощность одного модуля, получить количество модулей.

При создании ФЭС настоятельно рекомендуется максимально снизить мощность потребителей. Например, в качестве осветителей использовать (по возможности) только люминесцентные лампы. Такие светильники потребляют в 5 раз меньше электроэнергии и обеспечивают световой поток, эквивалентный световому потоку лампы накаливания.

## 7.5. Ветроэнергетика

Использование энергии ветра для Беларуси является традиционным (рис. 7.7).



Рис. 7.7. Ветряная мельница XIX в. индивидуального пользования

В регионах республики среднегодовая скорость ветра не превышает 4,1 м/с. Наибольшие среднемесячные значения скорости ветра наблюдаются зимой, а минимальные – летом. Максимальные среднемесячные значения скорости ветра изменяются в пределах от 4,6 до 4,9 м/с.

Из-за небольших среднегодовых скоростей ветра в настоящее время перспективным следует считать использование автономных ветроэнергетических и ветронасосных установок малой мощности, в основном в сельскохозяйственном секторе. Такие ветроагрегаты производятся предприятиями СНГ и зарубежными фирмами (рис. 7.8).

#### *7.5.1. Устройство ветродвигателей*

Крыльчатый ветродвигатель состоит из следующих основных частей: ветроколеса, головки, хвоста и башни.

Ветроколесо преобразует энергию ветра в механическую работу; оно может иметь одну или много лопастей, устанавливаемых под некоторым углом к плоскости вращения ветроколеса. Крыло состоит из лопасти и маха, закрепляемого на валу ветроколеса, как правило, перпендикулярно оси вала.

Головка представляет собой опору, на которой монтируют вал ветроколеса и верхний передаточный механизм.



Рис. 7.8. Промышленные ВЭУ мощностью 250 кВт и 600 кВт около г.п. Занарочь (владелец – белорусско-немецкое общественное объединение «ЭкоДом»)

Форма головки определяется системой передаточного механизма, конструкция и число ступеней которого зависят от назначения и мощности ветродвигателя, а также числа оборотов ветроколеса и рабочей машины. Головка может свободно поворачиваться вокруг вертикальной оси в опорах башни. Хвост, закрепляемый позади головки, предназначен для установки ветроколеса на ветер; он работает подобно флюгеру.

Башня служит для поднятия ветроколеса на высоту, на которой незначительно сказывается влияние препятствий, нарушающих прямолинейное течение воздушного потока. В зависимости от рельефа местности и диаметра ветроколеса высоту башни для выпускаемых в настоящее время ветродвигателей принимают равной 6...20 м. Ветродвигатели малой мощности монтируют на столбе или трубе, укрепив их растяжками. Известно, что скорость ветра увеличивается с высотой, поэтому, казалось бы, правильным строить башни настолько высокими, насколько позволяют технические возможности. Однако повышение мощности является не единственным требованием при выборе высоты башни. Необходимо учитывать также вес, стоимость, условия монтажа, ремонта и обслуживания ветродвигателя. Высота башни должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы было удобно эксплуатировать ветродвигатель, но она не должна быть ниже препятствий, нарушающих прямолинейное течение воздушного потока. Например, в степных районах с частыми бурями высота башен ветродвигателей малой мощности может быть принята не более 4...6 м, а в лесных – не менее 15 м (рис. 7.9).

Редуктор монтируют у основания башни; он предназначен для передачи крутящего момента рабочим машинам. Для ветродвигателей, работающих с поршневым насосом, имеющим кривошипный механизм, размещенный в головке ветродвигателя, а также для ветродвигателей, работающих с генератором, размещенным в головке, редуктор у основания башни не нужен.

Механизм регулирования служит для ограничения числа оборотов и крутящего момента ветроколеса, а также для предотвращения поломок ветродвигателя при буревых ветрах.



Рис. 7.9. Пример масштабного использования энергии ветра

### 7.5.2. Расчет ветродвигателей

Использование энергии ветра связано с определенными трудностями, обусловленными непостоянством скорости и направления ветра, а также малой концентрацией воздушного потока на единицу площади. Плотность воздуха невелика, и поэтому диаметр лопастей рабочего колеса ветродвигателя должен быть большим – превышать в сотни раз диаметр колеса гидротурбины такой же мощности, так как плотность атмосферного воздуха примерно в 800 раз меньше плотности воды.

Обозначим через  $m$  массу воздуха, протекающего через поперечное сечение площадью  $A$  со скоростью  $V$ . Очевидно,

$$m = \rho AV, \quad (7.2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

Кинетическая энергия этой массы равна  $mV^2/2$ . Подставив значения, получим

$$mV^2/2 = \rho AV^3/2.$$

Мощность  $P_v$  ветроколеса определяется разностью кинетических энергий массы ветра, пересекающего площадь ометания  $S_o$  до и после ветроколеса:

$$P_v = S_o \rho V^3 / 2 - S_o \rho v^3 / 2 = S_o \rho (V^3 - v^3) / 2, \quad (7.3)$$

где  $S_o = \pi R_v^2 / 2$ .

Здесь  $R_v$  – радиус ветроколеса.

## 7.6. Гидроэнергетика

В настоящее время в Беларуси функционируют построенные в 50-е гг. Чигиринская и Осиповичская ГЭС с общей установленной мощностью 3,7 МВт и сеть ГЭС, восстановленных в 1992–1994 гг., общей мощностью около 2 МВт, что обеспечивает среднегодовую выработку электроэнергии около 20 млн кВт·ч, т.е. всего 1 % от возможного использования гидроэнергетического потенциала республики.

В Беларуси в 1988 г. действовало свыше 170 ГЭС, в том числе 5 малых ГЭС суммарной мощностью 3,5 тыс. кВт и годовой выработкой 16,5 млн кВт·ч электроэнергии. Для притоков первого и второго порядка бассейнов рек Западная Двина, Неман, Вилия, Днестр, Припять и Западный Буг был проведен анализ строительства новых малых ГЭС. В перспективе на притоках перечисленных рек может быть установлено около 50 малых ГЭС суммарной мощностью 50 тыс. кВт и среднегодовой выработкой электроэнергии 160 млн кВт·ч. На прудах и малых водохранилищах, напор на которых обычно 2...5 м, а расход воды в пределах 0,5...1,0 м<sup>3</sup>/с, возможно применение гидроагрегатов малой мощности (микроГЭС). Такие микроГЭС мощностью 10...50 кВт могут устанавливаться на существующих гидротехнических сооружениях водоемов мелиоративных и водохозяйственных систем. По ориентировочной оценке общая мощность микроГЭС на водохозяйственных системах республики составит до 1 МВт.

Мировой уровень стоимости 1 кВт установленной мощности для микроГЭС составляет 2000...2500 US \$. Стоимость оборудования, изготовленного в странах СНГ, остается ниже мирового уровня цен и составляет 250...800 US \$ /кВт. Срок окупаемости микроГЭС – менее 3 лет.

Строительство новых крупных ГЭС технически целесообразно и экономически оправдано на водохранилищах (объемом более 1 млн м<sup>3</sup>), где имеется возможность использования готового напорного фронта и существующих гидротехнических сооружений. Как показал анализ, общая установленная мощность таких ГЭС на 17 крупных водохранилищах республики неэнергетического назначения составит около 6 МВт, что обеспечит выработку электроэнергии порядка 21 млн кВт·ч в год.

Наиболее значительный объем электроэнергии может быть получен при строительстве каскада ГЭС на реках Западная Двина (Витебская,

Полоцкая, Верхнедвинская) и Неман (Гродненская). Эти гидроэлектростанции при относительно небольшом затоплении пойменной территории позволят получить до 800 млн кВт·ч в год электроэнергии, при установленной мощности около 240 МВт.

Потенциальная мощность всех учитываемых водотоков Беларуси составляет 850 тыс. кВт, из них более 50 % мощности приходится на средние и крупные реки. Технический потенциал гидроресурсов республики составляет 550 тыс. кВт, но экономически целесообразно реализовать лишь третью часть.

## 7.7. Биоэнергетика

Наиболее значительным обновляемым энергетическим ресурсом Беларуси является древесина. Общий объем леса на корню составляет 1 млрд м<sup>3</sup> (сплошной древесины), а площадь под ним – около 8 млн га. Ежегодный прирост древесной биомассы оценивается в 25 млн м<sup>3</sup>. За последние три десятилетия общие заготовки древесины составили 10...12 млн м<sup>3</sup> в год, из которых 6...7 млн м<sup>3</sup> приходилось на деловую древесину и 4...5 млн м<sup>3</sup> – на дрова. Около 40 % заготовленной круглой древесины шло на древесные отходы, из них 1...1,5 млн м<sup>3</sup> сжигалось в котлах.

Разрешенный лесоповал составляет 15 млн м<sup>3</sup> в год, при этом принимается во внимание необходимость восстановления леса и то обстоятельство, что использование леса возможно лишь на 80 % площади, занятой лесонасаждениями (вследствие загрязнения лесов в результате Чернобыльской катастрофы и проведения мероприятий по защите окружающей среды на некоторых занятых лесами участках). С учетом этого существует возможность использования еще 3...4 млн м<sup>3</sup> древесины в год, кроме того, около 1 млн м<sup>3</sup> неиспользованных древесных отходов находится на предприятиях деревообрабатывающей промышленности. Энергетическая ценность этих 4 млн м<sup>3</sup> дополнительного резерва древесины приблизительно равна 7 млн Гкал или 0,7 млн тнэ.

В 1995 г. в республике переведено на этот вид топлива 1190 действующий котлоагрегатов, что позволило сберечь 130 тыс. тнэ. В сельскохозяйственном коллективном предприятии «Прогресс» Гродненского района пущен в эксплуатацию котел, работающий на древесных отходах мебельного цеха, срок окупаемости – 1,8 г.

Выпуск высокоэффективных котлов, работающих на местных видах топлива и отходах производства, организован на Гомельском заводе «Коммунальник» и Бешенковичском «Котломаш».

Наиболее эффективным способом сжигания древесных отходов является их переработка в газогенераторных установках. Освоен выпуск газогенераторов мощностью 30...200 кВт, работающих на низкосортном местном топливе. Из выпущенных 190 газогенераторов 91 уже смонтирован. Применение их позволяет экономить порядка 350 тнэ и обеспечивает автономность теплоснабжения потребителей.

Другим возобновляемым источником энергии в Беларуси является биогаз, получаемый из животноводческих отходов. В республике насчитывается 275 животноводческих комплексов и 66 птицефабрик, на которых ежегодно можно производить 1,7 млрд м<sup>3</sup> биогаза, что эквивалентно 0,9 Мтнэ. Кроме того, существует способ получения биогаза путем переработки твердых бытовых отходов. Если принять срок переработки накопленных в республике отходов – 15 лет, то ежегодная возможная выработка составит 350 млн м<sup>3</sup> биогаза (около 200 тыс. тнэ).

В 1992 г. в Брестской области введена в эксплуатацию первая в республике биогазовая установка «Кобос», которая была спроектирована и изготовлена по типу аналогичных установок в Западной Европе. Ее производительность составляла 500 м<sup>3</sup> биогаза в сутки при расходе навоза крупного рогатого скота в объеме 50 м<sup>3</sup> /сутки. Примерно половина полученного биогаза расходовалась на собственные нужды, тем не менее установка способна была замещать в хозяйстве органическое топливо в объеме 47 тнэ в год.

Опыт эксплуатации этой установки в течение двух лет выявил ряд ее недостатков применительно к условиям Беларуси, особенно в работе при отрицательных температурах окружающего воздуха. Были выработаны рекомендации по их устранению. Проверка была проведена на лабораторной пилотной установке в Институте проблем энергетике Академии наук Беларуси. На основании этих рекомендаций в настоящее время идет изготовление опытно-промышленной установки производительностью 200 м<sup>3</sup> биогаза в сутки.

Традиционным топливом в Беларуси является торф. Запасы пригодного к добычи торфа в республике составляют 260 млн т при коэффициенте использования 45...50 %. Повышая этот коэффициент до 75...80 % (что технически выполнимо), можно увеличить объем извлекаемого торфа до 400 млн т.

В последние годы в Беларуси ежегодно используются 7...11 млн т торфа для нужд сельского хозяйства и 3,5...5 млн т для производства торфобрикетов, предназначенных для отопления 44 тыс. коммунально-бытовых предприятий и 1,7 млн индивидуальных домовладений. Потребности населения и коммунально-бытовых предприятий в твердом бытовом топливе удовлетворяются за счет торфа только на 30 %, поэтому в Энергетической программе Республики Беларусь до 2010 г. не предусмотрен возврат к его использованию в большой энергетике.

Однако неперспективность использования торфа в качестве топлива обусловлена прежде всего экологическими соображениями. В настоящее время более 50 % площади торфяных месторождений вовлечены в хозяйственную деятельность, что вызывает интенсивные процессы минерализации почвы, ветровой и водяной эрозии. Поэтому правительство Республики Беларусь приняло в 1991 г. решение об увеличении почти вдвое

охраняемого торфяного фонда, который в будущем должен охватить 30 % торфяных месторождений.

Учитывая имеющиеся ресурсы торфа и то, что торфяные брикеты достаточно дешевый вид топлива, можно говорить о возможности поддержания их производства на достигнутом уровне. В связи с выработкой запасов на ряде действующих брикетных заводах в ближайшей перспективе ожидается снижение объема выпуска топливных брикетов. По этой причине возможно увеличение производства бытового топлива за счет добычи более дешевого кускового торфа (в 2 раза), а также за счет строительства мобильных заводов мощностью 5...10 тыс. т объемы добычи кускового торфа могут быть доведены до 300...400 тыс. т в ближайшие 3 года, в дальнейшем – до 800...900 тыс. т, что позволит значительно снизить напряженность в энергообеспечении населения.

После катастрофы на Чернобыльской АЭС наша республика располагает значительными объемами радиоактивной биомассы. В этой связи специалистами прорабатываются вопросы использования этой биомассы для замещения топливных ресурсов Беларуси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня практически каждый житель Беларуси понимает, что энергосбережение – ключевая проблема любого общества. Ни у кого не вызывает сомнения, что уровень и качество жизни, материальный достаток, состояние здоровья, трудовая занятость напрямую зависят от возможности доступа к источникам энергии и стоимости последней. Совершенно ясно и то, что возврата к дешевой, казалось бы, неисчерпаемой энергии уже не будет. Ограниченность нашего мира, а следовательно, и первичных энергоисточников делает очевидным, что неэкономное использование энергии не может более продолжаться. Даже возобновляемые источники энергии не обещают безоблачного будущего из-за экологических проблем. Единственный подход к решению, или точнее говоря, существенному смягчению энергетической проблемы – использовать энергетические источники более эффективно. При нынешних обстоятельствах альтернативы энергосбережению не существует, что дает ему право рассматриваться как самостоятельный конкурентоспособный источник энергии.

Неоспоримым преимуществом этого источника энергии является тот факт, что он не только уменьшает внешнюю зависимость государства, но и во многом решает внутренние проблемы. Энергосбережение – это передовые энергосберегающие технологии, энергоэффективное оборудование и приборы, в том числе и бытовые, энергоэффективные уютные жилые дома, энергоэффективные демонстрационные, в том числе и конверсионные зоны, множество рабочих мест, как в сфере производства, так и в бытовом, и коммерческом, предпринимательском секторах.

Изложенный в данной публикации материал должен способствовать распространению широкой информации о состоянии энергетики, возможностях и потенциале энергосбережения, дать необходимые начальные сведения о теоретических основах энергоэффективности, пропагандировать достижения в области энергосбережения, обрисовать контуры наиболее перспективных направлений в создании энергоэффективных производств, вооружить методиками оценки эффективности инвестиций, что особенно важно для будущих руководителей производств и молодых специалистов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Беларусь «Об энергосбережении», 1998.
2. Справ. пособие / В. Е. Батищев и [др.]. – Энергосбережение : Екатеринбург, 1999.
3. Ганжа, В. Л. Основы практического энергосбережения. – Минск, 1995.
4. Основы энергосбережения: курс лекций / под ред. Н. Г. Хуцкой. – Минск : Тэхналогія, 1999.
1. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М. : Мир, 1984.
2. Неупорядоченные полупроводники / А. А Айвазов и [др.]. – М. : Высш. шк., 1995
3. СНБ 2.04.01-97.
4. СНиП 11-3-79.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Сущность энергетической проблемы.....	3
1.1. Мировое потребление энергетических ресурсов .....	3
2. Основные определения.....	5
2.1. Источники энергии .....	6
2.2. Топливо.....	7
2.3. Запасы органических видов топлива .....	13
3. Современное состояние мировой энергетики .....	14
4. Некоторые теоретические аспекты энергосбережения.....	20
4.1. Термодинамика как теоретическая база анализа энергоэффективности .....	20
4.2. Первое начало термодинамики .....	22
4.3. Второе начало термодинамики .....	23
5. Основы теплофизических расчетов ограждающих конструкций зданий и сооружений.....	27
5.1. Ограждающие конструкции зданий и сооружений.....	27
5.2. Теплотехнический расчет наружной монолитной стены из несъемной опалубки из ППС (пенополистирола) .....	35
5.3. Теплотехнический расчет наружной кирпичной стены.....	36
5.4. Сравнительный анализ ограждающих конструкций.....	37
6. Важнейшие энергосберегающие технологии.....	38
6.1. Энергоэффективные окна на основе стеклопакетов .....	39
6.2. Автоматизация тепловых пунктов зданий.....	43
7. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии .....	46
7.1. Геотермальная энергия .....	46
7.2. Управляемый термоядерный синтез .....	47
7.3. Топливные элементы .....	51
7.3.1. Два направления развития ТЭ .....	52
7.3.2. Первое поколение ТЭ.....	53
7.3.3. Второе и третье поколение ТЭ .....	54
7.4. Фотовольтаика.....	55
7.4.1. Основные принципы работы солнечных батарей .....	56
7.4.2. Конструкции и материалы солнечных элементов.....	59
7.4.3. Расчет фотоэлектрической системы.....	60
7.5. Ветроэнергетика.....	62
7.5.1. Устройство ветродвигателей .....	62
7.5.2. Расчет ветродвигателей .....	64
7.6. Гидроэнергетика .....	65
7.7. Биоэнергетика .....	66
Заключение.....	69
Литература .....	70

Учебное издание

**Барченко Григорий Васильевич**

**ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
«Радиотехника» и «Радиоинформатика»  
всех форм обучения

Редактор Н. В. Гриневич  
Корректор Е. Н. Батурчик

---

Подписано в печать 22.11.2007.	Формат 60×84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 4,3.
Уч.-изд. л. 4,0.	Тираж 200 экз.	Заказ 338.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6