

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**В.Я. Ушаков**

# **ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ**

*Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим  
центром высшего профессионального образования для межвузовского  
использования в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки магистров  
140200.68 «Электроэнергетика»*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2010

УДК 621.31(075.8)

ББК 31.2я73

У93

**Ушаков В.Я.**

У93 История и современные проблемы электроэнергетики и высоковольтной электрофизики: учебное пособие / В.Я. Ушаков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 219 с.

ISBN 978-5-98298-664-1

В пособии представлена история возникновения и развития науки об электричестве и практики его использования для нужд человека. Большое внимание уделено основным проблемам, связанным с энергетикой: истощаемость запасов невозобновляемых энергетических ресурсов, трудности освоения возобновляемых энергоресурсов, воздействие электроэнергетики на биосферу. Рассмотрены пути решения этих проблем.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям: 140200 «Электроэнергетика» и 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнология». Может быть полезно аспирантам, научным работникам и специалистам в области энергетики и смежных с ней областях.

УДК 621.31 (075.8)

ББК 31.2я73

*Рецензенты*

Доктор технических наук, член-корреспондент РАН

*Ю.Н. Вершинин*

Доктор физико-математических наук, профессор

директор НИИ высоких напряжений

*В.В. Лопатин*

ISBN 978-5-98298-664-1

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2010

© Ушаков В.Я., 2010

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2010

## Предисловие

Данное пособие посвящено описанию истории возникновения и развития науки об электричестве и практики его использования для нужд человека. Представлено становление самостоятельного раздела науки и техники – электротехники, зарождения в ее недрах электроэнергетики и, наконец, появление высоковольтной электрофизики (мощной импульсной энергетики и высоковольтных импульсных технологий) как результата синтеза высоковольтной техники, физики высоких энергий и некоторых классических технологий.

Большое внимание уделено основным проблемам, связанным с энергетикой: исчерпаемость запасов невозобновляемых энергетических ресурсов, трудности их освоения, воздействие электроэнергетики на биосферу, на социально-политическую обстановку в странах и на межгосударственные отношения. Рассмотрены пути решения этих проблем: освоение новых технологий производства и потребления электроэнергии, повышение эффективности использования энергоресурсов, коррекция жизненного уклада.

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК), важнейшей составной частью которого является электроэнергетика представляет собой крупнейшую отрасль экономики. Например, в России по состоянию на 2002 г. на его долю приходится около 30 % всей промышленной продукции, более 40 % доходной части бюджета, около 50 % всех валютных поступлений в Россию.

*Нет в XXI веке более важной проблемы для человечества, чем развитие энергетики – как научной области, так и отрасли экономики.*

По инициативе лауреата Нобелевской премии Жореса Алферова в 2003 г. в России учреждена международная премия «Глобальная энергия» (~1 млн долл.), которая будет присуждаться за выдающиеся фундаментальные исследования и прикладные разработки в области энергетики.

Особое место энергетики в жизни общества и каждого человека и определило потребность в данном учебном пособии. Надеюсь, что оно поможет студентам, магистрантам, молодым ученым и преподавателям с наименьшими потерями времени и сил решить следующие задачи:

- приобрести знания о глобальных воздействиях энергетики на Землю и человеческую цивилизацию;
- получить представление о современном состоянии и тенденциях развития энергетики вообще и ее важнейшей компоненты – электроэнергетики, в частности;
- овладеть знаниями об основных проблемах, связанных с электроэнергетикой, и путях их преодоления.

Обширная историческая справка о становлении и развитии учения об электричестве и его практических применениях будет способствовать выработке у студентов и молодых ученых навыков восприятия специальных дисциплин в их исторической и генетической взаимосвязи с фундаментальными и прикладными науками.

Значительная часть материала, а в ряде случаев и тексты, заимствованы из книг: В.А. Веников, Е.В. Путятин «Введение в специальность». учеб. пособ. для вузов. – М., «Высш. школа», 1978 г.; «История электротехники» / под ред. И.А. Глебова – М.: Изд-во МЭИ, 1999.; М.В. Самойлов «Основы энергосбережения»: учеб. пособ. / М.В. Самойлов, В.В. Паневчик, А.Н. Ковалев. – Мн.: БГЭУ, 2002; В.В. Литвак «Основы регионального энергосбережения» (Научно-технические и производственные аспекты). – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. Другие источники приведены в списке использованной литературы.

Большую помощь при подготовке рукописи оказали Е.В. Богданова и А.Ю. Худоногова. Автор выражает им свою сердечную благодарность.

# ГЛАВА 1

## ЭНЕРГЕТИКА – ОСНОВА ПРОГРЕССА И УГРОЗА БИОСФЕРЕ

### 1.1. Основные понятия и определения

Прежде чем приступить к рассмотрению истории и современных проблем как самой электроэнергетики, так и проблем всего человеческого сообщества, связанных с энергетикой, необходимо напомнить основные понятия и определения, относящиеся к этой проблеме.

Энергия (греч. – действие, деятельность) – общая количественная мера различных форм движения материи.

Основными свойствами энергии являются:

- способность проявляться лишь при изменении состояния или положения различных объектов окружающего нас мира;
- способность переходить из одной формы в другую;
- возможность количественной оценки;
- способность производить полезную для человека работу.

В зависимости от природы различают 8 видов энергии: механическая, тепловая, электрическая, химическая, магнитная, электромагнитная, ядерная, гравитационная.

Энергия, непосредственно извлекаемая в природе (энергия топлива, воды, ветра, тепла Земли, ядерная) называется *первичной энергией*. Энергия, получаемая человеком после преобразования первичной энергии на специальных предприятиях – станциях, – называется *вторичной энергией* (энергия электрическая, пара, горячей воды и т. п.).

В естественнонаучной литературе тепловую, химическую и ядерную энергию иногда объединяют понятием внутренней энергии, т. е. заключенной внутри вещества.

Современная наука не исключает существование и других пока не обнаруженных видов энергии.

Энергетические ресурсы – материальные объекты, содержащие энергию, пригодную для использования ее человеком в настоящее время или в недалеком будущем.

В зависимости от источников энергоресурсы подразделяются на первичные (природные) и вторичные (побочные).

В свою очередь *первичные энергоресурсы* подразделяются:

- по способам использования – на топливные и нетопливные;
- по признаку сохранения запасов – на а) возобновляемые и б) невозобновляемые;

- по динамике – на а) участвующие в постоянном обороте энергии (солнечная, космическая энергия и др.), б) депонированные (уголь, нефть, газ и т. п.) и в) искусственно активированные (атомная и термоядерная энергия);
- по воздействию на Землю и околоземное пространство – на а) добавляющие и б) недобавляющие энергию по сравнению с естественным притоком энергии к планете;
- по экономической целесообразности использования энергетического ресурса – на а) валовый (теоретический) ресурс, представляющий собой суммарную энергию, заключенную в данном виде энергоресурса; б) технический ресурс, представляющий собой энергию, которая может быть получена из данного вида энергоресурса при существующем уровне развития техники; в) экономический ресурс, представляющий собой энергию, получение которой из данного вида ресурса экономически выгодно при существующем соотношении цен на оборудование, материалы и рабочую силу. Доля двух последних ресурсов в валовом ресурсе возрастает по мере усовершенствования энергетического оборудования и освоения новых технологий.

*Вторичные энергетические ресурсы* – неиспользуемые в данном технологическом процессе или установке энергетические отходы (ВЭР). ВЭР – это энергетический потенциал продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, образующихся в технологических агрегатах (установках), которые не могут быть использованы в самом агрегате, но могут частично или полностью использоваться для энергоснабжения других потребителей.

К ВЭР не относятся химически связанное тепло продуктов топливopерерабатывающих установок (нефтеперерабатывающих, газогенераторных, коксовальных, углеобогатительных и др.). К ним относится тепловая энергия отходов, которая используется для подогрева потоков, поступающих в агрегат – источник ВЭР (регенерация, рекуперация).

Количество тепла, холода, электрической энергии, полученное за счет ВЭР в утилизационной установке, называется выработкой. Последняя может быть возможной, экономически целесообразной, планируемой, фактической. Их отличие понятно из самих определений (названий).

По своей природе ВЭР подразделяются на три типа: тепловые, горючие, ВЭР в виде избыточного давления.

*Тепловые ВЭР* – это физическое тепло отходящих газов, основной и побочной продукции, тепло золы и шлаков, горячей воды и пара, отработавших в технологических установках, тепло рабочих тел систем охлаждения технологических установок.

При правильном использовании вторичных тепловых энергетических ресурсов, образовавшихся в виде тепла отходящих газов технологических агрегатов, тепла основной и побочной продукции, достигается значительная экономия топлива. Проведенными расчетами установлено, что стоимость теплоэнергии, полученной в утилизационных установках, ниже затрат на выработку такого же количества теплоэнергии в основных энергоустановках.

*Горючие ВЭР* – горючие газы и отходы, которые могут быть применены непосредственно в виде топлива в других установках и непригодные в дальнейшем в данной технологии: отходы деревообрабатывающих производств (щепа, опилки, обрезки, стружки), горючие элементы конструкций зданий и сооружений, демонтированных из-за непригодности для дальнейшего использования по назначению, щелок целлюлозно-бумажного производства и другие твердые и жидкие топливные отходы.

К *вторичным энергетическим ресурсам избыточного давления* относится потенциальная энергия газов, воды, пара, покидающих установку с повышенным давлением, которая может быть еще использована перед выбросом в атмосферу, водоемы, емкости или другие приемники.

Избыточная кинетическая энергия также относится к вторичным энергоресурсам избыточного давления.

Энергетика или энергетическая система – совокупность больших естественных и искусственных систем, предназначенных для получения, преобразования, распределения и использования человеком энергетических ресурсов всех видов. Энергетика представляет собой одну из подсистем единой глобальной системы функционирования человеческого общества, включающая в себя различные отрасли хозяйства и окружающую среду.

Энергетическая система включает в себя:

- электроэнергетику и электроэнергетическую систему,
- нефте- и газоснабжение,
- угольную промышленность,
- ядерную энергетику,
- нетрадиционную энергетику.

Электроэнергетическая система – совокупность электрических станций, повышающих и понижающих подстанций и линий электропередач, совместно питающих потребителей электрической энергией.

На рис. 1.1 показана такая совокупность систем, их прямые и обратные (штриховая линия) связи. На этом рисунке и в приведенном выше определении подчеркивается **системный подход** к энергетике, при котором она рассматривается как большая система, включающая на правах подсистем части больших систем. Из понятия энергетике вытекает понятие энергетической науки, ее предмет и методы изучения.

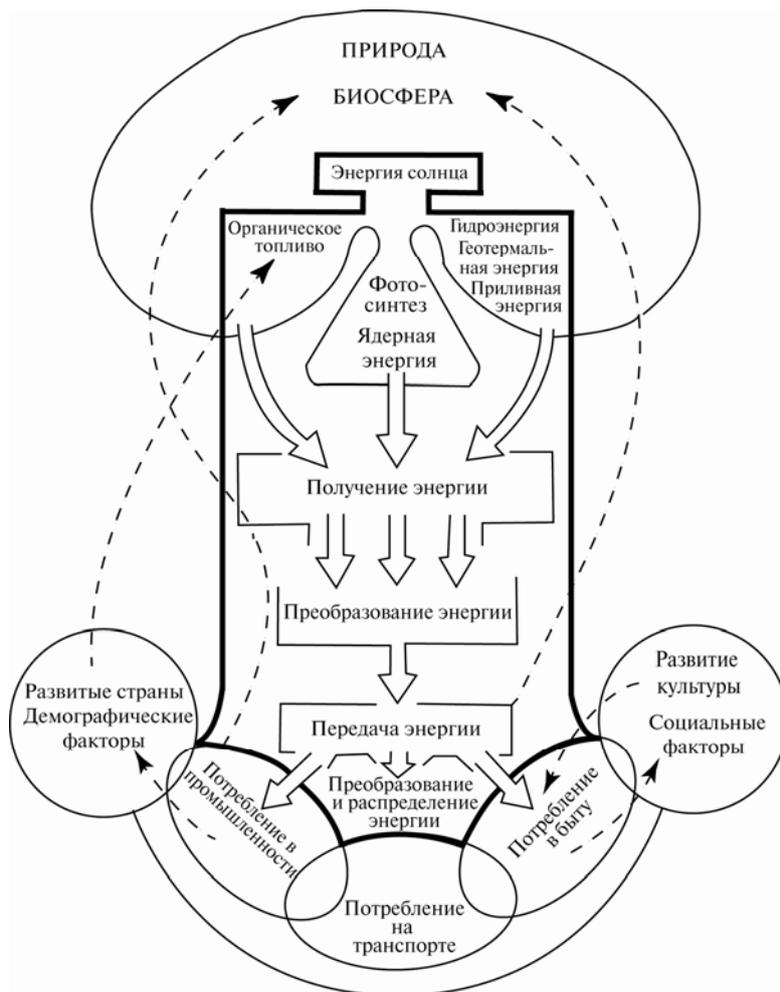


Рис. 1.1. Энергетика и связанные с ней подсистемы

Энергетическая наука – система знаний о свойствах и взаимодействиях энергетических потоков и их влиянии на окружающую среду. Такое определение энергетической науки соответствует общему понятию науки как формы общественного сознания, оформленной в виде системы упорядоченных знаний.

Предмет энергетической науки – закономерности процессов и явлений, прямо или косвенно связанных с получением энергетических ресурсов и созданием установок, вырабатывающих, преобразующих и потребляющих различные виды энергии.

Энергетическая наука развивается в *трех основных направлениях* [1]:

1) изучение закономерностей развития и оптимальных пропорций энергетики и электрификации, а также изучение природы и свойств больших развивающихся систем в энергетике. Это направление, имеющее своей целью совершенствование методов прогнозирования, планирования и эксплуатации систем энергетики, тесно связано с социальными процессами, экономикой стран;

2) совершенствование способов получения, преобразования, передачи, распределения и использования энергоресурсов и энергии различных видов; уменьшение их экологического влияния (неблагоприятного воздействия на природу и живые организмы, т. е. на биосферу);

3) новых методов и средств получения энергии и преобразования различных видов энергии в электрическую; разработка новых способов передачи электрической энергии и её использования. Здесь энергетика очень тесно смыкается с физикой.

Развитие и функционирование энергетики зависит от социальных и демографических факторов (политических и экономических аспектов состояния данной страны, наличия в ней рабочей силы, размещения населения, расположения источников энергии и т. д.). Выработка энергии связана с ее потреблением в промышленности, сельском хозяйстве, быту и на транспорте.

В связи с тем, что мощности искусственных энергетических установок и естественных геофизических процессов, влияющих на состояние планеты, становятся соизмеримыми, энергетика будет играть все более значительную роль в судьбе человечества. Она является как демографическим, социальным, так и политическим фактором, влияющим на взаимоотношения между государствами. Направленные по всему миру потоки различных энергетических ресурсов, общий качественный характер которых приближенно показан на рис. 1.2, проявляются в виде мощных факторов при развитии взаимоотношений, возникновении конфликтов и заключении договоров между государствами. Следует согласиться с утверждением о том, что современные межгосударственные конфликты пахнут не только кровью, но и нефтью.

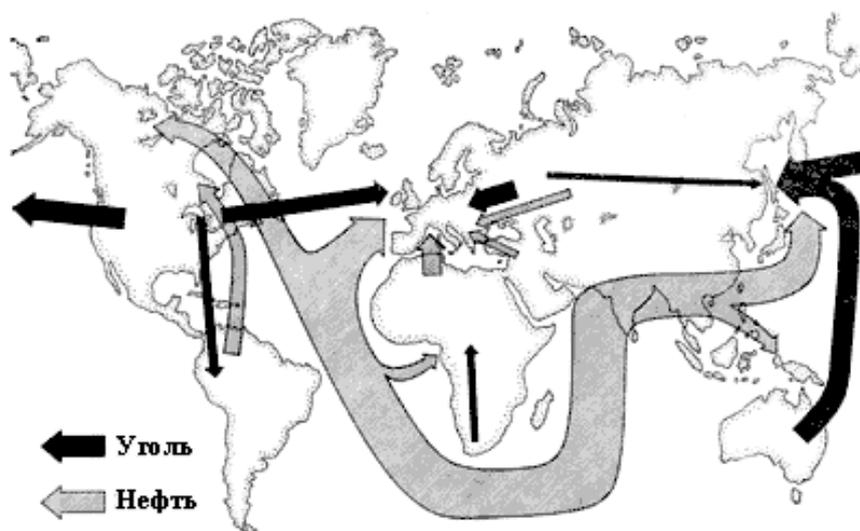


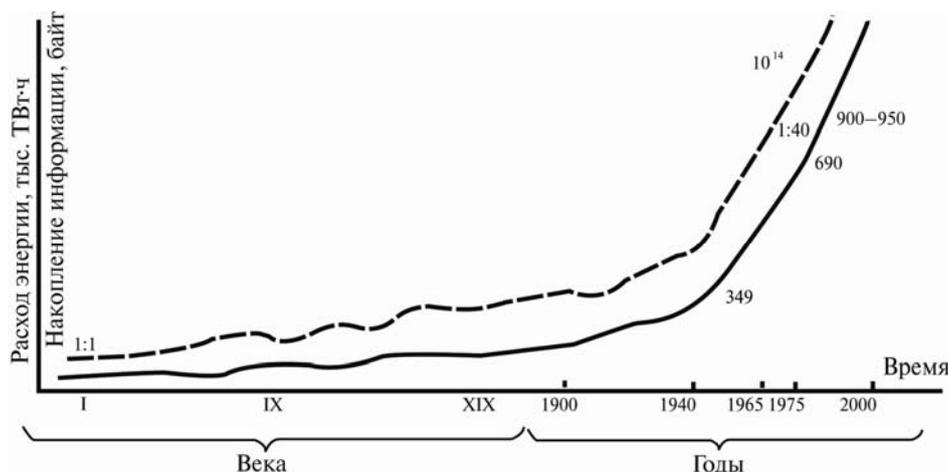
Рис. 1.2. Примерная схема потоков основных энергетических ресурсов в мире [1]

Характерные особенности энергетики, особенно важные на современном этапе технического прогресса, заставляют по-новому подходить к решению инженерных задач, учитывать факторы широкого плана, затрагивающие разные аспекты деятельности человеческого общества, вырабатывать новую инженерную психологию.

## 1.2. Энергетика и развитие цивилизации

Необходимое условие научно-технического и социального прогресса человеческой цивилизации состоит в увеличении количества потребляемой электрической энергии, освоении новых способов ее производства, повышении эффективности энергопотребления.

Процесс потребления энергии на нашей планете исторически протекал крайне неравномерно. Ориентировочное представление об этом может дать приведенная на рис. 1.3 кривая (сплошная линия), указывающая на резкое возрастание потребления энергии, начиная с XX в. Так, человечество за всю историю своего существования израсходовало примерно 900–950 тыс ТВт·ч энергии всех видов, причем около 2/3 ТВт·ч этого количества за последние 30 лет. Характерна здесь и неравномерность в потреблении энергии.



*Рис. 1.3. Возрастание расходуемой энергии и развитие культуры [1]: сплошная линия – суммарный расход энергии всех видов за предшествующий период развития (тыс ТВт·ч); цифрами 1:1 и 1:40 обозначены неравномерности в потреблении энергии на душу населения в различные исторические эпохи; пунктирная линия – накопленная человечеством информация, выраженная в байтах ( $10^{14}$  – оценка ее на 1974/75)*

Так, в доисторическую эпоху каждый человек, использующий свою мускульную силу и энергию впервые зажженного костра, тратил и приблизительно одинаковое количество энергии. Приближенно можно считать ее распределение равномерным – 1:1. В наше время неравномерность в потреблении энергии на душу населения стала огромна: для различных

стран она выражается отношением 1:40. Неравномерность в потреблении электроэнергии еще больше. Так, на одного жителя в Норвегии приходится около 14 000 кВт·ч, в то время как в Индии – всего лишь 100 кВт·ч.

Увеличение расходуемой энергии связано с развитием цивилизации, расширением и углублением знаний человека об окружающем его мире.

Объем знаний увеличивается по мере того, как человек развивает искусство, науки, открывает новые свойства материи. Приблизительно все эти знания, отражающие уровень развития цивилизации, можно оценить количеством накопленной информации. Интересно отметить, что потребление энергии и накопление информации примерно одинаково изменяются во времени (штриховая линия, рис. 1.3). Нужно иметь в виду, что общая накопленная информация, конечно, не отражает ее различной ценности при огромном качественном своеобразии. Этот показатель применим только для грубых ориентировочных оценок, выявления общих тенденций в развитии.

Влияние энергетики на культуру, духовное развитие человека образно охарактеризовал русский писатель К.Г. Паустовский, сказав, что «...лишняя тонна угля – это лишняя книжка хороших стихов, это тепло, свет, это спрессованная в черном блестящем камне сила жизни, сила и богатство мыслей и ощущений нашей эпохи». В самом деле, обеспечение энергией – это необходимая основа для того, чтобы человек мог создавать новую технику, заниматься науками, искусством, литературой – всем тем, что обобщенно называют культурой.

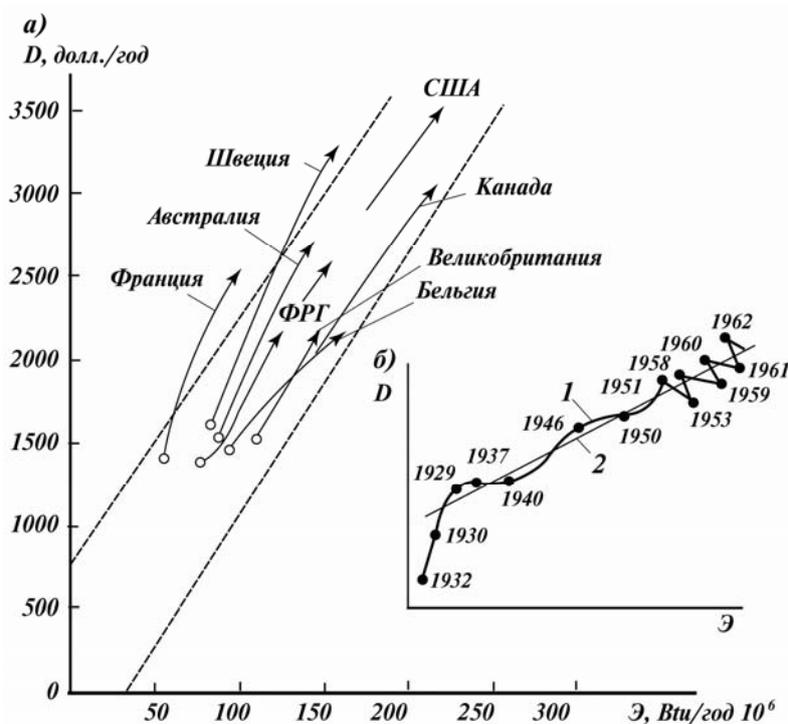


Рис. 1.4. Связь расхода энергии и объема выпускаемой продукции [1]

Огромное значение энергетики и прогресса энергетической техники состоит в том, что они обеспечивают повышение производительности труда, а, следовательно, и увеличение выпускаемой продукции.

На рис. 1.4 показана зависимость валового национального дохода населения  $D$  от расхода энергии  $\mathcal{E}$ . Доход США, выраженный в долларах, и энергия, определенная в условных единицах  $Btu$ , отнесены на душу населения. (для подсчета энергии употребляется  $Btu$  – Британская единица тепла, которая равна  $0,293 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$  или  $1,055 \text{ кДж}$ ).

Период научно-технической революции и формирования в наиболее развитых странах постиндустриального общества качественно отличается от предшествующих этапов развития. Это отличие, в первую очередь, заключается в огромном, революционном сдвиге в развитии производительных сил, создании в широких масштабах технически совершенных, оснащенных высокоэффективной автоматикой средств труда.

Научно-техническая революция представляет собой сложный процесс, приводящий к различным социальным последствиям. Прогресс в науке и технике определяется единством определенных эволюционных и революционных изменений. При этом в случае имеющихся предпосылок воздействие внутренних закономерностей развития науки и техники и общественных потребностей могут перевести эволюционные изменения в революционные. Любая техническая революция характеризуется коренными изменениями в средствах труда или технологии. Она может охватить целые отрасли, в результате чего складывается качественно новая материально-техническая база общества.

Рассматривая современную научно-техническую революцию и процессы в постиндустриальном обществе, нужно учитывать историю развития техники, важнейшие ее достижения и научные открытия последних лет. Это позволяет осознанно выбирать направления научно-технического прогресса, которые не только обеспечивают его высокие темпы, но и в наибольшей мере отвечают интересам нынешних и будущих поколений.

Успехи в области автоматизации, электрификации производства, транспортной технике также существенны для настоящих и будущих революционных изменений в энергетике и энергетической науке, которая, в свою очередь, существенно влияет на ход научно-технической революции.

Сознание человека, его разум развивались по мере совершенствования средств труда, развития производительных сил, по мере того как человек научался изменять природу. Пытаясь проникнуть в тайны природы, человек стремился использовать ее возможности для своих нужд. Со временем ему понятнее становились такие явления природы как молния, солнечное тепло, морские приливы и отливы и многие другие, которые для древнего человека были таинственными силами. Прекло-

няясь перед ними и перед стихиями природы, человек обожествлял их. У многих древних народностей не случайно верховным богом считалось Солнце. Это наивное представление о Солнце правильно оценивает его значение как источника почти всей энергии, используемой человечеством, как источника жизни. Солнечное тепло было первым источником энергии, которым пользовался человек. Легенда о Прометее донесла до нас весть о величайшем событии в жизни человечества, о том что люди научились добывать и поддерживать огонь, применять химическую энергию, запасенную в органическом топливе. Эта форма энергии и в настоящее время наиболее широко используется человеком.

Освоение природных энергетических ресурсов стимулировало создание машин, выполнявших довольно сложные операции и позволявших переложить на них значительную часть вначале физического, а в наше время и некоторой части умственного труда. Совершенствование машин высвобождало время человека для наиболее творческой работы, позволяло глубже проникать в законы природы, используя их для своего блага. Это, в свою очередь, способствовало созданию еще более совершенных орудий труда.

Потребности в энергии постоянно возрастали, что вынуждало изыскивать новые энергоресурсы и новые способы преобразования энергии из одного вида в другой. Сегодня стало уже традиционным использование таких видов энергии, как энергия Солнца, химическая энергия органического топлива, механическая энергия воды в реках, морях и океанах, энергия ветра, внутриядерная энергия, получаемая при делении тяжелых ядер. Весьма перспективно использование термоядерной энергии, получаемой при синтезе легких элементов, реализация которого снимет на все исторически обозримое время проблему удовлетворения потребностей человечества в энергии, ту проблему, которая возникает в связи с истощением запасов органического топлива.

Возвращаясь к вопросу о развитии энергетики, надо заметить, что бурный прогресс техники и тот уровень, которого она сейчас достигла, был бы невозможен без использования качественно новых видов энергии, в первую очередь электрической энергии. *Электрическая энергия по праву может считаться основой современной цивилизации.* Без электрической энергии невозможна нормальная жизнь современного общества. Именно электрическая энергия явилась той движущей силой, которая привела к созданию крупного машинного производства, обеспечившего невиданное развитие производительных сил. Основные отличительные свойства электрической энергии состоят в том, что она может легко передаваться на большие расстояния, трансформироваться в другие виды энергии.

Иллюстрацией значения электроэнергетики, хотя и печальной, в жизни современного общества служит известная авария в 1965 г. в США, когда на длительное время обширные районы страны, включая Нью-Йорк, остались без электричества. Отсутствие электричества парализовало жизнь в крупных городах, в них внезапно остановился электрический транспорт, отказали лифты, перестали работать установки для кондиционирования воздуха, вентиляторы, погас свет и т. п. Эта авария вызвала глубокие моральные потрясения и тяжелые материальные последствия.

Существенный материальный и моральный урон жителям российского Дальнего Востока нанесли перебои в теплоэнергоснабжении суровой зимой 2000–2001 гг. Такие примеры, к сожалению, можно было бы продолжать.

В последнее время более заметной становится связь энергетики с *биосферой*, т. е. тем пространством, в котором существует все живое. Это происходит потому, что мощности и энергии, которые человек научился получать искусственным путем, стали соизмеримыми с мощностями и энергиями природы, действующими на нашу планету.

### **1.3. Технический прогресс и биосфера**

#### **1.3.1. Соотношение мощностей естественных и технологических процессов**

Мир достиг в своем развитии состояния, требующего реализации новых, глобальных подходов к решению комплекса сложнейших проблем современности. К числу этих проблем относятся «энергетический голод» и «экологический инфаркт».

В этих условиях чрезвычайно важным становится прогнозирование будущего мировой энергетики, чтобы понять с какими противоречиями столкнется ее развитие, что можно предпринять, чтобы ослабить их остроту, в каких пределах это достижимо и какой ценой.

Современный человек в результате своей деятельности оказывает весьма заметное влияние на биосферу. Действительно, мощность только стационарных электростанций мира примерно равна 1,9 ТВт, а мощность всех установок, вырабатывающих энергию, не меньше 10 ТВт, что примерно соответствует мощностям таких явлений, как испарение влаги с поверхности Земли (0,5 ТВт), как приливы в морях и океанах (2–3 ТВт), как действие термических градиентов океана и суши (2–2,5 ТВт), и даже таких колоссальных проявлений сил природы как землетрясение (1,5–100 ТВт). Вырабатываемая человеком энергия влияет на естественные процессы, происходящие на нашей планете. Энергия всех видов топлива, добываемого в настоящее время на планете в течение года, равна примерно 60 тыс ТВт·ч. Это



Сегодня люди уже в повседневной жизни ощущают последствия, порой крайне неблагоприятные воздействия на окружающую среду. Наблюдается интенсивное загрязнение вредными веществами атмосферы, в результате чего меняется ее газовый состав, быстро сокращаются площади, занятые лесами, нарушается экологическое равновесие между атмосферой и мировым океаном вследствие засорения океана нефтью и прочими техническими продуктами, происходит так называемое тепловое загрязнение воды и воздуха, нагреваемых различными промышленными отходами. На сегодня эта проблема выросла до таких масштабов, что стал актуальным вопрос: не грозит ли уничтожением самой цивилизации научно-технический прогресс из-за его сильного отрицательного влияния?

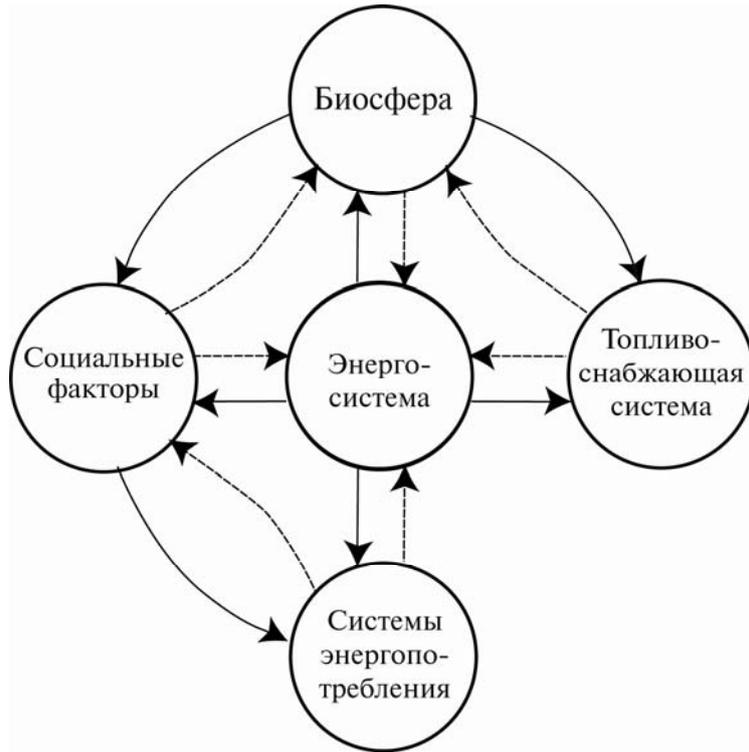
### ***1.3.2. Развитие энергетики в ее взаимосвязи с окружающей средой***

Эта озабоченность мирового сообщества нашла отражение в подписании большинством промышленно развитых стран в 1997 г. так называемого Киотского соглашения (по названию японского города), согласно которому страны взяли на себя обязательства по ограничению загрязняющих выбросов в атмосферу.

Стали традиционными периодические встречи глав государств мира для обсуждения проблем устойчивого развития человеческой цивилизации, в первую очередь, в связи с экологическими проблемами. Последняя по времени такая встреча состоялась в сентябре 2002 г. в г. Йоханнесбурге (ЮАР).

Очевидно, что планирование и проектирование энергетических систем, их развитие и эксплуатация должны осуществляться с учетом всех аспектов влияния на окружающую среду. В этой связи специалисту-энергетику предъявляются новые требования больших знаний о природе и происходящих в ней явлениях.

Энергосистема, в которой производится электрическая и тепловая энергия, непосредственно связана с системой обеспечения первичными энергоресурсами (рис. 1.6). Сооружение энергосистемы и условия ее работы во многом определяются природными факторами, например наличием водоемов и географическим расположением энергоресурсов и потребителей. Состояние биосферы, уровень ее загрязнения, связанный с работой энергетических установок, накладывают определенные ограничения на технические характеристики и условия работы энергосистем. Здесь прослеживаются прямые и обратные связи между биосферой и энергосистемой.

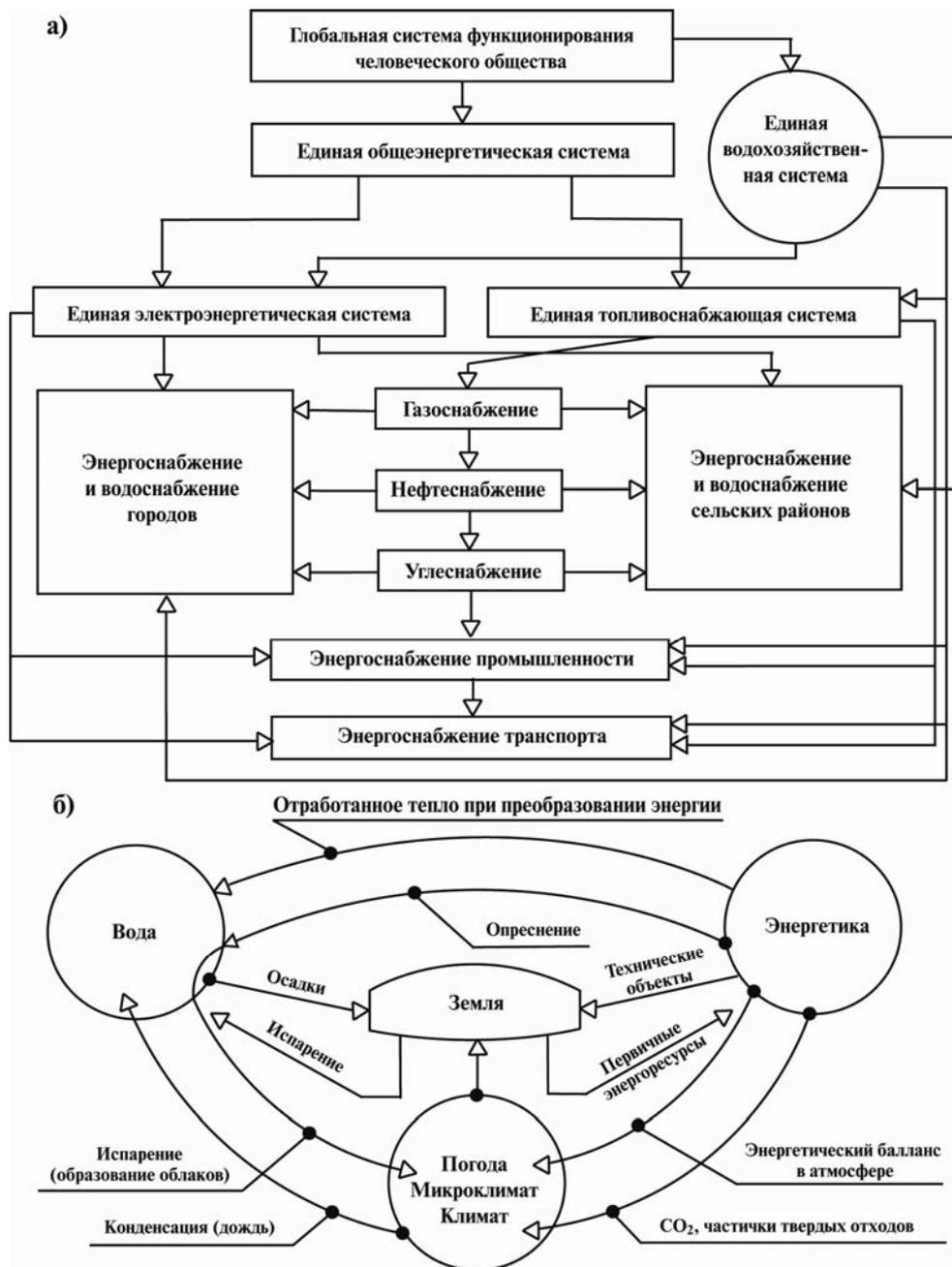


*Рис. 1.6. Различные факторы, влияющие на работу энергосистемы*

Управление энергосистемой должно производиться как с учетом влияния ее на биосферу, так и с учетом социальных функций топливоснабжающей системы, потребности в энергии промышленности и транспорта и других факторов. Управление производится не только выработкой энергии в энергосистеме, но и потреблением ее в различных отраслях хозяйства.

Современные энергетические системы, как было отмечено выше, находятся в тесной взаимосвязи с многогранными аспектами всей деятельности человека. Они прямо влияют на самые различные отрасли хозяйства (промышленность, транспорт, сельское хозяйство), на экономику, социальные условия, состояние биосферы и т. п. Существует также обратное влияние различных факторов деятельности человека на состояние и развитие энергетики. Именно поэтому энергетические системы и следует рассматривать как подсистемы единой глобальной системы функционирования человеческого общества (рис. 1.7 а, б).

При управлении работой энергетической системы, при прогнозировании и проектировании ее развития, а также проведении научных исследований необходимо учитывать взаимовлияние энергетической системы, связанных с ней систем хозяйства и биосферы. Развитие энергетики оказывает непосредственное влияние на общий уровень развития техники. В свою очередь достижения в различных областях техники отражаются на состоянии энергетики. Энергетика, биосфера, социальная и экономическая деятельность человека взаимосвязаны.



*Рис. 1.7. Энергетическая система и ее связи:  
а – энергетика как составная часть глобальной системы народного хозяйства  
б – энергетика как составная часть биосферы*

Важное различие двух видов источников энергии – возобновляемые и невозобновляемые, о которых было сказано выше, состоит в их влиянии на биосферу. Энергетика на невозобновляемых источниках приводит к дополнительному нагреву среды обитания, т. е. их энергия добавляется к энергии нагрева планеты, который обеспечивается Солнцем.

Использование возобновляемых источников энергии не приводит к дополнительному нагреву планеты, поэтому такая энергия называется

недобавляющей. Действительно, в этом случае, например, забирая солнечные лучи в энергетические установки, расположенные на Земле, мы изымаем энергию из цикла нагрева планеты, а затем, после использования, возвращаем планете в том же количестве в виде тепла. То же самое относится к ветровой и океанической энергии – сколько взято их из энергетического фона, столько и вернулось в среду обитания в виде тепла. Недобавляющую энергию можно назвать безотходной, добавляющая должна рассматриваться как засоряющая среду обитания.

Расчеты показывают, что производство добавляющей энергии, например, химической, ядерной, термоядерной в количестве, составляющем всего один процент от той, которую получает Земля от Солнца, приведет к увеличению средней температуры биосферы примерно на один градус.

По общему признанию, такое повышение средней температуры биосферы ведет к глобальным катастрофическим последствиям как для географии и климата Земли, так и для всего живого и растительного мира. Потепление непредсказуемо изменит темп и характер всех происходящих на Земле процессов, приведет к значительному изменению атмосферной циркуляции и условий увлажнения почвы. Как следствие – к сильному смещению зон, оптимальных для земледелия и других видов хозяйственной деятельности. Эти изменения затронули бы жизненные интересы миллиардов людей, вызвали бы массовые миграции населения (в том числе и с пересечением национальных границ), к переселению людей в зоны без сложившейся инфраструктуры и, в конечном итоге, к тяжелым социальным потрясениям. В применении к нашей стране это означало бы, в частности, прекращение производства зерна на десятках миллионов гектаров в зонах традиционного земледелия. Особенно неприятно то, что все эти изменения происходят очень быстро в историческом масштабе времени и к ним трудно приспособиться.

Проблема глобального парникового эффекта в последние годы стала предметом пристального внимания ученых. К сожалению, составление точного прогноза будущего оказалось очень трудной задачей, несущей в себе пока довольно большой элемент неопределенности из-за нашего недостаточного знания многих процессов в атмосфере, почве и океане. Неудивительно, что предсказания, сделанные разными группами ученых, довольно сильно различаются между собой. Оптимистичный прогноз состоит в том, что при удвоении количества углекислого газа температура вырастет на один градус, пессимистичный – что на пять градусов. Наиболее вероятной считается средняя между названными величинами – рост температуры на два с половиной – три градуса.

Насколько же быстро будет происходить накопление углекислого газа на самом деле? Если бы оно шло нынешними темпами, то через 50 лет концентрация углекислого газа увеличилась бы на 15–20 % против нынешнего уровня. Но так как потребление ископаемого топлива растет, более вероятным кажется достижение к сороковым годам нынешнего века концентраций, превышающих современные на 25 % и более. В рамках наиболее вероятного прогноза этому соответствовало бы повышение температуры, приближающееся к одному градусу, что уже было бы очень опасно.

По-видимому, безопасный предел использования добавляющей энергии может составить не более одной десятой процента от мощности падающей на Землю солнечной энергии, т. е. около 100 млрд киловатт. Сейчас земная цивилизация производит для своих нужд (промышленность, быт, транспорт) добавляющую энергию мощностью 10 млрд киловатт – всего в 10 раз меньше допустимого предела.

Уже многие десятилетия ежегодный прирост энергопроизводства составляет около 3 % в год. При сохранении такого темпа прироста добавляющей энергии допустимый тепловой предел будет достигнут через 60 лет. Тогда в середине XXI столетия рост производства этих видов энергии должен быть прекращен. При этом неизбежно возникнет трудный вопрос о квотах энергопроизводства государства. Это будет тяжелым глобальным кризисом цивилизации, имеющем геополитическое значение.

Что же делать? Ответ на этот вопрос пытаются дать ученые, специалисты, политики, журналисты, общественность.

В 1968 г. группа ученых и бизнесменов из разных стран основала Римский клуб – международную неправительственную организацию, которая поставила своей целью изучение глобальных проблем и путей их решения. В 1972 г. был опубликован первый доклад Клубу – «Пределы роста» Донеллы и Дениса Мидоузов, Йоргена Рандеса и В.В. Беренса. В докладе, привлечшем внимание политиков и ученых во всем мире, утверждалось, что судьба человечества оказалась под угрозой в результате неконтролируемого роста населения, безжалостной эксплуатации природных ресурсов и загрязнения окружающей среды. Некоторые восприняли «Пределы роста» как предсказание близкого конца света.

С тех пор прошло более 30 лет. Авторы первого доклада скорректировали свою компьютерную модель и опубликовали в 1992 г. еще один доклад «За пределами: глобальная катастрофа или устойчивое будущее?» А недавно появился новый доклад Римскому клубу «Фактор четыре. Удвоение богатства, двукратная экономия ресурсов», в котором предложены некоторые новые решения старых проблем, подстерегающих человечество на пути к устойчивому развитию, [12]. В предисловии

к книге редактор русского издания академик Г.А. Месяц пишет: «Казалось само собой разумеющимся, что промышленность создает экологические проблемы, а ученые (биологи, химики, медики, физики и др.) думают, как их решить. Однако не менее важно думать о том, как изменить технологии, чтобы создавать меньше экологических проблем. Нам нужно уйти от только ассенизационной роли ученых. Чтобы у нас было будущее, необходимо радикально усовершенствовать технологии, потреблять меньше энергии, эффективно использовать природные ресурсы. Книга «Фактор четыре» – одна из лучших публикаций из числа многочисленных статей и книг, посвященных этим проблемам.

Правильно ли мы живем? И как жить дальше? Таковы, в сущности, основные вопросы, на которые пытаются ответить авторы книги «Фактор четыре». Речь в ней идет об экономике, технологии, природных ресурсах, свободном рынке. Со времени промышленной революции прогресс означал увеличение производительности **труда**. «Фактор четыре» предлагает новый подход к прогрессу, ставя во главу увеличение продуктивности **ресурсов**. Как утверждают авторы, мы можем жить в два раза лучше и в то же время тратить в два раза меньше ресурсов, что необходимо для устойчивого развития человечества в будущем. Решение заключается в том, чтобы использовать энергию, воду, топливо, материалы, плодородные земли и т. п. более эффективно, часто без дополнительных затрат и даже с выгодой. Как весьма убедительно показывает «Фактор четыре», большинство технических решений наших проблем уже имеется и ими надо пользоваться прямо сейчас.

Мы много рассуждали в свое время об энергосберегающей политике, квинтэссенцией которой можно считать известную надпись на стенах учреждений «Уходя, гасите свет!» Так что продуктивное использование ресурсов – не такая уж новость. Новостью является то, как много существует нереализованных возможностей. Авторы приводят десятки примеров – от гиперавтомобилей до видеоконференций, от новых подходов в сельском хозяйстве до экономичных моделей холодильников. При этом они не только дают рекомендации, порой достаточно простые, но и реализуют многие из них на практике. Книга изобилует практическими примерами технологий, позволяющих более эффективно использовать мировые ресурсы. Она может стать справочным руководством для тех, кто хочет понять, как поставить технологию на службу устойчивому развитию и охране окружающей среды. К сожалению, в нашей повседневной жизни мы сталкиваемся с десятками контрпримеров – от подтекающих кранов, через которые утекают целые моря драгоценной чистой воды, до теплотрасс в крупных городах, которые перекадываются каждые три-четыре года, а теплоизоляция их такова, что зимой снег над ними тает.

В книге объясняется, как организовать рынки и перестроить налоговую систему таким образом, чтобы благосостояние людей могло расти, а потребление ресурсов не увеличивалось.

Для многих развивающихся стран революция в эффективности может дать единственно реальную возможность процветания за сравнительно не продолжительный период времени. Но новый образ мышления приемлем не для всех, что показали дискуссии на Всемирном экологическом форуме в Рио-де Жанейро в 1992 г., которому в книге посвящено немало страниц.

Один из основных барьеров на пути более эффективного использования ресурсов – противоречия между развитыми и развивающимися странами. Для последних экономия ресурсов и бережное отношение к природе часто отступают на второй план перед сиюминутными задачами борьбы с бедностью, которые они пытаются решить на пути развития по западному образцу, увы, не лишенному множественных ошибок.

В четырех главах данного пособия «Энергетика на базе возобновляемых источников энергии», «Нетрадиционные способы получения электрической энергии», «Энергосбережение», и «Становление и развитие мощной импульсной энергетики и высоковольтной электрофизики» будут кратко рассмотрены научно-технические и организационные подходы к решению этой глобальной проблемы.

Эту главу мы закончим рассмотрением еще одного чрезвычайно эффективного и столь же чрезвычайно трудного в использовании пути сохранения Земли, как колыбели и пока единственно пригодного места обитания человека, – путь осознанного самоограничения, путь изменения стиля жизни.

Жизнь в развитых странах отличается необыкновенно высокой скоростью расходования природных ресурсов. В частности, эти страны сжигают более половины ископаемого топлива, тогда как их население составляет лишь 20 % населения Земли. Такая скорость расходования ресурсов определяется тем жизненным стандартом, который достигнут значительной частью населения этих стран и к достижению которого стремится оставшаяся часть: отдельный довольно большой дом и один, а лучше два автомобиля на каждую семью, возможность много путешествовать и т. п. Этот стандарт и определяет в конечном итоге потребности общества в черных и цветных металлах, цементе, пластмассе, древесине и прочем, а через необходимость все это добыть, обработать, доставить – в энергии.

Возникает вопрос: «А нельзя ли несколько изменить стиль жизни населения развитых стран?» Таким ли уж привлекательным останется старый стандарт (большой дом, две машины и т. п.), если учесть, что следование ему скоро превратит нашу Землю в пустыню?

Нет ли ему приемлемой замены? Ведь стремление иметь свободу перемещения можно удовлетворить и с помощью развитой системы общественного транспорта, которая будет заведомо более экономичной, чем индивидуальные автомобили. А что касается большого дома, то, может быть, привлекательнее будет жизнь в маленьких (или даже многоквартирных) домах, но стоящих на фоне относительно нетронутой природы? Такого рода вопросы сейчас вызывают усмешку, но есть опасение, что они вскоре будут жестоко поставлены самим ходом событий.

Кстати, переход к этому стилю жизни в развитых странах вовсе не обязательно будет связан с появлением у их жителей субъективного «чувства утраты». Скорее всего, разумное самоограничение в сочетании с использованием «высоких технологий» только повысит общее качество жизни в этих странах, хотя и благодаря новым (по сравнению с сегодняшним днем) компонентам.

## ГЛАВА 2. ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

### 2.1. Истоки науки об электричестве и практической электротехники

Первые наблюдения магнитных и электрических явлений относятся к глубокой древности. О таинственных способностях магнита притягивать железные предметы упоминается в старинных летописях и легендах, дошедших до нас из Азии (Индии и Китая), Древней Греции и Рима.

Из древних сказаний и летописей, относящихся ко второму тысячелетию до н. э., мы узнали о многих интересных фактах практического использования магнита. Древние индийцы использовали магнит для извлечения железных наконечников стрел из тел раненых воинов. В китайских летописях рассказывается о волшебных магнитных воротах, сквозь которые не мог пройти человек, спрятавший металлическое оружие. При раскопках городища ольмеков (Центральная Америка) найдены скульптуры трехтысячелетней давности, высеченные из магнитных глыб.

В Китае во втором тысячелетии до н. э. уже применялись первые компасы разных конструкций. В одном из музеев хранится китайский компас тысячелетней давности.

Естественно, что древние ученые и естествоиспытатели задумывались над причиной загадочных свойств магнита. Платон, например, объяснял их божественным происхождением.

С именем одного из древних мудрецов – Фалеса (640–550 гг. до н. э.) связаны дошедшие до нас предания о свойстве натертого янтаря притягивать легкие тела. По его мнению, в янтаре, как и в магните, имеется душа, являющаяся первопричиной притяжения.

Изделия из янтаря, блестящие и красивые, широко использовались древними людьми для украшения, поэтому вполне вероятно, что многие могли заметить, что натертый янтарь притягивает легкие соломинки, кусочки тканей и пр.

Греки называли янтарь «электрон». От этого слова, спустя много веков, и произошел термин «электричество». Известно, что в одном из древнегреческих сочинений описывался камень (во-видимому, драгоценный), который, подобно янтарию, электризовался при трении. Но об электризации других тел древние греки, вероятно, не знали.

И еще одно любопытное явление не осталось незамеченным древними народами, жившими на побережье Средиземного моря и в бассейне р. Нила. Речь идет об «электрических» рыбах – скате и соме. При соприкосновении с этими рыбами, имеющими электрические органы, че-

ловек испытывал сильные удары. Известно, что в I веке н. э. римские врачи использовали электрический скат для лечения подагры, головной боли и других болезней.

И, конечно, древние народы наблюдали грозные раскаты грома и яркие вспышки молний, внушавшие им естественный страх, но ни одному из мудрецов тех времен не могла прийти в голову мысль о том, что и притяжения натертого янтаря, и удары «электрических рыб», и явления грозы в атмосфере имеют одну и ту же природу.

Упадок античной культуры заметно отразился на изучении электрических и магнитных явлений. Из многочисленных источников следует, что практически до 1600 г. не было сделано ни одного открытия в области электрических явлений, а в области магнетизма лишь описаны способы использования мореплавателями компаса (арабами – в IX в., а европейцами – в XI в.).

В XVI–XVII вв. в Европе все большее распространение получает экспериментальный метод научных исследований, одним из основоположников которого по праву называют Леонардо да Винчи (1452–1519 гг.). Изобретения и открытия этого «титана эпохи Возрождения» поражают своей глубиной и разносторонностью. Он был не только искуснейшим всадником, фехтовальщиком, поэтом, музыкантом, но и конструктором разнообразных машин и приборов, гениальным художником, математиком, астрономом, геологом, ботаником, анатомом, военным инженером, мыслителем-материалистом.

Его записные книжки, эскизы различных машин и механизмов насчитывают более 7 тыс. листов. Очень важно отметить, что он сумел сделать поразительный рывок в будущие века и оставил чертежи и эскизы не только летательных аппаратов и цилиндра паровой машины с поршнем, но и предсказал волновую природу света и магнетизма, что было подтверждено учеными спустя лишь около 400 лет. В одной из его записных книжек можно найти знаменательные слова: «Не слушай учения тех мыслителей, доводы которых не подтверждены опытом».

Экспериментальный метод исследований нанес заметный удар по мистицизму и разного рода вымыслам и предрассудкам. Но потребовалось еще столетие, чтобы наступил в самом начале XVII в. значительный перелом в представлениях об электрических и магнитных явлениях, наступил когда вышел в свет фундаментальный научный труд видного английского ученого (врача английской королевы Елизаветы) Вильяма Гильберта (1554–1603 гг.) «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле» (1600 г.). Будучи последователем экспериментального метода в естествознании, В. Гильберт провел более 600 искусных опытов, открывших, как он писал, тайны «скрытых причин различных явлений».

Фундаментальный труд В. Гильберта выдержал в течение XVII в. несколько изданий; он был настольной книгой многих естествоиспытателей в разных странах Европы и сыграл огромную роль в развитии учения об электричестве и магнетизме. Великий Г. Галилей писал о сочинениях В. Гильберта: «Я воздаю величайшую похвалу и завидую этому автору».

Эти события можно считать отправной точкой интенсивных экспериментальных исследований и теоретических обобщений в области электричества и магнетизма, приведших к становлению в начале XIX в. электротехники, а в последней четверти этого столетия – электроэнергетики как самостоятельных отраслей науки и техники. Основные вехи в истории науки об электричестве и магнетизме приведены в хронике выдающихся открытий и изобретений, составленной по материалам [2].

Таблица 2.1

*Хроника открытий и изобретений в области электричества и магнетизма (до 1890 г.)*

|  | Открытия, изобретения   | Даты                  | Авторы                                    |
|--|---|-----------------------|---|
| <b>1 . Предыстория электротехники (до 1800 г.)</b> |   |                       |   |
| 1.1  | Электризация янтаря (притягивание натертым янтарем легких предметов)  | около 600 г. до н. э. | Фалес (640–550 гг. до н. э.)              |
| 1.2  | Вышел в свет фундаментальный научный труд «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле»  | 1600 г.               | Вильям Гильберт (1554–1603 гг.)           |
| 1.3  | Электростатическая машина   | 1650 г.               | Отто фон Герике (1602–1686 гг.)           |
| 1.4  | Наблюдение и описание «искусственной молнии» – электрической искры  | около 1680 г.         | Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646–1716 гг.) |
| 1.5  | Разделение тел на проводники и непроводники (диэлектрики). Способность наэлектризованных тел наэлектризовывать другие при соприкосновении   | 1729 г.               | Стефан Грей (1670–1736 гг.)               |
| 1.6  | Обнаружение двух типов (два рода) электрических зарядов – «стеклянных» и «смоляных» и их способности отталкивать одноименные и притягивать разноименные заряды. Прототип электроскопа | 1733 г.               | Шарль Франсуа Дюфе (1698–1736 гг.)        |
| 1.7  | Лейденская банка, простейший конденсатор  | 1745 г.               | Питер Мюсхенбрук (1692–1761 гг.)          |
| 1.8  | «Электрический указатель» – стрелочный (льняная нить) прибор для измерения количества электричества   | 1745 г.               | Георг Вильгельм Рихман (1711–1753 гг.)    |

Продолжение табл. 2.1

|  |   |                    |   |
|--|---|--------------------|---|
| 1.9  | Установление основного соотношения для конденсатора – количество накапливаемого электричества пропорционально площади обкладок и обратно пропорционально толщине разделяющего их изолятора  | 1746 г.            | Б. Вильсон  |
| 1.10   | Материальная (тончайшие частицы) природа электричества. Электростатическая индукция.<br>Зарядение лейденской банки от облака (знаменитый опыт с воздушным змеем). Введение терминов «батарея», «заряд», «разряд». Усовершенствование молниеотвода | 1747 г.<br>1749 г. | Бенджамин Франклин (1706–1790 гг.)                                    |
| 1.11   | Первая теория атмосферного электричества. Установление природы молнии. «Эфирная» теория электричества   | 1753 г.            | Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765 гг.)                           |
| 1.12   | Отмечено «сходство и подобие» электрических и магнитных явлений.<br>Выход в свет трактата «Опыт теории электричества и магнетизма»  | 1758 г.<br>1759 г. | Франц Эпинус (1724–1802 гг.)<br>Джан батиста Беккария (1716–1781 гг.) |
| 1.13   | Электрическая машина для зарядения лейденской банки. Усовершенствованная эфирная теория электричества   | 1761 г.            | Леонард Эйлер (1707–1783 гг.)   |
| 1.14   | Успешная попытка аналитически установить силу взаимодействия электрических зарядов.   | 1771 г.            | Генри Кавендиш (1731–1810 гг.)  |
| 1.15   | Крутильные весы – прибор для измерения «малых электрических и магнитных сил».<br>Установление закона $F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ ,<br>названного впоследствии «законом Кулона»  | 1785 г.            | Шарль Кулон (1736–806 гг.)  |
| 1.16   | Создание основ электромедицины. Обобщение опыта применения электричества для лечения в:<br>– трехтомнике «История моего электризования и врачевания разных больных оным»,<br>– справочнике «Краткий электрический лечебник»                       | 1792 г.<br>1793 г. | Андрей Тимофеевич Болотов (1738–1833 гг.)                             |
| <b>2. Начальный этап развития электротехники (1800–1870 гг.)</b> |   |                    |   |
| 2.1  | Обнаружение «животного» электричества в опытах с лягушками.<br>Выход в свет «Трактата о силах электричества при мышечном движении»  | 1770 г.<br>1781 г. | Луиджи Гальвани (1737–1798 гг.)                                       |

Продолжение табл. 2.1

|     |   |               |  |
|-----|---|---------------|--|
| 2.2 | <p>Гальванический или Вольтов столб – первый источник непрерывного электрического тока.</p> <p>Выход в свет трактата «Об идентичности гальванического и электрического флюидов».</p> <p>Основание электрической метрологии.</p> <p>Создание более совершенных электрофоров и электроскопов</p>  | 1800 г.       | Алесандро Вольта (1745–1827 гг.)   |
| 2.3 | <p>Открытие химических, тепловых, световых и магнитных действий электрического тока. Создание основ электротехники</p>  | Начало XIX в. | <p>Антони Карлейль (1768–1840 гг.)</p> <p>Вильям Миколсон (1753–1815 гг.)</p> <p>Вильям Крейкшейк (1745–1800 гг.)</p> <p>Джованни Романьози (1761–1835 гг.)</p> <p>Василий Васильевич Петров (1761–1834 гг.)</p> <p>Ганс Христиан Эрстед (1777–1851 гг.)</p> |
| 2.4 | <p>Создание самой мощной к началу XIX в. электрической батареи (<math>U = 1,7</math> кВ, <math>P = 60-80</math> Вт, <math>I_{кз} = 0,2</math> А).</p> <p>Публикация научного труда «Известия о гальванических опытах».</p> <p>Введение понятия «электрическое сопротивление».</p> <p>Открытие явления электрической дуги и указания на применимость ее для освещения, плавки металлов, восстановления металлов из окислов.</p> <p>Исследования явления электрического разряда в вакууме</p> | 1803 г.       | В.В. Петров  |
| 2.5 | <p>Создание первой ионной теории электролитических явлений, изложенной в научном труде «Мемуары о разложении при помощи гальванического электричества воды, а также растворенных в ней тел»</p>   | 1805 г.       | Теодор Гротгурс (1785–1822 гг.)  |

Продолжение табл. 2.1

|      |  |                              |   |
|------|--|------------------------------|---|
| 2.6  | Показана возможность использования земли и воды в качестве обратного (второго) провода при осуществлении установок и устройств для передачи электрического тока от генератора к приемникам   | 1802–<br>1807 гг.            | Петр Иванович<br>Страхов<br>(1756–1827 гг.)   |
| 2.7  | Повторное (независимое от В. В. Петрова) открытие электрической дуги.<br>Установление химической природы электрического тока в гальванических элементах.<br>Получение электролитическим способом калия, натрия, магния, бора, бария, стронция и кальция  | 1808 г.                      | Хамфри Дэви<br>(1778–1829 гг.)  |
| 2.8  | Научное объяснение связи между электрическими и магнитными явлениями, ранее обнаруженной Д. Романьози. Публикация брошюры «Опыты, касающиеся действия электрического конфликта на магнитную стрелку»   | 1812 г.<br>1820 г.           | Ханс Христиан<br>Эрстед<br>(1777–1851 гг.)  |
| 2.9  | Открытие явления намагничивания проводника протекающим по нему током.<br>Создание соленоида  | 1820 г.                      | Доминик<br>Франсуа Араго<br>(1786–1853 гг.)   |
| 2.10 | Формулирование закона действия тока на магнит  | 1820 г.                      | Жан<br>Батист Био<br>(1774–1862 гг.)<br>Феликс Савар<br>(1791–1841 гг.)   |
| 2.11 | Создание основ электродинамики:<br>– открытие закона взаимодействия линейных проводников с током (закон Ампера),<br>– введение понятий «электрический ток», «направление электрического тока»,<br>– публикация сочинения «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта» | 1820 г.<br>1826–<br>1827 гг. | Андре Мари<br>Ампер<br>(1775–1836 гг.)  |
| 2.12 | Открытие и изучение явления термоэлектричества, имеющего большое практическое значение и сыгравшего важную роль в подготовке к открытию закона сохранения и превращения энергии  | 1834 г.                      | Томас Иоган<br>Зеебек<br>(1770–1831 гг.)<br>Антуан Сезар<br>Беккерель<br>(1788–1878 гг.)<br>Жан Шарль<br>Пельтье<br>(1785–1845 гг.) |
| 2.13 | Создание фундамента теоретической электротехники:<br>– формулирование закона электрической цепи (закон Ома),<br>– публикация фундаментального труда «Теоретические исследования электрических цепей»   | 1827 г.                      | Георг Симон Ом<br>(1789–1854 гг.)   |

Продолжение табл. 2.1

|      |   |  |  |
|------|---|--|--|
| 2.14 | <p>Независимое от М. Фарадея открытие электромагнитной индукции.</p> <p>Открытие явления самоиндукции.</p> <p>Открытие колебательного характера разряда конденсатора (в 1847 г. независимо от Д. Генри повторено Г. Гельмгольцем)</p>   | <p>1831 г.</p> <p>1832 г.</p> <p>1842 г.</p> | <p>Джозеф Генри<br/>(1797–1878 гг.)</p>  |
| 2.15 | <p>Открытие явления электромагнитной индукции.</p> <p>Два закона электролиза</p> <p>«Динамомашинa» – самовозбуждающийся генератор постоянного тока</p>  | <p>1831 г.</p> <p>1836 г.</p> <p>1867 г.</p> | <p>Майкл Фарадей<br/>(1791–1867 гг.)</p>   |
| 2.16 | <p>Открытие двух фундаментальных законов теоретической электротехники (законов Кирхгофа), сформулированных в научном труде «О протекании электрического тока через плоскую пластину, например, круглой формы».</p> <p>Установление количественных соотношений при описании явления электромагнитной индукции и переходных процессов</p> | <p>1845 г.</p>                               | <p>Густав Роберт Кирхгоф<br/>(1824–1887 гг.)</p>   |
| 2.17 | <p>Создание теории электромагнитного поля</p>   | <p>70-е годы XIX в.</p>                      | <p>Джеймс Клерк Максвелл<br/>(1831–1879 гг.)</p>   |
| 2.18 | <p>Закон сохранения и превращения энергии (точная формулировка и количественное описание завершены примерно к середине XIX в.)</p>  |  | <p>М.В. Ломоносов,<br/>А.Л. Лавуазье<br/>(1743–1794 гг.),<br/>С. Карно<br/>(1796–1832 гг.),<br/>М. Фарадей,<br/>Э.Х. Ленц<br/>(1804–865 гг.),<br/>Р. Майер<br/>(1814–1878 гг.),<br/>Д. Джоуль<br/>(1818–1889 гг.)<br/>Т. Юнг<br/>(1773–1829 гг.),<br/>Г. Гельмгольц<br/>(1821–1894 гг.),<br/>У. Томсон<br/>(Кельвин)<br/>(1824–1907 гг.)</p> |

Продолжение табл. 2.1

| <b>3. Становление электротехники как самостоятельной отрасли техники (1870–1890 гг.)</b> |   |                                      |   |
|--|---|--------------------------------------|---|
| 3.1.   | Индукционная катушка – простейший трансформатор с разомкнутым магнитопроводом   | 1848 г.                              | Генрих Румкорф (1803–1877 гг.)  |
| 3.2  | Лампа накаливания с угольным стержнем   | 1870 г.                              | Александр Николаевич Лодыгин (1847–1923 гг.)  |
| 3.3  | Демонстрация возможности передачи электрической энергии на большое расстояние   | 1873 г.                              | Ипполит Фонтен (1833–1910 гг.)  |
| 3.4  | Электрическая свеча   | 1876 г.                              | Павел Николаевич Яблочков (1847–1894 гг.)   |
| 3.5  | Лампа накаливания с платиновой спиралью. Разработка систем электрического освещения и централизованного электроснабжения  | 1879 г.                              | Томас Алва Эдисон (1847–1913 гг.)   |
| 3.6  | Способ снижения потерь энергии в линии, основанный на использовании высокого напряжения   | 1880 г.                              | Морсель Депре (1843–1918 гг.)<br>Дмитрий Александрович Лачинов (1842–1902 гг.)                              |
| 3.7  | Трансформатор с замкнутым магнитопроводом (сердечником)   | 1884–1885 гг.                        | Джон и Эдвард Гокинсы,<br>Миклош Дери,<br>Отто Блати (1860–1938 гг.),<br>Карой Циперновский (1853–1942 гг.) |
| 3.8  | Несколько систем амперметра, ваттметр, апериодический гальванометр, электромагнитный молот, принцип смешанного возбуждения электрических машин, система синхронной связи двух движений. Строительство первой линии электропередачи протяженностью 57 км (Мисбах – Мюнхен) | последняя четверть XIX в.<br>1882 г. | М. Депре  |
| 3.9  | Экспериментальные и теоретические исследования вращающегося магнитного поля   | 1882–1888 г.                         | Галилео Феррарис (1847–1897 гг.)<br>Николо Тесла (1856–1943 гг.)  |

|      |  |   |  |
|------|--|---|--|
| 3.10 | Трехфазная система передачи электрической энергии:<br>– трехфазный асинхронный двигатель,<br>– ротор в виде «беличьего колеса»,<br>– трехфазный трансформатор,<br>– трехфазная цепь с нейтральным проводом,<br>– синусоида как основная форма кривой тока  | 1885–<br>1892 гг.   | Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862–1919 гг.)                           |
| 3.11 | Электропривод, электротранспорт, электротехнологии:<br>– электрифицированный станок (швейная машина с электрическим приводом),<br>– промышленная дуговая печь,<br>– электрифицированная железная дорога (опытный участок),<br>– электрический трамвай,<br>– электрические печи выплавки алюминия | 1872 г.<br><br>1878 г.<br>1879 г.<br>1880 г.<br>1886–<br>1888 гг. | В.Н. Чикалев<br>В. Сименс<br>В. Сименс<br>Ф.А. Пироцкий<br>П. Эру<br>Ч.М. Холл |

## 2.2. Рождение и развитие электроэнергетики. Электрификация в СССР

История науки и техники ведет отчет времени электрификации с 1891 г., когда состоялось испытание трехфазной системы электропередачи на международной электротехнической выставке в г. Франкфуртена – Майне. [2].

В августе 1891г. на выставке впервые зажглись 1000 ламп накаливания, питаемых током от Лауфенской гидроэлектростанции (ГЭС); 12 сентября того же года двигатель М.О. Доливо-Добровольского привел в действие декоративный водопад.

Что же представляла собой эта первая трехфазная система электропередачи?

На гидроэлектростанции в Лауфене энергия, развиваемая турбиной, передавалась через коническую зубчатую передачу на вал трехфазного синхронного генератора (мощность 230 кВт·А, частота вращения 150 об/мин, напряжение 95 В, соединение обмоток звездой). В Лауфене и Франкфурте находилось по три трехфазных трансформатора с магнитопроводом призматической формы. Трансформаторы были погружены в баки, наполненные маслом.

Трехпроводная линия была выполнена на деревянных опорах со средним пролетом около 60 м. Медный провод диаметром 4мм крепился на штыревых фарфоро-масляных изоляторах. Интересной деталью линии являлась установка плавких предохранителей со стороны высокого

напряжения: в начале линии в разрыв каждого провода был включен участок длиной 2,5 м, состоявший из двух медных проволок диаметром 0,15 мм каждая. Для отключения линии во Франкфурте посредством простого приспособления устраивалось трехфазное короткое замыкание, плавкие вставки перегорали, турбина начинала развивать большую скорость, и машинист, заметив это, останавливал ее.

На выставочной площадке во Франкфурте был установлен понижающий трансформатор, от которого при напряжении 65 В питались 1000 ламп накаливания, расположенных на огромном щите. Здесь же был установлен трехфазный асинхронный двигатель Доливо-Добровольского приводивший в действие гидравлический насос мощностью около 100 л.с., питавший небольшой искусственный водопад. Одновременно с этим мощным двигателем М.О. Доливо-Добровольский экспонировал асинхронный трехфазный двигатель мощностью около 100 Вт с вентилятором на его валу и двигатель мощностью 1,5 кВт с сидящим на его валу генератором постоянного тока.

Испытания электропередачи, которые проводились Международной комиссией, дали следующие результаты: минимальный КПД электропередачи (отношение мощности на вторичных зажимах трансформатора во Франкфурте к мощности на валу турбины в Лауфене) – 68,5%, максимальный – 75,2 %; линейное напряжение при испытаниях – около 15 кВ, а при более высоком напряжении – 25,1 кВ максимальный КПД составил 78,9 %.

Результаты испытаний электропередачи Лауфен–Франкфурт не только продемонстрировали возможности электрической передачи энергии, но и поставили точку в давнем споре. В борьбе «постоянный–переменный ток» победил переменный.

Создание трехфазной системы – важнейший этап в развитии электроэнергетики и электрификации. После закрытия Франкфуртской выставки электростанция в Лауфене перешла в собственность г. Хейльборна, расположенного в 12 км от Лауфена и была пущена в эксплуатацию в начале 1892 г. Электроэнергия использовалась для питания всей городской осветительной сети, а также ряда небольших заводов и мастерских. Понижающие трансформаторы устанавливались непосредственно у потребителей.

В том же 1892 г. была сдана в эксплуатацию линия Бюлах–Эрликон (Швейцария). У водопада в г. Бюлахе построили гидроэлектростанцию с тремя трехфазными генераторами мощностью 150 кВт каждый. Электроэнергия передавалась на расстояние 23 км для электроснабжения завода. Вслед за этими первыми установками началось довольно быстрое

строительство ряда электростанций, причем наибольшее их число находилось в Германии.

В Америке первая трехфазная установка была сооружена в конце 1893 г. в Калифорнии. Гидроэлектростанция располагала двумя генераторами мощностью по 250 кВт. От электростанции провели две линии генераторного напряжения (2500 В). Первая из них длиной 12 км поставляла энергию для осветительных целей, а вторая длиной 7,5 км предназначалась для питания трехфазного асинхронного двигателя мощностью 150 кВт.

Темпы внедрения трехфазной системы в Америке вначале были заметно ниже, чем в Европе. Это объясняется тем, что одна из крупнейших американских фирм – компания «Вестингауз» – настойчиво пыталась развернуть работы по сооружению электростанций и электрических сетей по системе Теслы, т. е. двухфазных.

Американская фирма «Дженерал электрик» – основной оппонент фирмы «Вестингауз» – быстро переориентировалась и в противовес конкурирующей фирме развила бурную деятельность по сооружению трехфазных установок. Фирма «Вестингауз» проиграла.

Для переходного периода в любой области техники характерны попытки комбинирования устаревающих и новых технических решений. Так, в течение почти двух десятилетий, начиная с 1891 г., делались попытки «примирить» трехфазные системы с другими системами. В эти годы существовали электростанции, на которых одновременно работали генераторы постоянного, переменного однофазного тока, двухфазные и трехфазные или любая их комбинация. Напряжения и частоты были различными, потребители питались по отдельным линиям. Попытки спасти устаревающие системы, а вместе с ними и освоенное заводами электрооборудование, приводили к созданию комбинированных систем.

Но уже начиная с 1901–1905 гг. в основном сооружаются трехфазные электростанции, которые вначале преимущественно были станциями фабрично-заводского типа.

Трехфазная техника позволяла строить крупные электростанции на месте добычи топлива, на водопаде или на подходящей реке, а вырабатываемую энергию транспортировать по линиям электропередачи в промышленные районы и города. Такие электростанции стали называть районными.

Первые районные электростанции были построены во второй половине 90-х годов XIX в., а в следующем столетии они составили основу развития электроэнергетики. Первой районной электростанцией считают Ниагарскую ГЭС. Строительство районных электростанций приобрело широкий размах с начала XX в. Этому способствовал рост потреб-

ления электроэнергии, связанный с внедрением в промышленность электропривода, развитием электрического транспорта и электрического освещения городов.

Электрические станции становились крупными промышленными предприятиями по выработке электроэнергии; сети разных станций объединялись, создавались первые энергетические системы. Под энергетической системой стали понимать совокупность электростанций, линий электропередачи, подстанций и тепловых сетей, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства и распределения электрической и тепловой энергии.

Потребность объединить работу нескольких электростанций в общую сеть стала проявляться уже в 90-х годах XIX в. Было выяснено, что при совместной работе уменьшается необходимый резерв на каждой станции в отдельности, появляется возможность ремонта оборудования без отключения основных потребителей, создаются условия для выравнивания графика нагрузки базисных станций для более эффективного использования энергетических ресурсов.

Первое известное объединение двух трехфазных электростанций было осуществлено в 1892 г. в Швейцарии.

Русские электротехники сумели быстро оценить достоинства трехфазной системы. Уже в январе 1892 г. на 4-й Петербургской электротехнической выставке демонстрировались две трехфазные машины системы Доливо-Добровольского мощностью по 15 кВт.

В России первым предприятием с трехфазным электроснабжением был Новороссийский элеватор. Он представлял собой грандиозное сооружение, и задача распределения энергии по его этажам и различным зданиям могла быть решена наилучшим образом только с помощью электричества. Летом 1892 г. швейцарскому заводу фирмы «Брун-Бовери» были заказаны чертежи трехфазных машин. В следующем 1893 г. элеватор был электрифицирован. Интересно, что все машины по разработанным за границей проектам изготавливались в собственных мастерских элеватора.

На электростанции, построенной рядом с элеватором, были установлены четыре синхронных генератора мощностью 300 кВт·А каждый. Таким образом, общая мощность электростанции составляла 1200 кВт·А, т. е. это была в то время самая мощная в мире трехфазная электростанция. В помещениях элеватора работали трехфазные двигатели мощностью 3,5–15 кВт, которые приводили в действие различные машины и механизмы. Часть энергии использовалась для освещения.

Первой в России электропередачей значительной протяженности была установка на Павловском прииске Ленского золотопромышленно-

го района в Сибири. Электростанция была построена в 1896 г. на р. Ныгра. Здесь были установлены трехфазный генератор (98 кВт, 600 об/мин, 140 В) и трансформатор соответствующей мощности, повышающий напряжение до 10 кВ. Электроэнергия передавалась на прииск, удаленный от станции на 21 км. На прииске для привода водоотливных устройств использовались трехфазные асинхронные двигатели мощностью 6,5–25 л. с. (напряжение 260 В). Так постепенно расширялось в России строительство трехфазных электростанций.

С 1897 г. началась электрификация крупных городов: Москвы, Петербурга, Самары, Киева, Риги, Харькова и др.

Интересно отметить, что во время бурного развития трехфазных электропередач высокого напряжения (до 150 кВ) М.О. Доливо-Добровольский на основе технико-экономических расчетов пришел к выводу о том, что при передаче энергии на несколько сотен километров при напряжении свыше 200 кВ целесообразно генерирование и распределение энергии осуществлять переменным током, а передачу – постоянным высоким напряжением. Линия постоянного тока в начале и в конце должна подсоединяться к преобразовательным подстанциям, на которых устанавливаются ртутные выпрямители. К такому выводу он пришел даже не зная о такой проблеме для мощных линий передач переменного тока как устойчивость.

В наши дни его предсказание оправдалось, и во многих странах успешно действуют линии электропередачи постоянного тока сверхвысокого напряжения.

Дальнейшее развитие электроэнергетики в нашей стране прошло в несколько этапов:

- соединение электростанций на параллельную работу и образование первых энергосистем;
- образование территориальных объединений энергосистем (ОЭС);
- создание Единой энергетической системы (ЕЭС);
- функционирование электроэнергетики России после образования независимых государств на территории бывшего СССР.

Основа создания энергетических систем в нашей стране была заложена Государственным планом электрификации России (ГОЭЛРО), утвержденным в 1920 г. Этот план предусматривал централизацию электроснабжения путем строительства крупных электростанций и электрических сетей с последовательным объединением их в энергетические системы. Планом ГОЭЛРО предусматривалось также всемерное развитие отечественной электротехнической промышленности, освобождение ее от засилья иностранного капитала, удельный вес которого составлял в ней в начале 20-х годов 70 %. Для решения всех вопросов

электротехники и подготовки высококвалифицированных специалистов в октябре 1921 г. был создан Государственный экспериментальный электротехнический институт, переименованный впоследствии во Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ).

Под руководством ведущих членов комиссии ГОЭЛРО (руководитель Г.М. Кржижановский) были спроектированы и построены ряд электростанций и линий электропередач: Шатурская ГРЭС (мощность 48 тыс. кВт, год ввода в эксплуатацию 1925 г.), Волховская ГЭС (66 тыс. кВт, 1926 г.), Нижнесвирская ГЭС (90 тыс. кВт, 1993), Днепровская ГЭС (580 тыс. кВт, 1932). Днепровская ГЭС была в то время самой крупной в Европе.

Первые энергосистемы – Московская и Петроградская – были созданы в 1921 г. В 1922 г. в Московской энергосистеме вошла в строй первая линия электропередачи напряжением 110 кВ Каширская ГРЭС–Москва длиной 120 км, а в 1933 г. была пущена линия электропередачи напряжением 220 кВ Нижнесвирская ГЭС–Ленинград. (первая линия 220 кВ во Франции была построена всего на полгода раньше). Были образованы новые энергосистемы: Донбасская (1926 г.), Ивановская (1928 г.), Ростовская (1929 г.) и др.

За 15-летний срок план ГОЭЛРО был значительно перевыполнен. Установленная мощность электростанций страны в 1935 г. составила 6,9 млн кВт, годовая выработка электроэнергии достигла 26,8 млрд кВт·ч. По производству электроэнергии Советский союз занял второе место в Европе и третье в мире.

Процесс объединения энергосистем начался еще в первой половине 30-х годов с создания сетей 110 кВ энергосистем в районах Центра и Донбасса. В 1940 г. для руководства параллельной работой Верхневолжских энергосистем (Горьковской, Ивановской и Ярославской) была создана объединенная диспетчерская служба. В связи с намечавшимся объединением энергосистем Юга в 1938 г. было создано Бюро Южной энергосистемы, которое затем было преобразовано в Оперативно-диспетчерское управление Юга; в 1940 г. была введена в эксплуатацию первая межсистемная связь напряжением 220 кВ Днепр–Донбасс.

Мощность всех электростанций страны в 1940 г. достигла 11,2 млн кВт, выработка электроэнергии составила 48,3 млрд кВт·ч.

Интенсивное плановое развитие электроэнергетики было прервано Великой Отечественной войной. Перебазирование промышленности западных районов на Урал и в восточные районы страны потребовало форсированного развития энергетики Урала, Казахстана, Центральной Сибири, Средней Азии, Поволжья, Закавказья и Дальнего Востока. Осо-

бенно большое развитие получила электроэнергетика Урала, где выработка электроэнергии с 1940 по 1945 г. увеличилась в 2,5 раза.

В ходе войны электроэнергетике был нанесен громадный ущерб: взорваны, сожжены или частично разрушены 61 крупная электростанция и большое число мелких общей мощностью 5 млн кВт, т. е. почти половина установленных к тому времени мощностей. Разрушено 10 тыс. км магистральных линий электропередачи высокого напряжения, большое количество подстанций.

Восстановление разрушенного энергетического хозяйства началось уже с конца 1941 г. В 1942 г. восстановительные работы велись в центральных районах европейской части СССР, а к 1945 г. эти работы распространились на всю освобожденную территорию страны.

В 1946 г. суммарная мощность электростанций СССР достигла довоенного уровня: в 1947 г. страна по производству электроэнергии вышла на первое место в Европе и на второе в мире.

В 1954 г. в г. Обнинске была введена в эксплуатацию первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт.

Суммарная мощность электростанций в 1955 г. достигла 37,2 млн кВт, выработка электроэнергии составила 170,2 млрд кВт·ч.

Переход к следующему, качественно новому этапу развития электроэнергетики был связан с вводом в эксплуатацию мощных Волжских ГЭС и дальних линий электропередачи 400–500 кВ. В 1956 г. была введена в работу первая электропередача 400 кВ Куйбышев (ныне Самара) – Москва.

Электропередача 400 кВ Куйбышев–Москва объединила энергосистемы Средней Волги, линия Куйбышев–Урал – с энергосистемами Предуралья и Урала. Этим было положено начало объединению энергосистем различных регионов и созданию ЕЭС европейской части СССР.

В течение 60-х годов завершилось формирование ЕЭС европейской части СССР, и в 1970 г. начался следующий этап развития электроэнергетики страны – формирование ЕЭС СССР. В составе ОЭС Центра Урала, Средней Волги, Северо-запада, Юга, Северного Кавказа и Закавказья, включавшие 63 энергосистемы, три территориальные ОЭС – Казахстана, Сибири и Средней Азии – работали отдельно; ОЭС Дальнего востока находилась в стадии формирования.

В 1972 г. в состав ЕЭС СССР вошла ОЭС Казахстана. В 1973 г. энергосистема Болгарии присоединена на параллельную работу с ЕЭС СССР по межгосударственной связи 400 кВ Молдавская ГРЭС–Вулканешты–Добруджа.

В 1978 г. с завершением строительства транзитной связи 500кВ Сибирь–Казахстан–Урал присоединилась на параллельную работу ОЭС Сибири. В том же году было закончено строительство межгосударственной связи 750 кВ Западная Украина–Альбертирша (Венгрия) и с 1979 г. началась параллельная работа ЕЭС СССР и ОЭС стран-членов Совета экономической взаимопомощи (СЭВ).

От сетей ЕЭС СССР осуществлялся экспорт электроэнергии в МНР, Финляндию, Турцию и Афганистан; через преобразовательную подстанцию постоянного тока в районе Выборга ЕЭС СССР соединилась с энергообъединением Скандинавских стран NORDEL.

Динамика структуры генерирующих мощностей в 70-х и 80-х гг. характеризуется нарастающим вводом мощностей на АЭС в западной части страны и дальнейшим вводом мощностей на высокоэффективных ГЭС в основном в восточной части страны, началом работ по первому этапу создания Экибастузского энергетического комплекса, общим ростом концентрации генерирующих мощностей и увеличением единичной мощности агрегатов. Мощность наиболее крупных электростанций России в настоящее время составляет: ТЭС – 4800 МВт (Сургутская ГРЭС-2), АЭС – 4000 МВт (Балаковская, Ленинградская, Курская), ГЭС – 6400 МВт (Саяно-Шушенская).

Технический прогресс в развитии системообразующих сетей характеризовался последовательным переходом к более высоким ступеням напряжения. Освоение напряжения 750 кВ началось с ввода в эксплуатацию в 1967 г. опытно-промышленной электропередачи 750 кВ Конаковская ГРЭС–Москва. В течение 1971–1975 гг. в ОЭС Юга была сооружена широтная магистраль 750 кВ Донбасс–Днепр–Винница–Западная Украина. В 1975 г. была сооружена межсистемная связь 750 кВ Ленинград–Конаково, позволившая передать в ОЭС Центра избыточную мощность ОЭС Северо-запада. Для создания мощных связей с восточной частью ЕЭС сооружалась магистральная линия электропередачи 1150 кВ Сибирь–Казахстан–Урал. Было начато также строительство электропередачи постоянного тока напряжением 1500 кВ Экибастуз–Центр.

В табл. 2.2 приведены данные по установленной мощности электростанций и протяженности электрических сетей 220–1150 кВ ЕЭС СССР за период 1960–1991 гг.

В послевоенные годы электрификация стала основой научно-технического прогресса страны. На ее базе происходило непрерывное совершенствование технологий в промышленности, транспорте, связи, сельском хозяйстве и строительстве, осуществлялась механизация и автоматизация производственных процессов. Рост производства электроэнергии в эти годы опережал рост произведенного национального дохода в 1,6 раза.

Таблица 2.2

*Рост установленной мощности электростанций и протяженности электрических сетей 220–1150 кВ ЕЭС СССР*

| Показатель                                     | Годы |       |       |       |       |       |        |
|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|  | 1960 | 1965  | 1970  | 1975  | 1980  | 1985  | 1991   |
| Установленная мощность электростанций, млн кВт | 29,1 | 53,9  | 104,9 | 153,1 | 223,4 | 265,3 | 288,2  |
| Высшее напряжение, кВ*                         | 500  | 500   | 750   | 750   | 750   | 750   | 1150   |
| Протяженность электрических сетей, тыс. км:    |      |       |       |       |       |       |        |
| 220кВ  | 9,68 | 17,27 | 30,11 | 44,55 | 72,63 | 90,29 | 196,52 |
| 330кВ  | 0,66 | 4,58  | 12,86 | 18,79 | 23,63 | 27,66 | 31,93  |
| 500кВ  | 4,40 | 5,90  | 9,77  | 14,67 | 23,75 | 30,85 | 43,93  |
| 750кВ  | –    | –     | 0,09  | 1,68  | 2,86  | 4,35  | 7,11   |
| 1150кВ   | –    | –     | –     | –     | –     | 0,89  | 1,9    |

Управление электроэнергетикой страны до 1991 г. происходило в условиях монополии государственной собственности на все предприятия отрасли. Все электростанции и ЛЭП принадлежали государству и строились за счет средств государственного бюджета, который складывался из налогов на доходы населения и прибыли предприятий. Строительство объектов электроэнергетики осуществлялось по критерию минимальных народнохозяйственных затрат. Такой подход к развитию отрасли при полном государственном регулировании не допускал лишних производительных затрат. Новые электростанции размещались там, где производство электроэнергии было экономически выгодно с точки зрения всего народного хозяйства. Выбор места размещения новых электростанций и их мощность определялись наличием топливно-энергетических ресурсов в районе и экономической целесообразностью их использования [6].

Каждая крупная электростанция строилась так, чтобы обеспечивать электроэнергией территорию, охватывающую несколько смежных областей или республик. Для таких электростанций использовался термин «государственная районная электрическая станция» – ГРЭС, т. е. электростанция, построенная на государственные средства, принадлежащая государству и обеспечивающая электроэнергией большой район радиусом до 500–600 км и более. Как правило, эти крупные ГРЭС конденсационного типа или АЭС рассчитаны на производство большого количества электроэнергии.

Тепловая электроэнергия производилась на ГРЭС в небольшом количестве для собственных нужд электростанции и для близлежащих населенных пунктов. Такие электростанции явились основными производителями электроэнергии в составе ЕЭС СССР.

Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), вырабатывающие электрическую и тепловую энергию по комбинированному циклу, размещались в местах сосредоточения больших тепловых нагрузок, например крупных промышленных предприятий или городских районов. В каждом крупном городе была построена одна или несколько ТЭЦ. Они обеспечивали население и промышленность, в первую очередь, тепловой энергией, а попутно и дешевой электроэнергией, вырабатываемой на тепловой нагрузке.

Эффективность работы электроэнергетики обеспечивалась централизованным управлением режимами работы электростанций и электрических сетей, планированием и контролем их технико-экономических показателей. Директивная система позволяла легко реализовать перераспределение экономического эффекта от деятельности различных предприятий электроэнергетики, исходя из интересов народного хозяйства страны, а экономические противоречия между производителями и потребителями разрешались самим же государством. Непротиворечивость интересов развития и функционирования отдельных предприятий электроэнергетики в этот период обеспечивалась единой нормативно-правовой основой, которая формировалась центральными органами государственного управления (Госпланом СССР и Минэнерго СССР).

Централизованное распределение капитальных вложений на развитие и функционирование объектов электроэнергетики не было непосредственно связано с результатами хозяйственной деятельности отдельных предприятий, а непроизводительные расходы убыточных предприятий покрывались перераспределением доходов внутри самой отрасли за счет прибыльных предприятий. Такой порядок не требовал от предприятий совершенствования методов хозяйствования. Директивное управление было направлено в основном на выполнение плановых технико-экономических показателей и ограничивало инициативу предприятий по улучшению своей деятельности, поскольку экономический эффект от успешной деятельности мог быть просто перераспределен в пользу другого, убыточного предприятия.

### **2.3. Сведения из истории высшего энергетического и электротехнического образования в России**

Развитие высшего технического образования началось примерно с последней трети XVIII в.

Энергетическое хозяйство того времени базировалось исключительно на применении водяного колеса и паровой машины и могло обходиться услугами инженеров-механиков и техников-механиков. Уровень хозяйства того времени не вызывал необходимости в подготовке инженеров-энергетиков.

Начиная с 30-х гг. XIX в. электротехника стала получать практическое применение, и примерно тогда же началась подготовка специалистов в этой области. В 1840 г. при лейб-гвардии саперном батальоне был организован офицерский класс для изучения магнетизма и гальванизма, в 1856 г. было создано техническое гальваническое заведение, а Главное инженерное училище военного ведомства стало готовить инженеров по электротехнике.

После реформы 1861 г. в России начался подъем промышленности: строительство фабрик и заводов, железных дорог. Появилась потребность в инженерах, и начали открываться новые учебные заведения. В 1862 г. открылся Рижский политехнический институт, в 1885 г. – Харьковский технологический институт, в 1888 г. Московское ремесленное училище было преобразовано в Высшее императорское техническое училище. Постепенно стали создаваться специализированные высшие технические заведения. Так, в Петербурге открылся электротехнический институт. В старейшем политехническом институте – Петербургском технологическом институте – в 1884 г. появилась электротехническая специальность.

Первым высшим электротехническим учебным заведением в России было Телеграфное училище Министерства внутренних дел, основанное в 1886 г. Оно было рассчитано на трехлетний курс обучения. Телеграфное училище затем было преобразовано в Электротехнический институт с четырехлетним курсом обучения. В связи с прогрессом электротехники и накоплением опыта преподавания в институте стали создавать различные ответвления специальностей. При электротехническом отделении были созданы подотделы общей и промышленной электротехники, телеграфов, телефонов и электрохимии.

В 1898 г. в Московском высшем техническом училище профессор Угримов приступил к чтению лекций по электротехнике, и тогда же началось оборудование специальных электротехнических лабораторий. Раздел электричества в курсе физики, который читал профессор Щегляев, был значительно расширен в 1905 г. и стал представлять собой введение в электротехнику. Вскоре за этим началось преподавание специальных электротехнических дисциплин. Появилась группа преподавателей, которые под руководством К.А. Круга возглавили московскую школу электротехников. Таким образом, 1905 г. считается годом основания Московской электротехнической школы и зарождения Московского энергетического института, столетие которое будет отмечаться в 2005 г.

Исключительно важное значение для постановки электротехнического образования в России имели два высших учебных заведения: Петербургский политехнический институт и Московское высшее техническое училище, или, как оно теперь называется, Московский Государственный технический университет (МГТУ). В этих вузах создались две школы электротехников, сохранившиеся и до наших дней.

## 2.4. Становление энергетического образования Сибири

Представляется символичным и неслучайным то, что и хронологически (1895–96 гг.) и географически первенец сибирской энергетики – Городская электрическая станция – тесно связан с первым за Уралом высшим техническим учебным заведением – Томским технологическим институтом, в котором одним из приоритетных направлений подготовки специалистов впоследствии стала энергетика. Наличие в городе первой в Сибири электростанции, безусловно, повлияло на ускорение решения о начале подготовки специалистов энергетического профиля, а в дальнейшем и на практическую направленность этой подготовки [14].

Потребность в специалистах остро ощущалась не только в зарождающейся энергетике. Это было для Сибири повсеместной проблемой – отсутствие инженеров разных специальностей, способных наладить продуктивную работу производства и заботиться о его развитии. Так, на Сибирской железной дороге из более чем ста тысяч служащих только 1,5 % имели высшее специальное образование и 4,5 % – среднее. Остальные были либо самоучки, либо неграмотны.

Быстрое развитие экономики Сибири поставило вопрос об организации в этом крае технического вуза для подготовки инженеров разного профиля, в том числе энергетиков и электротехников. В представлении министерства в Государственный совет по вопросу учреждения технологического института было подчеркнуто, что крайне необходимо открыть в этом учебном заведении специальность по подготовке инженеров-энергетиков: «Электротехника в настоящее время развивается так быстро, что обещает в весьма недалеком будущем охватить почти все без исключения области заводской и промышленной деятельности. Не касаясь всем известного и быстро распространяющегося применения электричества в освещении городов и частных домов, заводов и фабрик, железнодорожных мастерских и вокзалов, достаточно указать на успешное применение электрической трансмиссии не только для передачи силы на большое расстояние, но и в пределах одного завода для электрической передачи движения от центрального двигателя к различным машинам и станкам или группам станков, на электрические заведения железных дорог для отвоза и вывоза материалов, продуктов и отбросов производства и для удобных внутренних сообщений между отдельными цехами или мастерскими завода, на электрические подъемные механизмы или краны для подъема или передвижения грузов, на электрическую пайку или сварку металлов, наконец, на многочисленные металлургические и химико-технологические применения электричества. Введение в настоящее время в Иркутском техническом училище специального преподавания электротехники было вызвано

многочисленными потребностями края. Не подлежит сомнению, что спрос на электротехников как среднего, так и высшего технического образования, довольно значительный в настоящее время, должен непрерывно и быстро возрастать по мере приближения к окончанию строительства Великого Сибирского железнодорожного пути и ожидаемого, связанного с ним, быстрого развития производственных сил страны. Своевременное удовлетворение этой потребности страны должно составить предмет неотложных забот Министерства народного просвещения».

В заключение министр народного просвещения предлагал открыть при механическом отделении Томского технологического института электротехнический подотдел. Представление министра Государственный совет счел весьма обоснованным. Принятое в марте 1896 г. решение Государственного совета об учреждении Томского технологического института 11 мая 1896 г. было утверждено царем и получило силу закона.

Так, в 1896 г. Томску суждено было стать колыбелью не только практической энергетики, но и высшего энергетического образования в Сибири. Открытие Томского технологического института, состоявшееся в 1900 г., положило начало подготовке инженеров-энергетиков в Сибири.

Первые практические действия по организации энергетического образования в Томском технологическом институте следует относить к 1899 г., когда к своим обязанностям приступил назначенный первым директором ТТИ профессор Е.Л. Зубашев. Принимая во внимание большую потребность в инженерах-энергетиках, Е.Л. Зубашев использовал все зависевшие от него меры, чтобы ускорить подбор преподавателей для электротехнической специальности, создать и оборудовать соответствующие лаборатории. Дело, однако, осложнилось тем, что никто из крупных специалистов-энергетиков не согласился ехать в Томск на преподавательскую работу. Спрос на электротехников был огромный и в столичных городах. К тому же Сибирь пользовалась дурной славой края каторги и ссылки. Помимо этого в Сибири не было условий для успешного занятия научными исследованиями в области электротехники. Поэтому многие ведущие ученые, которых профессор Зубашев приглашал в ТТИ на кафедру электротехники, ответили отказом. Тогда Е.Л. Зубашев решил готовить преподавателей по этой специальности из числа молодых талантливых инженеров-электриков, не имевших ни ученых степеней, ни званий, но стремившихся к педагогической деятельности и научной работе в этой области.

Поскольку учебный план Томского технологического института на первых двух курсах всех отделений предусматривал изучение только общеобразовательных дисциплин, а чтение специальных предметов – с третьего курса, то принятые на работу в 1900 г. преподаватели-электротехники имели возможность повысить свою квалификацию.

Первым преподавателем по этому курсу был назначен 7 июня 1900 г. А.А. Потebня, которому суждено было стать основателем сибирской школы электротехников. Закончив с отличием физико-математический факультет Харьковского университета, он поступил лаборантом в Харьковский технологический институт, где увлекся электричеством. Экстерном сдал экзамены за курс технологического института и получил диплом инженера. К 1900 г. он был уже эрудированным специалистом в области электротехники, имел опыт работы во втузе.

Вскоре после назначения в ТТИ на должность экстраординарного профессора А.А. Потebня был направлен в длительную командировку в лучшие вузы России и зарубежных стран. Он посетил электротехнический институт в Петербурге, старейший электротехнический вуз России – МВТУ, затем ряд институтов и университетов в Англии, Франции и Германии. Уделяя большое внимание вопросам обучения студентов, прохождения ими практики, А.А. Потebня одновременно посещал предприятия, заказывал оборудование для кафедры и лабораторий ТТИ. В Томск пошли вагоны с оборудованием для кафедры электротехники, лабораторий паровых машин, гидравлики и др., прибыли динамо-машины разных конструкций, разные приборы, измерительная техника и т. д. Последующие годы лаборатории пополнялись, и это дало возможность обеспечить подготовку будущих инженеров на самом высоком уровне.

Педагогическую деятельность профессор А.А. Потebня совмещал с большой научной работой в области электротехники, результатом чего явился ряд крупнейших публикаций, обеспечивших ему широкую известность и авторитет среди ученых страны. Работал А.А. Потebня и как консультант в области энергетики на ряде предприятий Сибири и Урала.

На должность преподавателей по кафедре электротехники А.А. Потebня пригласил ряд молодых талантливых инженеров, подававших большие надежды как в педагогической, так и в научной деятельности. Среди приглашенных на кафедру был А.А. Левченко. Так же, как и сам А.А. Потebня, А.А. Левченко окончил Харьковский университет, а затем Харьковский технологический институт. Талантливый ученый и большой практик, он был одним из первых преподавателей электротехники в Сибири, который оставил о себе добрую память.

Большим авторитетом среди студентов-электротехников пользовался выпускник МВТУ Г.Б. Густавович, начавший свою педагогическую и научную деятельность в ТТИ в 1903 г.

Видная роль в первом поколении профессоров технологического института, обеспечивавших преподавание дисциплин энергетического профиля, принадлежала Н.И. Карташову, который возглавлял железнодорожную специальность, одну из трех на механическом отделении (наряду с фабрично-заводской и электротехнической).

Н.И. Карташов был первым лектором по дисциплине «Паровые котлы» на механическом отделении.

Впоследствии он заведовал кафедрой прикладной механики, был деканом механического факультета, а в 1911–1916 гг. – директором ТТИ.

Начало века в Сибири характеризовалось быстрым развитием каменно-угольной промышленности, промышленности строительных материалов, перевооружением отрасли по добыче золота. Стало ясно, что электротехнический подотдел ТТИ не сможет обеспечить потребности Сибири в инженерах-энергетиках, поскольку спрос на них рос значительно быстрее темпов подготовки. Кроме того, приходилось учитывать, что в отличие от предприятий европейской части России, где большинство из них были крупными и состоятельными в финансовом отношении, сибирские предприятия в большинстве своем были мелкими или средними, финансово слабыми и поэтому не могли содержать в своем штате нескольких инженеров, поскольку труд инженера в те годы оплачивался очень высоко. Поэтому каждый сибирский инженер, независимо от основной специальности, обязан был знать основы энергетики, так как на энергетике держалось все остальное производство. В этой связи совет института решил, что каждый студент, независимо от избранной специальности, при обучении в институте должен изучать двигатели: паровые, электрические, внутреннего сгорания, водяные. Большое внимание при этом уделялось практической подготовке будущих специалистов, поэтому значительная роль отводилась учебным лабораториям и производственной практике.

Одной из первых в институте была создана лаборатория по электротехнике. Лаборатория имела 2 агрегата по 3,5 и 12 кВт, один агрегат большой частоты, 6 электродвигателей разных типов, четыре трансформатора и множество разных приборов.

Лаборатория гидравлических машин имела турбины различных типов и мощностей, центробежные насосы и другие установки и оборудование. Здесь же размещались лаборатории паровых котлов и паровых машин, прекрасно оборудованные по тому времени и имевшие у себя все необходимое для подготовки высококвалифицированных инженеров.

Пристроенная в 1905 г. к инженерному корпусу электростанция, дававшая свет и энергию корпусам, лабораториям и мастерским института, использовалась также и для учебных целей.

Для того чтобы познакомить будущих энергетиков с новейшими достижениями науки и техники институт организовывал экскурсии студентов в лучшие, наиболее оснащенные современной техникой предприятия России. Высокое качество преподавания, хорошая практическая подготовка, привлечение студентов к научной работе на кафедре и в кружках дали по-

ложительный результат. Томский технологический институт начал выпускать высокообразованных инженеров, которые не уступали выпускникам старейших российских вузов. К тому же они лучше знали особенности работы в Сибири (крепкие морозы, резкие перепады температур), нравы и обычаи людей, с которыми им предстояло работать.

Первый выпуск сибирских инженеров-энергетиков состоялся осенью 1906 г. Кроме механического отделения (факультета), готовившего для Сибири инженеров по электротехнической и теплотехнической специальностям, на ряде кафедр других факультетов также занимались вопросами развития энергетики. Так, химики в конце 20-х годов начали работы в области получения электрической энергии из угля, минуя традиционные стадии его сжигания в топках (топливные элементы).

Впечатляющей была работа доктора физики профессора Б.П. Вейнберга по созданию электрического поезда на магнитной подушке. Ученик Д.И. Менделеева по Петербургскому университету Б.П. Вейнберг – один из крупнейших физиков России начала века – много занимался и вопросами энергетики. Он полагал, что жизнь, структура и деятельность человеческого общества зависят, в первую очередь, от той энергии, которая лежит в основе его жизнеобеспечения, а основой будущей энергетики он считал не ядерную энергию, а солнечную, в силу неиссякаемости и экологической безопасности последней. В Томске Б.П. Вейнберг начал свои работы в области использования солнечной энергии и продолжил их в Ленинграде после переезда туда в 1924 г.

Начав заниматься гелиотехникой в Томске, он продолжал работы в этой области и после переезда в Ленинград в 1924 г.

За первую четверть века своей деятельности (1900–1925 гг.) Томский технологический институт подготовил 151 инженера по электротехнической и паросиловой специальностям. Если учесть, что до открытия ТТИ Сибирь почти не имела инженеров в этой области, то этот передовой отряд был равноценен по тем временам целой армии высококлассных специалистов.

В дальнейшем выпуск инженеров-энергетиков возрастал одновременно с увеличением номенклатуры специальностей и стал особенно большим после создания специализированного энергетического факультета, а впоследствии на его базе – теплоэнергетического и электроэнергетического, а также ряда факультетов смежного профиля: электромеханического, физико-технического.

Инженеры-энергетики – выпускники Томского политехнического университета – своим отличным трудом и большим вкладом в развитие науки создали крепкий фундамент для успешного развития энергетики Сибири. Последующие поколения выпускников ТТИ продолжили тра-

диции первых сибирских энергетиков. Академия наук на своем выездном заседании в Сибири в 1932 г. отмечала, что преобладающее число инженеров, в том числе и энергетиков, работающих на предприятиях Урала, Сибири и Дальнего Востока, являются выпускниками ТТИ и своим трудом приносят ему славу. Еще в начале XX века молодой общетехнический вуз Сибири убедительно оправдал возлагавшуюся на него при создании роль флагмана в деле подготовки сибирских инженеров-энергетиков и в развитии энергетической науки и техники

## ГЛАВА 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ЗЕМЛИ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

### 3.1. Запасы энергетических ресурсов

Из большого разнообразия энергоресурсов, встречающихся в природе и упомянутых в главе 1, выделяют *основные*, используемые в больших количествах для практических нужд.

Доля различных видов энергетических ресурсов в общемировой выработке первичной энергии на конец XX столетия показана на рис. 3.1, а мировые запасы энергетических ресурсов на тот же период представлены в табл. 3.1.

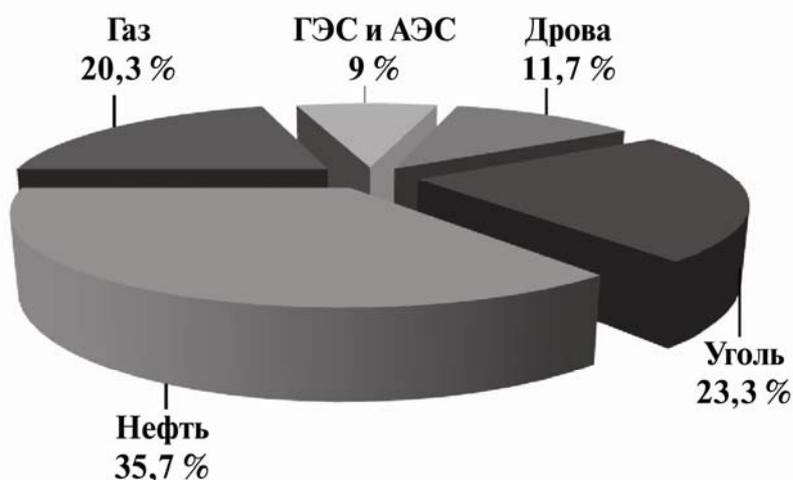


Рис. 3.1. Доля различных видов энергетических ресурсов в общемировой выработке первичной энергии (1998) в % [3]

Получение энергии необходимого вида и снабжение этой энергией потребителей происходит в процессе *энергетического производства*, в котором можно выделить пять стадий.

1. Получение и концентрация энергетических ресурсов: добыча и обогащение топлива, концентрация напора с помощью гидротехнических сооружений и т. д.
2. Передача энергетических ресурсов к установкам.
3. Преобразование первичной энергии во вторичную, имеющую наиболее удобную в данных условиях для распределения и потребления форму, обычно в электрическую энергию и тепло.
4. Передача и распределение преобразованной энергии.

5. Потребление энергии, осуществляемое как в той форме, в которой она доставлена потребителю, так и в еще раз преобразованной.

Таблица 3.1

*Мировые запасы энергетических ресурсов, млрд т условного топлива [3]*

| Источники энергии  | Энергетические ресурсы |             |
|--|------------------------|-------------|
|  | Теоретические          | Технические |
| I. Невозобновляемые  |                        |             |
| Энергия горючих ископаемых                                   |                        |             |
| уголь  | 17900                  | 637         |
| нефть  | 1290                   | 179         |
| газ  | 398                    | 89,6        |
| торф   | 500                    | 100         |
| 2. Атомная энергия   | 67200                  | 1340        |
| II. Возобновляемые   |                        |             |
| Энергия Солнца:  |                        |             |
| на верхней границе атмосферы                                 | 197000                 |             |
| на поверхности Земли   | 81700                  | 6140        |
| на поверхности суши  | 28400                  | 2460        |
| на поверхности Мирового океана                               | 53300                  | 3690        |
| 2. Энергия ветра   | 21300                  | 22          |
| 3. Глубинное тепло Земли (до 10 км):                         |                        |             |
| геотермальный тепловой поток, достигающий поверхности Земли, | 3,69                   | 0,35        |
| гидротермальные ресурсы,                                     | 1350                   | 147         |
| метрогеотермальные ресурсы                                   | 36900                  | 3070        |
| 4. Энергия Мирового океана:                                  |                        |             |
| градиента солености  | 43000                  | 430         |
| тепловая (температурная градиента)                           | 12,3                   | 0,61        |
| течений  | 8,6                    | 0,12        |
| приливов   | 3,2                    | 0,86        |
| прибоя   | 1                      | 0,02        |
| морских ветровых волн  | 2,7                    | 0,1         |
| 5. Горючие энергоресурсы (биомасса):                         |                        |             |
| на суше  | 44,2                   | 4,9         |
| в Мировом океане   | 23,3                   | 1,84        |
| органические отходы  | 2,5                    | 1,23        |
| 6. Гидроэнергия крупных водотоков                            | 4,1                    | 1,84        |

Схема использования энергии показана на рис. 3.2.

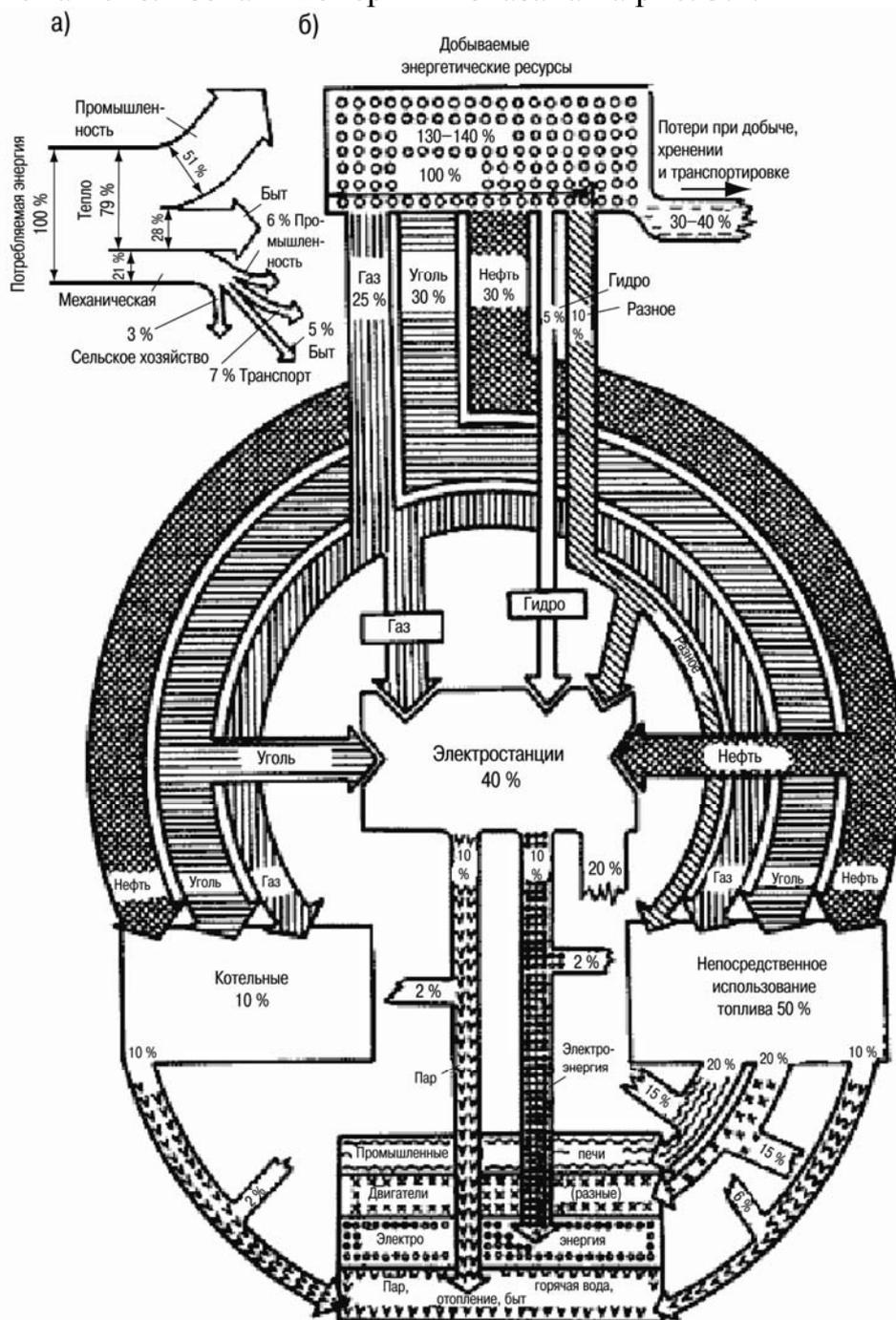


Рис. 3.2. Использование энергии: а – распределение механической энергии и тепла, доставленных потребителям, б – общее распределение энергетических ресурсов

Примерная (средняя) структура потребления энергетических ресурсов в мире приведена на рис. 3.2, б. При этом надо учесть, что если общую энергию используемых первичных энергоресурсов принять за 100 %, то полезно используемая энергия составляет на сегодня только 35–40 %. Остальная часть теряется, причем большая часть в виде тепла.

Возможности уменьшения потерь энергии ограничиваются техническими характеристиками энергетических машин, существующими в настоящее время. Для выработки электроэнергии кроме основных энергоресурсов используются механическая энергия ветра («голубой уголь»), энергия приливов и отливов («синий уголь»), тепловая энергия земных недр (геотермальная энергия), лучистая энергия Солнца («желтый уголь») (см. ниже).

Различные виды энергоресурсов неравномерно распределены по районам Земли, по странам, а также внутри стран. Места их наибольшего сосредоточения обычно не совпадают с местами потребления, что наиболее заметно для нефти. Больше половины всех мировых запасов нефти сосредоточено в районах Среднего и Ближнего Востока, а потребление энергоресурсов в этих районах в четыре с лишним раз ниже среднемирового.

Концентрация потребления энергоресурсов в наиболее развитых странах привела к такому положению, когда 30 % всего населения в мире потребляет 90 % всей вырабатываемой энергии, а 70 % населения – только 10 %. Тенденция к увеличению неравномерности общего потребления энергии на душу населения сохраняется на протяжении многих десятилетий. Целесообразность передачи на расстояние тех или иных носителей энергии определяется их *энергоемкостью*, под которой понимается количество энергии, приходящееся на единицу массы физического тела (см. табл. 3.2).

Таблица 3.2

*Характеристика энергетических ресурсов, [4]*

| Энергоресурсы, вид, сорт  | Теплотворная способность   | Разведанные запасы     | Годовая добыча, производство                       | Товарная цена, руб/т у. т.           |
|---|--|------------------------|--|--------------------------------------|
| Газ:<br>природный,<br>сжиженный,<br>попутный нефтяной,<br>попутный угольный | 8400 ккал/1000м <sup>3</sup><br>7600 ккал/1000м <sup>3</sup><br>8000 ккал/1000м <sup>3</sup><br>6700 ккал/1000м <sup>3</sup> | 50 трлн м <sup>3</sup> | 570 млрд м   | 310<br>300–350<br>600–900            |
| Нефть:<br>сырая,<br>мазут,<br>дизтопливо                                    | 9600 ккал/кг<br>10000 ккал/кг<br>11000 ккал/кг   |                        | 306 млн т<br>60 млн т                              | 1300<br>2000<br>4000                 |
| Уголь:<br>бурый,<br>каменный,<br>антрацит                                   | 3400 ккал/кг<br>5600 ккал/кг<br>6000 ккал/кг   | 200 млрд т             | 200 млрд т<br>120 млрд т<br>60 млрд т<br>20 млрд т | 260<br>200–300<br>300–400<br>500–550 |

Окончание табл. 3.2

| Энергоресурсы, вид, сорт   | Теплотворная способность               | Разведанные запасы     | Годовая добыча, производство                           | Товарная цена, руб/т у. т.         |
|--|--|------------------------|--|------------------------------------|
| Прочие:<br>дрова,<br>торф,<br>древесные отходы   | 4000 ккал/кг                           | 80 млрд м <sup>3</sup> | 5,2 млн т  | 300–500                            |
|  | 2900 ккал/кг                           | 200 млрд т             | 0,6 млн т  | 200–400                            |
|  | 2000 ккал/кг                           | 16 млрд м <sup>3</sup> | 0,3 млн т  | 150–250                            |
| Электроэнергия:<br>КЭС,<br>ТЭЦ,<br>ГЭС,<br>АЭС,<br>ДЭС,<br>нетрадиционные  | 320 г у.т./кВт·ч                       |                        | 850 млрд кВт·ч   | 1780 руб/т у. т.                   |
|  |  |                        | 1228 млрд кВт·ч  | 1700–2000                          |
|  |  |                        | 242 млрд кВт·ч   | 1000–1500                          |
|  |  |                        | 391 млрд кВт·ч   | 80–120                             |
|  |  |                        | 24 млрд кВт  | 1300–1500                          |
|  |  |                        | 13 млрд кВт·ч  | 4000–5000                          |
| Тепловая энергия из централизованных источников:<br>электростанции,<br>котельные,<br>утилизационные установки,<br>прочие | 7000 ккал/кг у.т.                      |                        | 1520 тыс Гкал  | 204                                |
|  |  |                        | 596,4 тыс Гкал   | 200–250                            |
|  |  |                        | 526,4 тыс Гкал   | 300–400                            |
|  |  |                        | 60,2 тыс Гкал  | 150–200                            |
|  |  |                        | 319,2 тыс Гкал   | 400–600                            |
|  |  |                        |  |                                    |
| Энергосбережение организационные, технологические, инвестиционные  | По величине вытесняемого энергоресурса | 400 млн т              | 50–60 млн т<br>6–8 млн т<br>10–18 млн т<br>25–35 млн т | По цене вытесняемого энергоресурса |

Среди энергоносителей, применяемых в настоящее время, наибольшей энергоемкостью обладают радиоактивные изотопы урана и тория. Их энергоемкость достигает 2,22 ГВт·ч/кг ( $8 \cdot 10^{12}$  Дж/кг). Вследствие огромной энергоемкости атомного топлива практически не существует проблемы транспорта его на расстояние, так как для работы мощных энергетических установок требуются сравнительно малые его количества. Энергоемкость применяемого сейчас топлива в среднем по всем видам составляет 0,834 кВт·ч/кг ( $3 \cdot 10^6$  Дж/кг).

Органическое тепло в силу его специфических свойств и исторически сложившихся условий пока остается основным источником используемой человечеством энергии.

Запасы всех видов топлива, которое может быть извлечено из недр Земли, ограничены и оцениваются по данным Мировой энергетической конференции (МИРЭК) в 28,3 млн ТВт·ч, или в 3480 млрд т у. т.

Как известно, за единицу условного топлива принимают такое топливо, при сгорании 1 кг которого выделяется 29,3 МДж (8,12 кВт·ч) те-

пла. Эта условная единица используется для сопоставления различных видов топлива.

**Уголь.** Общие геологические запасы угля в мире оцениваются в 61–114 млн ТВт·ч (7500–14000 млрд т у. т.), из которых 24,4 млн ТВт·ч (3000 млрд т у. т.) относятся к достоверным запасам. Наибольшими достоверными запасами располагают Россия и Соединенные Штаты. Значительные достоверные запасы имеются в ФРГ, КНР и ряде других стран. Современная техника и технология позволяют экономически оправданно добывать лишь 50 % от всех достоверных запасов угля.

**Нефть.** Оценка мировых запасов нефти в настоящее время представляет особый интерес. Это вызвано быстрым ростом ее потребления и тем, что во многих странах (Япония, Швеция и др.) нефть при производстве электроэнергии вытеснила уголь, хотя в последнее время этот процесс приостановился.

Мировые геологические запасы нефти оцениваются в 200 млрд т, из которых 53 млрд т составляют достоверные запасы. Более половины всех достоверных запасов нефти расположено в странах Среднего и Ближнего Востока. В странах Западной Европы, где имеются высокопроизводительные силы, сосредоточены относительно небольшие запасы нефти. В табл. 3.3, составленной по данным международного журнала «Oil and Journal», приведены мировые разведанные запасы нефти и газа на конец XX столетия.

Таблица 3.3

*Мировые разведанные запасы нефти и газа*

| Страна, регион   | Запасы нефти, млрд т. | Запасы газа, трлн м <sup>3</sup> |
|--|-----------------------|----------------------------------|
| Россия   | 6,653                 | 48,0                             |
| США  | 2,888                 | 4,6                              |
| Канада   | 0,675                 | 1,8                              |
| Мексика  | 3,4                   | 08                               |
| Западная Европа  | 2,5                   | 4,3                              |
| Африка   | 7,0                   | 7,3                              |
| Страны Ближнего и Среднего Востока                       | 56,0                  | 42,0                             |
| Азиатско-Тихоокеанский регион                            | 5,9                   | 9,5                              |
| Восточная Европа и страны, входившие в СССР (без России) | 1,3                   | 6,0                              |
| Южная и Центральная Америка                              | 12                    | 6,3                              |
| Всего  | 139,183               | 144,0                            |

Оценки достоверных запасов нефти по своей природе динамичны. Их величина изменяется по мере проведения разведок новых месторождений. Геологические разведки, осуществляемые в широких масштабах, приводят, как правило, к увеличению достоверных запасов нефти. Все имеющиеся в литературе оценки запасов являются условными и характеризуют только порядок величин. По мнению российских ученых, запасы нефти в России существенно выше, приведенных в литературных источниках.

Исключительно быстрый рост потребления нефти определяется в основном четырьмя причинами:

- 1) развитием транспорта всех видов и в первую очередь автомобильного и авиационного, для которых жидкое топливо пока незаменимо;
- 2) лучшими показателями добычи, транспортировки и использования (по сравнению с твердым топливом);
- 3) стремлением в кратчайшие сроки и с минимальными затратами перейти к использованию природных энергетических ресурсов;
- 4) стремлением получить возможно большие прибыли за счет эксплуатации нефтяных месторождений.

Несоответствие между размещением нефтяных ресурсов и местами их потребления или центрами производительных сил привело к бурному прогрессу в развитии средств транспортировки нефти, в частности, к созданию трубопроводов большого диаметра (больше 1 м) и танкеров большой тоннажности.

**Природный газ.** Мировые геологические запасы оцениваются в 140–160 трлн м<sup>3</sup>, из которых около 50 трлн. м<sup>3</sup> приходится на долю России и 42 трлн м<sup>3</sup> – на долю стран Ближнего и Среднего Востока. Распределение запасов газа по странам и регионам приведено в табл. 3.3. Эти цифры, как и в случае нефти, следует рассматривать как весьма приближенные, изменяющиеся по мере проведения разведок.

**Гидроэнергетические ресурсы.** В отличие от невозобновляемой химической энергии, запасенной в органическом топливе, кинетическая энергия движущейся в реках воды возобновляема. На гидростанциях она превращается в электрическую энергию. Гидроэнергетические ресурсы на Земле оцениваются величиной в 32900 ТВт·ч в год, из которых только около 25 % по техническим и экономическим условиям оказываются пригодными для использования. Эта величина примерно в 2 раза превышает современный уровень ежегодной выработки электроэнергии всеми электростанциями мира, т. е. определенные запасы гидроэнергии еще имеются. В табл. 3.5 содержатся данные о гидроэнергоресурсах в различных странах.

Таблица 3.4

*Гидроэнергетические ресурсы отдельных стран*

| Государства         | Мощность, ГВт   |   | Государства | Мощность, ГВт   |   |
|---------------------|---|---|-------------|---|---|
|                     | При среднегодовых расходах воды (обеспеченность 50 %) | При минимальных расходах воды (обеспеченность 95 %) |             | При среднегодовых расходах воды (обеспеченность 50 %) | При минимальных расходах воды (обеспеченность 95 %) |
| Россия и страны СНГ | 249,4   | 79,5  | Франция     | 5,8   | 3,4   |
| США                 | 53,9  | 25,0  | Италия      | 5,2   | 2,8   |
| Канада              | 25,1  | 15,85   | Швейцария   | 3,8   | 2,4   |
| Япония              | 13,2  | 5,6   | Испания     | 5,0   | 2,9   |
| Норвегия            | 20,0  | 12,0  | Германия    | 3,7   | 1,5   |
| Швеция              | 8,9   | 2,9   | Англия      | 1,2   | 0,6   |

**Ядерная энергия.** Тепловое содержание геологических запасов урана в мире оценивается величиной, превышающей в 320 раз тепловое содержание всех мировых запасов минерального топлива. Однако общегеологическая оценка имеет практическое значение, так как добыча урана решающим образом зависит от концентрации его запасов. По данным Международного агентства по атомной энергии общее количество урана, которое может быть добыто при сравнительно низких затратах (ниже 22 долл. за 1 кг) составляет 1500 тыс. т. При затратах, превышающих в 2–3 раза существующие сейчас, можно будет добыть приблизительно в 10 раз больше урана. Полагают, что при полном использовании энергии ядерного топлива энергетические ресурсы мира увеличатся примерно в два раза.

Однако при очевидных достоинствах развития атомной энергетики необходимо иметь в виду три серьезных ее недостатка:

- а) малая доля «выгорающего» топлива;
- б) малая, но, как показала история, конечной величины вероятность аварии;
- в) проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Поскольку цепная реакция в современных атомных установках осуществляется в урановых стержнях или смеси графита и урана, но не во всей массе, а только в изотопе  $^{235}\text{U}$ , содержащемся в количестве

0,7 % в основном элементе  $^{238}\text{U}$ , то уже в самом начале «атомной эры» возникла проблема поисков путей более экономного использования урана. Уже в 1949–1950 гг. наметилась в перспективе возможность создания реакторов-размножителей на быстрых нейтронах. В настоящее время в СССР, США, Англии и Франции разработаны новые типы реакторов на быстрых нейтронах, позволяющие использовать значительно большую (примерно в 20 раз) часть делящегося материала, чем в обычных котлах, работающих на тепловых нейтронах. Таких реакторов-размножителей мощностью в 250–350 МВт во всем мире имеется три. Один из них работает с 1972 г. на полуострове Мангышлак (Казахстан).

Авария на Чернобыльской АЭС, случившаяся 26 апреля 1986 г., унесла жизни десятков и здоровье десятков тысяч людей. Она похоронила миф об абсолютной противоаварийной устойчивости (безопасности) АЭС. Реакция простых людей была практически однозначной – страх перед этим источником электричества и тепла. Специалисты сделали единственно правильный вывод – дорабатывать конструкцию реактора и всех систем его функционирования, обеспечивающую реальную, а не мифическую безопасность его работы. Мощное антиядерное движение во многих странах вынудило правительства некоторых из них практически полностью отказаться от развития атомной энергетики (например, Германия) и даже закрывать действующие АЭС. Напротив, другие страны, как например, Франция, продолжают развивать атомную энергетику, доведя долю электроэнергии, выработанной на АЭС до чрезвычайно высоких значений. Наибольшую долю атомной энергетики в суммарном энергопроизводстве имеют Литва – 91,5 %, Франция – 78,2 %, Бельгия – 60,1 %, Украина – 46,8 %, Швеция – 46,2 %, Болгария – 45,4 %, Словакия – 44 %, Швейцария – 40,6 %, Словения и Венгрия – 40 %. АЭС обеспечивают примерно 17 % общемирового производства электроэнергии [4].

По данным МАГАТЭ, в конце 1997 г. во всем мире работало 437 энергетических реакторов – на пять меньше, чем в конце 1996 г. Однако в результате вывода из эксплуатации старых и небольших АЭС и ввода в строй новых и больших реакторных блоков суммарная мощность повысилась.

Существенную проблему для атомной энергетики в последние годы стала представлять защита атомных объектов от террористических актов (в особенности после терактов в США 11.09.2001 г. и в России в октябре 2002 г.)

Захоронение и переработка радиоактивных отходов атомных объектов (АЭС, атомных надводных и подводных кораблей и др.) также представляют собой серьезные проблемы. «Зеленые» приводят убедительные доводы в подтверждение угрозы биосфере, исходящие от таких отходов. Физики-атомщики приводят противоположные доводы и одно-

временно работают над совершенствованием систем переработки и захоронения радиоактивных отходов.

Современные концепции безопасности АЭС основаны на трех принципах: управления, глубокоэшелонированной защиты и инженерно-технических средств безопасности. Ведущими энергетическими корпорациями и фирмами индустриальных стран разрабатывается более 20 проектов АЭС нового поколения, радикально отличающихся не только по мощности и типу реактора, но и по технологическим, схемным и конструктивным решениям.

По срокам коммерческой реализации и степени самозащищенности АЭС условно делят на три поколения. Проекты АЭС нового поколения основаны на использовании освоенных и проверенных в эксплуатации технологий и конструкций. Они имеют активные и пассивные системы безопасности, что позволяет снизить вероятность тяжелых аварий и уменьшить на 20 % капиталовложения и себестоимость электроэнергии.

Научная и инженерная мысль сейчас усиленно работает также над созданием еще одного ядерного источника энергии. Речь идет об осуществлении *термоядерного контролируемого синтеза*, который может стать для будущих поколений практически неисчерпаемым источником электроэнергии и тепла (подробнее см. в гл. 5).

Значительны запасы еще одного источника энергии – *торфа*. Ориентировочно они составляют 225–261 млрд т из расчета 25 % влажности. Вследствие малой теплотворной способности торф пока не нашел применения в большой энергетике.

Другие возобновляемые и невозобновляемые энергетические ресурсы и способы их преобразования в электроэнергетическую энергию будут рассмотрены в гл. 4.

Следует иметь в виду, что первичные энергоресурсы, имеющиеся в природе, используются человеком для получения энергии только после преобразований к виду, удобному для практического применения. Как уже отмечалось в гл. 1, примерно 30–40 % от добытых и предназначенных к полезному использованию ресурсов теряется при добычи, транспортировке и хранении. Распределение топливных ресурсов потребителям – для выработки электроэнергии, получения горячей воды и пара в котельных установках, непосредственного использования в промышленности и на транспорте – происходит по довольно сложной схеме с возможной взаимозаменяемостью. Это распределение также сопровождается потерями энергии.

## 3.2. Тенденции энергопотребления и производства электрической и тепловой энергии

### 3.2.1. Тенденции потребления энергии человечеством

Потребление энергоресурсов быстро растет, что вызывается непрерывным увеличением мирового промышленного производства. По данным Международного института прикладного системного анализа (МИРЭС), потребление первичной энергии к 2030 г. по миру в целом составит приблизительно 24 млрд т у. т. в год, т. е. возрастет вдвое по сравнению с уровнем 1988 г. Увеличение потребления первичной энергии составляет примерно 1,5–2 % в год. Оставшихся мировых запасов невозобновляемых энергоресурсов без учета возможностей ядерной и термоядерной энергетики, видимо, хватит еще на 100–250 лет. Эти данные, конечно, ориентировочны, однако все же они дают некоторую картину будущего. В табл. 3.5 приведены данные о мировом потреблении важнейших энергоносителей в 1990 г. и прогноз на 2020 г., а на рис. 3.2 – один из вариантов экспертной оценки топливного баланса.

Таблица 3.5

*Сводка данных по максимальному и минимальному вариантам прогноза мировой энергетики, опубликованному МИРЭС в 1993 г., [3]*

| Общие данные   | Фактические данные за 1990 г. | Прогноз на 2020 г.   |                                     |
|--|-------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
|  |                               | Максимальный вариант | Минимальный (экологический) вариант |
| Численность населения, млн чел   | 5292                          | 8092                 | 8092                                |
| Экономический рост:<br>валовой внутренний продукт, трлн долл. США;<br>валовой внутренний продукт на одного жителя, долл. США | 21,0<br>3972                  | 64,7<br>8001         | 55,7<br>6884                        |
| Потребности в первичных энергетических ресурсах:<br>суммарные, млн т у. т.,<br>удельные, т у. т./чел                         | 12593<br>2374                 | 24610<br>3060        | 16120<br>1988                       |
| Потребности в электроэнергии, млрд кВт·ч   | 11608                         | 23000*               | 23000*                              |
| Энергоемкость экономики, кг у. т./долл.  | 0,55                          | 0,41*                | 0,41*                               |

Окончание табл. 3.5

| Общие данные  | Фактические данные за 1990 г. | Прогноз на 2020 г.   |                                     |
|---|-------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
|   |                               | Максимальный вариант | Минимальный (экологический) вариант |
| Структура мирового энергетического баланса, % к итогу:                    |                               |                      |                                     |
| уголь;  | 26,3                          | 28,2                 | 18,9                                |
| нефть;  | 31,0                          | 26,7                 | 25,7                                |
| природный газ;  | 19,5                          | 21,2                 | 22,1                                |
| атомная энергия;  | 5,0                           | 5,7                  | 6,1                                 |
| гидроэнергия;   | 5,3                           | 5,8                  | 5,9                                 |
| возобновляемые источники энергии  | 12,9                          | 12,4                 | 21,3                                |
| Потребности в первичных энергетических ресурсах по регионам, млн т у. т.: |                               |                      |                                     |
| Северная Америка;   | 3095                          | 3494                 | 2615                                |
| Латинская Америка;  | 825                           | 3190                 | 1869                                |
| Западная Европа;  | 2091                          | 2594                 | 1886                                |
| Центральная и Восточная Европа;   | 418                           | 515                  | 379                                 |
| Содружество Независимых Государств;                                       | 2069                          | 2394                 | 1830                                |
| Ближний Восток и Северная Африка;   | 453                           | 1853                 | 1131                                |
| Африка южнее пустыни Сахары;  | 380                           | 1829                 | 869                                 |
| Тихоокеанский регион**;   | 2635(1358)                    | 6989 (3328)          | 4273 (2528)                         |
| Южная Азия  | 637                           | 2648                 | 1287                                |
| Выбросы в атмосферу:  |                               |                      |                                     |
| сера, млн т,  | 64,6                          | 98,1                 | 42,8                                |
| азот, млн т,  | 24,0                          | 37,9                 | 20,9                                |
| углерод, млн т  | 5,9                           | 11,5                 | 6,3                                 |

\* по среднему варианту.

\*\* включая страны Азии с плановой экономикой (данные по этой группе стран приведены в скобках).

В условиях бурного развития энергетической промышленности и многих других отраслей техники, когда особое значение приобретают вопросы загрязнения биосферы, повышенное внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, таким как энергия приливов, геотермическая энергия и особенно солнечная энергия (см. гл. 4). Интересно проследить

эволюцию потребления различных видов энергии, начиная с доисторических времен (рис. 3.3, б). Мускульная энергия человека и животных, иногда называемая «биологической» энергией, некогда была единственным источником энергии. В наши дни она составляет от общего потребления энергии величину, меньшую 1 % (на рис. 3.3, б не показана). Доля мускульной энергии в дальнейшем еще уменьшится. Это говорит о том, что высокий уровень развития производительных сил позволил человеку почти полностью переложить на машины усилия по изготовлению необходимой продукции. Для того чтобы машины могли выполнить такую работу, человек на основе познанных им и практически используемых законов природы должен был привести в действие огромные мощности, приложив их к средствам труда. Эти мощности современных орудий труда стали неизменно превышать ту максимальную мощность, которая могла быть получена за счет биологических источников.

Первыми источниками тепла были различные органические остатки и древесина. Древесина на протяжении длительного периода, вплоть до XVI в., была основным энергоносителем. Впоследствии, по мере относительно быстрого освоения других, более энергоемких источников энергии (угля, нефти), сокращается потребление древесины, использование которой в качестве энергоносителя вскоре может почти полностью прекратиться.

Среди всех видов доступных энергоресурсов наибольшая доля приходится на уголь – 75–85 %; значительны запасы нефти (10–15 %) и газа (5–10 %); все остальные энергоресурсы в совокупности составляют меньше 2 %. Среди используемых видов топлива уголь занимал наибольшую долю (порядка 70 %) от всех используемых энергоресурсов в начале XX в. По мере увеличения потребления нефти, газа и электроэнергии доля угля уменьшалась, хотя общее количество добываемого угля существенно возрастало.

Одна из попыток заглянуть в будущее мировой энергетики и понять с какими противоречиями столкнется ее развитие описана в [5]. Разработанная автором модель энергетики мира позволяет прогнозировать потребности по шести различным энергоресурсам, по шести видам вторичных энергоносителей для шести секторов экономики. Отправной точкой анализа служил базовый сценарий, разработанный исходя из соображений «традиционной мудрости». Затем определялись возможности ускоренного вовлечения в мировой энергетический баланс последовательно нефти, угля, газа, ядерной энергии, возобновляемых источников энергии и оценивалась их способность ослабить остроту противоречий развития мирового энергетического хозяйства. К шести модификациям базового сценария была добавлена еще одна – сценарий с уско-

ренным энергосбережением. В табл. 3.6 показан мировой энергетический баланс на 1990 г., а в табл. 3.7 – прогнозируемый мировой энергетический баланс на 2020 г., рассчитанный на основе базового.

Таблица 3.6

*Мировой энергетический баланс. Базовый сценарий 1990 (млн т у. т.)*

| Сектор экономики                      | Энергетические ресурсы |                           |       |      |                             |         |                |       |       |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|-------|------|-----------------------------|---------|----------------|-------|-------|
|                                       | уголь                  | прочие твердые<br>топлива | нефть | газ  | возобновляемые<br>источники | ядерная | электроэнергия | тепло | Всего |
| Потребление<br>первичной энергии      | 3080                   | 889                       | 2811  | 2289 | 748                         | 665     |                |       | 12049 |
| Выработка<br>электроэнергии           | 1546                   | 55                        | 433   | 616  | 748                         | 665     | 1410           | 345   | 2308  |
| Энергетический<br>сектор              | 146                    | 15                        | 287   | 300  | 0                           | 0       | 250            | 38    | 1034  |
| Потребление<br>подведенной<br>энергии | 1389                   | 959                       | 3531  | 1373 | 0                           | 0       | 1157           | 298   | 8707  |
| Промышленность                        | 912                    | 174                       | 673   | 678  | 0                           | 0       | 589            | 210   | 3236  |
| Транспорт                             | 35                     | 7                         | 1835  | 3    | 0                           | 0       | 25             | 3     | 1908  |
| Коммунально-<br>бытовой сектор        | 435                    | 773                       | 527   | 569  | 0                           | 0       | 543            | 85    | 2933  |
| Неэнергетические<br>нужды             | 7                      | 4                         | 496   | 123  | 0                           | 0       | 0              | 0     | 630   |

Эволюция расходной части мирового энергетического баланса определяется действием двух зачастую противоположных тенденций: а) постепенного приближения структуры производства энергоресурсов к структуре имеющихся запасов; б) повышения качества потребляемых энергоресурсов и энергоносителей.

Первая тенденция определяет сдвиг в мировом энергобалансе в сторону угля. Вторая – в сторону нефти, газа, ядерного топлива.

Увеличение мирового потребления первичных энергоресурсов будет проходить при снижении удельного веса трех основных видов органического топлива, но их преобладание в структуре мирового энергобаланса сохранится до середины XXI в., а возможно и далее.

Разумное сочетание различных энергоресурсов и плавное развитие энергетики, несомненно, позволили бы избежать тех трудностей, приобретающих иногда катастрофический характер, которые возникли в 1973–1975 гг. в ряде стран. Эти трудности, получившие название *энер-*

гетического кризиса, были вызваны многолетним хищническим использованием международными монополиями сырьевых ресурсов стран и континентов.

Таблица 3.7

Мировой энергетический баланс. Базовый сценарий развития до 2020 г.  
(млн т у. т.)

| Сектор экономики                | Энергетические ресурсы |                           |       |      |                             |         |                |       | Всего |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|-------|------|-----------------------------|---------|----------------|-------|-------|
|                                 | уголь                  | прочие твердые<br>топлива | нефть | газ  | возобновляемые<br>источники | ядерная | электроэнергия | тепло |       |
| Потребление первичной энергии   | 4951                   | 1344                      | 4054  | 3823 | 1461                        | 1376    |                |       | 18763 |
| Выработка электроэнергии        | 3079                   | 117                       | 406   | 1102 | 1461                        | 1376    | 2728           | 713   | 4099  |
| Энергетический сектор           | 140                    | 17                        | 328   | 403  | 0                           | 0       | 429            | 73    | 1390  |
| Потребление подведенной энергии | 1732                   | 1478                      | 4788  | 2318 | 0                           | 0       | 2300           | 657   | 13274 |
| Промышленность                  | 1175                   | 327                       | 557   | 1103 | 0                           | 0       | 1223           | 401   | 4787  |
| Транспорт                       | 50                     | 13                        | 2888  | 41   | 0                           | 0       | 85             | 4     | 3082  |
| Коммунально-бытовой сектор      | 501                    | 1128                      | 618   | 979  | 0                           | 0       | 992            | 251   | 4469  |
| Неэнергетические нужды          | 7                      | 9                         | 724   | 195  | 0                           | 0       | 0              | 0     | 935   |

Так, международный нефтяной картель, состоящий из семи монополий (пять из которых американские), практически полностью контролировал добычу нефти в странах Арабского Востока и прочно захватил доминирующие позиции на рынках государств – потребителей нефти. Этот картель в целях извлечения максимальных прибылей тормозил работы по использованию других видов энергии. В странах Западной Европы сокращалась добыча каменного угля, закрывались шахты, часто неоправданно придерживалось развитие атомной энергетики.

Монополии, картели не останавливались ни перед какими средствами, чтобы сохранить свои позиции. В ряде стран, например, они давали огромные взятки, чтобы провалить законы о национализации энергетики (США) или дискредитировать и затормозить программу строительства атомных станций (Италия) и т. д.

Ориентация энергетики на нефть, дававшую монополиям огромные прибыли, требует в перспективе значительного увеличения ее добычи. В то же время, начиная с 1973 г., страны – производители нефти стали требовать

все большую долю прибылей: они повысили на нее закупочные цены и заявили о намерении держать прирост добычи нефти в определенных пределах, поставив тем самым развитие стран перед необходимостью пересмотра их энергетической политики. Все соображения и данные о мировых запасах энергоресурсов следует рассматривать как приближенные, так как пока все еще недостаточно изучены земные недра (обследована небольшая часть залежей на суше и практически не изучены ресурсы топлива под дном Мирового океана), имеется неудовлетворительного качества статистический материал о залегании энергоресурсов, в различных странах существуют разные методики учета запасов и, кроме того, используются различные подходы к оценке запасов. В одних случаях исходят из общегеологических запасов, в других – из достоверных, подтвержденных геологической разведкой, в третьих – из запасов, которые могут быть извлечены исходя из экономических, географических, технологических и прочих условий. Например, по данным Мировой энергетической конференции, общегеологические запасы топлива планеты оценивались примерно а 200 млн ТВт·ч, а далее было показано, что с помощью современных технологических методов может быть добыто при оправданных экономических затратах более 28 000 млн ТВт·ч, что в 380 000 раз превышает современный уровень годовой добычи в мире всех видов топлива. Характерно то обстоятельство, что несмотря на быстрое расходование энергоресурсов, их потенциальные запасы по мере проведения разведки не уменьшаются, а увеличиваются.

### **3.2.2. Пути развития мировой электроэнергетики**

Значения запасов энергоресурсов и показателей их добычи определяются эффективностью их полезного потребления. Усовершенствования технических установок, позволяющие более полно (т. е. с большим КПД) использовать первичные энергоресурсы, означают, что для получения одного и того же количества энергии требуется все меньшее количество первичных ресурсов. Если к оценке использования первичных ресурсов подойти с позиций учета их энергии по существу, то придется констатировать, что преобразование их в электроэнергию на станциях различных типов (табл. 3.9) происходит с крайне низким коэффициентом полезного действия (КПД). При этом наибольший КПД соответствует атомным станциям, а наименьший – гидроэлектростанциям. Значения расхода энергоносителей и КПД, приведенные в табл. 3.8 определены для электростанций одинаковой мощности (1 ГВт), вырабатывающих за сутки 24 ГВт·ч ( $86,4 \cdot 10^{12}$ ).

Расчет КПД по существу может производиться следующим образом. Через турбины ГЭС мощностью 1 ГВт для получения энергии  $120 \cdot 10^{12}$  Дж необходимо пропустить  $700 \cdot 10^6$  т воды. Эта масса воды обладает внутренней энергией  $630 \cdot 10^{26}$  Дж. Следовательно, КПД по веще-

ству  $\eta = (120 \cdot 10^{12} / 630 \cdot 10^{26}) \cdot 100 \% = 0,19 \cdot 10^{-12}$ . Аналогично находится КПД для ТЭС и АЭС. КПД по использованию топлива у этих станций составляет 25–40 и 15–30 %, соответственно.

Таблица 3.8

| Потребное количество энергоносителей для выработки 33,4 ГВт·ч ( $120 \cdot 10^{12}$ Дж) электроэнергии | Тип станции (мощность каждой станции 1 ГВт) | КПД по веществу, вовлеченному в энергетический процесс, % |
|--|---|---|
| Вода – $700 \cdot 10^6$ т  | ГЭС   | $0,19 \cdot 10^{-12}$                                     |
| Уголь – 6400 т<br>Нефть – $4600 \text{ м}^3$<br>Газ – $536000 \text{ м}^3$                             | ТЭС   | $0,2 \cdot 10^{-5}$                                       |
| Уран – 1,5–2 кг  | АЭС   | $10^{-2}$   |

Вопрос об увеличении КПД процессов получения энергии является очень острым. В целом это увеличение непрерывно происходит. Так, производство электроэнергии в мире за 10 лет (1955–1965 гг.) выросло в 1,97 раза, за 15 лет (1950–1965 гг.) в 3,5 раза. За этот период производство первичных энергоресурсов возросло только в 2 раза. Это произошло вследствие повышения КПД энергетических установок и увеличения доли расходования первичных ресурсов для выработки электроэнергии (подробнее см. в гл. 4).

Масштабы выработки электроэнергии в мире увеличиваются с 11,5 трлн кВт·ч в 1990 г. до 19,4–24,4 млрд кВт·ч в 2020 г. или в 1,7–2,1 раза. Опережающий рост выработки электроэнергии по отношению к потреблению первичных энергоресурсов сохраняется во всех вариантах на протяжении всего периода. Сохраняется тенденция роста потребления электроэнергии на душу населения. Этот показатель увеличивается с 2,17 тыс. кВт·ч/человек в 1990 г. до 2,4–3,03 тыс. кВт·ч/человек в 2020 г. Однако, наряду с этим формируется новая тенденция – снижение электроемкости глобального ВВП (на 8–27 % к 2020 г. по сравнению с уровнем 1990 г.).

Отличительной чертой будущей мировой электроэнергетики явится нарастающая централизация распределения энергии и диверсификация источников ее производства. Характерным будет сочетание крупных концентрированных и относительно малых энергоисточников, работающих на единую сеть: применение разнообразных комбинированных схем производства электроэнергии и тепла, совмещение энергетических и производственных технологий с полным использованием отходов и вторичных ресурсов, формирование интегрированных энергопроизводственных систем.

Особое значение приобретает наметившаяся в последнее десятилетие тенденция – создание крупных государственных и межгосударственных энергообъединений. Накоплен положительный опыт создания и функционирования крупных энергообъединений в Западной Европе, Северной Америке, на территории бывшего СССР и стран Восточной Европы.

В формировании единого электроэнергетического пространства Евроазиатского континента особую роль играет Россия, обладающая большими топливно-энергетическими ресурсами и крупнейшими в мире централизованно управляемым энергообъединением РАО «ЕЭС России».

До разделения СССР на независимые государства на Европейском континенте было три крупных энергообъединения: энергообъединение 12-и стран Западной Европы (Бельгии, ФРГ, Испании, Франции, Греции, Италии, Югославии, Люксембурга, Нидерландов, Австрии, Швейцарии, Португалии) UCPTЕ; энергообъединение четырех стран Северной Европы (Норвегии, Дании, Финляндии, Швеции) Nordel System и энергообъединение «Мир» (стран – бывших членов Совета Экономической Взаимопомощи). Асинхронно с UCPTЕ через кабель постоянного тока работает энергосистема Великобритании.

Установленная мощность электростанций, входящих в UCPTЕ, составляет более 390 млн кВт, в Nordel System – 85 млн кВт, в энергообъединение «Мир» – более 400 млн кВт. Энергообъединение «Мир» было связано с UCPTЕ тремя вставками постоянного тока суммарной мощностью 1750 МВт и с Nordel System – вставкой постоянного тока мощностью 1100 МВт. Электрические связи между энергосистемами стран Восточной Европы и ЕЭС бывшего СССР включали три воздушные линии электропередачи (ВЛ) напряжением 750 кВ, четыре ВЛ напряжением 400 кВ и четыре ВЛ напряжением 220 кВ, по которым осуществлялись значительные поставки электроэнергии из СССР в страны Восточной Европы. В отдельные годы они составляли около 40 млрд кВт·ч.

В настоящее время в энергообъединениях UCPTЕ и Nordel System интеграционные процессы усиливаются. В течение 1994 г. была введена в коммерческую эксплуатацию кабельная линия электропередачи постоянного тока между Швейцарией и Германией длиной около 250 км, мощностью 600 МВт. Рассматриваются два проекта межсистемных связей между Норвегией и континентальной Европой. Одна из них соединит Норвегию и Германию, другая – Норвегию и Голландию. Выполнено технико-экономическое обоснование межсистемной линии электропередачи постоянного тока между Швецией и Польшей. В дальнейшем рассматривается возможность присоединения энергосистем Латвии, Литвы и Эстонии к Nordel System и UCPTЕ.

В 1994 г. объем обменов электроэнергией, включая третьи страны, в UCPTE составил 155,9 млрд кВт·ч, или 10 % производимой электроэнергии в странах UCPTE, а Nordel System – 39,3 млрд кВт·ч или 11,2 %.

Иная картина оказалась в энергообъединении «Мир», где после разделения СССР на независимые государства начались дезинтеграционные процессы, а взаимовыгодные обмены электроэнергией внутри энергообъединения стали сокращаться. В 1994 г. объем экспорта электроэнергии из стран СНГ в страны Восточной Европы составил всего 1,7 млрд кВт·ч и уменьшился более чем в 20 раз по сравнению с концом 80-х гг.

В октябре 1995 г. к UCPTE присоединилось энергообъединение CENTREL, включающее энергосистемы Венгрии, Чехии, Словакии и Польши и энергосистему восточной части Германии. При этом установленная мощность расширенного энергообъединения UCPTE стала составлять более 470 млн кВт. Имеются планы присоединения к UCPTE энергосистемы Болгарии и Румынии. В конце сентября–начале октября 1995 г. энергосистема Болгарии отключилась от ОЭС Украины и переключилась на синхронную работу с энергосистемами Румынии, Греции, Албании, бывшей СФРЮ. Этот эксперимент рассматривается как этап по подключению энергосистем стран южной части Европы к UCPTE. Следующий кандидат на подключение к UCPTE – Турция. Рассматривается развитие связей энергосистемы Турции с энергосистемами стран, входящих в экономическую зону Mashreq (от Сирии до Египта). После ввода в эксплуатацию в 1996 г. подводного кабеля переменного тока между Испанией и Марокко к UCPTE присоединятся энергосистемы Марокко, Алжира, Туниса и Ливии (страны зоны Maghreb). Проводятся исследования по развитию связей между энергосистемами стран Mashreq и Maghreb. Таким образом, стоит вопрос о создании большого энергообъединения стран бассейна Средиземного моря, которое будет работать параллельно с UCPTE. Намечается проведение исследований по оценке возможностей совместной работы энергосистемы Турции с энергосистемами Закавказских республик: Армении, Грузии и Азербайджана.

Вместе с тем продолжает функционировать ЕЭС России, которая работает синхронно с энергосистемами стран Балтии, Беларуси, Украины, Молдовы и Казахстана. Сохранили возможность параллельной работы ЕЭС России энергосистемы Азербайджана, Армении и Грузии.

В этих условиях центральной проблемой сотрудничества стран на Европейском континенте в области электроэнергетики стало использование уже существующих 11 ВЛ между странами СНГ и Восточной Европы, в строительстве которых были вложены значительные средства, предполагаются различные варианты дальнейшего развития этих связей. Одним из вариантов предусматривается перенос вставок постоянного тока на границы стран СНГ и стран Восточной Европы.

Выбор наилучшего пути развития сотрудничества на Евразийском континенте должен быть направлен на создание общего рынка электроэнергии и мощности как основы единого энергетического пространства. На решение этой задачи направлен ряд международных проектов.

*Балтийское электроэнергетическое кольцо.* Этот проект имеет целью создание мощной электрической сети, связывающей энергосистемы 11 стран региона Балтийского моря: Дании, Швеции, Норвегии, Финляндии, России, Эстонии, Латвии, Литвы, Беларуси, Польши, Германии. По существу, частью этого проекта является другой проект энергомоста Восток–Запад, предусматривающий сооружение электропередачи постоянного тока мощностью 4000 МВт, связывающей энергосистемы России, Беларуси, Польши и Германии.

Предполагается, что Балтийское кольцо позволит улучшить эффективность работы энергосистем участвующих стран и будет в целом способствовать экономическому развитию стран региона Балтийского моря.

В Копенгагене в 1996 г. состоялось совещание 17 электроэнергетических компаний из 11 стран региона, посвященное проблеме создания Балтийского электроэнергетического кольца. В соответствии с договоренностью, достигнутой на этом совещании, РАО «ЕЭС России» подготовлены проекты меморандума о сотрудничестве в реализации международного проекта «Балтийское электроэнергетическое кольцо» и положения о Балтийском электроэнергетической ассамблее.

В основу указанных документов положены следующие принципы:

- направленность интеграции энергосистем 11 государств Балтийского региона на удовлетворение национальных интересов;
- принцип ненарушения существующих структур энергообъединения;
- выработка недискриминационной формы участия энергосистем региона в проведении исследований.

Меморандум о сотрудничестве уже парафирован руководителями ряда энергокомпаний. Координационный комитет консорциума, который будет проводить исследования по созданию Балтийского электроэнергетического кольца, взял на себя обязательства обратиться в электроэнергетические компании Балтийского региона с предложением подписать меморандум о сотрудничестве в реализации проекта.

Необходимо отметить, что к настоящему времени накоплен положительный опыт совместной работы ЕЭС России с энергообъединением Nordel System. Ведутся работы по увеличению мощности вставки постоянного тока с Финляндией до 1400, а в перспективе – до 2000 МВт. Рассматривается возможность создания новых связей Карельской и Кольской энергосистем со странами, входящими в Nordel System.

*Черноморское энергообъединение.* При активной поддержке большинства стран – участниц Черноморского экономического сообщества (ЧЭС), включая Украину, Румынию и Болгарию, начата проработка предложения РАО «ЕЭС России» по проблеме создания объединенной энергосистемы ЧЭС. Создание этой объединенной энергосистемы имеет целью объединение энергосистем региона в мощные электрические сети, часть из которых уже существует. Такое объединение могло бы позволить более оптимальным образом развивать электроэнергетику всего региона, рационально использовать энергоресурсы, повысить надежность электроснабжения потребителей, осуществлять взаимовыгодные обмены мощностью и электроэнергией и оказать в целом положительное влияние на экономику всех стран региона. Основу объединенной энергосистемы Черноморско-Каспийского региона должны составить электрические сети высших классов напряжения, созданные странами-членами Совета Экономической Взаимопомощи: на Юго-западе это сети напряжением 400 и 750 кВ, связывающие Россию, Украину, Молдову, Болгарию и Румынию; на Юго-востоке – сети напряжением 330 и 500 кВ, связывающие Россию, Грузию, Армению и Азербайджан, и ВЛ напряжением 220 кВ между странами Закавказья и Турцией. Первый вариант концепции создания Черноморского энергообъединения, разработанный при финансовой поддержке России, был обсужден на совещании экспертов рабочей группы в апреле 1996 г.

*Другие электроэнергетические проекты.* Рассматриваются варианты развития связей между объединенными энергосистемами Средней Азии и энергосистемами Ирана и Турции, прорабатываются вопросы развития связей между энергообъединениями России и Китая, Японии, Кореи, энергообъединениями России и США.

Электроэнергетика Китая развивается быстрыми темпами; производство электроэнергии увеличивается ежегодно на 7–9 %. Общее ежегодное производство электроэнергии в Китае превысило 900 млрд кВт·ч. Китайской стороной проявлен интерес к передаче электроэнергии из России. Потенциальные источники электроэнергии для экспорта могут находиться как в районах Сибири – Богучанская, Братская, Усть-Илимская ГЭС и Березовская ГРЭС – , так и в районах Дальнего Востока – АЭС в Хабаровском крае, ГЭС и ТЭС в Амурской области и в Якутии, приливная электростанция на юге Охотского моря. В качестве вариантов передачи электроэнергии могут рассматриваться ВЛ напряжением 500 кВ переменного тока со вставками постоянного тока, передача постоянного тока пропускной способностью 1,5–2 млн кВт. В ОЭС Востока в качестве передающих рассматривается Амурская, Хабаровская, Дальневосточная энергосистемы. Для экспорта электроэнергии рассматриваются ВЛ разного класса напряжения – до 500 кВ включительно.

Главные предпосылки для импорта электроэнергии Японией состоят в отсутствии собственных топливно-энергетических ресурсов и чрезвычайно высокой плотности населения. Потенциальные источники электроэнергии в России для экспорта в Японию: тепловые электростанции на Сахалине, сжигающие шельфовый газ или южносахалинский уголь; ГЭС и АЭС в объединенной энергосистеме Дальнего Востока; приливная электростанция на юге Охотского моря. Электропередачи для экспорта электроэнергии в Японию могут быть сооружены либо через о. Сахалин с пересечением двух проливов небольшой ширины и глубины (Татарский и Лаперуза), либо через территории Китая и Кореи с пересечением Корейского пролива шириной 200 км.

Транспорт электроэнергии в США с учетом большой дальности линий электропередачи пока прогнозируется в небольшом объеме и при условии, что основная часть затрат на сооружение перехода ВЛ через Берингов пролив и освоение труднодоступных подходов к нему будет отнесена на строительство трансконтинентальной железной дороги через Берингов пролив.

Реализация рассмотренных международных проектов, а также намечаемых вариантов усиления межсистемных связей позволит сформировать мощную протяженную цепь: Япония–Китай–Сибирь–Казахстан–Европейская часть России–Западная Европа и явится важным этапом в создании Единого энергообъединения на Евразийском континенте, суммарная мощность которого составит порядка 60 % мощности всех электростанций мира и в котором ЕЭС России в силу своего геополитического положения может стать центральным связующим звеном.

Необходимую пропускную способность межсистемных связей в этом энергообъединении можно приближенно оценить на основе рекомендаций, апробированных практикой создания ЕЭС бывшего СССР, согласно которым суммарная пропускная способность межсистемных связей в сечениях, делящих мощное энергообъединение на две части, должна составлять порядка 2–3 % максимума нагрузки меньшей из рассматриваемых частей энергообъединения. С учетом этого условия необходимые пропускные способности межсистемных связей в Евразийском энергообъединении на территории России и Казахстана составляют более 10 ГВт. Достижение таких пропускных способностей возможно лишь с использованием линий электропередачи сверхвысокого напряжения (1150 кВ переменного и 1500 постоянного тока).

### 3.3. Современное состояние энергетики России

В 1991–1992 гг. в связи с разрушением старой системы управления экономикой ситуация в стране резко ухудшилась. Из-за недостатка государственных средств были остановлены почти все крупные стройки энергетики. Государственная власть в стране провозгласила своей целью построение рыночных отношений в экономике. Были отпущены цены на уголь, нефть, продукты нефтепереработки, промышленное оборудование, работы, услуги и другие продукты производства, которые использовались в электроэнергетике для производства электроэнергии и тепла. Только цены на газ и электроэнергию остались под государственным контролем, но и они также значительно возросли. В результате произошедших изменений устанавливать цены на электроэнергию из единого органа управления стало невозможно. Возникла необходимость создания нового рыночного механизма управления ценообразованием, который учитывал бы особенности работы и интересы каждой электростанции и каждого предприятия электрических сетей как отдельных хозяйствующих субъектов. Такой механизм был создан на базе акционерных обществ энергетических предприятий, построения новой схемы управления отраслью, а также организации федерального (общероссийского) рынка электрической энергии (ФОРЭМ) и потребительских рынков электроэнергии на территории каждого субъекта РФ (республики, края, области).

В трудный период экономических преобразований в России электроэнергетика продолжает в основном устойчиво обеспечивать потребности народного хозяйства и населения в электроэнергии и тепле, а также поставляет значительное количество электроэнергии в страны ближнего и дальнего зарубежья. Установленная мощность электростанций России на начало 2000 г. составила 215 млн кВт.

Впервые в 1999 г. выработка электроэнергии на электростанциях России возросла до 845 млрд кВт·ч против 827,2 млрд кВт·ч в 1998 г. и 834 млрд кВт·ч в 1997 г. (табл. 3.10). Рост производства электроэнергии в 1999 г. составил 2,15 % по сравнению с 1998 г.

Таблица 3.9

#### *Производство электроэнергии в России*

| Год  | Производство электроэнергии, млрд кВт·ч |       |       |       |
|------|---|-------|-------|-------|
|      | Суммарное                               | ТЭС   | ГЭС   | АЭС   |
| 1997 | 834,0                                   | 567,1 | 158,4 | 108,5 |
| 1998 | 827,2                                   | 564,0 | 159,5 | 103,7 |
| 1999 | 845,0                                   | 563,0 | 161,8 | 120,2 |
| 2000 | 875,7                                   | 582,4 | 164,4 | 128,9 |

После длительного спада в производстве электроэнергии, начиная с 1999 г. наблюдается рост выработки на всех основных типах электростанций, табл. 3.9. В 2001 г. она достигла 890 млрд кВт·час. В переходный период напряженную ситуацию с электроснабжением ослабила устойчивая работа атомных электростанций. Тем не менее, начиная с сентября 1999 г., в ряде регионов страны вводились ограничения потребления электроэнергии в часы максимальных нагрузок и вынужденно снижалась частота электрического тока. Трудная ситуация складывалась с созданием запасов топлива на электростанциях. Так, по состоянию на начало 2002 г. запасы угля и мазута на электростанциях были самыми низкими за последнее десятилетие и составили только 75–80 % запасов на тот же период 1998 г.

Основным источником инвестиций сейчас по-прежнему остаются амортизационные отчисления. Инвестиции, привлекаемые из прибыли, составляют только 30 % от общего объема. По-прежнему низки объемы вводимых новых мощностей электростанций, которые в 1999 г. составили только 835 МВт.

В конце 2001 г. руководство РАО «Единая энергосистема России» провело переговоры с руководителями крупнейших энергетических корпораций США и Западной Европы, суть которых – приглашение западных инвесторов вкладывать капиталы в энергетику РФ. Их вниманию были предложены 11 проектов, подготовленных РАО «ЕЭС России».

Руководство страны, Минэнерго РФ, РАО «ЕЭС России» отчетливо осознают, что если сегодня принципиально не поменять подход к инвестициям, не ускорить введение новых мощностей, то к 2003–2005 гг. Россия станет энергодефицитной страной.

Каковы эти проекты? Например, строительство третьего энергоблока Березовской ГРЭС-1 в Красноярском крае, на что требуется 113,5 млн долл., реконструкция каскада Верхневолжских ГЭС – ценой в 31,2 млн долл. Привлекательным в РАО «ЕЭС России» считают и проект достройки Псковской ГРЭС, право собственности на которую оно делит с «Газпромом». Необходимое оборудование уже завезено на стройку. Необходимые вложения составляют 32,5 млн долл.

Сразу несколько проектов – это создание в России самой конкурентоспособной и экономичной парогазовой энергетики, которая может снять остроту нехватки топлива и его дороговизны. На Нижегородчине нужно превратить Дзержинскую ТЭЦ в парогазовую станцию, перестроив ее третий блок (37,6 млн долл.). Интересен проект для Ивановской ГРЭС – там планируют установить два отечественных парогазовых энергоблока, на что нужно 273,3 млн долл. Сейчас на этой ГРЭС проходят испытания турбины российского производства, которые позже будут использоваться для парогазового цикла. Проект стратегического значения – это строительство теп-

ловой ТЭЦ-2 в Калининграде, для которого потребуется 437 млн долл. капитальных вложений. Модернизация Краснодарской ТЭЦ с переводом ее на газ, на парогазовые агрегаты и новые турбины – это еще 166,8 млн долл., ввод второго блока на Северо-Западной ТЭЦ – это еще 230 млн долл., что энергию с этой станции можно легко поставлять за рубеж, должно повысить привлекательность проекта для инвесторов. По две парогазовые установки предлагается строить на Сургутской ГРЭС-1 (177,7 млн долл.) и Щекинской ГРЭС (275,8 млн долл.).

Одиннадцатый проект, который с полным правом можно снабдить приставкой «супер», – план создания энергомоста «Сахалин–Япония» стоимостью 9,6 млрд долл. Суть замысла в том, чтобы газ, который будет добываться на сахалинском шельфе крупными зарубежными инвесторами, не шел бы на экспорт в Японию, а превращался в электричество на огромной парогазовой станции здесь же на Сахалине (8 блоков по 500 МВт). И уже отсюда по подводному кабелю уходил бы на японский рынок, принося в экономику России денег в три раза больше, чем простой вывоз газа. Эти проекты носят пока сугубо заявочный характер.

В поисках путей выхода из острейшего инвестиционного кризиса законодательная и исполнительная власть России дала зеленый свет беспрецедентному эксперименту в масштабах системообразующей отрасли – в энергетике. Суть эксперимента можно выразить двумя словами – принудительная коммерциализация [64].

Девятого октября 2002 г. нижняя палата в первом чтении приняла пакет энергетических законодательств из шести законов: базового закона «Об электроэнергетике», поправок во вторую часть Гражданского кодекса, законов «О государственном регулировании тарифов», «Об энергосбережении», «О конкуренции» и «О естественных монополиях».

Ожесточенные споры вокруг реформы энергетики не утихают уже третий год. 11 июля 2001 года было подписано Постановление правительства № 526 «О реформировании электроэнергетики Российской Федерации» – так называемая концепция реструктуризации энергетической отрасли «по Чубайсу». И отрасль начала постепенно втягиваться в многолетнюю реформу. Хотя принятие пакета энергетических законов делает ее фактически необратимой и задает тон будущим правилам игры в реформированной отрасли, многие вопросы все еще ждут своего решения на втором чтении пакета законопроектов, которое намечено на весеннюю (2003) сессию Госдумы РФ.

Кроме проблем с инвестициями, сторонники реформы в энергетике называют еще три побудительных мотива:

- крайне низкая эффективность российской энергетики. Практически все российские энергетические установки построены по паротурбинному циклу. При производстве электроэнергии их коэффициент полезного дейст-

вия равен – 38–39 %, а при совместном производстве электроэнергии и тепла – 42–46 %. Современные же технологии получения электроэнергии, построенные на парогазовом цикле, позволяют увеличить КПД при производстве только электроэнергии до 53–55 %, а при производстве электроэнергии и тепла КПД можно довести до 65–75 %. В холдинге РАО ЕЭС работает более 600 тыс. человек, то есть больше, чем до перестройки; в пересчете же на МВт установленной мощности это превышает соответствующий удельный показатель в электроэнергетике развитых стран в пять–восемь раз;

- во многих энергосистемах нет современных систем коммерческого учета электроэнергии, что приводит к высоким коммерческим потерям;
- в отрасли крайне неэффективна система регулирования цен на электроэнергию, сам этот процесс чрезмерно зависит от решений региональных властей, а недостатки системы регулирования на федеральном уровне приводят к тарифному небалансу на ФОРЭМ. В результате тарифы устанавливаются из субъективных соображений. Система регулирования не стимулирует энергосбережение и тормозит структурную перестройку экономики. Промышленность в России, дотируемая за счет энергетики, тратит энергии на рубль продукции примерно в два с половиной раза больше, чем в США, и в пять–семь раз больше, чем в европейских странах. В рамках нынешней системы регулирования цен в случае снижения издержек действует принцип «инициатива наказуема», когда регулирующая комиссия наказывает «отличившихся», назначая более низкий тариф на следующий период регулирования.

В результате реформы энергетическая отрасль будет функционально разделена на *монопольный* и *конкурентный* сегменты. В первый войдут магистральные электрические сети и системный оператор (ныне это оперативно-диспетчерское управление – ОДУ). Во второй – электрические станции.

Будет создано десять федеральных генерирующих компаний (ФГК), шесть из них будут состоять из крупных тепловых электростанций (ГРЭС), а четыре – из гидроэлектростанций. В каждой компании будет четыре–восемь крупных электростанций. Предполагается, что эти компании станут инвестиционно устойчивыми и смогут эффективно конкурировать друг с другом на оптовом рынке.

Цену электроэнергии, производимой федеральными генерирующими компаниями, созданными на базе ГЭС, будет регулировать государство. Атомные электростанции будут реформированы путем образования одной генерирующей компании. Электростанции АО-энерго будут выделены из энергосистем и консолидированы в Территориальные генерирующие компании, которые, как и ФГК, будут участвовать в торговле на оптовом рынке.

Противников реформы по такой схеме настораживает зарубежный опыт функционирования энергетики в условиях «управляемого рынка» – на

смену ценообразования «от издержек» там пришли десятки куда более изощренных способов манипулирования квазирыночными тарифами, освоенных приватизированными генерирующими компаниями и оптовыми перекупщиками. Понятно, что умерить ценовые аппетиты последних будет куда сложнее, чем разбираться с тарифной политикой государственной энергомонополии и ее дочерних АО-энерго.

## ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

### 4.1. Необходимость поиска новых источников энергии

Среди многочисленных факторов, определяющих необходимость наращивания энергетических мощностей, несмотря на значительные успехи ряда высокоразвитых стран (Япония, страны Западной и Северной Европы, США) в повышении эффективности использования энергетических ресурсов, в качестве важнейших необходимо назвать следующие:

- рост населения Земли (1950 г. – 1,97 млрд, 2000 г. ~ 6,0 млрд);
- рост душевого потребления электроэнергии (развитие и совершенствование транспорта в связи с повышением мобильности населения и ростом грузопотоков, повышение комфортности быта, дальнейший рост городского населения, увеличение доли каттеджного жилья и др.);
- необходимость расширения освоенной части Земли (1/3 Земли не заселена из-за отсутствия влаги, в то время как 1/2 населения Земли «теснится» на 1/10 суши); для этого нужна дешевая энергия.

Стремительный рост всех показателей энергопотребления (см. табл. 4.1) и невозможность его искусственного ограничения в глобальных масштабах даже перед лицом возможной глобальной угрозы в виде «парникового эффекта» или истощения невозобновляемых энергоресурсов заставляют безотлагательно решать три проблемы:

- развивать энергетику на основе использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ);
- искать и осваивать новые способы получения электрической энергии;
- повышать эффективность использования энергоресурсов за счет внедрения энерго-ресурсосберегающего оборудования, технологий, поведения населения.

Термин «нетрадиционные возобновляемые источники энергии» (НВИЭ) используется для обозначения таких источников как солнечная, геотермальная, ветровая, приливная, энергия малых рек (мощность агрегата ГЭС от 0,1 до 10МВт), энергия биомассы, морских волн, природных температурных градиентов и др. Как уже отмечалось, все эти источники энергии являются недобавляющими.

Целесообразно ввести еще один термин – «нетрадиционные способы получения электроэнергии» (НСПЭ). К ним следует отнести управляемый термоядерный синтез (УТС), магнетогидродинамическое преобра-

зование энергии (МГД-генераторы), термоэлектрические, термоэмиссионные и электрохимические генераторы, радиоизотопные источники энергии. Все они являются добавляющими источниками энергии.

Таблица 4.1

*Некоторые показатели энергопотребления*

| Энергетические мощности и потребление энергии        | Год                  |      |       |       |
|--|----------------------|------|-------|-------|
|  | 1950                 | 1970 | 1980  | 2000  |
|  | Население, млрд чел. |      |       |       |
|  | 1,97                 | 2,87 | 3,6   | 6,0   |
| Общие энергетические мощности, млн кВт               | 223                  | 1070 | 2200  | 7200  |
| Энергетическая мощность в расчете на 1 человека, кВт | 0,1                  | 0,4  | 0,6   | 2     |
| Общее потребление электроэнергии, млрд кВт·ч/год     | 950                  | 4760 | 10000 | 33000 |
| Потребление электроэнергии на 1 человека, кВт·ч/год  | 500                  | 1700 | 2900  | 6200  |

Их «нетрадиционность» заключается не только в необычности для большой энергетики способов получения электроэнергии, но и в том, что процесс доведения лежащих в их основе идей до реализации находится на ранних стадиях или в том, что сферы их применения специфические (малозергоемкие).

Сейчас на каждого жителя Земли приходится 2 кВт электрической мощности (табл. 4.1), а признанная норма качества 10 кВт (в развитых странах). Если все население Земли рано или поздно должно иметь душевую норму электрической мощности 10 кВт, то с учетом теплового барьера численность населения не должна превышать 10 млрд чел. Таким образом, развитие энергетики на невозобновляемых ресурсах ставит жесткий предел численности населения планеты. Однако уже через 75 лет население Земли может достигнуть 20 млрд чел. Отсюда видно: уже сейчас надо думать о сокращении темпов прироста населения примерно вдвое, к чему цивилизация совсем не готова. Очевиден надвигающийся энергодемографический кризис. Это еще один веский аргумент в пользу развития нетрадиционной энергетики.

Многие специалисты энергетики считают, что единственный способ преодоления кризиса – это масштабное использование возобновляемых источников энергии: солнечной, ветровой, океанической и др.

Есть еще один аспект освоения НВИЭ, особенно важный для России и некоторых других стран, имеющих обширные регионы с малой плотностью населения – доставка энергии потребителю. Население большей части обширной территории России (на Европейском Севере, в Сибири, на Дальнем Востоке), составляющее около 10 млн человек, не имеет доступа к электроснабжению от централизованных сетей. Они получают электроэнергию в основном от автономных дизель-генераторов небольшой мощности. Необходимое для этого топливо завозится из далеко расположенных центров автотранспортом, водными путями, а иногда даже вертолетами, что делает это топливо очень дорогим. К тому же эти поставки не всегда надежны, зависят от погодных условий, наличия транспортных средств и предоплаты.

Альтернативой топливным органическим ресурсам в этих условиях является использование в экономически обоснованных объемах НВИЭ. За последние 10–20 лет человечество активно движется в этом направлении, и в области использования НВИЭ наблюдается значительный прогресс. В результате достаточно крупных капитальных вложений в эту отрасль, а также законодательных и политических актов, принятых как в отдельных странах, так и на межгосударственном уровне обеспечен переход систем на НВИЭ от стадии НИОКР к стадии промышленного и коммерческого исследования. Имеются примеры разработки и реализации долгосрочных программ. Так, согласно докладу Европейской Комиссии целью ЕС в области НВИЭ является координация действий и развертывания масштабного использования НВИЭ, обеспечивающих к 2010 г. достижения производства 12 % электроэнергии за счет ВИЭ (включая «большую» гидроэнергетику). Согласно глобальным целям Энергетической стратегии США признано необходимым способствовать развитию технологий, позволяющих увеличить отдачу от гидроэнергетических источников возобновляемой энергии до 25 ГВт к 2010 г. Федеральное правительство Германии поставило цель повысить долю ВИЭ к 2050 г. в общем объеме производства электроэнергии до 50 %. И это реальная цифра, т. к. только за период 1998–2002 г. эта доля возросла с 4,6 % до 7,1 % и к 2010 г. составит не менее 12 %. Такие результаты возможны только в результате повышения конкурентоспособности установок на НВИЭ по сравнению с традиционными. Пока, как будет показано далее, установки НВИЭ уступают последним по большинству технико-экономических показателей.

Удельные мощности нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) для сопоставления с традиционными представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

*Удельные мощности нетрадиционных возобновляемых источников энергии [3]*

| Источник   | Мощность Вт/м <sup>2</sup> | Примечание                       |
|--|----------------------------|----------------------------------|
| Солнце   | 100–250                    |                                  |
| Ветер  | 1500–5000                  | при скорости 8–12 м/с            |
| Геотермальное тепло                              | 0,06                       |                                  |
| Ветровые океанические волны                      | 3000 Вт/пог. м             | может достигать 10 000 Вт/пог. м |
| Для сравнения:<br>двигатель внутреннего сгорания | около 100 кВт/л            |                                  |
| турбореактивный двигатель                        | до 1 МВт/л                 |                                  |
| ядерный реактор                                  | до 1 МВт/л                 |                                  |

Говоря о НВИЭ, необходимо также отметить, что многие из них для производства единицы электроэнергии и обеспечения функционирования требуют значительного расхода природных источников энергии (табл. 4.3).

Таблица 4.3

*Энергетические потребности для производства электроэнергии при использовании возобновляемых источников*

| Тип энергетической установки           | Расход энергии природного источника на единицу произведенной электроэнергии, отн. ед. |
|--|---|
| Установка на биомассе                  | 0,82–1,13   |
| Гэо ТЭС                                | 0,08–0,37   |
| ГЭС малой мощности                     | 0,03–0,12   |
| большой мощности                       | 0,09–0,39   |
| Солнечная фотоэлектрическая установка: |   |
| наземная;                              | 0,47  |
| спутниковая                            | 0,11–0,48   |
| Солнечная теплоустановка (зеркала)     | 0,15–0,24   |
| Приливная станция                      | 0,07  |
| Ветроэнергетическая установка          | 0,06–1,92   |
| Волновая станция                       | 0,3–0,58  |

В табл. 4.4 приведены данные по установленной мощности электростанций в мире, использующих НВИЭ.

Таблица 4.4

*Установленная мощность электростанций в мире, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии (по состоянию на 1994 г.) [8]*

| Вид электростанций | Установленная мощность, МВт |
|--------------------|-----------------------------|
| Солнечные          | 400                         |
| Геотермальные      | 6 000                       |
| Ветровые           | 3 730                       |
| Приливные          | 253                         |
| Малые ГЭС          | 25 910                      |
| <b>ВСЕГО</b>       | <b>36 293</b>               |

Исследованиями МИРЭС установлено, что увеличение использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии до 2020 г. может достигнуть только 12 % от мирового потребления энергии.

Дальнейший прогресс в создании надежных, технически совершенных, экономичных и простых в эксплуатации конструкций электроустановок на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии позволит существенно решить основную проблему – снизить удельную стоимость вырабатываемой энергии. С этой точки зрения интересны прогнозные данные ряда зарубежных специалистов, приведенные в табл. 4.5.

Таблица 4.5

*Стоимость электроэнергии, производимой на основе использования различных видов топлива и НВИЭ за рубежом, дол. США/кВт.ч [3]*

| Источники энергии                               | 1980 г.   | 1989 г. | 2000 г. | 2020 г.   |
|---|-----------|---------|---------|-----------|
| Нетрадиционные возобновляемые источники энергии |           |         |         |           |
| Энергия солнца                                  | 0,25      | 0,07    | 0,04    | 0,01      |
| Тепловая солнечная энергия                      | 0,24      | 0,12    | 0,05    | 0,03      |
| Фотоэлектрическая солнечная энергия             | 1,15      | 0,35    | 0,06    | 0,02–0,03 |
| АЭС и станции на органическом топливе           |           |         |         |           |
| Атомная энергия                                 | 0,04–0,13 |         |         |           |
| Энергия, полученная при сжигании нефтепродуктов | 0,06      |         |         |           |
| Энергия, полученная при сжигании угля           | 0,04      |         |         |           |

Сопоставляя традиционные и нетрадиционные энергетические установки, анализируя перспективы их развития, нельзя не отметить экономические и экологические аспекты, некоторые из них нашли отражение в табл. 4.6, 4.7.

Таблица 4.6

*Материалоемкость и трудоемкость создания и эксплуатации некоторых типов энергоустановок [3]*

| Первичный энергоресурс, источник энергии | Материалоемкость установки, отн. ед. | Общая трудоемкость создания и эксплуатации установки, отн. ед. |
|--|--------------------------------------|--|
| Природный газ                            | 1,0                                  | 1,0  |
| Нефть                                    | 2,2                                  | 1,6  |
| Уголь                                    | 3,2                                  | 2,0  |
| Ядерная энергетика                       | 5,6                                  | 2,8  |
| Энергия солнца:                          |                                      |  |
| на отопление                             | 62,5                                 | 40,0   |
| фотопреобразование                       | 109,4                                | 140,0  |
| Гидроэнергия                             | 62,5                                 | –  |
| Энергия ветра                            | 250,0                                | 72,0   |

Таблица 4.7

*Средняя площадь, необходимая для производства 1 МВт в год электроэнергии на электростанциях различного типа, м<sup>2</sup> [3]*

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| АЭС                         | 630       |
| ТЭС:                        |           |
| на жидком топливе           | 870       |
| на природном газе           | 1500      |
| на угле                     | 2400      |
| Солнечные электростанции    | 100 000   |
| ГЭС                         | 265 000   |
| Ветроэнергетические станции | 1 700 000 |

Как уже отмечалось ранее, применение НВИЭ имеет существенные географические, технические и экономические ограничения.

Ресурсы НВИЭ имеют определенную географическую «привязку». Очевидно, например, что энергия приливов может быть использована на берегах морей, геотермальная энергия – в местах наличия парогидротерм и термоаномалий. Малые ГЭС, естественно, могут быть использованы на реках и при водохранилищах. Солнечная и ветровая энергия распространены повсеместно, но ее использование наиболее целесообразно в районах, где имеет место соответственно наибольший приход солнечной радиации или наибольшая скорость ветра.

Технические ограничения связаны с проблемой устойчивости энергосистем и изолированных энергоузлов при наличии в них электростанций с нерегулируемым графиком выработки энергии.

Весьма существенны в настоящее время экономические ограничения. Большинство энергоустановок, использующих НВИЭ, еще не достигло уровня безусловной конкурентоспособности. Это обусловлено малой плотностью потока (удельной мощностью) используемой первичной энергии (табл. 4.2), вследствие чего удельная материалоемкость и капиталоемкость установок на НВИЭ выше (табл. 4.6, 4.7), чем для энергоустановок на традиционных энергоисточниках. Если какая-либо энергоустановка, использующая НВИЭ, и окупается в приемлемые сроки, то начальные затраты всегда или почти всегда выше, чем для традиционных установок, что создает существенный барьер на пути применения НВИЭ, поэтому многие государства для реализации своей технической политики в данной области применяют меры экономического стимулирования развития НВИЭ, состоящие в налоговых и кредитных льготах производителям и потребителям оборудования или в прямых дотациях. В этих странах установлена соответствующая законодательная и нормативная база, по которой, в частности, энергетические компании обязаны покупать электроэнергию, производимую при использовании НВИЭ. Эти меры необходимы для развития НВИЭ на начальной стадии в период, в течение которого электрогенерирующие установки и станции, использующие НВИЭ, могут и должны достичь полной конкурентоспособности по сравнению с традиционными.

## **4.2. Использование энергии воды**

### **4.2.1. «Большая» гидроэнергетика**

Электростанции, преобразующие энергию воды рек в электрическую энергию, составляют на сегодня основу той части энергетики, которая использует возобновляемые источники энергии. За почти столетнюю историю гидроэнергетики накоплен огромный опыт строительства гидравлических электрических станций на горных и равнинных реках, на реках с гигантским водосбросом и на маленьких речках (микро-ГЭС), русловых и приплотинных ГЭС и т. д., а сама гидроэнергетика отнесена к числу наиболее значимых достижений XX века [9]. В ее становления и развития решающий вклад внесли ученые СССР и России.

Принято выделять четыре типа гидроэнергетических установок (ГЭУ):

- крупные ГЭС – системообразующие звенья в электроэнергетике;
- гидроаккумулирующие станции;
- малые ГЭС, работающие вне энергосистем;
- гидроэнергетические установки в составе водохозяйственных комплексов.

В настоящее время в мире используется около 30 % экономически эффективного гидроэнергетического потенциала.

Удельный вес гидроэнергетики в общем производстве электроэнергии достаточно высок во многих странах: в Норвегии и Бразилии этот показатель выше 90 %, от 50 до 80 % – в Канаде и Венесуэле, около 20 % – в Индии, Египте, Италии, Китае.

Гидроэнергетический потенциал России составляет 2900 млрд кВт·ч/г. Потенциал крупных и средних рек оценивается в 2400 млрд кВт·ч/г. Технически достижимый уровень этого потенциала – 1670 млрд кВт·ч/г. По экономическому гидроэнергетическому потенциалу – 850 млрд кВт·ч/г. (или по топливному эквиваленту 300 млрд т усл. т. в год Россия занимает второе место после Китая. По установленной мощности гидроагрегатов на ГЭС и выработке электроэнергии Россия находится на пятом месте после США, Китая, Канады и Бразилии, по мощности гидроагрегатов на строящихся ГЭС – на четвертом месте после Китая, Бразилии и Индии (табл. 4.8).

Таблица 4.8

*Основные показатели ГЭС в мире*

| Страна    | Установленная мощность, МВт | Выработка электроэнергии на ГЭС, ГВт·ч/год | Экономически обособанный гидроэнергетический потенциал, Вт·ч/год | Количество ГЭС | Доля гидроэнергии в общем объеме вырабатываемой электроэнергии, % | Мощность строящихся ГЭС, МВт |
|-----------|-----------------------------|--|--|----------------|---|------------------------------|
| США       | 75 525                      | 308 800                                    | 3 760 000  | 6389           | 8,8   | нет данных                   |
| Китай     | 72 900                      | 212 900                                    | 1 260 000  | 24 119         | 17,3  | 35 000                       |
| Канада    | 65 726                      | 350 000                                    | 536 000  | 820            | 62,0  | 882                          |
| Бразилия  | 56 481                      | 301 198                                    | 736 500  | 470            | 93,5  | 12 050                       |
| Россия    | 43 940                      | 157 500                                    | 852 000  | 62             | 19,4  | 8400                         |
| Норвегия  | 27 410                      | 116 259                                    | 176 600  | 300            | 99,4  | 140                          |
| Франция   | 23 100                      | 69 800                                     | 71 500   | 554            | 15,0  | 0                            |
| Индия     | 21 963                      | 74 338                                     | нет данных   | 2601           | 25,0  | 9818                         |
| Япония    | 21 389                      | 102 587                                    | 114 267  | 2467           | 10,0  | 1113                         |
| Испания   | 17 000                      | 39 000                                     | 41 600   | 871            | 20,0  | 70                           |
| Швеция    | 16 204                      | 69 300                                     | 90 000   | 144            | 47,7  | нет данных                   |
| Италия    | 15 267                      | 51 636                                     | 54 000   | 502            | 19,4  | 450                          |
| Венесуэла | 13 224                      | 57 923                                     | 100 000  | 69             | 73,0  | 73                           |
| Турция    | 10 215                      | 42 229                                     | 123 040  | 427            | 38,0  | 4190                         |
| Мексика   | 9702                        | 24 616                                     | 32 232   | 540            | 14,4  | 900                          |

В России в настоящее время освоено около 20 % имеющегося гидроэнергетического потенциала: на Европейскую часть приходится 50 %, на Сибирь – 19 %, на Дальний Восток – 4% освоенных гидроэнергетических мощностей страны. В 2000 г. на электростанциях России было выработано 857 млрд кВт·ч электроэнергии, в том числе на тепловых электростанциях – 549 млрд кВт·ч, на ГЭС – 157,5 млрд кВт·ч, на АЭС – 103,5 млрд кВт·ч [9].

Неоспоримые преимущества гидроэнергетики связаны с возобновляемостью водных ресурсов, низкой себестоимостью производства электроэнергии, мобильностью мощности для покрытия пиковой части графика нагрузки, инфляционной устойчивостью, экологической чистотой производства. Себестоимость электроэнергии на ГЭС в России в 2000 г. в среднем была почти в 6 раз ниже, чем на ГРЭС.

Сегодня накопленные знания позволяют больше внимания уделять экологическим факторам, в частности тем положительным эффектам, которые могут быть достигнуты при сооружении объекта гидроэнергетики. Всесторонний анализ дает возможность более полно оценить влияние ГЭС на окружающую среду.

Более подробные сведения об истории и современном состоянии «большой» гидроэнергетики можно найти в многочисленной специальной литературе.

#### **4.2.2. Мини- и микрогэс**

Кроме указанного выше деления гидроэнергетических установок по функциональному назначению, в настоящее время принята следующая классификация ГЭС по их мощности: станции мощностью до 100 кВт – микрогэс, от 100 до 1000 кВт – мини-ГЭС, от 1000 до 10000 кВт – малые ГЭС и свыше 10000 кВт – крупные гидроэлектростанции. Конструкция и принципы построения энергоустановок этих классов могут существенно отличаться [22].

Исторически первые гидроэлектростанции относились к классу микрогэс, и время их появления совпадает с успехами в промышленном освоении электромашинных генераторов. Такие простейшие, часто полукустарные установки имели широкое распространение. Особенно в сельской местности. В частности, в СССР в 1937 г. доля гидроэнергии в сельскохозяйственном электроснабжении достигла 11 %.

До 1941 г. малая гидроэнергетика развивалась в СССР главным образом путем индивидуального строительства электростанций из элементов выпускавшегося в то время специального оборудования и использования подходящих узлов и деталей от автомобилей, сельскохозяйственной техники и т. д. Зачастую использовались самодельные, в том числе деревян-

ные и деревометаллические конструкции гидротурбин. В качестве редукторов использовались задние мосты автомобилей. А в качестве гидрогенераторов – серийные генераторы постоянного и переменного тока.

До 1957 г. в СССР функционировало 5615 малых ГЭС общей мощностью 443,1 МВт, вырабатывавших 0,8 млрд кВт·ч электроэнергии. Однако в связи с интенсивной электрификацией сельской местности за счет подключения к энергосистемам малые ГЭС оказались неэкономичными. В последующие годы гидроэнергия использовалась путем построения крупных ГЭС, которые наряду с известными достоинствами, обладают рядом существенных недостатков, особенно с экологической точки зрения. И только в последние годы интерес к микрогэс вновь усилился.

В России, в отличие от большинства зарубежных стран, где развитие микрогидроэнергетики осуществлялось параллельно с другими энергоисточниками, эти работы приходилось начинать практически с нуля. За время длительного игнорирования малой энергетики вообще и микрогэс в частности был утрачен даже имевшийся опыт использования малых рек, ликвидированы многие из имевшихся гидроэлектростанций и свернуто производство оборудования для них.

Современные достижения в области электромашиностроения, полупроводниковой и преобразовательной техники привели к появлению нового класса электрических машин, который получил название вентильных. Вентильные машины обладают принципиально новыми свойствами и позволяют решать ранее недоступные задачи.

Например, вентильные электрические машины позволяют строить на их основе автономные источники электропитания, обеспечивающие генерирование высококачественной электроэнергии при минимальных требованиях к приводному двигателю. Применительно к микрогэс это дает возможность строить автоматизированные гидроагрегаты с нерегулируемыми турбинами. Как показал еще довоенный опыт, именно это направление развития микрогэс в наибольшей степени отвечает как производственно-технологическим, так и эксплуатационным требованиям. Микрогэс с применением вентильных электрических машин получают в настоящее время наибольшее распространение во всем мире.

Тенденция к упрощению гидротехнической части станций существенно повышает требования к устройствам генерирования электроэнергии и стабилизации ее параметров.

По отчетным данным, в 1990 г. в России остались в эксплуатации 55 МГЭС суммарной мощностью 545 МВт. Они выработали 1940 млн кВт·ч электроэнергии. Практически все эти МГЭС расположены на Европейской территории России. Наибольшее их число и основные суммарные

мощности МГЭС (более 2/3) приходится на районы Северо-Запада и Северного Кавказа.

Основные направления развития малой гидроэнергетики в России на ближайшие годы следующие: строительство малых ГЭС при сооружаемых комплексных гидроузлах; модернизация и восстановление ранее существующих малых ГЭС, сооружение малых ГЭС на небольших реках, возведение малых ГЭС на существующих водохранилищах, на каналах, трубопроводах подвода и отвода воды на объектах различного хозяйственного назначения.

#### **4.2.3. Гидроаккумулирующие электрические станции (ГАЭС)**

Производство электроэнергии на электрических станциях и ее потребление различными приемниками представляют собой процессы, взаимосвязанные таким образом, что в соответствии с физическими закономерностями мощность потребления электроэнергии в какой-либо момент времени должна быть в точности равна генерируемой мощности.

При идеальном равномерном потреблении электроэнергии происходила бы равномерная работа определенного количества электростанций. В действительности работа большинства отдельных электроприемников неравномерна и суммарное потребление электроэнергии также неравномерно. Можно привести множество примеров неравномерности работы установок и приборов, потребляющих электроэнергию. Завод, работающий в одну или две смены, неравномерно потребляет электрическую энергию в течение суток. В нерабочее время потребляемая им мощность близка к нулю. Улицы и квартиры освещают только в определенные часы суток. Работа электробытовых приборов, вентиляторов, пылесосов, электрических печей, нагревательных приборов, телевизоров, радиоприемников, электробритв также неравномерна. В утренние и вечерние часы коммунальная нагрузка наибольшая.

*График нагрузки* некоторого района или города, представляющий собой изменение во времени суммарной мощности всех потребителей, имеет провалы и максимумы. Это означает, что в одни часы суток требуется большая суммарная мощность генераторов, а в другие часы часть генераторов или электростанций должна быть отключена, или должна работать с уменьшенной нагрузкой. Количество электростанций и их мощность определяются относительно непродолжительным максимумом нагрузки потребителей. Это приводит к недоиспользованию оборудования и к удорожанию энергосистем. Так, снижение числа часов использования установленной мощности крупных ТЭС с 6000 до 4000 ч в год приводит к возрастанию себестоимости вырабатываемой энергии на 30–35 %.

Анализ тенденций в потреблении электрической энергии показывает, что в дальнейшем неравномерность потребления будет увеличиваться по мере роста благосостояния населения и связанного с ним увеличения коммунально-бытовых нагрузок, по мере повышения электровооруженности труда, уменьшения количества ночных смен. Сокращение числа рабочих дней в неделе также способствует повышению неравномерности потребления электроэнергии. В большинстве стран Западной Европы неравномерность в потреблении электроэнергии такова, что в течение часа изменение нагрузки достигает 30 % от максимальной мощности и в перспективе также ожидается увеличение неравномерности. Кардинально изменить характер потребления электроэнергии очень трудно, так как он зависит от установившегося ритма жизни людей и ряда не зависящих от людей объективных обстоятельств.

Энергетики по возможности принимают меры по выравниванию графика суммарной нагрузки потребителей. Так, вводится дифференцированная стоимость электроэнергии в зависимости от того, в какой период времени она потребляется. Если электроэнергия потребляется в моменты максимумов нагрузки энергосистемы, то и стоимость ее устанавливается выше. Это повышает заинтересованность потребителей в таких перестройках своей работы, которые бы способствовали уменьшению электрической нагрузки в моменты максимумов потребления в энергосистеме. В целом возможности выравнивания потребления электроэнергии невелики. Следовательно, электроэнергетические системы должны быть достаточно маневренными, способными быстро изменять мощность электростанций.

В большинстве стран значительная часть электроэнергии (до 80 %) вырабатывается на тепловых электростанциях, для которых наиболее желателен равномерный график нагрузки. Агрегаты тепловых станций плохо приспособлены к регулированию мощности. Обычные паровые котлы и трубы на этих станциях допускают изменение нагрузки всего лишь на 10–15 %.

Периодические включения и отключения тепловых станций не позволяют решить задачу регулирования мощности. На запуск тепловой станции в лучшем случае требуются часы. Кроме того, работа крупных тепловых станций в резко переменном режиме нежелательна вследствие повышенного расхода топлива, повышенного износа теплосилового оборудования и, следовательно, снижения его надежности. Нужно учесть также, что ТЭС с высокими параметрами пара имеют некоторые минимальные технически возможные мощности, составляющие 50–70 % от номинальной мощности оборудования. Все сказанное относится не только к обычным ТЭС, но и к атомным электрическим станциям. Поэтому в настоящее время и в ближайшем будущем дефицит в маневренных мощ-

ностях («пики» нагрузки) покрывается ГЭС, у которых набор полной мощности с нуля может быть произведен за 1–2 мин.

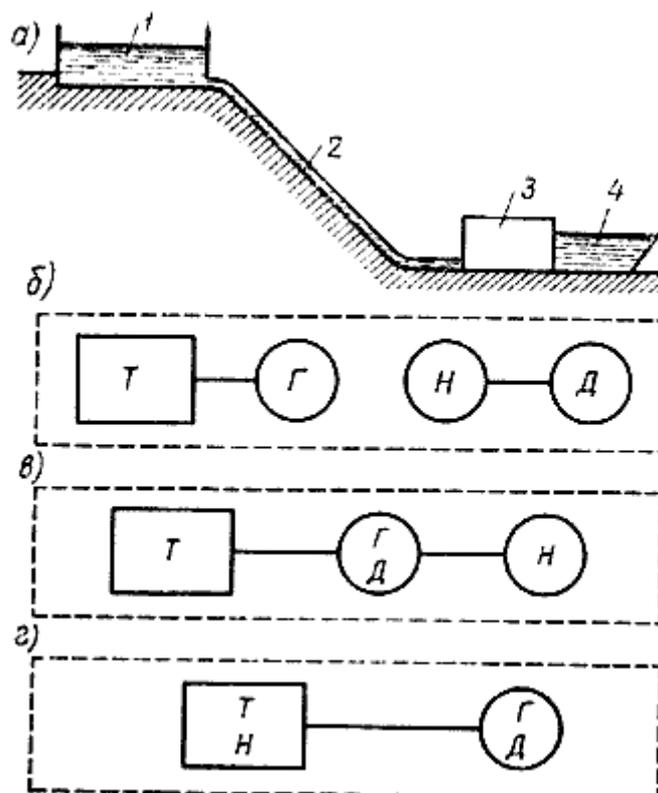


Рис. 4.1. Гидроаккумулирующая станция

Регулирование мощности ГЭС производится следующим образом: в периоды времени, когда в системе имеются провалы нагрузки, ГЭС работают с незначительной мощностью и вода заполняет водохранилище. При этом запасается энергия. С наступлением пиков включаются агрегаты станции, и увеличивается на необходимую величину их мощность.

Накапливание энергии в водохранилищах на равнинных реках приводит к затоплению обширных территорий, что во многих случаях крайне нежелательно. Небольшие реки малопригодны для целей регулирования мощности в системе, так как они не успевают заполнить водой водохранилище.

Упомянутую выше задачу (снятие пиков) могут решать гидроаккумулирующие станции (ГАЭС), работающие следующим образом (рис. 4.1). В интервалы времени, когда электрическая нагрузка в объединенных системах минимальна, ГАЭС перекачивает воду из нижнего водохранилища в верхнее и потребляет при этом электроэнергию из системы (рис. 4.1, а). В режиме непродолжительных «пиков» – максимальных значений нагрузки – ГАЭС работает в генераторном режиме и расходует запасенную в верхнем водохранилище воду.

В европейской части России возможно сооружение до 200 ГАЭС. В энергосистемах, расположенных в центральной, северо-западной и южной частях, где имеется наибольший дефицит маневренной мощности, естественные перепады рельефа позволяют сооружать станции с небольшим напором (80–110 м).

Районы с благоприятным для сооружения ГАЭС рельефом местности, позволяющим получать перепады порядка 1000 м, значительно удалены от центров потребления маневренной мощности. Сооружение линий электропередач в этих случаях может привести к затратам, превышающим затраты на сооружение ГАЭС.

У первой в Советском Союзе экспериментальной Киевской ГАЭС мощностью 225 МВт напор равен 70 м.

В настоящее время под Павловом Пасадом сооружается ГАЭС мощностью 1 200 МВт с обратимыми агрегатами. Ведется проектирование ГАЭС для Ленинградской области и для ряда других регионов.

С вводом в эксплуатацию мощных АЭС (мощностью более 1000 МВт) значение ГАЭС возрастает, так как АЭС наиболее экономично работают с постоянной нагрузкой и ГАЭС должны брать на себя все ее изменения.

К наиболее крупным ГАЭС относятся Лорх-на-Рейне (ФРГ) – 2400 МВт, Корнуэлл (США) – 2000 МВт, Лох-Ломонд (Англия) – 1200 МВт.

Мощность ГАЭС зависит от расхода воды и напора. При ограниченном объеме верхнего бассейна увеличение мощности может быть получено за счет большого напора. Поэтому горные районы удобны для сооружения ГАЭС. Например, огромную величину напора (около 1800 м) имеет ГАЭС Рейссек в Австрии. Там, где это возможно, стремятся использовать в качестве верхнего бассейна естественные водоемы. Например, в Англии для ГАЭС Лох-Ламанд используется высокогорный пруд. В Японии построена ГАЭС Нумацаванума с верхним бассейном в виде кратерного озера.

Сооружение искусственных бассейнов сопряжено со значительными объемами работ и затратами больших средств. Кроме того, существует опасность утечки воды из верхнего бассейна, которая даже в небольшом количестве (порядка нескольких процентов) заметно снижает КПД станции. Поэтому приходится принимать тщательные меры по гидроизоляции

Воду в верхнем бассейне можно подогревать, используя теплую воду конденсаторов тепловой станции. Близко расположенные ГАЭС и ТЭС удачно сочетаются друг с другом. ГАЭС генерирует электроэнергию в часы «пик», а бассейн-охладитель ТЭС становится нижним бассейном ГАЭС и из него в верхний бассейн перекачивается только теплая вода.

Водоводы ГАЭС, по которым вода из верхнего бассейна подводится к турбинам, не должны вызывать большие потери энергии. Наиболее удобны туннельные водоводы большого диаметра, покрытые изнутри бетоном или металлом. Число водоводов должно быть не меньше двух, так как в случае ремонта одного из них станция будет работать с другим. Использование металлических труб в качестве водовода менее желательно из-за больших потерь на трение о стенки, поскольку трубы могут быть выполнены относительно небольшого диаметра и их приходится прокладывать в большом количестве.

На первых ГАЭС для выработки электроэнергии использовали трубы Т и генераторы Г, а для перекачки воды в верхний бассейн – электрические двигатели Д и насосы Н (рис. 4.1, б). Такие станции называли четырехмашинными, по числу устанавливаемых машин. В силу независимости работы генератора и насоса иногда четырехмашинная схема оказывается экономически наиболее выгодной.

Например, в Швейцарии на ГАЭС Гримзель генераторы расположены на одной реке, а насосы – на другой, протекающей выше. При этом на перекачивание воды в верхний бассейн затрачивается меньше энергии, чем получается при срабатывании воды в турбинах.

Сокращение числа машин существенно снижает стоимость ГАЭС и открывает перспективы для их широкого применения. Объединение функций генератора и двигателя в одной машине привело к трехмашинной компоновке станций (рис. 4.1, в). В различных странах мира построены десятки таких станций. Например, в ФРГ в 1958 г. построена станция Гессштахт мощностью 130 МВт; в Англии в 1961 г. – станция Фестиниог мощностью 300 МВт.

ГАЭС стали особенно эффективными после появления обратимых гидротурбин, выполняющих функции и турбин, и насосов (рис. 4.1, г). Количество машин в этом случае сведено к минимуму – к двум. Однако станции с двухмашинной компоновкой имеют более низкие значения КПД из-за необходимости создавать в насосном режиме примерно в 1,3–1,4 раза бóльший напор на преодоление трения в водоводах. В генераторном режиме величина напора меньше из-за трения в водоводах. Для того чтобы агрегат одинаково эффективно работал как в генераторном, так и в насосном режимах, можно в насосном режиме увеличить его частоту вращения. Применение разных частот вращения в обратимых генераторах привело к усложнению и удорожанию их конструкции.

Перспективы применения ГАЭС во многом зависят от их КПД, под которым применительно к этим станциям понимается отношение энергии, выработанной станцией в генераторном режиме, к энергии, израсходованной в насосном режиме.

Первые ГАЭС в начале XX в. имели КПД не выше 40 %, у современных ГАЭС КПД составляет 70–75 %. К преимуществам ГАЭС относится также и низкая стоимость строительных работ. В отличие от обычных ГЭС здесь нет необходимости перекрывать реки, возводить высокие плотины с длинными туннелями и т. п. Ориентировочно на 1 кВт установленной мощности на крупных речных ГЭС требуется 10 м<sup>3</sup> бетона, а на крупных ГАЭС – всего лишь несколько десятых долей кубометра бетона.

ГАЭС и ветровые электростанции, отличающиеся непостоянством работы, удачно сочетаются между собой. При этом трудно рассчитывать на мощность ветровых станций в часы «пик» в энергосистеме. Если же вырабатываемую на этих станциях электроэнергию запасать на ГАЭС в виде воды, перекачиваемой в верхний бассейн, то в нужное время выработанная на ветровых электростанциях за какой-либо промежуток времени энергия может быть использована в системе. Отсутствие мощных и надежных способов аккумуляирования электрической энергии будет способствовать распространению ГАЭС.

#### **4.2.4. Приливные и волновые электрические станции**

Энергия морских приливов или, как говорят иногда, «лунная энергия» известна человечеству со времен глубокой древности. Эта энергия еще в далекие исторические эпохи использовалась для приведения в движение различных механизмов, в особенности мельниц. В Германии с помощью энергии приливной волны орошали поля, в Канаде – пилили дрова. В Англии приливная водоподъемная машина служила в XIX веке для снабжения Лондона водой.

Существует огромное количество остроумных проектов приливных технических установок. Только во Франции к 1918 г. было опубликовано более 200 таких патентов. В начале XX в. предпринимались попытки сооружения мощных приливных электростанций. В США в 1935 г. было начато строительство ПЭС Кводди мощностью 200 тыс кВт. Вскоре строительство, на которое ушло 7 млн долл., было прекращено из-за выявившейся высокой стоимости электроэнергии (на 33 % больше стоимости на тепловой станции). По составленному в 1940 г. в СССР проекту, Кислогубская ПЭС вырабатывала бы энергию стоимостью в 2 раза больше, чем у речных электростанций.

ПЭС выгодно отличаются от речных тем, что их работа определяется космическими явлениями и не зависит, как у речных, от многочисленных случайных погодных условий.

Однако ПЭС обладают двумя существенными недостатками – неравномерность во времени их работы и большой объем требующихся капиталовложений.

Неравномерность приливной энергии в течение лунных суток и лунного месяца, отличающихся от солнечных, не позволяет систематически использовать ее в периоды максимального потребления в системах. Можно компенсировать неравномерность работы ПЭС, совместив ее с ГАЭС. В то время, когда имеется избыточная мощность ПЭС, ГАЭС работает в насосном режиме, потребляя эту мощность и перекачивая воду в верхний бассейн. Во время спадов в работе ПЭС ГАЭС работает в генераторном режиме, выдавая электроэнергию в систему. В техническом отношении такой проект хорош, но дорогостоящ, так как требуется большая установленная мощность электрических машин.

ПЭС также может удачно сочетаться с речной ГЭС, имеющей водохранилище. При совместной работе этих станций ГЭС увеличивает свою мощность при спаде мощности ПЭС и ее остановке; в то время как ПЭС работает с достаточно большой мощностью, ГЭС запасает воду в водохранилище. Таким образом, может быть выровнена как суточная, так и сезонная неравномерность работы ПЭС.

ПЭС работают в условиях быстрого изменения напора, поэтому их турбины должны иметь высокие КПД при переменных напорах. В настоящее время создана достаточно совершенная и компактная горизонтальная турбина двойного действия. Электрический генератор и часть деталей турбины заключены в водонепроницаемую капсулу, и весь гидроагрегат погружен в воду. Поворотные лопасти рабочего колеса турбины обеспечивают высокое значение КПД при различных напорах начиная с 0,5 м.

Гидроагрегат может работать как в генераторном, так и в насосном режимах. При выключенном генераторе гидроагрегат может осуществлять прямой перепуск воды из моря в бассейн и обратно; в насосном режиме он может осуществлять перекачивание воды из моря в бассейн и тем самым увеличивать напор воды.

Природные условия России позволяют построить ПЭС с суммарной установленной мощностью около 150 тыс МВт. Многолетние научные исследования и проекты привели к выводу, что заслуживает внимания создание нескольких ПЭС: Лумбовской в Баренцевом море мощностью 320 МВт (в другом варианте 672 МВт); Мезенской в Белом море мощностью 15 200 МВт и выработкой электроэнергии 42 000 ГВт·ч; Тургурской мощностью 6 800 МВт и выработкой электроэнергии 16 200 ГВт·ч; Пенжинской мощностью 21 400 МВт (в другом варианте 87 400 МВт) в Охотском море [8].

В течение нескольких десятков лет в бывшем СССР велись научные и проектные работы по приливной энергетике. К настоящему времени выпол-

нены внестадийные проработки по Лумбовской ПЭС, Пенжинской ПЭС, материалы технико-экономического обоснования (ТЭО) Тугурской ПЭС.

С 1968 г. работает экспериментальная Кислогубская ПЭС мощностью 400 кВт. Выполнено ТЭО по опытно-промышленной Кольской ПЭС мощностью 40 МВт, которая предназначалась для проведения натурных испытаний и проверки конструктивных решений по капсульному агрегату для мощных Тугурской и Мезенской ПЭС.

За рубежом работают три ПЭС: ПЭС «Ранс» мощностью 240 МВт во Франции (построена в 1967 г., 24 агрегата), ПЭС «Цзянсян» мощностью 3,2 МВт в Китае (пуск шести агрегатов осуществлен в период 1980–1985 гг.) и ПЭС «Аннаполис» мощностью 19,6 МВт в Канаде (построена в 1984 г., 1 агрегат). Кроме того, в Китае построены десятки микро- и мини-ПЭС, являющиеся элементами комплексов при осуществлении проектов обводнения, осушения, судоходства и т. д.

На Мезенской и Тугурской ПЭС, возможность создания которых до 2015–2020 гг. в принципе полностью исключать нет оснований, предусмотрена установка соответственно 800 и 420 агрегатов.

Единичная мощность агрегатов Мезенской ПЭС 19 МВт. Это капсульные агрегаты с диаметром рабочего колеса турбины 10 м. Режим работы агрегатов – двухсторонний.

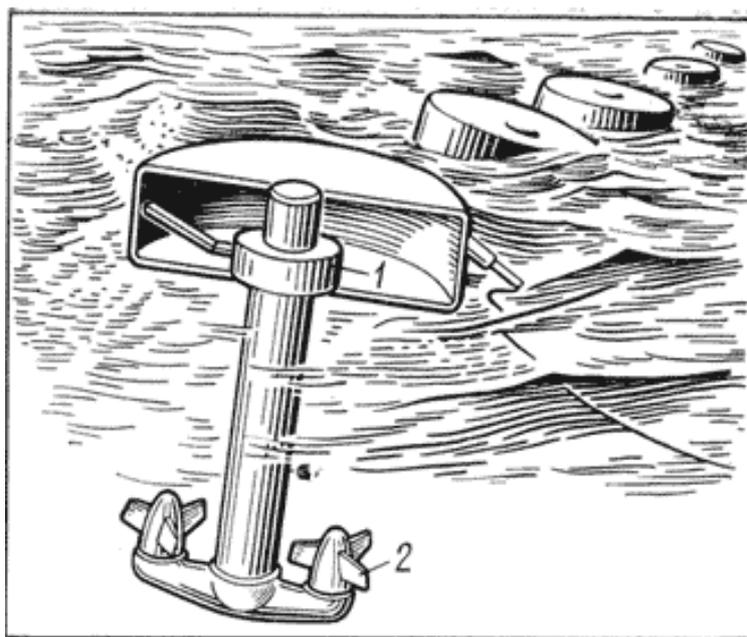
Единичная мощность агрегатов Тугурской ПЭС–16,2 МВт. Это капсульные агрегаты с диаметром рабочего колеса 10 м. Режим работы агрегатов – двухсторонний без насосного режима.

Подобные типы агрегатов уже разработаны зарубежными фирмами. Большое количество агрегатов на ПЭС – серьезное препятствие для их сооружения, так как для создания такого числа агрегатов необходимо задействовать всю энергетическую промышленность страны.

В оптимистическом варианте развития приливной энергетики можно рассматривать вопрос о начале работ по созданию до 2015 г. одной из двух ПЭС – Мезенской на Белом море или Тугурской на Охотском море.

Учитывая трудности с топливоснабжением электростанций в зонах возможного влияния указанных ПЭС, экономически обе ПЭС могут оказаться приемлемыми как в европейской части страны, так и в Хабаровском и Приморском краях.

В последнее время сделан ряд предложений, касающихся создания *волновых электростанций*. В Швеции получен патент на изобретение, позволяющее использовать энергию волн морей и крупных озер. Идея, на которой основано изобретение, проста. Если на шест прикреплен пропеллер и ритмично двигать его в воде вниз и вверх, то он будет вращаться. Если прикрепить верхнюю часть шеста к поплавку и заменить движение руки движением колышающейся волны, то результат будет тот же (рис. 4.2).



*Рис. 4.2. Волновая электростанция*

Роль поплавок выполняет огромный плавающий бак с электрогенератором внутри. Генератор 1 приводится в движение водой, нагнетаемой насосом, который работает за счет вращения пропеллера 2. Испытания опытного образца (рис. 4.2) показали, что такой агрегат может действовать не только у морского побережья, где практически постоянно происходит волнение воды, но даже на больших озерах. По мнению изобретателей, такие агрегаты целесообразно соединять последовательно в батареи, создавая таким образом надежный и дешевый источник электроэнергии достаточно большой мощности. Разумеется, опыт эксплуатации должен в какой-то мере подтвердить эти ожидания.

### **4.3. Геотермальные электростанции**

Геотермальные электростанции в качестве источника энергии используют тепло земных недр. Известно, что в среднем на каждые 30–40 м в глубь Земли температура возрастает на 1 °С. Следовательно, на глубине 3–4 км вода закипает, а на глубине 10–15 км температура Земли достигает 1000÷1200 °С. В некоторых частях нашей планеты температура горячих источников достаточно высокая в непосредственной близости от поверхности. Эти районы наиболее благоприятны для сооружения геотермальных станций. Так, в Новой Зеландии на геотермальных станциях вырабатывается 40 % всей электроэнергии, в Италии – 6 %. Значительная доля электроэнергии на таких станциях вырабатывается и в ряде других стран.

Италия была первой страной, вставшей на путь промышленного использования тепла Земли недр. Этому способствовал недостаток обычных энергоресурсов.

Схема использования подземного тепла проста. Разогретые подземные воды превращаются в пар, который используется на геотермальных электростанциях и в других технических установках. Пар, получаемый в недрах Земли, в отличие от пара, получаемого в парогенераторах ТЭС, содержит примеси различных агрессивных газов, которые разрушают оборудование станций. Поэтому пар земных недр либо направляют в теплообменники для получения «чистого» пара, теряя при этом около 25 % тепла, либо используют специальное коррозионно-стойкое оборудование. Второй путь в настоящее время считается наиболее целесообразным.

Что касается России, то ГеоТЭС не могут играть значительной роли в электроэнергетике страны в целом, но они способны радикально решить задачу энергообеспечения в таких отдаленных районах России, как Камчатка и Курилы, обладающие большими потенциальными запасами геотермальной энергии в виде парогидротерм вулканического происхождения.

В настоящее время в России начато строительство двух коммерческих ГеоТЭС: Мутновской на Камчатке суммарной мощностью (первой и второй очередей) 200 МВт и Океанской в Сахалинской обл. суммарной мощностью (первой и второй очередей) 30 МВт. Эти ГеоТЭС будут сооружены с применением модульных блоков мощностью 4–20 МВт полной заводской готовности, которые изготавливает Калужский турбинный завод.

Для таких ГеоТЭС в энергосистеме предпочтителен базовый режим работы, так как эксплуатационные скважины не допускают резких изменений давления и расхода.

Рассмотренные ГеоТЭС географически «привязаны» к парогидротермам, поэтому районы их применения в России ограничены. Гораздо большее распространение могут иметь ГеоТЭС на термальной воде с температурой 100–200 °С, такая ГеоТЭС должна быть двухконтурной с низкокипящим рабочим телом во втором контуре.

Потенциальные запасы термальных вод с указанной температурой сосредоточены на Северном Кавказе в водоносных пластах на глубине 2,5–5 км и могут обеспечить создание ГеоТЭС общей мощностью в несколько миллионов киловатт. Однако если ГеоТЭС на парогидротермах являются промышленными установками коммерческого применения, ГеоТЭС на термальной воде указанного потенциала требуют в условиях России опытно-промышленного применения. Подобные ГеоТЭС могут

также быть использованы «на хвосте» парогидротермальных ГеоТЭС для утилизации тепла отсепарированной воды, что может увеличить выработку электроэнергии примерно на 20 %. Скважины на месторождениях термальных вод допускают регулирование расхода, поэтому на двухконтурных ГеоТЭС возможно регулирование мощности без потерь теплоносителя.

Развитие геотермальной электроэнергетики на ближайшую перспективу в основном уже определилось. Из ГеоТЭС на парогидротермах это упомянутые Мутновская и Океанская ГеоТЭС, которые уже строятся. Несмотря на их экономическую эффективность, имеются трудности с инвестициями, связанные со сложностью экономической ситуации в электроэнергетике. Тем не менее, есть основания полагать, что до 2005 г. или несколько позднее эти станции достигнут полной проектной мощности. Дальнейшее развитие ГеоТЭС на парогидротермах Камчатки и Курил будет зависеть от степени роста нагрузки в этих районах.

Что касается двухконтурных ГеоТЭС, использующих термальную воду, то целесообразно в период до 2005 г. построить на Северном Кавказе две-три опытно-промышленные ГеоТЭС данного типа мощностью 1,5–3,0 МВт, на основе опыта эксплуатации которых создать в этом регионе до 2015 г. две-три коммерческие ГеоТЭС мощностью до 20–30 МВт.

Структурная схема геотермальной электростанции для вулканических районов приведена на рис. 4.3.

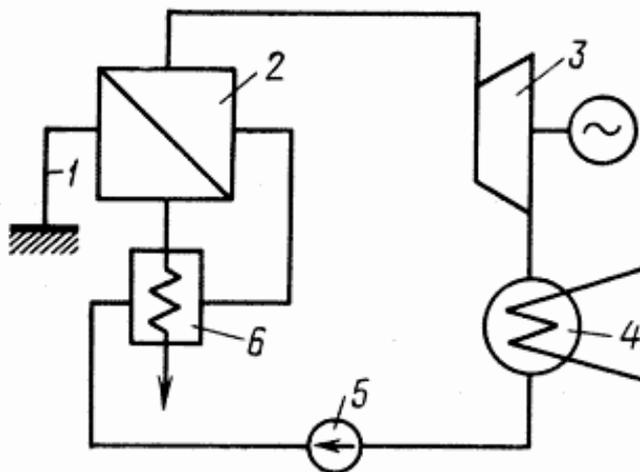


Рис. 4.3. Схема геотермальной электростанции для вулканических районов

Схема электростанции для вулканических районов, располагающих ресурсами термальных вод с температурой 100 °С на глубинах, доступных для современной буровой техники, приведена на рис. 4.4.

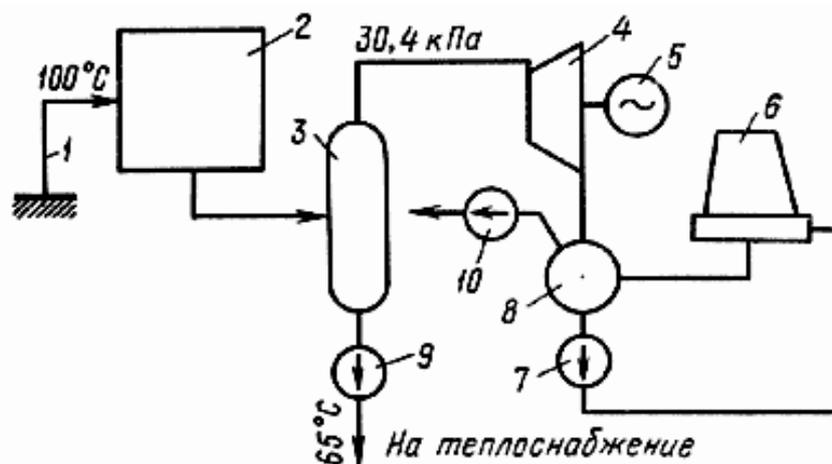


Рис. 4.4. Схема геотермальной электростанции для не вулканических районов

В более отдаленном будущем предполагается использование высокотемпературных слоев мантии (до 1000 °С) для получения пара, в который будет превращаться вода, закачиваемая в искусственно создаваемые «вулканические жерла». Разумеется, что получаемая таким образом энергия будет «чистой» и не будет влиять на биосферу (огромная масса мантии исключает влияние на ее состояние отбираемого тепла).

#### 4.4. Солнечные электростанции

Солнце – источник всей жизни на нашей планете и источник всех видов получаемой на ней энергии. Человек уже давно обращал и обращает вновь и вновь свое внимание на использование солнечной энергии, в том числе для получения электрической энергии, горячей воды и пара в промышленных масштабах. В настоящее время строятся и эксплуатируются солнечные электростанции (СЭС) двух различных типов, различающиеся методами преобразования солнечной энергии в электрическую, а именно термодинамическим и фотоэлектрическим методами. В первом случае солнечное излучение преобразуется в теплоту достаточно высокого потенциала с последующим преобразованием ее в механическую энергию (в турбине или иной тепловой машине), а затем в электрическую (в генераторе). Фотоэлектрический метод основан на прямом и непосредственном преобразовании энергии фотонов в энергию носителей тока, которое осуществляется в полупроводниковых фотоэлектрических преобразователях при их облучении – фотоэффекте.

Фотоэффект открыт Герцем в 1887 г. и детально исследован А.Г. Столетовым в 1888 г. Практическое использование фотоэффекта для получения электроэнергии стало возможным в последнее время в связи с прогрессом физики полупроводников.

При соприкосновении полупроводников с электронной (*n*-типа) и дырочной (*p*-типа) проводимостями на границе образуется контактная разность потенциалов вследствие диффузии электронов. Если полупроводник с дырочной проводимостью освещается, то его электроны, поглощая кванты света, переходят в полупроводник с электронной проводимостью. В замкнутой цепи при этом образуется электрический ток.

В настоящее время наиболее совершенны кремниевые фотоэлементы, на которые действуют как направленные солнечные лучи, так и рассеянный свет. КПД кремниевых фотоэлементов повышается с понижением температуры, т. е. они могут одинаково успешно работать и зимой, и летом. Зимой снижение светового потока компенсируется увеличением КПД за счет интенсификации фотоэффекта.

Из-за сложной технологии изготовления полупроводников и их большой стоимости кремниевые фотоэлементы применяются пока на уникальных установках, например на спутниках Земли.

При принципиальном различии указанных методов преобразования солнечные тепловые (СТЭС) и фотоэлектрические (СФЭС) электростанции имеют ряд общих свойств и ограничений, обусловленных природой используемого источника энергии. Солнечная радиация как энергоисточник при таких положительных свойствах, как практически неограниченные ресурсы, полная экологическая чистота, повсеместная распространенность, имеет и отрицательные свойства: малая плотность (удельная мощность) солнечного излучения (не более  $1 \text{ кВт/м}^2$  земной поверхности), изменения во времени как закономерные (годовой и суточный ход), так и случайные (погодные явления).

Нерегулярный приход солнечной радиации к земной поверхности приводит к нерегулируемой выработке энергии на СЭС. Величина мощности СЭС в данный момент светового дня может быть определена лишь в вероятностных оценках на основе длительного ряда метеорологических наблюдений. При весьма малом удельном весе СЭС в структуре генерирующих мощностей энергосистем (до 2015 г. нереально ожидать интенсивного развития СЭС) этот недостаток нивелируется другими генерирующими мощностями в энергосистеме. В будущем, когда доля СЭС в выработке электроэнергии может существенно вырасти, этот недостаток станет более значим. Для его преодоления исследования и разработки ведутся по трем основным направлениям.

*Первое из них* – перевод части солнечной энергетики (до 10 ТВт суммарной мощности) на космическое базирование с дистанционной передачей энергии на Землю.

Имеющийся научно-технический потенциал космонавтики создает предпосылки для решения задач по использованию энергии Солнца несколькими способами, [10, 11]:

- освещение приполярных районов Земли с помощью орбитальных солнечных отражателей на основе тонкопленочных зеркал;
- повышение производства биомассы на Земле путем увеличения продолжительности светового дня;
- повышение выработки электроэнергии солнечными наземными станциями за счет дополнительной подсветки;
- теплоснабжение энерготехнологических наземных комплексов с помощью лазерного излучения, полученного на орбите путем преобразования солнечного излучения;
- электроснабжение районов Земли с помощью орбитальных энергостанций, преобразующих солнечную энергию в СВЧ-излучение или лазерное излучение и передающих его на Землю. В перспективе с ростом числа и мощности таких энергостанций экономически выгодно будет создавать их из лунных материалов и располагать их на Луне (рис. 4.5).

Идеи электроснабжения Земли с орбитальных солнечных космических электростанций высказывались еще в 60-х годах (в 1960 г. П.А. Варваров в СССР, в 1968 г. П.Е. Глейзер в США). Позднее в 70–80-х гг. как в США, так и в СССР проводились научно-исследовательские работы, направленные на выявление проектного облика, оценку технико-экономических характеристик и перспектив применения подобных энергосистем будущего. Проблемы создания солнечных космических энергетических станций (СКЭС) уже много лет обсуждаются на международных конференциях.

Удельная масса полномасштабных СКЭС гигаваттного уровня, размещенных на геостационарной орбите (высота 36000 км), составит около 10 кг/Вт при классической схеме с кремниевыми фотоэлектрическими преобразователями и СВЧ-системой на базе электронно-вакуумных приборов единичной мощностью 100–1000 кВт (магнетронов, амплитронов). Ожидается, что весь процесс будет характеризоваться достаточно высоким КПД. В настоящее время КПД преобразования энергии солнечными элементами на монокристаллах составляет 11–12 %.

Сообщалось о достигнутом КПД в 16 %. Предполагается, что путем усовершенствования полупроводниковых элементов может быть достигнут КПД 20 %. Монокристаллы из арсенида галлия обеспечивают КПД 14 %, а на отдельных ячейках получен КПД 18 %.

Расчетные значения КПД преобразования энергии на космических станциях приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

| КПД различных стадий получения и передачи энергии      | КПД, достигнутый в настоящее время, % | КПД, ожидаемый при существующей технологии, % | КПД, ожидаемый за счет дальнейших разработок*, % |
|--|---------------------------------------|---|--|
| Генерации УКВ-потока энергии                           | 76,7*                                 | 85,0  | 90,0   |
| Передачи энергии с выхода генератора до створа антенны | 94,0                                  | 94,0  | 95,0   |
| Улавливания и детектирования                           | 64,0                                  | 75,0  | 90,0   |
| Суммарный  | 26,5**                                | 60,0  | 77,0   |

\* Такое значение продемонстрировано на частоте 3000 МГц при непрерывной генерации с уровнем мощности 300 кВт.

\*\* На частоте 2450 МГц (длина волны 12,2 см).

Космические солнечные станции могут быть спроектированы на полезную электрическую мощность 3–20 ГВт и более. Размер солнечной батареи станции с полезной выходной мощностью 5 ГВт можно оценить исходя из КПД, равного 15 %. Соответствующая такой станции суммарная поверхность солнечной батареи имеет примерно 20 км<sup>2</sup>. Передающая антенна должна иметь диаметр 1 км, приемная антенна – 7–10 км. Плотность пучка УКВ-волн со станции на Землю при этом составит всего  $\frac{1}{5}$  нормальной плотности солнечной энергии, поэтому он не будет представлять опасности ни для летательных средств, ни для птиц. Вопрос, связанный с радиопомехами, не должен стать серьезной проблемой.

Технические проблемы состоят только в улучшении достигнутой технологии и совсем не требуют разработки принципиально новых решений. Возникли и обсуждаются два основных вопроса:

1. Не будут ли солнечные элементы разлагаться под воздействием радиации и разрушаться микрометеоритами?
2. Не будет ли энергия, затраченная на изготовление станции и запуск ее на орбиту искусственного спутника, превышать энергию, которую солнечная станция выработает в течение срока службы?

Авторы такого рода проектов доказывают, что вполне достижим срок службы 30 лет, а затраченная энергия окупится уже в первый год работы станции.

Основной составляющей стоимости проекта является стоимость челночных полетов космических ракет для переброски станции на орбиту искусственного спутника. Запуск прототипа солнечной станции мощностью в несколько сотен МВт оценивается удельными затратами в 1920–1940 долл./кВт. Для последующих промышленных станций эти расходы должны уменьшиться до 800 долл./кВт.

В настоящее время рассматриваются по крайней мере три концепции энергоснабжения Земли из космоса в середине XXI в. на уровне 10 ТВт с привлечением Луны как источника сырьевых ресурсов.

1. Развертывание сотен СКЭС на геостационарной орбите с размерностью до 10 ГВт. На Луну доставляется только горнодобывающее оборудование и комплекс переработки лунного грунта для создания основных элементов СКЭС, транспортируемых затем на рабочую орбиту. Снижение общего грузопотока с Земли достигается за счет длительного многократного использования лунного комплекса, использования в системе транспортировки двигательных установок, работающих на топливах или рабочих телах, добываемых из лунного грунта ( $O_2$ , Al, Na,  $CH_4$  и т. п.). Кроме того, доставка с Луны на геостационарную орбиту требует примерно в 3 раза меньших энергозатрат по сравнению с доставкой с поверхности Земли (благодаря меньшим силам тяготения).

2. Создание на поверхности Луны крупногабаритных энергоизлучательных СВЧ-станций с питанием фазированных антенных решеток от фотоэлектрических преобразователей с характерными габаритами апертур до 100 км и мощностью единичного комплекса 1 ГВт. В данном варианте для непрерывного энергообеспечения любых наземных потребителей в любое время суток при различных условиях освещенности лунных комплексов требуется дополнительное развертывание значительного числа солнечных отражателей на окололунных орбитах и СВЧ-отражателей на околоземных орбитах, суммарная масса которых составляет ~200 тыс. т.

Преимуществом этого варианта является отсутствие этапа обратной космической транспортировки. Благодаря большим апертурам передающих антенн формируется луч существенно меньшей расходимости по сравнению с вариантом орбитального базирования СКЭС ( $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  рад), что позволяет снизить диаметр наземных приемных антенн примерно на порядок (до 1 км) и уменьшить их стоимость. В данном варианте для развертывания энергокомплексов суммарной мощностью 10 ТВт в течение 30 лет требуется переработка 300 млн т. грунта, включая переработку грунта для производства ракетного топлива, необходимого для доставки пассивных отражателей к Земле.

3. Создание промышленного комплекса на Луне по добыче гелия-3 с доставкой его на Землю на термоядерные электростанции с экологически «чистым» топливным циклом  $D + {}^3\text{He}$  при производительности  $1000 \text{ т } {}^3\text{He}$  в год, что достаточно для обеспечения наземных термоядерных станций суммарной мощностью 10 ТВт. При  ${}^3\text{He}$  имеется большое число попутных продуктов. Например, при выработке на  $1 \text{ кг } {}^3\text{He}$  из лунного грунта будут получены 6100 кг водорода, 3300 кг воды, 1600 кг метана, 500 кг азота и др.

Все «лунные» концепции требуют исключительно больших объемов и темпов переработки грунта.

*Второй путь* развития солнечной энергетики, позволяющий преодолевать основной недостаток – временную нестабильность, – строительство так называемых солнечно-топливных электростанций. Суть этой концепции состоит в сочетании солнечной тепловой электростанции с маневренной топливной установкой, компенсирующей недостаток тепловой энергии, подаваемой в парогенератор в период, когда приход солнечной энергии отсутствует или недостаточен. Такие комбинированные солнечно-топливные станции имеют достаточно стабильные характеристики и могут участвовать в балансе мощностей.

На сегодня не существует определенного мощностного ряда СЭС. В принципе может быть создана СЭС на любую заданную мощность, которая будет зависеть от площади лучевоспринимающих поверхностей СЭС. Поэтому такие характеристики, как, например, выработка электроэнергии, удобно представлять в удельном выражении в расчете на  $1 \text{ м}^2$  лучевоспринимающей поверхности.

*Третий путь* развития солнечной энергетики – использование явления фотосинтеза для улавливания и накопления энергии. Некоторые из проектов пока могут рассматриваться только как гипотетические, но некоторые – уже как практически осуществимые. Общим для всех проектов является стремление сократить тот длительный промежуток времени, который отделяет падение на Землю солнечного света и развития, благодаря ему, различных организмов от образования из этих организмов ископаемого топлива в виде угля, нефти и газа (подробнее см. в 4.6).

Думая о будущем использовании энергии, инженеры вновь обращаются к старым идеям. Одна из них состоит в создании искусственного ветра за счет нагрева большой поверхности. Полученный поток воздуха будет вращать турбины.

Солнечная энергия может непосредственно использоваться для нагрева воды в бытовых условиях, обогрева зданий и кондиционирования воздуха. Преимуществом использования солнечной энергии для этих целей является абсолютная экологическая чистота. Используя энергию для бытовых нужд, следует решить вопрос о наиболее рацио-

нальном ее применении, об уменьшении потерь энергии за счет улучшения конструкции зданий и улучшения теплоизоляции [12].

Большое внимание уделяется перспективе использования солнечной энергии в промежуточном процессе получения топлива. Так, на упоминавшихся выше конференциях высказывались соображения о том, что, возможно, в будущем будут построены крупные солнечные станции, энергия которых может быть использована для синтеза топлива на основе углеводорода, например метанола, известняка и воды. Такое производство жидкого топлива позволит избежать проблемы хранения и передачи энергии на значительные расстояния. Такое жидкое топливо может затем распределяться и использоваться как обычное.

При оценке энергетики будущего много внимания уделяется роли солнечной энергии в решении энергетического кризиса. Уже в наши дни гелиоэнергетика развивается ускоренными темпами. Сначала 90-х гг. темпы роста гелиоэнергетики составляют 16 % в год. В то время как мировое потребление нефти растет на 15 % в год.

Интересны примеры использования солнечной энергии разных странах, [3].

В условиях Великобритании жители сельской местности покрывают потребность в тепловой энергии на 40–50 % за счет использования энергии Солнца.

В Германии (под Дюссельдорфом) проводились испытания солнечной водонагревательной установки площадью коллекторов 65 м<sup>2</sup>. Эксплуатация установки показала, что средняя экономия тепла, расходуемого на обогрев, составила 60 %, а в летний период – 80–90 %. Для условий Германии семья из 4 человек может обеспечить себя теплом при наличии энергетической крыши площадью 6–9 м<sup>2</sup>.

Современные солнечные коллекторы могут обеспечить нужды сельского хозяйства в теплой воде в летний период на 90 %, в переходный период – на 55–65 %, в зимний – на 30 %.

В Австралии установлено, что для обеспечения 80 % теплой водой в жилых сельских домах на 1 человека требуется установка солнечных коллекторов с поверхностью 2–3 м<sup>2</sup> и емкостью бака для воды 100–150 л. Установка площадью 25 м<sup>2</sup> с емкостью для нагретой воды на 1000–1500 л обеспечивает тепловой водой 12 человек или небольшой сельский двор.

Наиболее эффективно в странах ЕС солнечные энергоустановки эксплуатируются в Греции, Португалии, Испании, Франции: выработка энергии солнечными энергоустановками составляет соответственно 870 000, 290 000, 255 200, 174 000 МВт·ч в год.

В целом по Европейскому союзу в 1992 г. было выработано 185 600 МВт·ч.

Наибольшей суммарной площадью установленных солнечных коллекторов располагают: США – 10 млн м<sup>2</sup>, Япония – 8 млн м<sup>2</sup>, Израиль – 1,7 млн м<sup>2</sup>, Австралия 1,2 млн м<sup>2</sup>. В настоящее время 1 м<sup>2</sup> солнечного коллектора вырабатывает электрической энергии:

- 4,86–6,48 кВт·ч в сутки;
- 1070–1426 кВт·ч в год.

Нагревает воды в сутки:

- 420–360 л (при 30 °С);
- 210–280 л (при 40 °С);
- 130–175 л (при 50 °С);
- 90–120 л (при 60 °С).

Экономит в год:

- электроэнергии –1070–1426 кВт·ч;
- условного топлива –0,14–0,19 т;
- природного газа –110–145 м<sup>3</sup>;
- угля – 0,18–0,24 т;
- древесного топлива – 0,95–1,26 т.

Площадь солнечных коллекторов 2–6 млн м<sup>2</sup> обеспечивает выработку 3,2–8,6 млрд кВт·ч энергии и экономит 0,42–1,14 млн т. у. т. в год.

За 2002 г. мощность фотоэлектрических установок, прямо преобразующих энергию Солнца, удвоилась и достигла 1 млн кВт. Сегодня в США действует программа «Миллион крыш», в Германии – «Сто тысяч крыш». При этом владельцы домашних солнечных батарей получают льготы при оплате за электричество.

Интересные примеры использования солнечной энергии в быту приведены в [12]. Благоприятные условия во многих развивающихся странах (большое количество солнечных дней в году) позволяют использовать солнечную энергию для производственных и бытовых целей.

Несомненно, что человечество в будущем с еще большей заинтересованностью будет обращаться к Солнцу – главному источнику энергии, которую и будет применять различными путями.

#### **4.5. Ветровые электростанции**

Ветровая энергия продолжительное время использовалась в мореплавании, а также для приведения в движение мельничных колес. Сравнительно недавно она начала использоваться для выработки электроэнергии. Большинство ветроэнергетических установок имеет мощность несколько киловатт, и используются они в отдаленных местах, например на морских маяках. Во время второй мировой войны на холме

Грандпа в штате Вермонт, США, была построена ветроэнергетическая установка мощностью 1,25 МВт, которая успешно работала несколько недель, в течение которых она выработала 61,78 МВт·ч электроэнергии, затем одна из лопастей ротора сломалась и установку не стали восстанавливать, по-видимому, из-за дефицита материалов и экономии средств в военное время.

Со времени энергетического кризиса 1973–1974 гг. в развитие ветровой энергетики были вложены значительные средства. Было построено несколько экспериментальных установок разной конструкции. Стоимость электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками, все еще высока по сравнению с электроэнергией, получаемой на базе органического топлива (табл. 4.5). Кроме того, выявились некоторые характерные для этого источника первичной энергии недостатки. Тем не менее, ветровую энергию следует рассматривать как энергетический ресурс.

Легко показать, что выходная мощность установки пропорциональна площади лопастей ветрового ротора и кубу скорости ветра (обычно небольшой). В этой связи и в связи с тем, что плотность воздуха в 846 раз ниже плотности воды, ветроэнергетические установки большой мощности (в МВт-ом диапазоне) должны быть по своим габаритам очень крупными по сравнению с гидротурбинами.

Одной из самых сложных проблем, препятствующих широкому распространению ветроэнергетических установок, является постоянно меняющаяся скорость ветра. Даже высоко в горах нельзя рассчитывать на стабильную скорость ветра. Кроме того, электроэнергия начинает вырабатываться этими установками тогда, когда дует ветер, а не тогда, когда она необходима. Как отмечалось в 4.2, к сожалению, удобного, эффективного и экономичного способа запастись электроэнергией в большом количестве еще нет. Кроме идеи, реализуемой в ГАЭС, были выдвинуты предложения по использованию получаемой в часы внепиковой части графика нагрузки электроэнергии для электролиза воды и создания запаса получаемого таким образом водорода и кислорода с тем, чтобы потом использовать реакцию соединения этих газов в топливном элементе для производства электроэнергии. Развитие этой технологии находится в начальной стадии, но, возможно, в будущем она станет экономически приемлемой.

В начале 2002 г. в прессе появилось сообщение о начале реализации почти фантастического проекта, в котором будет осуществлен синтез гелио- и ветроэнергетики, свободный от зависимости от погодных условий, времени суток и сезона.

Башня высотой в километр (это вдвое выше CN Tower в Канаде и Останкинской телебашни) скоро появится в Австралии. Ее уже окрестили восьмым чудом света. Этот грандиозный проект затеяла компания EnviroVision, чтобы решить проблему электроснабжения двухсот домов. Проект состоит в возведении железобетонной трубы, внутри которой будет установлена турбина, подключенная к электрогенератору. Вращать турбину придется потоку горячего воздуха, поступающему из огромного «парника» диаметром в семь километров, который будет построен вокруг башни. К тому времени, когда поток дойдет до основания башни, его скорость достигнет 60–65 км/ч, а его температура повысится до 65 °С.

В отличие от обычных ветряков, простаивающих в часы безветрия, Солнечная башня будет работать круглые сутки: ночью из «солнечных аккумуляторов» будет освобождаться тепло, накопленное за день, и энергия горячего воздуха продолжит вращать турбину. Строительство башни стоимостью 700 миллионов долларов уже началось в 2002 г.

Австралийский инженер Брайн Робертс намерен получать электроэнергию от высоких воздушных потоков, которые дуют постоянно и с большой скоростью. Для этого он собирается запускать воздушные змеи с ротором, а энергия будет передаваться на землю по трем проводам, удерживающим такой змей на привязи. Инженер уже получил от местных авиационных властей разрешение на запуск своей конструкции на высоту до 1600 м, а пока испытывает уменьшенную модель на высоте около 120 м.

В России наиболее перспективные зоны для использования энергии ветра находятся на прибрежной полосе шириной 50–100 км вдоль морей Северного Ледовитого океана, в отдельных прибрежных районах Дальнего Востока, в районах Балтийского, Черного и Каспийского морей. В указанных зонах среднегодовая скорость ветра равна 5–6 м/с и более.

Развитие системной ветроэнергетики в мире началось в начале 70-х годов.

Наибольшая доля (до 3 %) в производстве электроэнергии ВЭС получена в 1993 г. в Дании, где ветровые турбины рассеяны по всей стране. Строительство современных ВЭС началось здесь в конце 70-х годов. А в начале 80-х в штате Калифорния (США) наблюдается особенно интенсивный рост ВЭС. Принятие здесь закона о налоговых льготах на инвестиции в возобновляемые источники энергии в дополнение к федеральным налоговым льготам создало благоприятную обстановку. В результате Калифорния превратилась в мирового лидера по производству электроэнергии из ветра. США могут потерять это лидерство, так в ЕС поставили цель вырабатывать в 2005 г. 8 тыс МВт ветровой электроэнергии, что составляет 1 % потребностей ЕС в электроэнергии. Дания,

Германия и Нидерланды должны довести к этому времени выработку электроэнергии из ветра по крайней мере до 5000 МВт.

Стоимость ветровой энергии снижается на 15 % в год и даже сегодня может конкурировать на рынке, а главное – имеет перспективы дальнейшего снижения в отличие от стоимости энергии, получаемой на АЭС (последняя повышается на 5 % в год); при этом темпы роста ветроэнергетики в настоящее время превышают 25 % в год. Использование энергии ветра в различных государствах набирает силу, что находит подтверждение в табл. 4.10.

Таблица 4.10

*Развитие ветроэнергетики в странах мира [3]*

| Государство | Мощность ветроэлектростанций, введенных в 1995 г., МВт | Суммарные действующие мощности ветроэлектростанций по состоянию на 1996 г., МВт |
|-------------|--|---|
| Германия    | 500  | 1132  |
| Индия       | 375  | 576   |
| Дания       | 98   | 637   |
| Нидерланды  | 95   | 219   |
| Испания     | 58   | 133   |
| США         | 53   | 1654  |
| Швеция      | 29   | 69  |
| Китай       | 14   | 44  |
| Италия      | 11   | 33  |
| Другие      | 57   | 370   |
| Всего       | 1289   | 4897  |

Средняя единичная мощность эксплуатируемых в мире ВЭУ составляет ~140 кВт. Примерно до середины 80-х годов ветроэлектростанции создавались на базе ВЭУ единичной мощностью менее 100 кВт. С середины 80-х годов стали внедряться ВЭУ мощностью 100–300 кВт, а к концу 80-х – и ВЭУ 600–700 кВт. На данном этапе на базе накопленного опыта создаются для серийного производства новые модели ВЭУ мощностью 500–1500 кВт. Сейчас достигнута единичная мощность серийного горизонтально-осевого агрегата до 2,5 МВт. Создан прототип ветрогенератора мощностью 4,5 МВт с диаметром ветроколеса 112 м. Практически весь мировой парк ВЭУ состоит из крыльчатых установок. Работы по другим видам ВЭУ, а также по крыльчатым ВЭУ предельной мощности проводятся, однако широкого развития они не получили и перспективы их использования не ясны.

Таким образом, к настоящему времени мировая системная ветроэнергетика превратилась в отрасль электроэнергетики, вносящую в отдельных странах ощутимую долю в производстве электроэнергии.

Практическое развитие ветроэнергетики в России находится на самом начальном этапе. Разрабатываются и создаются несколько моделей крыльчатых ВЭУ мощностью 250–300 кВт, одна модель крыльчатой ВЭУ мощностью 1000 кВт и модель ВЭУ с вертикальной осью вращения мощностью 1250 кВт. В 1991–1992 гг. смонтированы две ВЭУ АВЭ-250 на полигонах в поселке Дубки (Чиркейская ГЭС, Дагестан) и в Иван-городе (Ленинградская обл.), и одна – на полигоне НПО «Ветроэн» в Геленджике. В 1993 г. АО «Комиэнерго» и НПО «Ветроэн» смонтирован АВЭ-250 в г. Воркуте.

В 1993 г. в Новороссийске построена опытно-экспериментальная ВЭУ ГП-250. Однако после первых испытаний ВЭУ отправлена на завод для доработки и дополнительных стендовых испытаний.

В 1994 г. на опытно-экспериментальной Калмыцкой ВЭС смонтирована первая установка мощностью 1000 кВт.

В системе РАО «ЕЭС России» в настоящее время в стадии строительства находятся три ВЭС:

- 1) экспериментальная база нетрадиционной энергетики мощностью 5 МВт (поселок Дубки, Чиркейская ГЭС, Дагэнерго);
- 2) Заполярная ВЭС мощностью 8 МВт (г. Воркута, Комиэнерго);
- 3) Калмыцкая ВЭС мощностью 22 МВт (Калмэнерго);

Проектируются семь ВЭС: Магаданская 50 МВт (Магаданэнерго), Дагестанская 6 МВт (Дагэнерго), Ленинградская 25 МВт (Ленэнерго), Приморская 30 МВт (Дальэнерго), Морская 30 МВт (Карелэнерго), Новороссийская 2 МВт (Краснодарэнерго), Западно-Приморская 30 МВт (Янтарьэнерго).

Один из проектов, разработанных в США, сводится к строительству 150 башен высотой по 260 м с трехлопастными роторами, приводящими во вращение генераторы мощностью примерно по 1,5 МВт [3]. Эти ветроустановки предлагается разместить по одной на квадратную милю. В результате предусматривается получить общую установленную мощность около 225 ГВт, что составило бы существенную долю суммарной установленной мощности всех электростанций США. Исползованию подобных ветроэнергетических установок препятствуют три фактора:

- не решена удовлетворительно проблема аккумулирования электроэнергии, выработанной во внепиковое время;
- инженерно-техническое исполнение высокоскоростных, с переменной частотой вращения и мощных ветрогенераторов, валов, регуляторов и т. п. еще несовершенно;

- против реализации этого проекта, вполне возможно, возникнут также возражения эстетического и экологического порядка.

Крупномасштабное применение ветроэнергетических установок на каком-то ограниченном участке может вызвать глубокие климатические изменения в данном районе. Например, отбор существенной части ветровой энергии при типовом шторме в районе Среднего Запада США (примерно  $4 \cdot 10^{12}$  Дж), возможно, сократил бы периодичность сильных штормов в этих широтах и силу их ветра. Разумеется, в этом есть положительная сторона. С другой стороны, остальные особенности климата на Среднем Западе могут зависеть от штормовых ветров в той форме, в которой они сейчас существуют. Снижение силы штормовых ветров могло бы изменить режим выпадения осадков до такой степени, что некоторые территории в восточных районах Среднего Запада США могли бы стать непригодными для сельского хозяйства, а для остальных районов могла бы стать необходимой ирригация, как на Дальнем Западе страны. Взаимодействие различных атмосферных явлений является очень сложным процессом и до конца не изучено. Любые крупномасштабные изменения природных явлений на Земле необходимо осуществлять осторожно и с полным учетом того, какие последствия для окружающей среды они за собой повлекут.

Обобщая, можно заключить, что ветровая энергия полезна в качестве дополнительного источника для производства электроэнергии, но в ближайшее время она будет находить лишь ограниченное применение. Научно-технический прогресс, особенно в области аккумуляции электроэнергии, может изменить ситуацию, но тогда нужно будет оценивать взаимосвязь крупномасштабного отбора энергии ветра с возможными климатическими изменениями.

#### **4.6. Биоэнергетика**

Биоэнергетику можно рассматривать как один из вариантов гелиоэнергетики (см. 4.4), в основе которого лежит фотосинтез и последующее высвобождение запасенной в биомассе солнечной энергии в виде тепловой и электрической энергии. Биомасса – наиболее дешевая и крупномасштабная форма аккумуляции возобновляемой энергии. Термин «биомасса» включает любые материалы биологического происхождения, включая продукты жизнедеятельности и отходы органического происхождения.

Одна из сложнейших проблем на пути к осуществлению заманчивой идеи использования растений в качестве основного энергетического источника заключается в низкой эффективности фотосинтеза как способа пре-

вращения солнечной энергии в химическую. Считается, что благодаря фотосинтезу ежегодно в пересчете на сухой вес образуется около 155 млрд т органической массы, главным образом целлюлозы, которую можно использовать или непосредственно как топливо, или как продукт для получения топлива. Из-за низкого КПД энергетического преобразования пришлось бы значительно увеличить посевные площади для получения энергии в необходимых количествах. Поэтому весьма важно проводить исследования, направленные на увеличение КПД преобразования, использовать наиболее удачные для этих целей растения, по возможности создавать наиболее оптимальный искусственный газовый состав и т. п. Например, если выращивать кукурузу с целью получения энергии, а не на корм скоту, то стоимость такой энергии будет сравнима с нынешней стоимостью ископаемого топлива в США. Если использовать для этой цели хвойный лес, в котором бы на акр (1 акр = 0,4 га) приходилось 6 тыс деревьев, и «собрать» урожай раз в 12 лет, то вследствие замедленного роста деревьев и некоторых других факторов стоимость производимой из них энергии возрастает примерно вдвое и составит около 3 долл. за 1 млн британских единиц тепла ( $1 \text{ Btu} = 1,05506 \cdot 10^3 \text{ Дж} \approx 1,055 \text{ кДж}$ ). Многолетние растения имеют одно неопределимое преимущество перед однолетними: урожай с них можно собирать в течение всего года в соответствии с потребностями, и при этом не возникает проблем, связанных с созданием огромных хранилищ «энергетических урожаев», которые заготавливают только определенный сезон. Поэтому для производства энергии обратились к быстро растущим листовым деревьям, у которых после порубки корни дают побеги, что позволяет избежать ежегодных посадок.

На экспериментальных участках заброшенных пахотных земель в Центральной Пенсильвании выращиваются гибридные тополя. Один из гибридов, высаженный в количестве примерно 3700 деревьев на акр, «производит» энергию стоимостью от 1,25 до 11,45 долл. за 1 млн Btu (по сравнению с нынешней стоимостью 1,97 долл. за 1 млн Btu для нефти и 1,31 долл. за 1 млн Btu для угля). Такая плантация может давать около 120 млн Btu с акра в год при КПД энергетического преобразования порядка 0,6 %. Для обеспечения топливом средней электростанции мощностью 400 МВт потребуется плантация площадью 30 тыс акров. Для снабжения топливом, получаемым на «энергетических плантациях» всех электростанций в США, потребуется не более 160 млн акров даже при коэффициенте преобразования солнечной энергии в топливо, не превышающем 0,4 %.

Ежегодный прирост органического вещества на Земле эквивалентен производству такого количества энергии, которое в десять раз больше годового потребления энергии всем человечеством на современном этапе (табл. 4.11).

Таблица 4.11

*Источники биомассы и примеры переработки [3]*

| Источник биомассы            | Производимое биотопливо | Технология            | Примерный КПД преобразования | Потребность в энергии (н – необходимо; о – оптимально) | Примерный энергетический выход биотоплива, МДж/кг |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|--|---|
| Лесоразработки               | Тепло                   | Сжигание              | 70                           | Сушка (0)  | 16–20   |
| Отходы переработки древесины | Тепло                   | –                     | 70                           | Сушка (0)  | 16–20   |
|                              | Газ<br>Нефть<br>Уголь   | Пиролиз               | 85                           | Сушка (0)  | 40*<br>40<br>20                                   |
| Зерновые                     | Солома                  | Сжигание              | 70                           | Сушка (0)  | 14–16***  |
| Сахарный Тростник, сок       | Этанол                  | Сбраживание           | 80                           | Тепло (н)<br>Электроэнергия (0)                        | 3–6   |
| То же, отходы                | Жмых                    | Сжигание              | 65                           | Сушка (0)  | 5–8   |
| Навоз (тропики)              | Метан                   | Анаэробное разложение | 50                           | -  | 4–8***  |
| То же (умеренный пояс)       | Метан                   | То же                 | 50                           | Тепло (н)  | 2–4**   |
| Городские стоки              | Метан                   | То же                 | 50                           | Тепло  | 2–4***  |
| Мусор                        | Тепло                   | Сжигание              | 50                           | –  | 15–16***  |

\* Суммарная величина; имеются затраты биогаза на обогрев установки.

\*\* Без учета азота.

\*\*\* Сухой материал.

Источники биомассы могут быть разделены на несколько основных групп:

- 1) продукты естественной вегетации (древесина, древесные отходы, торф, листья и т. п.);
- 2) отходы жизнедеятельности людей, включая производственную деятельность (твердые бытовые отходы, отходы промышленного производства и др.);
- 3) отходы сельскохозяйственного производства (навоз, куриный помет, стебли, ботва и т. д.);
- 4) специально выращиваемые высокоурожайные агрокультуры и растения.

Однако наличие биомассы даже в большом количестве еще не означает решения проблемы получения из нее различных продуктов и ве-

ществ, в том числе и топлива. Непереработанная биомасса приносит непоправимый вред окружающей среде.

В наши дни древесные отходы уже находят применение: созданы установки, осваивается технология производства генераторного газа и его сжигание. Специалисты считают, что при правильном использовании древесины, древесных отходов и быстрорастущих лесных насаждений может быть покрыто 15 % потребностей в топливе. При современном объеме потребления это составит около 6 млн т. у. т.

В настоящее время использование биомассы дает в Китае более 6 % всей потребляемой тепловой энергии, в США – 6 %, в странах ЕС – 5,7 %, в Бразилии – 32,9 %.

Переработка биомассы в топливо осуществляется по трем основным направлениям.

*Первое:* биоконверсия, т. е. разложение органических веществ растительного и животного происхождения в анаэробных (без доступа воздуха) условиях специальными видами бактерий с образованием газообразного топлива (биогаза) и/или жидкого топлива (этанолола, бутанола и др.). В настоящее время в Бразилии на этаноле, полученном в результате разложения биомассы из отходов сахарного тростника, работает городской автотранспорт и многие личные автомобили. В США этанол получают из отходов кукурузы. Этанол является хорошим заменителем бензина, при этом в отличие от нефти биомасса является достаточно быстро возобновляемым ресурсом. К биоконверсии относится также получение тепловой энергии при аэробном микробиологическом окислении органических веществ. Так по научному называется компостирование и биоподогрев, о чем знает каждый огородник.

*Второе:* термохимическая конверсия (пиролиз, газификация, быстрый пиролиз, синтез) твердых органических веществ (дерева, торфа, угля) в «синтез-газ», метанол, искусственный бензин, древесный уголь.

*Третье:* сжигание отходов в котлах и печах специальных конструкций. В мире сотни тонн таких отходов сжигаются с регенерацией энергии. Прессованные брикеты из бумаги, картона, древесины, полимеров, древесных опилок, бытового мусора по теплотворной способности сравнимы с бурным углем.

К этому направлению можно было бы отнести и сжигание дров в бытовых печах. Но дрова почему-то выведены из понятия биомассы, хотя одна шестая часть годового потребления топлива в мире приходится на древесину и около трети всех срубленных деревьев используется для приготовления пищи и отопления. Реальное потребление древесного топлива в три раза превышает уровень, который показывает статистика. Около половины населения мира использует для приготовления пищи (а это 4/5 расхода в домашнем хозяйстве) и отопления главным образом дрова.

## ГЛАВА 5. НЕТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Большие надежды в устранении угрозы грядущего энергетического голода возлагаются на освоение новых источников энергии, а также на увеличение мощности уже освоенных способов непосредственного преобразования тепловой, ядерной и химической энергии в электрическую. Они позволят радикально улучшить использование веществ, вовлеченных в энергетические процессы, и значительно увеличить доступные для практического использования ресурсы планеты.

Непосредственное получение энергии уже широко используется в автономных источниках энергии небольшой мощности, для которых показатели экономичности работы не имеют решающего значения, а важны надежность, компактность, удобство в обслуживании, небольшой вес и др. Они используются в основном для сбора информации в труднодоступных местах Земли и в космосе, на самолетах, судах, космических аппаратах и т. п. Традиционные генераторы, основанные на сгорании химического топлива и масштабном способе преобразования тепловой энергии в электрическую, как правило, требуют систематического обслуживания, поэтому они не могут быть использованы для рассматриваемых целей.

Суммарная установленная мощность миллионов автономных источников электрической энергии, несмотря на их скромные размеры, превосходит мощность всех стационарных электростанций вместе взятых. В этих источниках используются 2 типа эффектов:

- физические, проявляющиеся в различных видах – синтез легких элементов, фотоэффект, термоэлектричество, и др. (термоядерные реакторы, термоэлектронные генераторы, фотоэлектрические батареи, термоэмиссионные генераторы и др.);
- химические, проявляющиеся в выделении энергии при окислительно-восстановительных реакциях химических реагентов (гальванические элементы, аккумуляторы, электрохимические генераторы).

### 5.1. Термоядерная энергетика

Одним из реальных путей решения проблемы энергообеспечения населения Земли является овладение управляемым синтезом легких элементов (управляемый термоядерный синтез – УТС), т. к. при этом будет получен практически неисчерпаемый источник энергии.

Основная доля энергии звезд и Солнца, как удалось доказать Гансу Бете в 1939 г., выделяется при синтезе легких элементов. Если на Земле

удастся осуществить управляемую реакцию синтеза легких элементов (дейтерия, трития), то это, образно говоря, будет означать появление на нашей планете искусственных маленьких солнц, способных обеспечить энергией многие поколения.

Реакция синтеза изотопов водорода – дейтерия и трития – протекает по схеме, представленной на рис. 5.1.

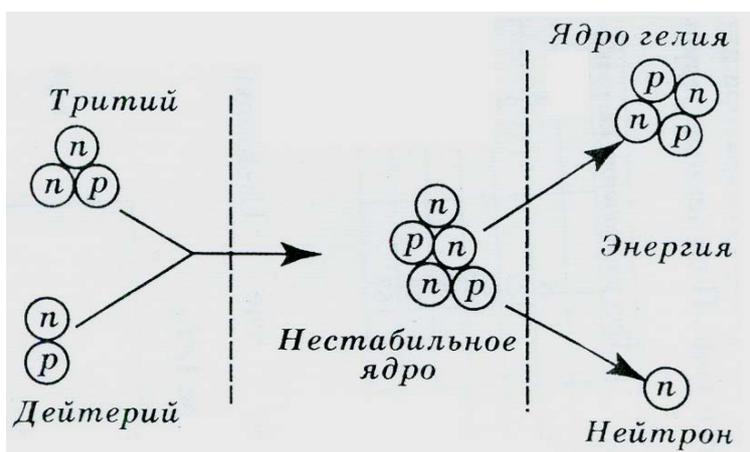


Рис. 5.1. Реакция синтеза изотопов водорода – дейтерия и трития

Очень важно, что топливо для реакторов синтеза легкодоступно. В природе дейтерий содержится в воде: один из каждых 6700 атомов водорода имеет дейтериевое ядро. Тритий распространен меньше. Он радиоактивен и имеет период полураспада 12,3 г., так что в природе в больших количествах он не встречается. Этот изотоп, однако, может быть искусственно получен из имеющегося в изобилии природного сырья в виде отложений металлического лития.

Ядерные реакторы синтеза обещают также быть экологически безвредными. Случайный запуск реактора не возможен, так как количества дейтерия и трития в установке в любой данный момент очень малы. При неконтролируемом горении все имеющееся топливо быстро израсходуется и процесс прекратится. Кроме того, при синтезе между ядрами дейтерия и трития рождаются только быстрые нейтроны и  $\alpha$ -частицы (ядра гелия), которые нерадиоактивны. Основные проблемы, связанные с радиацией, возникают из-за вторичных процессов. Энергичные нейтроны могут вызывать трансмутацию ядер в материалах, образующих структуру реактора и его компонентов, и они могут становиться радиоактивными. Однако исследования показали, что правильный выбор конструкционных материалов позволит поддерживать такую наведенную активность на очень низком уровне.

Ядерный синтез был известен за несколько лет до открытия явления деления ядер. В 1931 г. Гарольд Юра впервые выделил дейтерий из воды и с помощью небольших ускорителей показал, что реакция синтеза двух ядер дейтерия сопровождается выделением энергии.

Несмотря на многие годы исследований по управляемому синтезу, создание промышленного реактора – дело достаточно отдаленного будущего. Чтобы преодолеть естественное электрическое отталкивание, ядра должны обладать значительной энергией. Температура дейтерий-тритиевой смеси должна достигать, по крайней мере, 50 млн градусов (для сравнения: температура в центре Солнца составляет около 15 млн °С). Эта температура, измеренная в электрон-вольтах (эВ), равна 4500 эВ. При такой температуре электроны оторваны от ядер (фактически для ионизации водорода нужно только 13,56 эВ). Дейтерий-тритиевая смесь в этом случае представляет собой плазму – электрически нейтральный газ, состоящий из положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов.

Поддержание такой высокой температуры в плазме было до сих пор одной из важнейших задач термоядерных исследований. Энергия теряется из плазмы в результате нескольких процессов. Например, заряженные частицы в плазме излучают электромагнитную энергию при столкновениях друг с другом. Термоядерные реакции рождают огромное число быстрых нейтронов, которые легко покидают плазму. Излучение, теплопроводность и турбулентная конвекция частиц плазмы – это только некоторые из возможных процессов, приводящих к охлаждению плазмы и снижению ее температуры.

Можно постоянно поддерживать «плазменный огонь», подводя энергию извне с помощью радиочастотных волн или пучков высокоэнергичных нейтральных частиц. Однако существует эффективный самоподдерживающийся источник дополнительного тепла – быстрые  $\alpha$ -частицы, которые рождаются в плазме. Эти ядра гелия являются «золотой» термоядерных реакций. Они рождаются с энергией около 3,5 млн эВ и легко удерживаются магнитным полем, поскольку имеют двойной положительный заряд. При столкновениях с частицами плазмы  $\alpha$ -частицы отдают им свою энергию в виде тепла. До сих пор ни в одном эксперименте не удавалось генерировать достаточное число энергичных  $\alpha$ -частиц, чтобы полностью скомпенсировать потери тепловой энергии.

Исследователи называют общее среднее время, за которое тепло уходит из плазмы, временем удержания энергии или энергетическим временем  $\tau$ . Произведение  $\tau$  и плотности плазмы  $n$  представляет способность плазмы удерживать свое тепло и называется параметром качества удержания. Чтобы термоядерные реакции могли самоподдерживаться и давать

полезную энергию, произведение  $nt$  должно быть больше  $2 \cdot 10^{20}$ , если выразить время в секундах, а плотность – в числе частиц на один кубический метр, при температуре  $T = 10\,000$  эВ (около 100 млн градусов). Таким образом, цель термоядерных исследований заключается в том, чтобы достичь значения произведения трех величин,  $n, \tau, T$  около  $2 \cdot 10^{24}$  с·эВ/м<sup>3</sup>.

Наиболее близко к достижению этих условий подошли в настоящее время термоядерные устройства, называемые «токамаками». Предложенная в начале 1950 г. русскими физиками А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом, эта установка получила название от сокращения русских слов «тороидальная камера с магнитным полем». Принципы, лежащие в основе работы этого устройства, относительно просты, рис. 5.2, 5.3 [23].

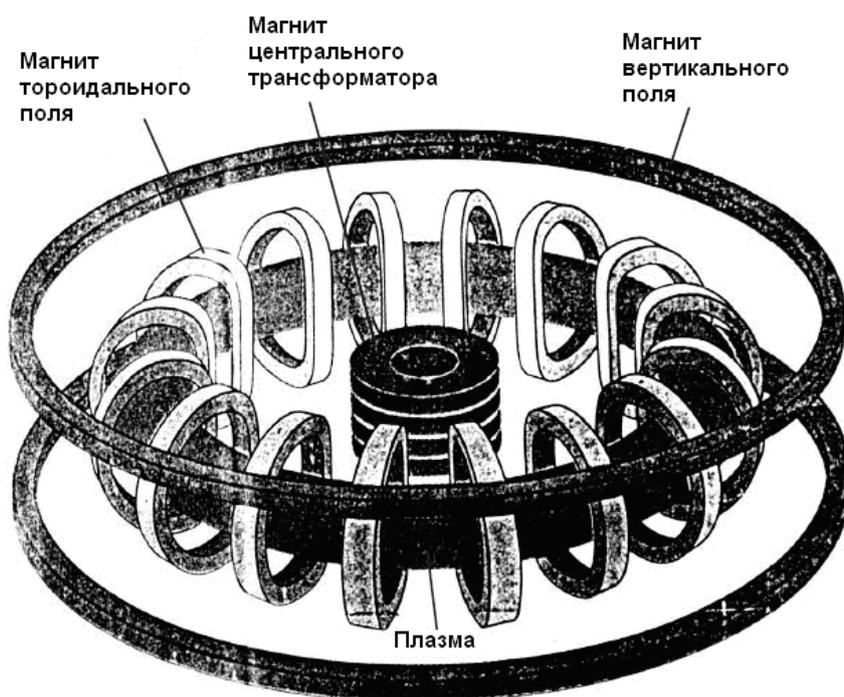


Рис. 5.2. Три системы электромагнитов токамака

Сначала плазму получают в вакуумной камере, имеющей форму тора или бублика. Система электромагнитов, расположенных снаружи от камеры, создает тороидальное магнитное поле, направленное вдоль оси тора. Поле действует как шланг, который поддерживает давление внутри плазмы и предотвращает ее контакт со стенками камеры.

Другая система электромагнитов, расположенных в центре тора (в дыре от бублика), используется для индуцирования в плазме электрического тока, который протекает в тороидальном направлении. Этот ток нагревает плазму до температуры около 1000 эВ. Плазменный ток создает свое магнитное поле, охватывающее тороид. Это поле предотвращает дрейф плазменных частиц за пределы основной области магнитно-

го удержания. Наконец, внешние проводники генерируют вертикальное магнитное поле, удерживающее плазменный шнур от движений вверх и вниз, влево и вправо внутри камеры.

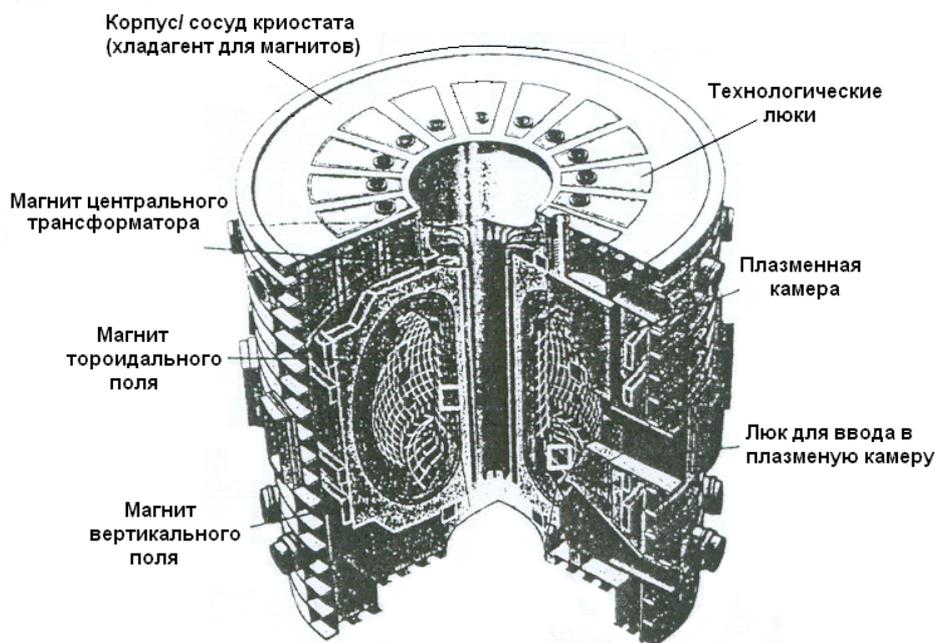


Рис. 5.3. Основные узлы токамака

Бывший Советский Союз до середины 60-х годов был единственной страной, где серьезно исследовалась концепция токамака. Л.А. Арцимович и его коллеги из Института атомной энергии им. И.В. Курчатова сумели получить такие знания, которые убедили физиков других стран в перспективности времени удержания энергии и температуры плазмы в токамаках, для реализации УТС. Их достижения привели к распространению исследований токамаков в ряде ведущих стран мира.

Существенно отметить международный характер развития исследований по управляемому термоядерному синтезу. Во время визита в Англию нашей правительственной делегации в 1956 г. академик И. В. Курчатов рассказал о наиболее интересных результатах, достигнутых в этой области в нашей стране. Позже примеру Советского Союза последовали и другие страны. Оказалось, что, работая независимо друг от друга в условиях строгой секретности, ученые разных стран пришли к одинаковым идеям осуществления управляемого термоядерного синтеза. С тех пор в течение двух десятилетий эти работы велись открыто с широким обменом результатами, обсуждением перспективных идей.

В результате конструкция токамаков была существенно улучшена. В середине 70-х годов на установках типа токамак были достигнуты температура 3000 эВ и параметр качества удержания около  $10^{18}$  с/м<sup>3</sup>. Се-

годня в наиболее мощных экспериментальных установках этого типа – токамак JET (Joint European Torus), токамак JT-60 в Японии, экспериментальный термоядерный реактор-токамак TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) и установка DIII-D в США – достигнуты температура плазмы 30 000 эВ и параметр качества удержания  $2 \cdot 10^{19} \text{ с/м}^3$ . Производство плотности, времени удержания и температуры в течение 1970–1990 гг. удалось увеличить более чем в 100 раз.

Качественно новый этап сотрудничества в решении проблемы УТС начался в 1985 г., когда во время встречи в Женеве лидеров СССР и США (М.С. Горбачева и Р. Рейгана) они призвали к совместной работе по овладению термоядерной энергией «на благо всего человечества». В ответ на этот призыв инженеры и ученые, участвующие в четырех ведущих программах исследований по термоядерному синтезу, проводимых в странах Европейского сообщества, Японии, СССР и США, пришли к соглашению начать в 1987 г. совместное проектирование экспериментальной термоядерной установки. Они назвали ее Международным Термоядерным Экспериментальным Реактором, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

Несмотря на определенный прогресс в экспериментах на токамаках, несколько проблем остаются нерешенными. Исследователи еще не выяснили фундаментальную природу турбулентного переноса тепла и частиц поперек силовых линий магнитного поля – процесса, который снижает температуру плазмы. Знание физики «сжигания» и поддержания термоядерного горения также является неполным. На ITER будут исследоваться эти проблемы. Основными целями проекта ITER являются достижения условий зажигания и длительного термоядерного горения, которые будут типичны для реального термоядерного реактора, а также испытание и демонстрация технологий для практического использования управляемого синтеза.

По словам академика Л.А. Арцимовича, проблема УТС по своей сложности превосходила все научно-технические проблемы, порожденные успехами естествознания в XX веке. В итоге в ушедшем столетии термоядерный реактор создать не удалось.

Сооружаемый экспериментальный реактор будет самым большим из когда-либо построенных токамаков – его высота 30 м, диаметр 30 м. Объем плазмы в установке очень большой – порядке  $850 \text{ м}^3$ ; ток в плазме – 15 МА. Термоядерная мощность установки 500 МВт поддерживается в течение 400 с. В дальнейшем это время предполагается довести до 300 с, что даст возможность проводить на реакторе первые реальные исследования физики термоядерного горения в плазме. На рис. 5.3 в разрезе показаны отдельные узлы этой установки. По оценкам exper-

тов стоимость разработки и сооружения ITER составит около 7,5 млрд долл. Только с российской стороны в реализации проекта задействованы более 200 организаций.

После сооружения установки программа ITER будет состоять из двух основных стадий. Первая, называемая физической стадией, продлится 6–8 лет. В это время исследователи попытаются достичь условий зажигания и длительного горения, типичных для энергетического и термоядерного реактора. После пуска и проведения полных испытаний исследования будут сфокусированы на стационарном поддержании плазмы и условий для дейтерий-тритиевого синтеза. Будут также изучаться эффекты нагрева плазмы  $\alpha$ -частицами, динамика и контроль горения плазмы, а также диффузия и удаление гелия, после того как ядра гелия отдали всю энергию плазме.

Следующая стадия – это многолетняя программа решения технических и инженерных проблем. Многие технологии будут продемонстрированы уже на физической стадии – из наиболее важных, например, работа сверхпроводящих магнитов, системы нагрева плазмы и поддержания тока, устройства для введения топлива и удаления «золы», инструменты для дистанционного обслуживания и внешние обеспечивающие системы. На технологической стадии будут испытываться интегральные характеристики и надежность оборудования, а также альтернативные материалы и конструкции.

Конструирование и инженерные разработки должны привести к созданию реактора ITER, который благодаря синтезу дейтерия и трития сможет генерировать мощность 1000 МВт. Это будет значительное достижение. Ожидаемый термоядерный выход будет на три порядка величины больше, чем уже достигнуто на установке JET, наиболее мощной термоядерной установке в настоящее время.

Способность генерировать термоядерную мощность, в 1000 раз большую, чем на существующих экспериментальных установках, делает ITER предпоследним этапом на пути к практическому использованию управляемого термоядерного синтеза. Научные и инженерные знания, полученные в экспериментах на ITER, должны привести к созданию демонстрационной термоядерной электростанции, по-видимому, к сороковым годам текущего столетия. Действительно, надежда овладеть термоядерным синтезом уже привела к значительным обязательствам со стороны четырех вовлеченных в проект сторон.

Реакцию синтеза можно получить также, используя нагрев вещества импульсами лазерного излучения или ионных пучков длительностью порядка  $10^{-9}$  с.

Анализируя ситуацию с созданием ИТЭР, комиссия, в которую вошли советники правительств ЕС, а также ряд экспертов, пришла в 2002 г. к выводу, что работы по УТС развиваются слишком медленно, необходимо повысить темпы. Это направление во многом альтернативно первому, ориентировано на то, чтобы, не затрачивая усилий на удержание неустойчивых плазменных сгустков, создать такие условия (плотность), при которых основная часть термоядерного топлива сгорала бы быстрее, чем оно «разлентится». Временные параметры этого процесса определяется инерцией топливной смеси, поэтому он получил название *инерционного термоядерного синтеза*.

При создании импульсной термоядерной установки трудности, которые в токамаке заключаются в удержании плазмы, трансформировались в задачу нагреть ее за очень малое время. В настоящее время создание импульсных реакторов находится на стадии обоснования концептуальных проектов.

Усилия ученых привели к тому, что в настоящее время по ряду параметров импульсный «термояд» начинает конкурировать с более традиционным магнитным удержанием плазмы.

Возможность создания термоядерных реакторов, работающих короткими импульсами при воздействии лазерных лучей или ионных пучков, в значительной мере зависит от успехов в разработке лазеров и сильноточных ускорителей с высоким КПД. В настоящее время этот КПД еще очень низок.

Сложную проблему представляет разработка такой системы утилизации термоядерной энергии, которая была бы способна уцелеть, несмотря на быстро повторяющиеся взрывы дейтерий – тритаевых «таблеток» под действием лазерных или ионных пучков. Достижение приемлемого энергетического выхода требует весьма высокой частоты повторения взрывов, аналогично повторяющимся актам зажигания горючей смеси в автомобильном двигателе внутреннего сгорания.

## **5.2. Магнитогидродинамическое преобразование энергии**

Поиск способов повышения эффективности преобразования первичных топливо-энергетических ресурсов привел ученых-энергетиков и физиков к идее магнитогидродинамического преобразования энергии. Магнитогидродинамический генератор (МГД-генератор) непосредственно преобразует тепловую энергию в электрическую и тем самым позволяет существенно повысить эффективность использования топливных ресурсов. Работы по созданию МГД-генераторов были впервые начаты в СССР и наибольших масштабов они достигли в 60–80-е годы.

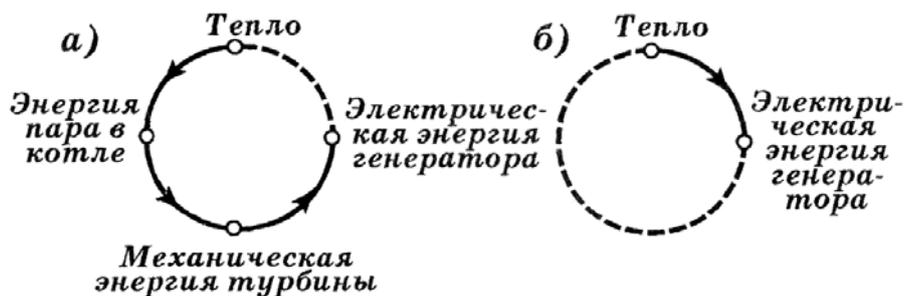


Рис. 5.4. Схемы преобразования энергии:  
*а* – паросиловое, *б* – магнетогидродинамическое

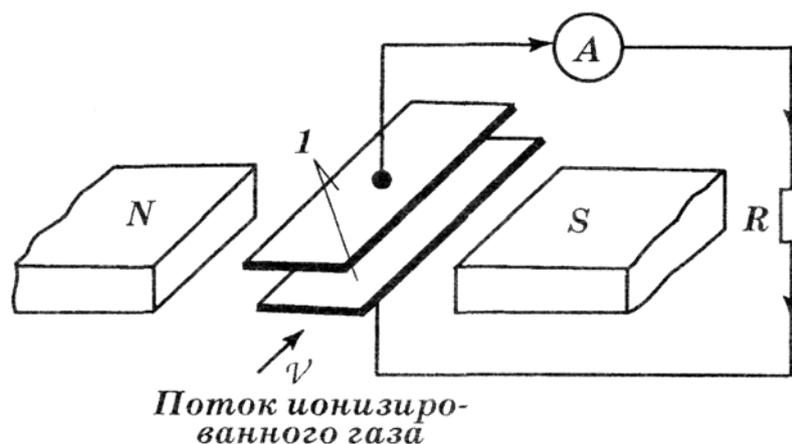
В паросиловых установках тепло, получаемое при сжигании топлива, превращается во внутреннюю энергию пара, температура и давление которого при этом повышаются. Затем в паровых турбинах энергия пара превращается в механическую и только после этого в электрических генераторах механическая энергия преобразуется в электрическую. Эти многократные преобразования сопровождаются неизбежными потерями, снижающими эффективность всего цикла.

В магнетогидродинамическом цикле (рис. 5.4, *б*) цепочка преобразований энергии значительно короче. Но не только в этом состоит преимущество МГД-преобразования энергии. КПД идеального теплового цикла Карно зависит от максимальной и минимальной температур рабочего тела. В современных топках парогенераторов температура превышает  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а нагрев лопаток паровых турбин из-за ограниченной теплостойкости материала не должен превышать  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что ограничивает КПД до 60 %. В реальных условиях из-за несовершенства паросилового цикла КПД не удается повысить более чем до 40 %. В МГД-генераторах статические условия работы позволяют использовать материалы, на поверхности которых температура может достигать  $2700\text{--}3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это открывает широкие перспективы повышения КПД преобразования энергии.

В качестве проводящего вещества в МГД-генераторах используются ионизированные газы. Чтобы обеспечить необходимую электропроводность газов, следует их температуру поддерживать не ниже  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это обстоятельство не позволяет использовать МГД-преобразование во всем диапазоне температур от 3000 до 300 К. Поэтому МГД-генераторы целесообразно дополнять паротурбинными преобразователями, полезно использующими тепло газов, выходящих из каналов МГД-преобразователей. Сочетание МГД-генераторов с паротурбинными преобразователями энергии позволит поднять КПД всей установки до 50–60 %, что означает экономии десятков миллионов тонн топливных ресурсов в год. Стационарные МГД-установки наиболее приспособлены для преобразования энергии

в широких масштабах. Повышение КПД установок с МГД-генераторами позволит снизить топливные составляющие стоимости электроэнергии и уменьшить капитальные затраты на сооружение станций.

*Принцип работы МГД-генератора.* Для современной электроэнергетики важное значение имеет открытый Фарадеем закон электромагнитной индукции, который утверждает, что в проводнике (твердом, жидком или газообразном), движущемся в магнитном поле, индуцируется ЭДС.



*Рис. 5.5. Принцип работы МГД-генератора*

Принципиальная схема действия МГД-генератора показана на рис. 5.5. Между металлическими пластинами 1, расположенными в сильном магнитном поле, пропускается струя ионизированного газа, обладающего кинетической энергией направленного движения частиц. При этом в соответствии с законом электромагнитной индукции появляется ЭДС, вызывающая протекание электрического тока между электродами внутри канала генератора и во внешней цепи. Поток ионизированного газа – плазмы – тормозится под действием электродинамических сил, возникающих при взаимодействии протекающего в плазме тока и магнитного потока.

Можно провести аналогию между этими возникающими силами и силами торможения, действующими со стороны рабочих лопаток паровых и газовых турбин на частички пара или газа. Преобразование энергии и происходит путем совершения работы по преодолению сил торможения. Если какой-либо газ нагреть до высокой температуры, увеличив тем самым его внутреннюю энергию и превратив в электропроводящее вещество, то при последующем расширении газа в рабочих каналах МГД-генератора будет происходить прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Трудности использования ионизированных газов состоят в том, что при такой высокой температуре происходит быстрое разрушение камеры сгорания, каналов и сопла, по которым происходит движение газового потока.

Добавление некоторых легко ионизирующихся щелочных металлов таких, как калий, натрий, в десятки тысяч раз увеличивает электропроводность газа. При этом можно ограничиться температурой 2500÷2700 °С. Однако в этом случае возникают трудности, связанные с обеспечением необходимой коррозионной прочности материалов из-за повышения химической агрессивности среды, в которой должны работать эти конструкционные материалы.

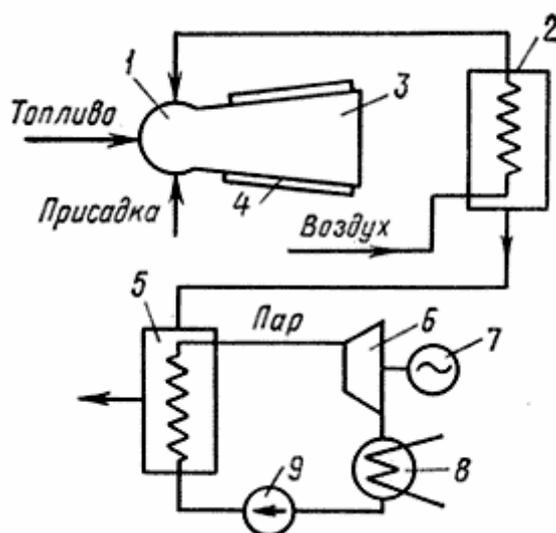


Рис. 5.6. Принципиальная схема МГД-генератора с паросиловой установкой:  
 1 – камера сгорания; 2 – теплообменник; 3 – МГД-генератор;  
 4 – обмотка электромагнита, 5 – парогенератор, 6 – турбина, 7 – генератор,  
 8 – конденсатор, 9 – насос

*МГД-генератор с паросиловой установкой.* Принципиальная схема МГД-генератора с паросиловой установкой показана на рис. 5.6. В камере сгорания производится сжигание органического топлива; получаемые при этом продукты в плазменном состоянии с добавлением присадок направляются в расширяющийся канал МГД-генератора. Сильное магнитное поле создается мощными электромагнитами.

Тепло отработанных в МГД-генераторе газов вначале используется для подогрева воздуха, подаваемого в камеру сгорания топлива, и повышения тем самым эффективности процесса его сжигания. Затем это тепло в паросиловой установке расходуется на образование пара и доведение его параметров до необходимых величин. Выходящие из канала МГД-генератора газы имеют температуру примерно 2000 °С, а современные теп-

лообменники, к сожалению, могут работать при температурах, не превышающих 800 °С, поэтому при охлаждении газов часть тепла теряется.

Трудности в создании МГД-генераторов состоят в обеспечении конструкции *материалами необходимой прочности*. Несмотря на статические условия работы, к материалам предъявляют высокие требования, так как они должны длительно работать в агрессивных средах при высоких температурах.

В настоящее время созданы материалы, которые могут работать длительно при температуре 2200÷2500 °С (графит и композиционные материалы на основе графитовых нитей, окись магния, нитриды (в частности, нитрид бора), материалы на основе нанопорошков и др.). Несмотря на достигнутые успехи задача создания материалов для МГД-генератора полностью пока не решена. То же относится и к газам, из которых создается плазма. Например, гелий с небольшой добавкой цезия при температуре 2000 °С имеет одинаковую проводимость с продуктами сгорания минерального топлива при температуре 2500 °С. Разработан проект МГД-генератора, работающего по замкнутому циклу, в котором гелий непрерывно циркулирует в системе.

Для работы МГД-генератора необходимо создавать сильное магнитное поле, которое может быть получено пропусканием огромных токов по обмоткам. Во избежание сильного нагрева обмоток и потерь энергии в них сопротивление проводников должно быть по возможности наименьшим. Поэтому необходимо проработать вариант проекта МГД-генератора, в котором в качестве таких проводников использовались бы сверхпроводящие материалы.

*МГД-генераторы с ядерными реакторами.* Весьма вероятно, что перспективными могут оказаться МГД-генераторы с ядерными реакторами, используемыми для нагрева газов и их термической ионизации. Предполагаемая схема такой установки показана на рис. 5.7.

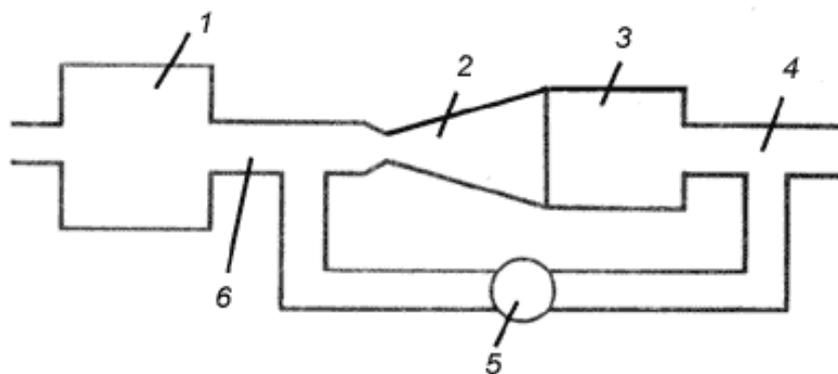


Рис. 5.7. МГД-генератор с ядерным реактором: 1 – ядерный реактор; 2 – сопло; 3 – МГД-генератор; 4 – место конденсации щелочных металлов; 5 – насос; 6 – место ввода щелочных металлов

Трудности создания МГД генератора с ядерным реактором состоят в том, что современные тепловыделяющие элементы, содержащие уран и покрытые окисью магния, допускают температуру не намного превышающую 600 °С. Этот тип МГД-генератора будет реализован только в том случае, если в процессе совершенствования реакторных систем их температуру можно будет увеличить до нужных величин.

При этом появится возможность наиболее полно использовать преимущества МГД-генераторов, так как можно будет нагревать газы с хорошими термодинамическими свойствами, не ограничиваясь продуктами сгорания органического топлива.

Вслед за СССР вопросам создания промышленных МГД-установок уделяется большое внимание во многих индустриально развитых странах. Повышение КПД установок с МГД-генераторами улучшает технико-экономические показатели работы и способствует уменьшению загрязнения окружающей среды вследствие более полного использования вовлеченных в энергетическое производство природных ресурсов.

Высокая стоимость МГД-генераторов, их низкая надежность и малый ресурс работы вследствие нерешенности ряда проблем, прежде всего материаловедческих, затормозили дальнейший прогресс в этом направлении. За рубежом сократились масштабы этих работ, а в России в девяностые годы эти работы полностью приостановлены.

### **5.3. Радиоизотопные источники энергии**

Острая потребность в автономных источниках электрической энергии длительного действия с удельной энергоемкостью фотоэлементов, электрохимических топливных элементов, химических батарей во многих случаях может быть удовлетворена применением радиоизотопных источников электрической энергии [18, 19]. В них утилизируется энергия распада радиоактивных изотопов, во все возрастающем количестве накапливающихся в сборных растворах атомной промышленности и тепловыделяющих элементах атомных электростанций. Они также могут быть получены при нейтронном облучении в ядерных реакторах.

Проблемами создания радиоизотопных источников энергии (РИЭ) занимаются во многих промышленно-развитых странах: США, Россия, Англия, Франция, Япония, Канада, Германия.

Такой повышенный интерес к рассматриваемому направлению использования атомной энергии объясняется в первую очередь существенными преимуществами перед другими автономными источниками электрической энергии: высокой энергоемкостью (тыс. Вт·ч/кг), длительным сроком службы (до 10 и более лет), достаточно высокой надежностью.

За сравнительно короткое время созданы генераторы различного назначения, а опытная эксплуатация отечественных и зарубежных РИЭ показала их высокую надежность.

Со времени открытия Беккерелем в 1896 г. явления радиоактивности урановых солей науке стало известно более 1200 радиоактивных изотопов как природных, так и искусственных.

При создании радиоизотопных источников тепла следует отдавать предпочтение такой химической форме и физическому состоянию радиоактивного препарата, которые соответствуют минимально возможной радиотоксичности при максимальном (для данного изотопа) удельном тепловыделении. Радиоактивный препарат должен представлять собой твердое некрошащееся, практически не растворимое в морской и пресной воде, несублимирующее и не вступающее в реакцию с воздухом, водой и материалом ампулы вещество, имеющее высокую радиационную и термическую стойкость. Это должно обеспечивать минимальное рассеивание изотопа при непредвиденных аварийных разрушениях радиоизотопного источника тепла. Нижняя граница температуры плавления и кипения регламентирована и равна соответственно 500 и 1500 °С (для генераторов с низкотемпературными термоэлектрическими преобразователями).

Что касается радиационных характеристик, препарат должен содержать минимальное количество примесных радиоактивных изотопов с жестким  $\gamma$ -излучением и нейтронным излучением. Вещества, входящие в состав химического соединения или являющиеся носителями, должны состоять из элементов с малым атомным номером  $Z$  при создании топлива на основе  $\beta$ -радиоактивных изотопов и с большим  $Z$  при создании топлива на основе  $\alpha$ -радиоактивных изотопов. Последнее требование вызвано необходимостью снижения выхода тормозного излучения в  $\beta$ -препаратах и нейтронного излучения в  $\alpha$ -препаратах.

Препарат должен также обладать достаточно высокой теплопроводностью и не содержать больших количеств примесных радиоактивных изотопов с периодом полураспада  $T_{1/2}$ , сильно отличающимся от  $T_{1/2}$  основного изотопа. Низкая теплопроводность препарата приводит к существенному перепаду температуры внутри препарата и возможному нарушению его термостойкости, содержание же значительного количества короткоживущего изотопа – к существенному спаду начальной мощности, а содержание долгоживущих изотопов – к снижению удельной мощности.

При использовании топлива, характеризующегося низкой удельной мощностью  $P_{уд}$ , чрезмерно возрастают размеры генератора, снижается его КПД, увеличивается вес. Приемлемая величина  $P_{уд} \geq 0,1$  Вт/см<sup>3</sup>. Период полураспада должен быть больше или, по крайней мере, равным

сроку службы генератора; при малом периоде полураспада и значительных сроках службы возникает необходимость регулирования теплового потока на термоэлектропреобразователь. Как правило, период полураспада радиоактивного изотопа не должен быть менее 100 дней и более нескольких лет. Изотопы с периодом полураспада свыше сотен лет имеют довольно низкие удельные характеристики ( $P_{уд} \ll 0,1 \text{Вт/см}^3$ ). Большое значение имеет также возможность получения топлива в достаточных количествах при относительно низкой стоимости.

Перечень и основные характеристики продуктов деления – основных видов топлива для РИЭ – приведен в табл. 5.1.

Таблица 5.1

*Основные удельные характеристики продуктов деления*

| Изотоп            | Удельная активность, кюри/г | Удельное энерговыделение (мощность) |                  |         | Период полураспада $T_{1/2}$ |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------|---------|------------------------------|
|                   |                             | $\text{Вт/г}$                       | $\text{Вт/см}^3$ | кюри/Вт |                              |
| $\text{Sr}^{90}$  | 144                         | 0,936                               | 2,44             | 154     | 27,7 года                    |
| $\text{Cs}^{137}$ | 88,4                        | 0,411                               | 0,77             | 215     | 2968 дня                     |
| $\text{Ce}^{144}$ | 3200                        | 26,7                                | 184,4            | 120     | 284,5 дня                    |
| $\text{Pm}^{147}$ | 918                         | 0,338                               | –                | 2725    | 2,66 дня                     |

Поскольку изотопы металлов, как правило, обладают большой радиотоксичностью, то в качестве топлива в РИЭ используют не металлы, а соединения на их основе. Последние являются инертными, стабильными и обладающими приемлемыми физическими свойствами (высокой теплопроводностью, высокой температурой плавления).

Кроме соединений на основе указанных в табл. 5.1 металлов в РИЭ используются также изотопы, получаемые путем облучения в реакторе, такие, например, как  $\text{Pu}^{238}$ ,  $\text{Po}^{210}$ ,  $\text{Cm}^{242}$ ,  $\text{Cm}^{244}$ .

По физическим эффектам, лежащим в основе преобразования излучения радиоизотопов в электрическую энергию, устройства можно объединить в две группы: атомные батареи и радиоизотопные электрогенераторы. В свою очередь, различают атомные батареи следующих типов:

- с непосредственным сбором заряда,
- на полупроводниковом переходе,
- на контактной разности потенциалов,
- на фотоэлектрическом эффекте,
- на вторичной электронной эмиссии.

Радиоизотопные электрогенераторы разделяются на турбогенераторы, термоэмиссионные генераторы, термоэлектрические генераторы. Два последних типа генераторов будут рассмотрены более подробно в 5.4 и 5.5; другим типам РИЭ будут даны лишь краткие характеристики.

Атомными батареями обычно называют РИЭ, в которых преобразование энергии радиоактивного распада не связано с тепловым циклом.

Атомные батареи используются для питания приборов инфракрасного видения, эталонов напряжения, для зарядки дозиметров, автоматического подзавода часов и для других целей, т. е. в тех случаях, когда требуется высокая стабильность параметров при низком потреблении энергии.

*Батареи с непосредственным сбором заряда* относятся к так называемым первичным, в которых собираются  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы, испускаемые при радиоактивном распаде.

Если взять две пластины и на одну из них (излучатель) нанести радиоактивное вещество, то излучаемые частицы, накапливаясь на противоположной пластине (коллекторе), заряжают ее соответственно знаку заряда частицы. Схема такой батареи показана на рис. 5.8.

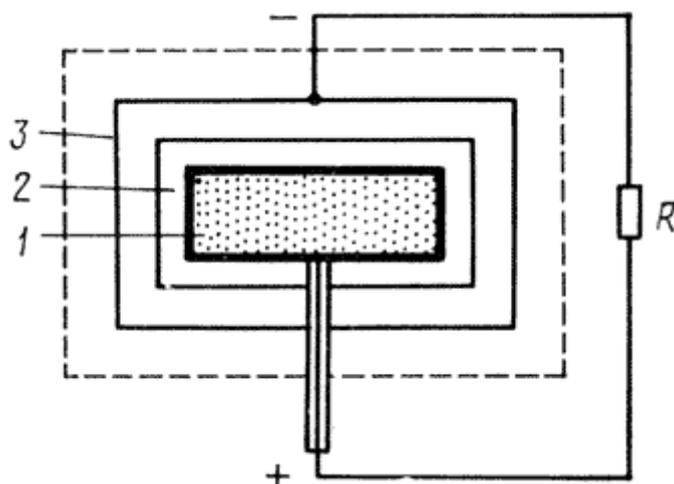


Рис. 5.8. Установка прямого преобразования ядерной энергии в электрическую:  
1 –  $\beta$ -радиоактивный излучатель; 2 – металлическая ампула;  
3 – металлический сосуд

В случае  $\beta$ -излучателя пластина заряжается отрицательно, в случае  $\alpha$ -излучателя – положительно (чаще всего применяются  $\beta$ -излучатели).

Для  $\beta$ -источников удельная мощность в среднем составляет несколько микроватт на милликюри; поскольку активность источника не превышает нескольких кюри, выходная мощность составляет около нескольких милливатт. Выходное напряжение таких источников зависит как от энергии  $\beta$ -частиц, так и от сопротивления изоляции между излучателем и коллектором.

Первая батарея с прямым сбором заряда была сделана Мозли в 1913 г. Используя 20 мкюри радия, он получил ток  $10^{-11}$  А при напряжении 150 000 В.

Реально достигнутые параметры батарей с прямым сбором заряда лежат в пределах: напряжение –  $1 \div 100$  кВ, ток –  $10^{-8} \div 10^{-12}$  А.

*Батареи на полупроводниковом переходе* относятся к вторичным РИЭ, т. к. в них собираются отрицательные или положительные заряды, возникающие в результате *p-n*-переходов при воздействии на полупроводник первичного излучения. Батарея состоит из источника излучения ( $\beta$ - или  $\gamma$ -излучателя) и полупроводника с *p-n*-переходом. Возможность использования  $\gamma$ -излучателя обусловлена тем, что  $\gamma$ -кванты в процессе взаимодействия с веществом выбивают электроны из кристаллической решетки полупроводника, образуя многочисленные пары носителей заряда – электронов (–) и «дырок» (+). Таким образом происходит как бы усиление первичного заряда  $\beta$ -частиц, достигающее величины порядка  $10^5$ , или преобразование энергии  $\gamma$ -квантов в энергию электронно-дырочных пар. Подобные источники могут иметь относительно низкое напряжение, но большие, чем в атомных батареях с непосредственным сбором заряда, токи. Мощность таких батарей ограничивается радиационной стойкостью полупроводникового перехода. Поэтому в качестве излучателей желательно брать источники мягкого излучения (например,  $\text{Pm}^{147}$ ). Опытные образцы имели мощность около 1 мкВт, напряжение составляло доли вольта, КПД  $\sim 1\%$ .

*Батареи на контактной разности потенциала (вторичные РИЭ)* используют разницу в значениях работы выхода электронов из двух металлов, образующих пару. Эта разница называется контактной разностью потенциалов.

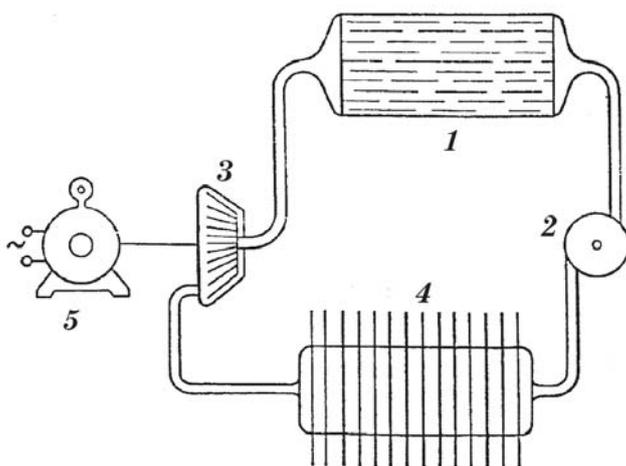
Если между двумя разнородными металлами (электродами) находится ионизированный газ, то под действием контактной разности потенциалов при замыкании цепи, связывающей электроды, потечет ток. В таких устройствах может быть использован или самоионизирующийся радиоактивный газ, например  $\text{Kt}^{85}$  или  $\text{T}$ , или газ, ионизируемый специальным источником. Поскольку одна  $\beta$ -частица может образовать сотни пар ионов, то ток в такой батарее примерно в 100 раз выше, чем в батареях с прямым сбором заряда, а э.д.с. ее равна разности работ выхода электродов (около нескольких вольт). Сила тока определяется концентрацией ионов, которая, в свою очередь, зависит от активности излучателя, энергии  $\beta$ -частиц, природы ионизируемого газа и т. д.

*В фотоэлектрических батареях* (третичные РИЭ) электрическая энергия получается в результате двукратного преобразования. При воздействии светового излучения на так называемые фотоэлементы образуется электрический ток. Сочетание радиоизотопных фосфоров и фотоэлементов позволяет создать фотоэлектрические батареи.

Для получения большей эффективности преобразования световой энергии в электрическую в случае фотоэлектрических батарей световой спектр люминофора выбирается в области максимальной спектральной чувствительности фотоэлемента. Реальная мощность таких устройств порядка десятков микроватт, КПД 1–2 %, напряжение – несколько вольт.

*Батареи со вторичной электронной эмиссией* работают следующим образом. Если поток, например,  $\beta$ -частиц направить на электрод, имеющий достаточно большой коэффициент вторичной эмиссии, то образуется поток вторичных заряженных частиц. Используя этот эффект, можно создать малогабаритный источник электрической энергии, причем для создания ускоряющего напряжения на последующих каскадах могут быть применены батареи с прямым сбором заряда. Э.д.с. однокаскадных батарей примерно равна энергии вторичных электронов.

*Радиоизотопные турбоэлектрогенераторы* пока не нашли практического применения, но они интересны тем, что в принципе могут обладать мощностью свыше 1 кВт.



*Рис. 5.9. Принципиальная схема радиоизотопного турбогенератора*

Принципиальная схема радиоизотопного турбогенератора представлена на рис. 5.9. Генератор состоит из радиоизотопного теплового блока 1, где происходит нагрев рабочего тела, из системы подачи 2 его на турбину 3 холодильника 4 и электрогенератора (динамомашины) 5. В качестве рабочего тела может быть использован жидкий металл (цикл Ренкина) или газ (цикл Брайтона). Немаловажную роль играет надежность работы турбины, генератора, насоса. Однако даже при достижении относительно больших сроков службы их надежность из-за наличия вращающихся элементов всегда будет ниже надежности термоэлектрических систем. Ввиду более высоко КПД турбогенераторов по сравнению с термоэлектрическими генераторами (при больших мощностях) турбогенераторы мо-

гут в дальнейшем найти применение, особенно в тех случаях, когда требуется не только электрическая, но и механическая энергия. Расчеты показывают, что при этом общий КПД установки составляет ~15 %.

Опыт разработки и эксплуатации радиоизотопных генераторов в различных районах земного шара и возрастающие возможности производства в большом количестве радиоактивных изотопов позволяют надеяться, что радиоизотопная энергетика получит дальнейшее широкое развитие.

#### 5.4. Термоэмиссионные преобразователи

Явление термоэлектронной эмиссии было открыто Т. Эдисоном в 1883 г. Работая над созданием электрической лампы, Эдисон помещал в колбе две нити. Когда перегорала одна из них, он поворачивал лампу и включал другую. Во время испытаний ламп обнаружилось, что некоторое количество электричества переходит к холодной нити, т. е. электроны «испаряются» с горячей нити – катода и движутся к холодной нити – аноду и далее во внешнюю электрическую цепь. При этом часть тепловой энергии, расходуемой на нагревание катода, переносится электронами и отдается аноду, а часть энергии электронов выделяется во внешней электрической цепи при протекании электрического тока.

Анод разогревается за счет тепла, приносимого электронами. Если бы температуры катода и анода были одинаковыми, то тепло «испарения» электронов с катода в точности было бы равно теплу «конденсации» электронов на анод и не было бы преобразования тепла в электрическую энергию. Чем меньше температура анода по сравнению с температурой катода, тем большая часть тепловой энергии превращается в электрическую.

Существуют два наиболее общих вида термоэмиссионных преобразователей (ТЭП): вакуумные и плазменные диоды. Источником тепловой энергии в изотопных ТЭП служат изотопы с большим удельным энерговыделением ( $\text{Sm}^{424}$ ,  $\text{Po}^{210}$  и т. п.), необходимым для достижения высоких температур. Схема генератора представлена на рис. 5.10, а эскиз его конструктивного исполнения – на рис. 5.11.

Нагретый катод испускает электроны, которые пересекают узкий межэлектродный промежуток и попадают на относительно холодный анод. Если катод и анод, имеющие различную работу выхода, соединить через нагрузку, то вследствие возникающей разности потенциалов по ней пойдет электрический ток. По отношению внешней цепи катод будет положительным выводом термоэмиссионного генератора, а анод – отрицательным.

Поступающая на катод тепловая энергия расходуется на преодоление работы выхода электронов из металла. Кроме того, имеются потери

энергии вследствие лучеиспускания, конвекции и теплопроводности. Теряемая катодом энергия в основном поступает на анод. Для предохранения анода от перегрева его необходимо охлаждать.

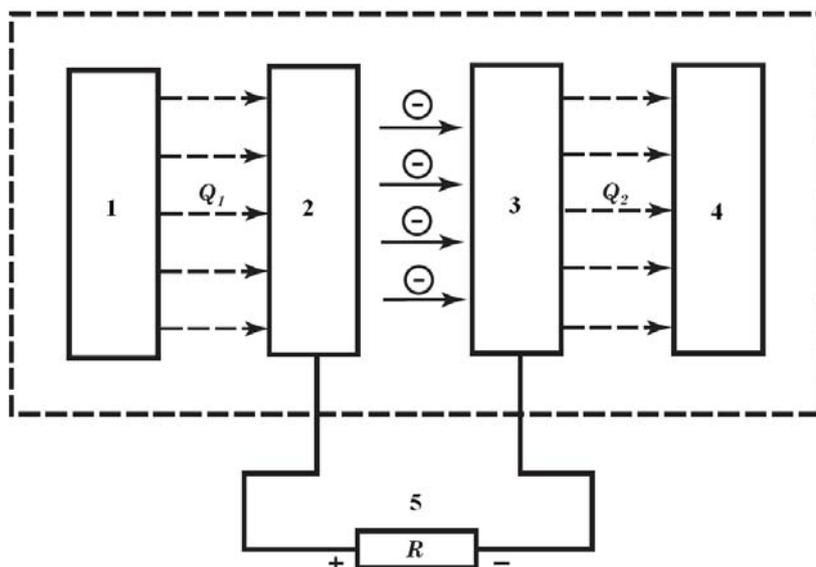


Рис. 5.10. Принципиальная схема радиоизотопного термоэмиссионного генератора

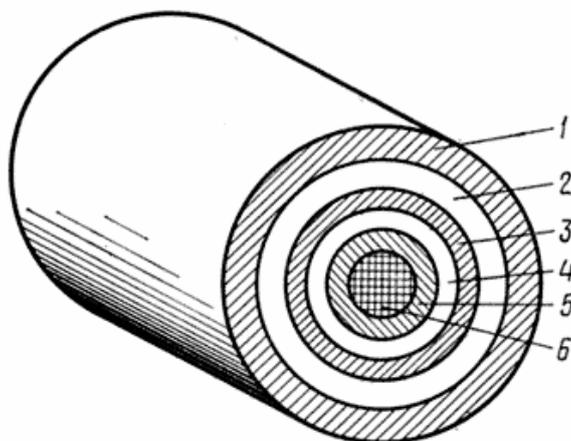


Рис. 5.11. Ядерный термоэмиссионный преобразователь: 1 – защита; 2 – охладитель; 3 – анод; 4 – вакуум; 5 – катод; 6 – ядерное горючее

Наиболее серьезная принципиальная трудность при создании ТЭП – возникновение пространственного заряда в промежутке анод–катод, что приводит к ограничению электронного тока. Для уменьшения объемного пространственного заряда стремятся сделать возможно меньшим зазор между катодом и анодом ( $d \sim 2 \cdot 10^{-4}$  см в вакуумном диоде) или вводят пары веществ с низким потенциалом ионизации (например цезий) в плазменном

диоде. Запирающее действие объемного заряда может быть уменьшено за счет увеличения скорости эмитированных электронов с помощью дополнительного ускоряющего электрода, на который подается высокий положительный потенциал, рис. 5.12. Траектория движения электронов при этом корректируется ускоряющим электродом и магнитным полем.

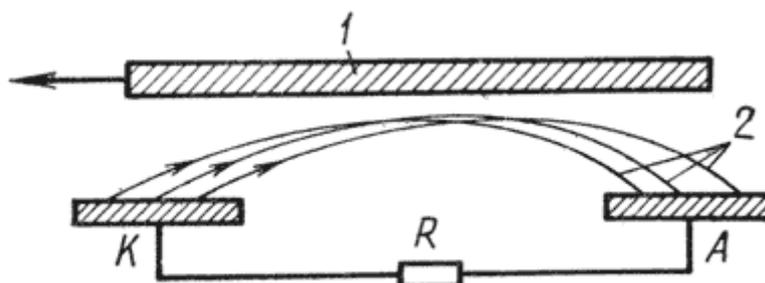


Рис. 5.12. Ускорение электрона в термоэмиссионном генераторе:  
1 – ускоряющий электрод; 2 – траектории электронов; А – анод; К – катод

Основными параметрами термоэмиссионного генератора являются КПД (эффективность) и удельная мощность, снимаемая с преобразователя ( $\text{Вт/см}^2$ ). В случае газонаполненных диодов эти величины являются функцией температуры катода (эммитера)  $T_k$ , температуры анода (коллектора)  $T_a$ , давления паров  $p$ , величины межэлектродного промежутка  $d$  и работы выхода анода и катода.

Эксперименты показывают, что удельная мощность для термоэмиссионных генераторов равна  $5\text{--}10 \text{ Вт/см}^2$ , причем для мощностей  $\sim 10 \text{ Вт}$  КПД равен примерно 10 % (расчетный КПД  $\sim 30 \%$ ).

Надо отметить, что создание термоэмиссионных генераторов сопряжено с серьезными техническими трудностями, связанными с подбором материалов, стойких по отношению к высоким температурам ( $T_k \sim 2000 \text{ }^\circ\text{К}$ ,  $T_a \sim 1500 \text{ }^\circ\text{К}$ ).

## 5.5. Термоэлектрические генераторы

Из всех устройств, непосредственно преобразующих тепловую энергию в электрическую, термоэлектрические генераторы (ТЭГ) в наши дни находят наиболее широкое применение (хотя пока при относительно небольшой мощности).

Термоэлектрические генераторы обладают специфическими особенностями, делающими их незаменимыми во многих случаях. К таким особенностям относится отсутствие движущихся частей, что, в частности, допускает использование более высоких температур цикла. Нет также необходимости в применении высоких давлений жидкостей или

газов в основной схеме, поскольку цикл осуществляется посредством явлений, происходящих в самом термическом материале. Термоэлектрические генераторы можно использовать при больших и малых перепадах температур, а также при низких и высоких температурах, т. е. термоэлектрический цикл универсален, он допускает использование практически любых источников тепла.

Расход термоэлектрических материалов может быть небольшим, так как КПД термоэлемента теоретически не зависит от размеров, но связан со способами подвода тепла, с контактными сопротивлениями и другими конструктивными особенностями. Управление термоэлектрическим генератором может быть сведено только к регулированию источника тепла, так как в принципиальной части схемы нет машин и механизмов. Это облегчает создание автоматически работающих электростанций.

Термоэлектрические явления были открыты в первой половине XIX века. Однако они не получили тогда применения в энергетике из-за низкой тепловой экономичности.

В настоящее время применение полупроводников и слоистых термоэлементов может обеспечить использование тепла с КПД более 10 %. Существенный вклад в развитие термоэлектрического метода внесли ученые нашей страны. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы под руководством академика А.Ф. Иоффе по термоэлектричеству в 30–40-х годах послужили толчком к началу исследований в США, Англии и Франции. Развитие работ в области физики термоэлектрических явлений, конструирования термоэлементов, синтеза термоэлектрических материалов и разработка методик расчета привели к тому, что уже в настоящее время созданы термоэлектрогенераторы различных типов и назначений, использующие тепло радиоизотопных источников и ядерных реакторов, тепло органических топлив, солнца и выхлопных газов различных двигателей. Эти энергоустановки работают на автоматических метеорологических станциях в условиях Арктики и высокогорья, на космических, морских и подводных объектах, защищают от коррозии трубопроводы в условиях пустыни и в ряде других случаев.

Экономисты показали, что когда КПД достигнет 15 %, термоэлектрогенераторы будут конкурировать со многими другими энергоисточниками в различных областях науки и техники.

Развитие атомной энергетики расширило сферы применения термоэлектрических генераторов. С конца пятидесятых годов стали разрабатываться и осуществляться термоэлектрические генераторы, использующие тепло распада радиоактивных изотопов и энергию деления урана в ядерных реакторах. Такие энергетические установки большой мощности нашли применение в космических аппаратах, работающих в отрыве от зем-

ных энергетических ресурсов, в морском деле (маяки, метеорологические станции) и в других областях техники. В 1964 г. в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова был пущен первый в мире ядерный реактор с термоэлектрическим генератором тока мощностью 500 Вт.

Широкое распространение получили ТЭГ мощностью от нескольких ватт до нескольких киловатт. Спроектированы и начали производиться пока в небольших масштабах ТЭГ мощностью в единицы и даже десятки МВт. За последние десятилетия опубликовано значительное количество работ, описывающих результаты научных исследований в области термоэлектрической энергетики, конструкции, методы расчетов ТЭГ, применяемые термоэлектрические материалы и т. д.

Для ознакомления с историей развития термоэлектрической энергетики, физическими основами прямого преобразования тепловой энергии в электрическую можно воспользоваться монографиями [15–17].

Приоритет в открытии термоэлектрических явлений принадлежит русскому акад. Ф. Эпинусу, который в 1762 г. в Петербурге дал описание опытов по получению электричества посредством нагревания материалов (см. главу 2).

Термоэлектрические явления (пироэлектричество) были описаны им в обстоятельном труде «Мемуар, содержащий точное описание опытов с турмалином», изданном в 1762 г. В работе описаны явления, возникающие при нагревании турмалина, и, в частности, дается описание пироэлектрического маятника.

Пробковый шарик совершал движение в результате воздействия электрического потенциала поверхности нагретого турмалина. Шарик притягивался к одному из электродов, заряжался, отталкивался и притягивался к другому электроду и т. д. Указанные опыты – первые попытки прямого получения электричества посредством простого нагревания материалов.

Принцип работы термоэлемента основан на эффекте Зеебека, который в 1822 г. сообщил об экспериментах, связанных с отклонением магнитной стрелки вблизи термоэлектрической цепи. Сущность эффекта Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных материалов, протекает ток при разных температурах контактов материалов. Экспериментальные исследования показали, что величина э.д.с. термопары зависит от используемых материалов и разницы в температуре горячего и холодного спаев.

Явление Зеебека можно качественно объяснить тем, что средняя энергия свободных электронов различна в разных проводниках и по-разному растет с температурой. Если вдоль проводника существует перепад температур, то возникает направленный поток электронов от горячего спаев к холодному, вследствие чего у холодного спаев образуется избыток

отрицательных зарядов, у горячего – избыток положительных. Поток этот более интенсивен в тех проводниках, у которых концентрация электронов больше. Поэтому даже в простейшем термоэлементе, замкнутая цепь которого состоит из двух проводников с разными концентрациями электронов и спаи поддерживаются при разных температурах, возникает электрический ток. Чем меньше электропроводность материала, тем меньше скорость обратного перетока электронов, следовательно, тем выше э.д.с. Поэтому полупроводниковые элементы более эффективны, чем металлы.

*Термоэлектрические батареи.* В то время, когда Зеебеком был открыт эффект термо-э.д.с., батареи электрохимических элементов были единственными источниками электрической энергии. Ряд исследователей предлагали использовать этот эффект для создания конкурентоспособных промышленных источников электрической энергии. Так, в 1843 г. на имя Мозеса Паули был выдан патент на производство термоэлектрических батарей, которые представляли собой цепочки последовательно соединенных термопар, дающих на выходе повышенное значение э.д.с. Термопара была составлена из разных металлов *A* и *B* (рис. 5.13). Существенным недостатком таких батарей было увеличение внутреннего сопротивления, а, следовательно, и ограничение мощности по мере увеличения числа последовательно соединенных элементов. Иными словами, стремление получить повышенное напряжение на выходных зажимах источника электроэнергии, которое позволило бы использовать такие источники в практических целях, приводило к снижению мощности источника и ограничивало тем самым его практическое использование.

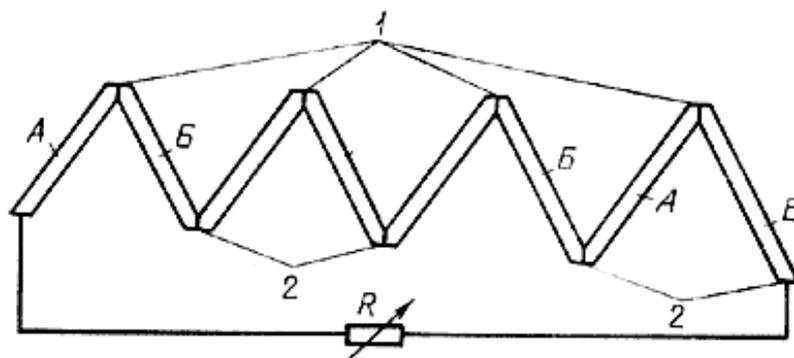


Рис. 5.13. Термоэлектрическая батарея: 1 – горячие спаи; 2 – холодные спаи

К 1850 г. наибольшее значение КПД термоэлектрических батарей составляло около 3 %, что приблизительно было равно КПД существовавших тогда паровых машин. Из-за низких значений КПД термопары в течение длительного времени (более ста лет) применялись в основном только для измерения температур (генерируемая э.д.с. пропорциональна разности температур между горячим и холодным спаями).

*Полупроводниковые ТЭГ.* Положение существенно изменилось в связи с открытием полупроводников.

Концентрацией и знаком электрических зарядов можно управлять, вводя в материалы полупроводников различные примеси.

Термоэлектрический элемент образуется парой из полупроводников обоих типов – с электронной проводимостью дырочной проводимостью (*p*-тип).

На рис. 5.14 показана термопара, образованная из полупроводников *n*- и *p*-типа. В обеих ветвях термопары носители зарядов перемещаются от горячего спая к холодному. Поскольку за положительное направление электрического тока принимается направление движения положительного заряда, то направления токов в ветвях схемы совпадают (показаны стрелками на рисунке). Чтобы получить значительные величины э.д.с., полупроводниковый ТЭГ необходимо выполнить из множества последовательно соединенных термопар, каждая из которых состоит из полупроводников *n*- и *p*-типа.

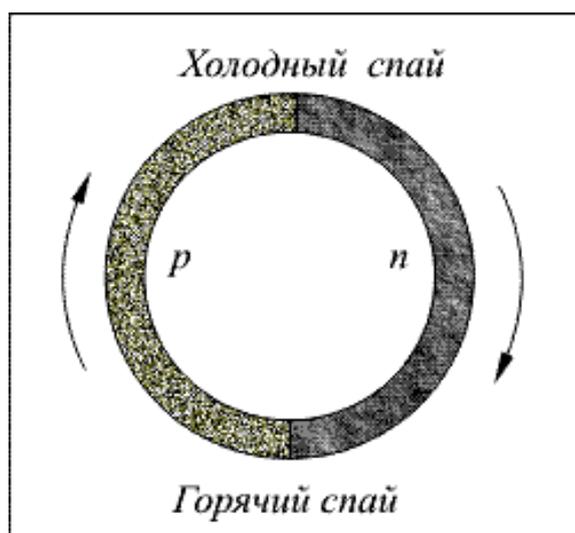


Рис. 5.14. Схема термоэлектрического элемента

В полупроводниках так же как и в металлах, термо-э.д.с. прямо пропорционально разности температур горячего и холодного концов стержня. Отличие состоит в том, что термо-э.д.с. у полупроводников в 40 с лишним раз больше, чем у металлов. Так, если в типичном металле при разности температур 55 °С термо-э.д.с. равна 0,2–0,3 мВ, то в полупроводнике, изготовленном из теллурида висмута, при этом же перепаде температур термо-э.д.с. равна 10 мВ.

Примерные зависимости термо-э.д.с. от перепада температур приведены на рис. 5.15 для типичных полупроводников 1 и металлов 2.

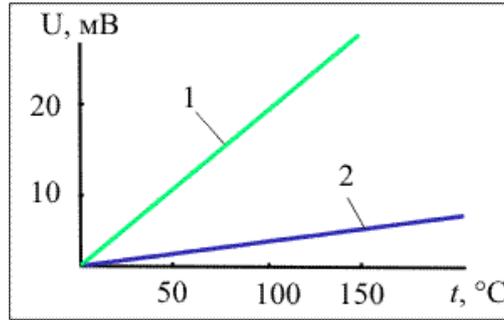


Рис .5.15. Зависимости термо-э.д.с. от перепада температур

Хорошая теплоизоляционная способность полупроводников позволяет создавать на их основе ТЭГ с большими перепадами температур, а, следовательно, и с большими величинами термо-э.д.с.

При рабочих температурах  $T \geq 900 \div 1000 \text{ K}$  целесообразны сплавы 20–30 % Ge-Si, а при  $T \leq 600 \div 800 \text{ °K}$  – материалы на основе теллуридов и селенидов свинца, висмута и сурьмы. Схема кремниевого термоэлектрического элемента показана на рис. 5.16. Тепло  $Q_1$  подводится к термоэлектрическому элементу через стенку нагревателя 1 с помощью теплоносителя (например, жидкометаллического), тепловой трубы или при непосредственном контакте с зоной тепловыделения реактора. Через стенку 7 холодильника тепло  $Q_2$  отводится от ТЭГ (излучением, теплоносителем или тепловой трубой). Спаи полупроводниковых кристаллических термостолбиков 4 и 9 образованы металлическими шинами 3 и 5, 8, которые электрически изолированы от стенок 1 и 7 слоями диэлектрика 2, 6 на основе оксидов с разностью температур  $\Delta T = T_1 - T_2$ .

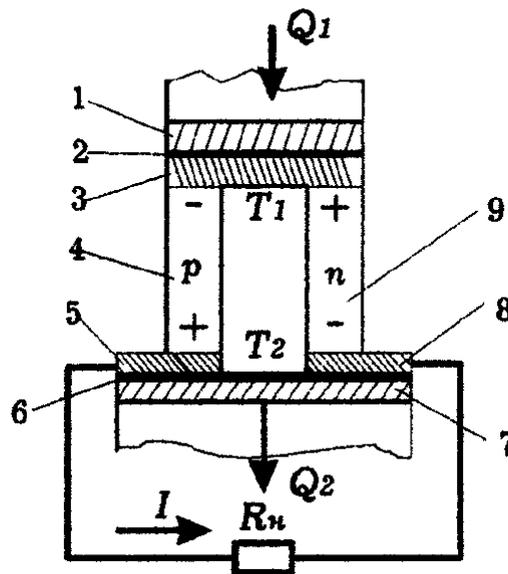


Рис. 5.16. Принципиальная схема элементарного полупроводникового ТЭГ

Эффективность ТЭГ обеспечивается существенной разнородностью структуры ветвей 4 и 9. Ветвь  $p$ -типа с дырочной проводимостью получается введением в сплав Si-Ge акцепторных примесей атомарного бора В. Ветвь  $n$ -типа с электронной проводимостью образуется при легировании Si-Ge донорными атомами фосфора Р. Из-за повышенной химической активности и малой механической прочности полупроводниковых материалов соединение их с шинами 3, 5, 8 выполняется прослойками из сплава кремний-бор. Для достижения стабильной работы батарея ТЭГ герметизирована металлической кассетой, заполненной аргоном.

Для эффективной работы промышленного ТЭГ потребуется температуру горячего спая довести до величины примерно 1100 °С. Трудности в повышении температуры полупроводников состоят в том, что с ростом температуры полупроводники различных типов проявляют тенденцию к превращению в собственно полупроводники, у которых числа носителей положительных и отрицательных зарядов равны. Эти заряды при создании градиента температуры перемещаются от горячего спая к холодному в равном количестве и, следовательно, не создается термо-ЭДС

В настоящее время широко ведутся исследования по созданию полупроводников, работающих при высоких температурах. При нагреве горячих спаев тепло и получаемым в реакторах при делении ядер тяжелых элементов требуется преодоление ряда трудностей, возникающих, в частности, при сильном радиационном воздействии на полупроводниковые материалы.

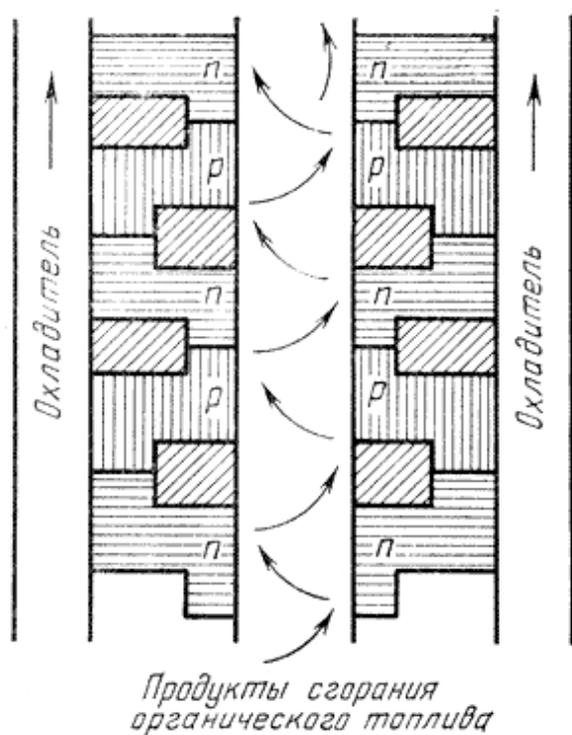


Рис. 5.17. ТЭГ на органическом топливе

На рис. 5.17. показана схема генератора, в котором тепло получается при сжигании органического топлива. Существенный недостаток таких генераторов – использование обычного органического топлива нерационально из-за больших потерь тепла, уносимого газами.

Судьба промышленного применения ТЭГ во многом зависит от успехов поиска материалов, которые обладали бы свойствами полупроводников в условиях высоких температур и интенсивного радиоактивного облучения.

Вопрос о целесообразности применения тех или иных

источников энергии решается в пользу ТЭГ в тех случаях, когда ведущее значение принадлежит не КПД, а компактности, надежности, портативности, удобству.

ТЭГ удобны в обслуживании, так как у них нет подвижных частей и они бесшумны в работе. Как пишет в шутивном тоне английский физик Джон Гарднер, «...общество борьбы с шумом будет наверняка довольно машинами для стрижки газонов с приводом от термоэлектрических генераторов, которые восстаноят в какой-то мере мир и тишину в пригородах во время уик-эндов».

## 5.6. Электрохимические генераторы

В электрохимических генераторах (так в наше время называют гальванические элементы) происходит преобразование химической энергии в электрическую.

Возникновение э.д.с. в гальваническом элементе связано со способностью металлов посылать свои ионы в раствор в результате молекулярного взаимодействия между ионами металла и молекулами (и ионами) раствора.

Были исследованы с точки зрения применимости в качестве источников тока все возможные комбинации гальванических пар с различными электролитами. Однако практически осуществимыми оказались только немногие электрохимические системы. Кроме классических свинцовых и никелевых аккумуляторов промышленное значение приобрели серебряные аккумуляторы с цинковым и кадмиевым анодом и несколько систем, способных кратковременно отдавать большие мощности (в основном это ампульные батареи). Удельная энергоемкость наилучших (серебряно-цинковых) аккумуляторных батарей не превышает 120–130 Вт·ч/кг при наиболее благоприятных условиях эксплуатации. Применение таких источников в зоне повышенных и отрицательных температур ухудшает их характеристики.

При создании автономных систем с длительными сроками службы весьма существенным, наряду с полезным потреблением энергии, становится саморазряд химических батарей, ограничивающий срок их активной работы и понижающий эффективную величину энергоемкости.

Важное техническое приложение гальванические элементы нашли в аккумуляторах, где вещество, расходующееся при отборе тока, предварительно накапливается на электродах при пропускании через них в течение некоторого времени тока от постороннего источника (при зарядке). Применение аккумуляторов в энергетике затруднено вследствие малого запаса активного химического горючего, не дающего возможности получать непрерывно электроэнергию в больших количествах. Кроме того, для аккумуляторов характерна малая удельная мощность.

Большое внимание во многих странах мира уделяется установкам, осуществляющим непосредственное преобразование химической энергии органического топлива в электрическую энергию, – *топливным элементами*. В этих установках могут быть получены более высокие значения КПД, чем у тепловых машин, и в несколько раз большая энергоемкость, чем у химических батарей. В 1893 г. немецкий физик и химик Нернст вычислил, что теоретический КПД электрохимического процесса превращения химической энергии угля в электрическую равен 99,75 %.

Наиболее отработанными и перспективными, по-видимому, являются водородно-кислородные элементы. Электроэнергия в таких элементах получается в результате превращения химической энергии в электрическую; элемент может работать при комнатной температуре и атмосферном давлении, но эффективность электрохимического процесса существенно повышается с увеличением температуры и давления.

На рис. 5.18 показана принципиальная схема водородно-кислородного топливного элемента. Электроды в топливном элементе выполнены пористыми. На аноде происходит переход положительных ионов водорода в электролит.

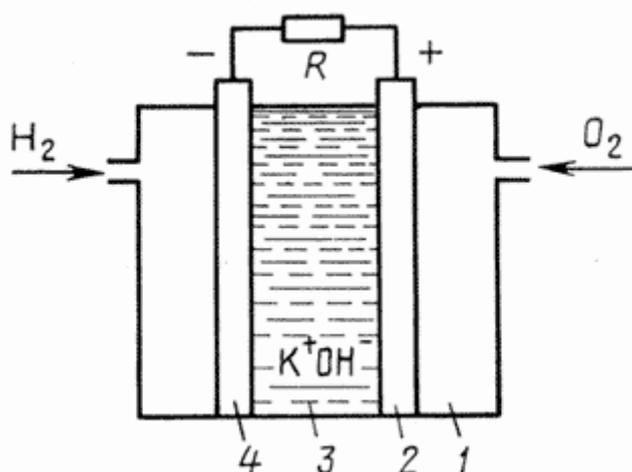


Рис. 5.18. Схема водородно-кислородного топливного элемента: 1 – корпус; 2 – катод; 3 – электролит; 4 – анод

Оставшиеся электроны создают отрицательный потенциал и во внешней цепи перемещаются к катоду. Атомы кислорода, находящиеся на катоде, присоединяют к себе электроны, образуя отрицательные ионы, которые, присоединяя из воды атомы водорода, переходят в раствор в виде ионов гидроксила  $\text{OH}^-$ . Ионы гидроксила, соединяясь с ионами водорода, образуют воду. Таким образом, при непрерывном подводе водорода и кислорода будет происходить непрерывная реакция окисления горючего ионами с одновременным образованием тока во внешней це-

пи. Так как напряжение на выводах элемента невелико (порядка 1В), то элементы последовательно соединяют в батареи. КПД топливных элементов очень высок. Теоретически он близок к 100 %, а практически он равен 60–80 %. Использование водорода в качестве топлива сопряжено с высокой стоимостью эксплуатации топливных элементов, поэтому изыскиваются возможности применения других видов топлива, в первую очередь природного и генераторного газа, так как газ относится к дешевым видам топлива. Однако удовлетворительные скорости протекания реакции окисления газа наблюдается при высоких температурах (800–1200 °К), что исключает применение в качестве электролитов водных растворов щелочи. В этом случае могут быть использованы твердые электролиты с ионной проводимостью.

В настоящее время широко ведутся работы над созданием эффективных высокотемпературных топливных элементов. Пока удельная мощность топливных элементов все еще невелика. Она в несколько раз ниже, чем у двигателей внутреннего сгорания. Однако успехи электрохимии и конструктивные усовершенствования топливных элементов в недалеком будущем могут сделать вполне возможным применение топливных элементов на автотранспорте и в энергетике. Топливные элементы бесшумны, экономичны и у них отсутствуют вредные отходы, загрязняющие атмосферу.

## ГЛАВА 6. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Вряд ли уже удастся установить, кто впервые применил термин «энергосбережение». Может быть это прямой перевод английского «energysaving» или немецкого «energiesparung» или французского «economie de L'energie». К сожалению, в любом из них содержится логическое противоречие: сбережение энергии противоречит физическому закону сохранения энергии. Энергию можно преобразовать из одного вида в другой, но невозможно сберечь.

Энергосбережение – это не экономия, а выбор между повышением производительности труда и повышением производительности энергоресурса, [4, 12, 20, 21].

В законе Российской Федерации «Об энергосбережении» дается следующая трактовка этому понятию: «Энергосбережение – реализация правовых, организационных, научно-производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии». Здесь ключевое слово – реализация. Оно предполагает внедрение новых технологий, обеспечивающих более эффективное использование энергоресурсов, установку приборов учета энергоресурсов, совершенствование энергопотребляющей техники, оптимизацию технологий использования топлива и энергии, снижение прямых потерь энергии, создание новых источников энергии, энергоресурсов и многое другое.

В ряде нормативно-правовых документов, действующих сегодня на территории Российской Федерации, под энергосбережением понимается деятельность органов государственной власти, направленная на создание условий для реального энергосбережения. Это уже иная деятельность – деятельность по обеспечению энергосбережения: подготовка кадров, стандартизация, сертификация, энергетическое обследование, нормирование, просвещение и др.

### **6.1. Проблемы энергоэффективности в сфере потребления на примере российской экономики**

Как было показано выше, прогресс цивилизации связан с освоением все новых объемов, видов и качества энергоресурсов. В течение прошедшего столетия энергопотребление увеличилось более чем в 5 раз. Это означает, что и далее будут расти расходы общества, связанные с добычей, переработкой и потреблением энергоресурсов. Будут расти и негативные воздействия энергетики на окружающую среду. Поэтому будут нарастать усилия и затраты по ограничению этого воздействия.

Оценки международных экспертов показывают, что до 40 % валового национального продукта страны связаны в той или иной мере с добычей, переработкой и потреблением энергоресурсов. Видимо и в будущем эти расходы будут увеличиваться, в том числе, для обеспечения повышающихся экологических требований.

С одной стороны, истощение невозобновляемых природных энергетических ресурсов, загрязнение окружающей среды, а в перспективе, изменение климата, другие глобальные явления, вызываемые производством и переработкой энергетических ресурсов, вызывают обоснованную озабоченность государственных и общественных организаций.

С другой стороны, тенденции, складывающиеся в мире в последние 2–3 десятилетия, показывают совершенно определенное снижение темпов прироста потребления энергоресурсов, что дает основание для оптимизма. Так, за период с 1963 по 1973 гг. прирост мирового энергопотребления составил 2,6 млрд тонн условного топлива, а за последующее десятилетие – всего 1,7 млрд т. Особенно сильно снизились темпы в промышленно развитых странах. Средний ежегодный прирост потребления в мире составил 1 %, а в США – 0,4 %, в странах Западной Европы и Японии – 0,25 %. Переломным моментом в мировом изменении темпов прироста энергопотребления стало начало 70-х годов, когда произошло резкое повышение цен на нефть и многие страны приступили к реализации энергосберегающих программ.

При этом обнаруживаются две противоречивые тенденции. Техника и технологии, машины и устройства на большинстве предприятий разрабатывались, проектировались и создавались в эпоху «дешевой» энергии. Их энергоэкономические показатели соответствуют приоритетам той эпохи. В новых условиях действующие регламенты и технологии воспринимаются как устаревшие и несоответствующие новой парадигме. Требуется изменить сам технико-экономический выбор, который повлечет за собой изменение в соотношении составляющих затрат – зарплата, энергия, сырье, материалы, амортизация, налоги и т. п. Поэтому структурная перестройка энергопотребления во всем мире идет медленно. С другой стороны, цивилизация всегда стремилась экономно распоряжаться энергоресурсами. Энергетическая теория, многие прикладные науки (термодинамика, тепломассопередача, гидроаэродинамика, электротехника и многие другие) по сути изучают способы и осуществляют поиск все более экономичных решений в технике, технологиях и в самой энергетике. Следует отметить, что в самой электроэнергетической отрасли повышение эффективности основного производства – выработки и передачи энергии – идет более высокими темпами, чем в большинстве отраслей, относящихся к сфере потребления.

Таким образом, энергосберегающий характер экономического переустройства является объективно обусловленным свойством современного этапа развития мирового хозяйства. Но до 70-х годов энергосбережение было естественным эффектом научно-технического прогресса, изменения структуры производительных сил. В 70–90 гг. энергосбережение приобрело целевой характер в большинстве стран мира, ощутивших удары нефтяного кризиса.

Вместе с тем даже в промышленно развитых странах, где рыночная экономика чутко реагирует на любые изменения общеэкономической конъюнктуры, повысить энергетическую эффективность удалось ценой больших затрат времени и средств. Потребовались многократные потрясения, прежде чем энергоемкость внутреннего валового продукта промышленно развитых стран начала снижаться [12].

В СССР нефтяной кризис наступил на полтора десятилетия позднее, когда остальной мир уже преодолел его последствия. Энергоемкость ВВП СССР, а теперь России по первичным энергоресурсам оказалась в 3–4 раза выше, чем в США, основных западноевропейских странах и Японии.

Примерно такая же ситуация складывается во многих развивающихся странах и, прежде всего, в обладающих большими энергетическими ресурсами. «Развращающее» влияние природных богатств в СССР усугублялось государственной системой регулирования экономики, а переходной период, начавшийся в 1991 г., усилил негативные явления в энергетике кризисом платежей за энергоносители. В этой связи представляется целесообразным все проблемы повышения энергоэффективности экономики страны рассмотреть на примере современной России, где они выступают в наиболее явном виде.

Сохранение заниженных цен на энергию, как один из основных элементов государственной политики в СССР и России, привело к недоинвестированию энергетике вообще и особенно в звеньях, следующих за добывающими в энергетической цепочке. Поэтому проблемы энергетического комплекса не разрешались по мере их проявления, а накапливались и усугублялись. Даже поддержание достигнутого уровня генерирующего потенциала энергетике при сохранении избыточного спроса на конечную энергию (из-за низкой эффективности потребления) требовало все больших и больших усилий и ресурсов. Вне сферы государственного воздействия оставался единственный эффективный путь решения энергетических проблем – путь повышения энергетической эффективности общественного производства, сокращения потерь энергии, путь энергосбережения. Решение проблем обеспечения потребностей страны в энергии должно прийти главным образом со стороны

спроса на энергию. Сегодня российское энергопотребление является избыточным более чем на треть. Оно не сопровождается соответствующим производством продукта (рис. 6.1).

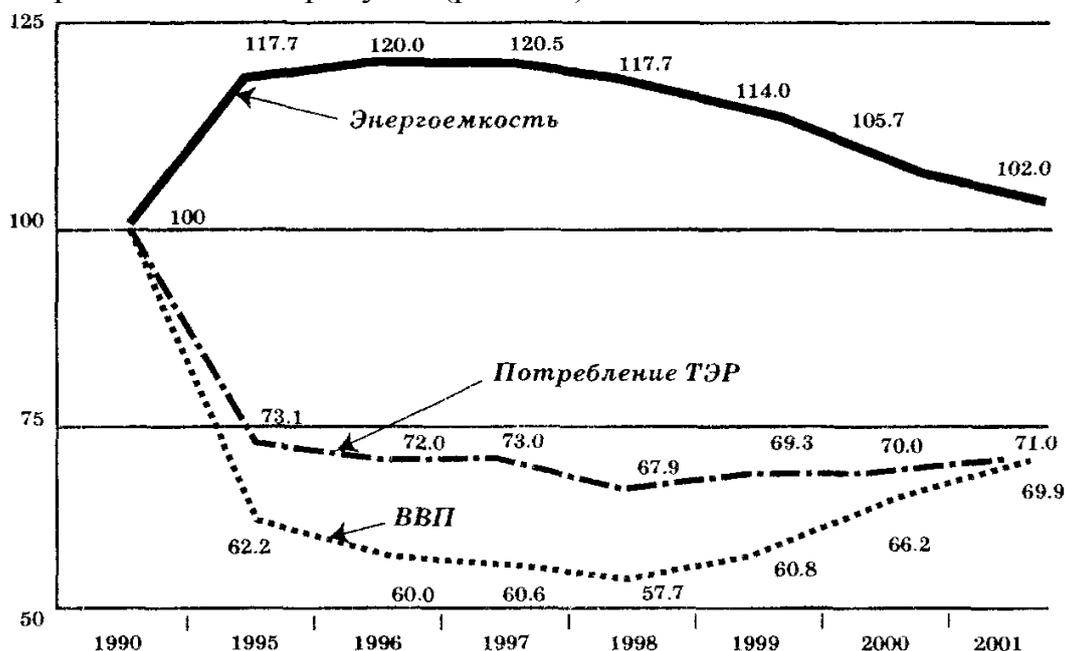


Рис. 6.1. Динамика показателей энергопотребления и ВВП

При годовом производстве 1362 млн т у.т. (1997 г.) «избыточной» является энергия в объеме 408 млн т у.т. При средней цене условного топлива 250 руб./т у.т. это соответствует 100 млрд руб. в год. Эти средства можно сэкономить.

Изобилие дешевых энергоресурсов за многие десятилетия породило негативную тенденцию энергорасточительности. Энергетическая составляющая себестоимости многих видов промышленной и сельскохозяйственной продукции снизилась до 1–3 %, что в значительной степени выключило стимулы к экономии энергоресурсов. В проекты целого ряда новых крупных заводов закладывалась старая технология, основанная на перерасходе энергетических ресурсов. Большинство новых видов российской продукции имеет энергетические показатели значительно хуже зарубежных аналогов. Многие в этом положении сохраняются и сегодня. Это затрудняет проведение реального энергосбережения, но увеличивает его потенциал.

Важной причиной неблагоприятного положения в области энергоэффективности, в особенности в сфере потребления, следует считать незаинтересованность в экономном расходовании топливно-энергетических ресурсов на всех уровнях управления, на производстве, на рабочих местах и коммунальной сфере. Незаинтересованность в экономии энергоресурсов потребителями естественна в энергосистемах и других энерго-

снабжающих организациях, поскольку это приводит к снижению объема реализации, а значит – доходов и прибылей.

В свою очередь, потребители энергетических ресурсов не проявляют энтузиазма в их экономии, поскольку это, прежде всего, требует средств, усилий, знаний и умений. Кроме того, энергетическая расточительность производственных процессов вызвана значительной долей устаревшего оборудования, малоэффективными технологическими установками, высокой постоянной составляющей энергопотребления, связанной с общезаводскими расходами.

В настоящее время повсеместно крайне низка оснащенность энергопотребителей и энергетических сетей средствами учета, контроля, регулирования и автоматизации. В меньшей мере это касается электроэнергии, в полной мере – тепла и других энергоресурсов.

Не менее важной причиной низкого уровня энергосберегающей деятельности в России является почти полное отсутствие экономических и иных стимулов. Разработка и выпуск энергосберегающей продукции и технологии, имеющих улучшенные показатели энергопотребления, не поощряются. Именно эти свойства продукции могли бы стать решающими на рынке.

В настоящее время экономика России испытывает недостаток в квалифицированном управленческом и инженерном персонале в сфере энергосбережения. Необходимо осуществлять обучение, подготовку и переподготовку кадров, повышение их квалификации, ориентируясь на новые силы и на новые интенсивные учебные программы.

Подводя итог, можно выделить несколько факторов, определяющих *актуальность* поиска новых подходов в разработке и осуществлении реального энергосбережения:

- динамика оптовых цен на первичные энергоресурсы, мировые тенденции и опыт промышленно-развитых стран свидетельствуют о необходимости и возможности существенного снижения энергетических потребностей общества;
- анализ энергопотребления в России, в развитых и в развивающихся странах, в странах с переходной экономикой показывает значительный резерв (потенциал) энергосбережения в промышленности, коммунально-бытовом хозяйстве и на транспорте (рис. 6.2);
- в России отраслевой принцип управления энергосбережением в настоящее время себя исчерпал в связи с акционированием предприятий;
- относительная экономическая и правовая самостоятельность регионов, их территориальная целостность создают предпосылки для построения эффективной региональной системы энергосбережения;

- наиболее эффективный путь реализации энергосберегающей политики – повышение цены энергии – может быть введен в действие только после принятия мер по социальной защите малообеспеченных слоев населения.

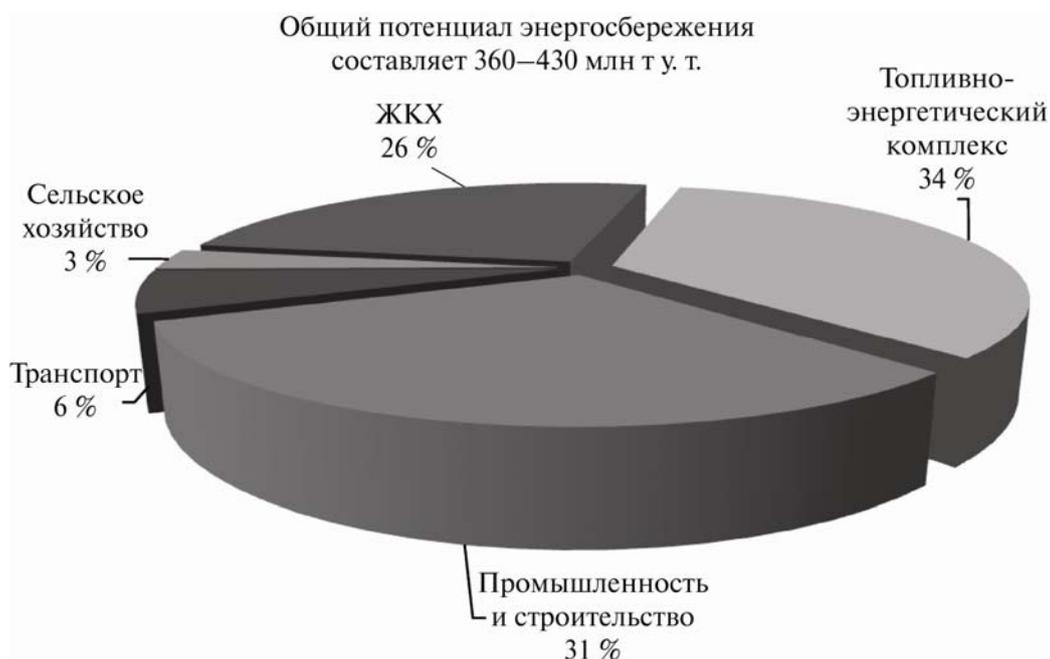


Рис. 6.2. Потенциал энергосбережения в различных отраслях экономики России

Проблемы в обеспечении потребителей энергетическими ресурсами в большинстве регионов Российской Федерации в середине 90-х годов были вызваны общим экономическим кризисом страны, глубоким спадом промышленного производства и деловой активности, интенсивным разгосударствлением предприятий топливно-энергетического комплекса, разрывом сложившихся схем поставок, массовыми неплатежами, нарастанием взаимных задолженностей, сохранением значительных некомпенсируемых льгот, сокращением производства энергоресурсов и снижением их качества, диспаритетом цен на внутреннем и внешнем рынках энергоресурсов, противоречиями между энергетическими компаниями, потребителями, органами государственной власти, муниципалитетами и населением (рис. 6.3).

Суть противоречий заключается, в первую очередь, в экономической области: приватизированная собственность и государственное регулирование тарифов, многочисленные льготы разным категориям потребителей энергоресурсов и отсутствие их бюджетного обеспечения, различие цен на один и тот же продукт для разных потребителей, долги потребителей за уже поставленные энергоресурсы и т. п.



Рис. 6.3. Схема связей и противоречий энергоснабжения в регионе

Таким образом, *проблемная ситуация* в регионах России состоит в следующем. В условиях реформирования хозяйства в большинстве регионов Российской Федерации нарастает зависимость уровня и качества жизни населения, социальной и политической устойчивости от количества и качества используемых энергоресурсов, их цены и доступности для потребителей в связи с углублением противоречий и несоответствием сложившихся систем управления новым рыночным экономическим условиям.

## 6.2. Особенности и закономерности энергосбережения

Закономерности и противоречия энергосбережения, как процесса, позволяют увидеть в нем специфичное, в известной степени новое явление общественной жизни. Отдельные черты этого явления, его закономерности и противоречия складываются в некую систему проблем и вытекающих из них следствий.

### **Проблема 1**

*Энергосбережение до сих пор является побочным продуктом научно-технического прогресса.*

Технические новшества в предыдущие десятилетия были призваны решать такие задачи, как повышение производительности труда, улучшение комфорта и качества продукции и услуг. Но одновременно с этим они обеспечивали повышение эффективности использования энергетических ресурсов.

### **Следствие**

В новых условиях необходимо более строго соизмерять конечные цели и стоимость их достижения. Иными словами среди набора показателей производственно-хозяйственной деятельности энергоэффективность должна занять приоритетное место.

## **Проблема 2**

*Государственная энергетическая политика характеризуется непоследовательностью и противоречивостью.*

- регулируемые цены (тарифы) на конечную энергию (электричество и тепло), устанавливаемые региональными энергетическими комиссиями, не в полной мере отражают динамику затрат энергоснабжающих организаций, длительное время сдерживаются ради стабильности социальной обстановки, в разных регионах отражают разные тенденции;
- соотношение цен (тарифов) на электрическую энергию для разных групп потребителей не соответствует реальному участию потребителей в формировании оптимального графика нагрузки;
- соотношение цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и промышленности деформировано в результате сильного давления социальной политики;
- федеральная и региональные энергетические комиссии устанавливают, регулируют тарифы на энергию, проверяют представленные энергоснабжающими организациями материалы о затратах на производство и передачу энергии, но не осуществляют контроль за направлением расходования средств;
- бюджетные дотации населению за потребляемую тепловую энергию распределяются пропорционально занимаемой жилой площади. Значит, значительно меньшую дотацию получают люди с меньшими доходами, проживающие в домах с малой площадью; малообеспеченные слои населения ущемляются;
- многие государственные бюджетные организации не получают достаточных средств для оплаты получаемых энергоресурсов.

## **Следствие**

Сложившееся в современной России соотношение между государственным регулированием и действием рыночных механизмов в области энергосбережения далеко от оптимального и представляет собой большой резерв для повышения энергоэффективности. Его извлечение требует законотворческой деятельности на всех уровнях властной вертикали и дополнительных затрат.

## **Проблема 3**

*Потребление энергии и энергоресурсов неизменно возрастает. Активное энергосбережение лишь сдерживает темпы роста.*

Статистические сведения об изменении потребления энергии, энергетических ресурсов странами и отраслями, регионами и предприятиями однозначно свидетельствуют об устойчивом росте использования энер-

горесурсов. И эту закономерность не нарушают даже периодические спады, вызванные особыми причинами. Для иллюстрации этой закономерности ниже представлены графики производства электроэнергии в СССР и России (рис. 6.4) и динамики производства топлива (рис. 6.5).

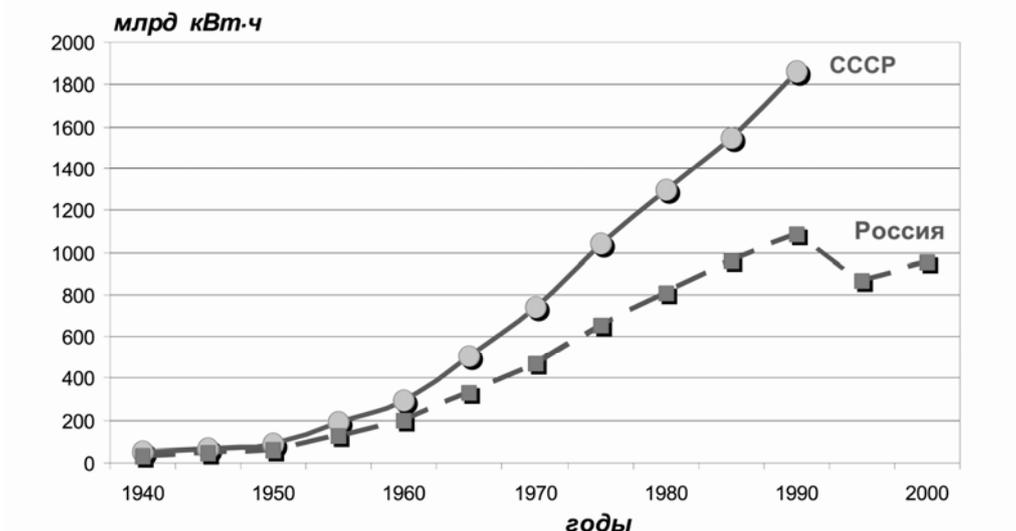


Рис. 6.4. Динамика производства электроэнергии в СССР и России

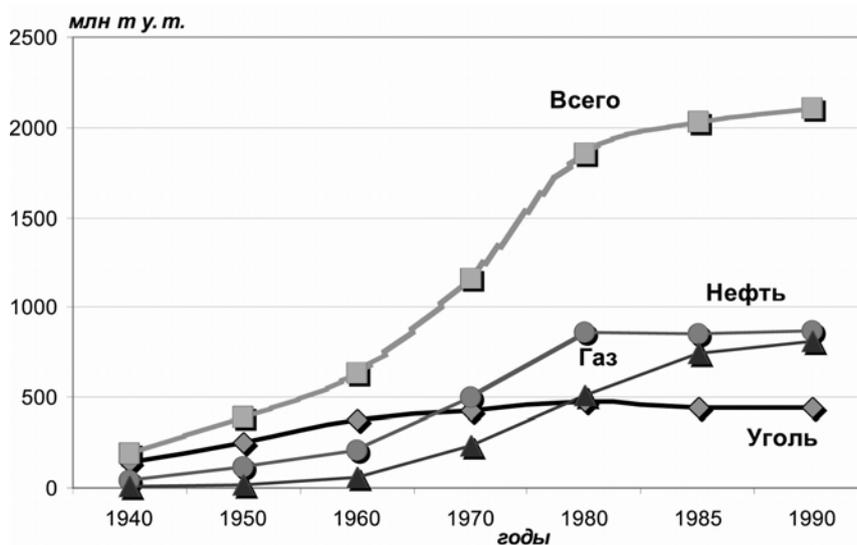


Рис.6.5. Добыча топлива в СССР

### Следствие

Для обеспечения жизнедеятельности объекта потребление энергии не должно быть меньше некоторого порогового значения: если принудительно снижается потребление одного энергоресурса, то оно, хотя бы частично, компенсируется другим, так как приближение потребления энергии к минимуму усиливает угрозу существованию объекта.

#### **Проблема 4**

*Дискриминационные экономические критерии ставят перед энергоэффективным проектом гораздо более высокий барьер, чем перед проектами, предполагающими расширение использования энергоресурсов:*

- энергетическая эффективность инвестиционного проекта чаще всего обеспечивается ростом капиталовложений или увеличением доли живого труда;
- в технико-экономическом сравнении проекты со сниженной долей энергетических затрат чаще всего проигрывают вариантам, увеличивающим потребление энергоресурсов;
- срок окупаемости, как критерий эффективности позволяет сравнить инвестиции с издержками и при дешевой энергии обеспечивает предпочтение энергорасточительным проектам;
- коэффициент полезного действия, как критерий эффективности технических систем, применительно к альтернативным и нетрадиционным источникам энергии может приводить к выводам о неэффективности таких систем, но поскольку они используют энергию, ранее не извлекаемую, то для оценки нужны другие критерии.

#### **Следствие**

Для приведения в действие экономических стимулов энергосберегающего поведения необходимо изменить соотношение стоимости энергоресурсов, сырья и труда в пользу первого. Простое повышение стоимости энергоресурсов быстро не изменит этого соотношения. Этот процесс длительный и для его ускорения требуются целенаправленные усилия.

#### **Проблема 5**

*Энергоснабжающие организации не заинтересованы в снижении потребителями энергетических затрат:*

- увеличение объема продаж энергии и энергоресурсов однозначно ведет к увеличению доходов от продажи, поскольку цена на них установлена заранее и, соответственно, энергосберегающие меры у потребителей ведут к снижению доходов и прибыли;
- снижение потерь в собственных установках и сетях интереса не представляет, так как стоимость этих потерь в соответствии с «методикой» заранее включена в затраты и тариф, то есть оплачивается потребителем;
- энергоснабжающие организации заинтересованы только в одном – снижении коммерческих потерь (разница между отпущенной энергией и оплаченной);
- нормирование баланса выработки и отпуска энергии в энергоснабжающих организациях делает ненужной энергосберегающую деятельность;

- персонал энергоснабжающих организаций не заинтересован в снижении энергетических затрат или потерь. Уровень зарплаты персонала никак не связан с энергосберегающими результатами.

### **Следствие**

Необходимо радикальное изменение всего пакета документов, регламентирующего взаимоотношения поставщиков и потребителей энергоресурсов.

### **Проблема 6**

*Многие системы оплаты труда предусматривают поощрение работника за расходование ресурса, а не за его сохранение:*

- стоимость проектирования, а отсюда – фонд оплаты труда проектировщиков – некоторый процент от объема капиталовложения в проект (внешняя экспертиза не спасает дела);
- оплата труда эксплуатационного, ремонтного, энергетического персонала весьма в малой степени зависит от эффективности использования энергоресурсов;
- для рабочих и служащих других профессий оплата труда не зависит от эффективности использования энергии или энергосбережения;
- для управленческого персонала и руководителей, находящихся, как правило, на контрактной системе оплаты труда, эффективность использования энергоресурсов может служить одним из факторов стимулирования, но пока это – из области надежд, а не реалий.

### **Следствие**

Одно из самых простых направлений реализации энергосбережения состоит в том, чтобы персонал исполнял свои обязанности в полном соответствии с правилами и регламентами, сориентированными на энергосбережение, а система оплаты труда поощряла энергосбережение и наказывала энергорасточительство.

### **Проблема 7**

*Все физические лица – потребители энергии – отчетливо понимают, что энергорасточительность неразумна, но без дополнительных стимулов энергосберегающее поведение не превращается в норму:*

- лестничные площадки жилых домов, лекционные и офисные помещения, цеховые пролеты часто освещены электричеством, когда достаточно естественного света;
- кипятят полный чайник, даже если требуется одна чашка воды;
- открывают окна в помещении, чтобы понизить температуру, держат оборудование во включенном состоянии на холостом ходу и многое-многое другое.

### **Следствие**

Энергорасточительное поведение – следствие слабой мотивации и некомпетентности.

Четкое формулирование любой проблемы, в том числе проблемы повышения эффективности использования энергоресурсов, позволяет найти способы ее решения.

### **6.3. Энергосбережение – новый энергетический ресурс**

Обществу требуется вовсе не энергосбережение, а *эффективное использование* энергии и энергоресурсов. В подтверждение этих слов уместно сослаться на Э. Вайцеккера, А. Ловинса, Л. Ловинс: «энергосбережение» имеет моралистический контекст. Расточительность всегда считалась и считается грехом. Это упрощенное понятие о сбережении энергии путем добровольного самоограничения. Но потребителям нужны не сами по себе кВт.часы, а горячий душ и холодное пиво, комфорт и свет – конечные услуги. Потребители хотят получить эти услуги надежным, удобным и по возможности наиболее дешевым способом», [12].

Необходимым условием энергосберегающего поведения является осознание необходимости эффективного использования энергоресурсов.

Целый ряд публичных выступлений и публикаций последних лет на тему энергосбережения свидетельствует об использовании термина энергосбережения как нового энергетического ресурса. Смысл здесь таков: энергосбережение, вытесняя другие энергоресурсы из топливно-энергетического баланса, само становится своеобразным энергетическим ресурсом. Предположим, предприятию «А» на планируемый период требуется  $T_1 = 1000$  т у.т. энергоресурсов. В результате внедрения энергосберегающих мероприятий при прочих равных условиях потреблено  $T_2 = 850$  т у.т. Если соблюдается условие

$$T_1 > T_2, \quad (6.1)$$

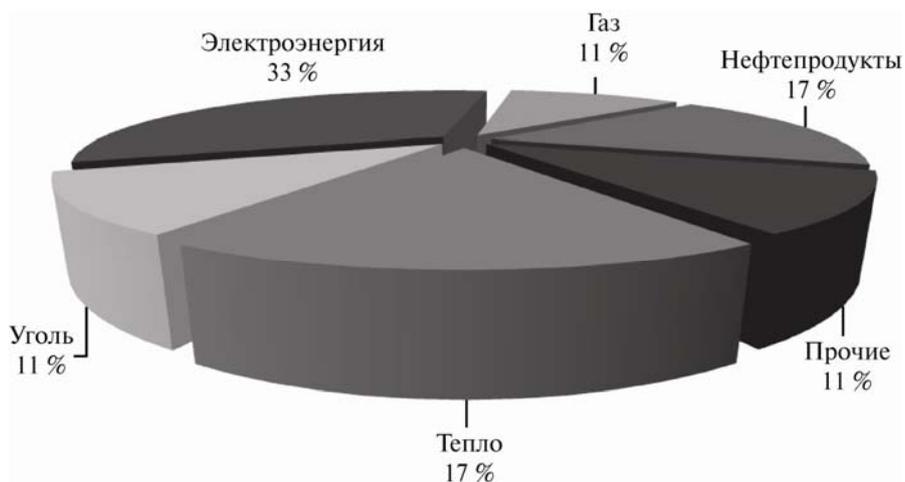
то можно считать, что

$$T_3 = T_1 - T_2 - \text{объем сэкономленного ресурса.}$$

Иначе говоря, часть потребного ресурса  $T_1$  замещается ресурсом  $T_3$ :

$$T_1 = T_2 + T_3 \quad (6.2)$$

В этом случае  $T_3$  – это энергосбережение, т. е. энергетический ресурс, который вытесняет часть ресурса  $T_1$  из топливно-энергетического баланса предприятия. На рис. 6.6 схематично представлено такое изменение баланса.



*Рис. 6.6. Исходный энергетический баланс предприятия*

Пусть исходный топливно-энергетический баланс предприятия выглядит в виде круга (рис. 6.6), где сектора – отдельные энергоресурсы, а объем каждого из них соответствует площади сектора. Суммарный объем потребляемых энергоресурсов (в эквивалентном измерении) соответствует площади этого круга. Если в результате энергосберегающих мероприятий снижено потребление некоторых (или всех) энергоресурсов при сохранении структуры баланса, то итоговый баланс будет выглядеть так, как показано на рис. 6.7.

Пунктирной линией здесь показан диаметр круга исходного баланса. Для большей наглядности итоговый баланс может быть преобразован к следующему виду (рис. 6.8). В данном случае меньший диаметр круга показывает снижение потребления энергоресурсов, а изменение соотношения секторов может соответствовать изменениям структуры баланса.

Если это изменение стало результатом энергосберегающих мероприятий, то его можно представить так, как показано на рис. 6.9.

Теперь площадь круга (рис. 6.9) совпадает с площадью исходного круга, но структура его принципиально изменилась – появился новый энергетический ресурс – энергосбережение, которое выполняет функцию замещающего энергоресурса.

Называя энергосбережение новым энергетическим ресурсом, следует предположить, что ему (ресурсу) можно поставить в соответствие некоторые физические, термодинамические и экономические свойства. Поскольку энергосбережение вытесняет из топливно-энергетического баланса другие виды ресурсов, то оно, видимо, должно иметь более привлекательные характеристики, чем у вытесняемых.



Рис.6.7. Итоговый баланс энергоресурсов

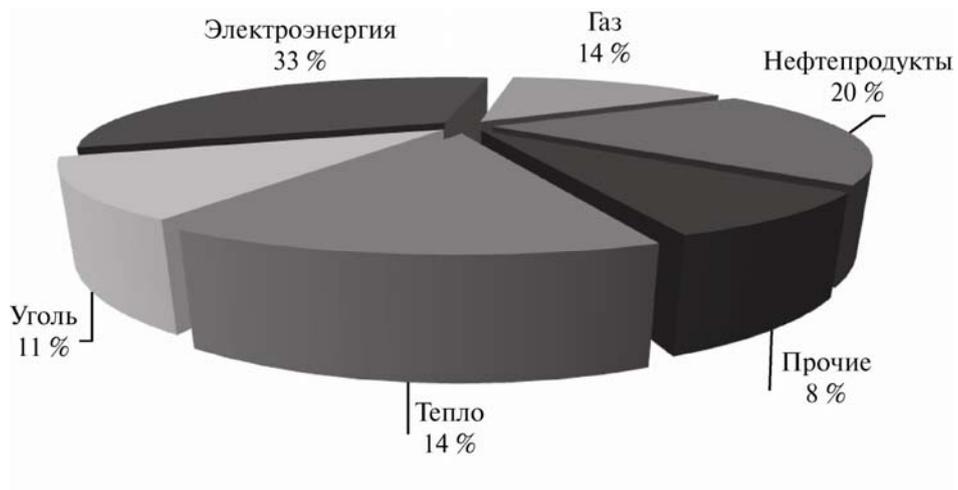


Рис. 6.8. Преобразованный баланс предприятия



Рис. 6.9. Баланс с учетом энергосбережения

В сопоставлении с другими энергоресурсами физические и экономические характеристики энергосбережения, как нового специфического ресурса, могут выглядеть для российских условий в соответствии с данными табл. 3.2.

Энергосбережение все чаще становится основным предметом деятельности специализированных предприятий, организаций, фирм. Особый род такой деятельности характерен для энергосервисных компаний «ЭСКО». Во многих странах нашли свое место фирмы, проводящие консультирование и энергетические обследования. Таким образом, энергосберегающая деятельность – это еще и бизнес. Очевидно, что существовать такой бизнес может только при наличии определенного устойчивого спроса на специфические товары и услуги и при заметной прибыльности этого дела. Наиболее активны здесь малые специализированные фирмы, которые действуют в содружестве и часто на базе крупных предприятий. Деятельность значительного количества организаций в области энергосбережения характеризуется значительной неоднородностью по длительности, затратам, эффективности, трудоемкости. Это можно проиллюстрировать на примере рис. 6.10.

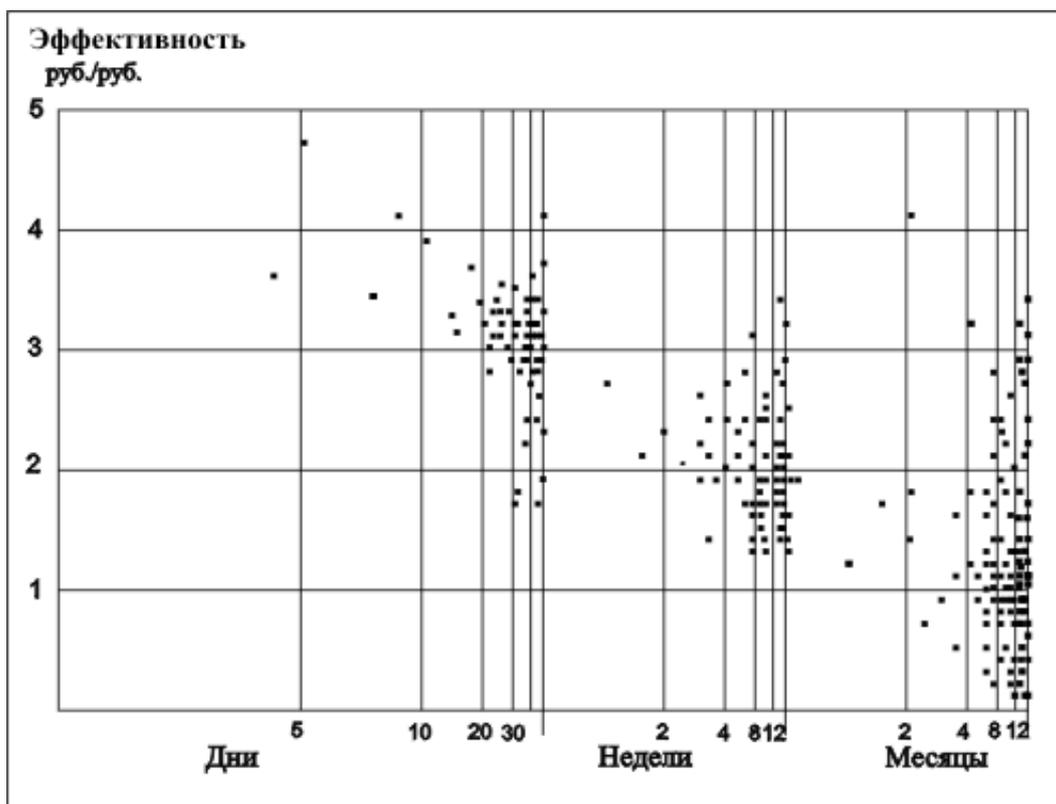


Рис. 6.10. Зависимость экономической эффективности энергосберегающих мероприятий от периода их реализации

На этом графике обобщены более четырех тысяч информационных материалов, публикаций, рекламных листовок и проектов, где приведены показатели эффективности [4]. Использована нелинейная временная шкала. Это позволило отчетливо выявить три плотные группы энергосберегающих мероприятий:

*I группа* – высокоэффективные, к которым в основном относятся организационные (малозатратные) мероприятия, обеспечивающие, в первую очередь наведение технологического порядка, укрепление дисциплины производства, устранение элементарных потерь. Примерами таких мероприятий могут служить оснащение предприятий счетчиками энергии, нормирование удельных расходов электроэнергии по видам деятельности, разработка энергосберегающего графика работы агрегатов.

*II группа* – среднеэффективные, к которым относятся технологические мероприятия, заключающиеся в технологическом переустройстве, рационализации производства без крупных капиталовложений. Применение установок компенсации реактивной мощности, снижение мощности обогревателей вследствие утепления и ремонта, настройка и оптимизация регулирования агрегатов – характерные примеры технологического энергосбережения.

*III группа* – инвестиционные мероприятия, предусматривающие коренную реконструкцию производства, замену технологии на энергоэффективную. Для реализации этих мероприятий требуются внешние заимствованные средства. Срок окупаемости этих мероприятий часто оказывается большим и потому экономическая эффективность их относительно невысока.

Таким образом, наличие обособленных групп мероприятий требует оценивания экономической эффективности энергосбережения отдельно для каждой из них. Более того, попытки сравнивать эффекты от мероприятий из разных групп заведомо неправомерны. Есть основание предполагать, что эти три группы представляют собой три несвязанные совокупности разнородных явлений или три разных явления, объединенных только конечной целью – сокращение непроизводительного расходования энергоресурсов.

В большинстве Европейских стран, в Японии, США сложилась многолетняя традиция экономного расходования энергии и энергоресурсов. Традиция эта возникла и укрепляется целым рядом исходных и сопутствующих обстоятельств:

- высокая цена топлива и энергии;
- высокая оснащенность средствами учета и регулирования;
- действенность механизма потребительского рынка энергии;

- законодательная и юридическая защита прав потребителей;
- высокая квалификация персонала энергоснабжающих организаций;
- мощная рекламная и разъяснительная кампания среди населения;
- законодательное обеспечение энергосбережения и эффективного использования энергии и энергоресурсов.

Эта традиция сформировалась в энергосберегающий образ жизни, что обеспечивает более низкую энергоемкость валового национального продукта, чем в России. При этом потребление энергоресурсов на душу населения в коммунально-бытовой сфере выше российского из-за более высокого уровня жизни. Значительная часть сэкономленных средств направляется на реализацию более современных энергосберегающих технологий.

Все это вместе взятое свидетельствует о постепенном прорастании энергосбережения во все сферы человеческой деятельности – в производство, транспорт, связь, быт, средства массовой информации, в рекламу и т. п. *Энергосбережение начинает формировать новый, экономный стиль жизни.* Именно поэтому энергосбережение следует считать новым специфическим явлением общественной жизни.

#### **6.4. Управление энергосбережением**

Энергосбережение по своим конкретным результатам, как уже отмечалось выше, эквивалентно отказу от значительной части добываемых ресурсов. Но переход к интенсивному энергосбережению потребует длительного времени и значительных усилий организационного, правового, производственного и научно-технического характера, а также финансовых вложений.

Система управления энергосбережением предполагает наличие четырех базовых блоков:

- создание законодательной базы энергосбережения;
- разработка и реализация федеральных и муниципальных, а также отраслевых программ энергосбережения;
- создание фондов энергосбережения для консолидации финансовых всех уровней в целях внедрения энергосберегающих проектов;
- создание центров энергосбережения, призванных осуществлять научно-методическое сопровождение и координацию энергосберегающей политики соответствующего уровня [63].

В определении оптимальных темпов, направлений и характера энергосбережения с учетом возможностей экономики и структуры управления состоит задача проектирования системы энергосбережения. Впечатляющих энергосберегающих результатов можно добиться при правильном взаимодействии всех указанных выше блоков – элементов управления энергосбережением (рис. 6.11).



Рис. 6.11. Взаимосвязь элементов управления энергосбережением

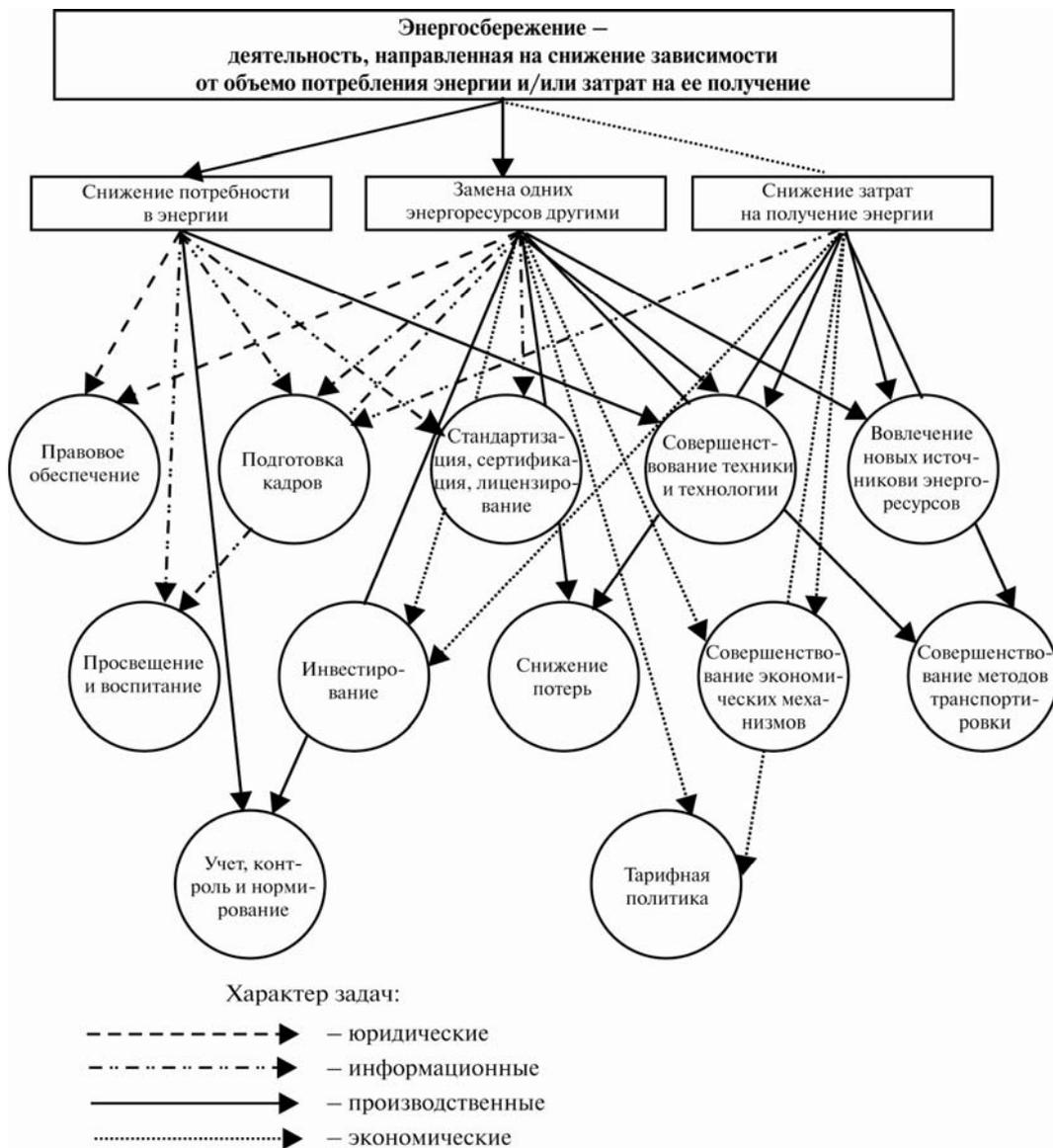


Рис. 6.12. Задачи, реализуемые при осуществлении энергосбережения

На региональном уровне формируемые цели и задачи должны содержать серьезную социальную составляющую. Непосредственная реакция населения на те или иные управляющие решения чаще всего направлена на местные органы власти. Именно в регионе эта реакция ощущается острее. Поэтому региональный уровень управления должен быть наиболее социализирован. Применительно к энергосбережению это означает, что прежде чем включать в действие сильный, но непопулярный энергосберегающий стимул – повышение цены энергии, необходимо не только провести широкую разъяснительную кампанию, но и создать возможность наименее обеспеченным слоям населения платить по этой повышенной цене. Управление энергосбережением в регионе целесообразно осуществлять на основе программно-целевого подхода, схематически представленного на рис. 6.12.

Энергосберегающая деятельность складывается из следующих трех направлений:

- снижение потребности в энергии;
- снижение затрат на энергию;
- замена одних энергоресурсов другими.

Вместе с тем задачи, возникающие на каждом из направлений, не только взаимно пересекаются, но часто дополняют и повторяют друг друга.

Определенное представление о взаимосвязи задач на разных этапах реализации энергосбережения дает табл. 6.2.

Одно только перечисление этих задач показывает, что для осуществления реального и эффективного энергосбережения совершенно недостаточно составить план организационно-технических мероприятий. Необходимо на системной основе подготовить программу энергосбережения в регионе.

Одним из необходимых условий исполнения целей и задач разрабатываемых программ энергосбережения является формирование структур, ответственных за осуществление этих программ. Отношения, связи, взаимодействия и противоречия органов разных уровней управления, сложившиеся к настоящему времени, накладывают существенные ограничения на структуру и функции органов управления энергосбережением. Поэтому при проектировании системы управления важно выдержать идеи баланса полномочий, ответственности и разграничения функций органов управления разных уровней.

Таблица 6.2

## Задачи управления и этапы реализации программы энергосбережения

|                       | Этапы формирования и реализации программы энергосбережения |   |  |   |   |
|-----------------------|--|---|--|---|---|
|                       | Создание и разработка                                      | Организация   | Обеспечение  | Реализация  | Контроль и анализ   |
| Правовая сфера        | Создание нормативно-правовой базы                          | Организация энергетических обследований предприятий     | Обеспечение единства измерений, сертификация и стандартизация          | Борьба с хищениями и расточительным расходом энергоресурсов | Осуществление контроля исполнения программы                     |
| Экономическая база    | Создание экономических механизмов                          | Организация учета и контроля потребления энергоресурсов | Обеспечение эффективности тарифной политики                            | Реализация проектов высокой энергетической эффективности    | Оценка и анализ эффективности мероприятий                       |
| Производственная база | Создание производственной базы                             | Организация производства энергосберегающей техники      | Менеджмент энергосберегающих проектов                                  |   | Анализ эффективности производства                               |
| Информационная база   | Маркетинг энергосбережения                                 |   | Обеспечение подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров | Общественное просвещение и рекламная кампания               | Осуществление демонстрационных зон энергетической эффективности |

Схема взаимоотношений организаций, участвующих в осуществлении энергосбережения и в управлении им, представлена на рис. 6.13, 6.14.

Эффективность системы управления определяется результатами, достигаемыми в объекте управления. Применительно к системе управления энергосбережением это означает, что ее эффективность определяется тем, в какой мере управленческие решения приводят к снижению энергоемкости валового продукта, энергоемкости продукции потребления, потребления первичных энергоресурсов, потерь энергии, достижению плановых значений индикаторов эффективности.

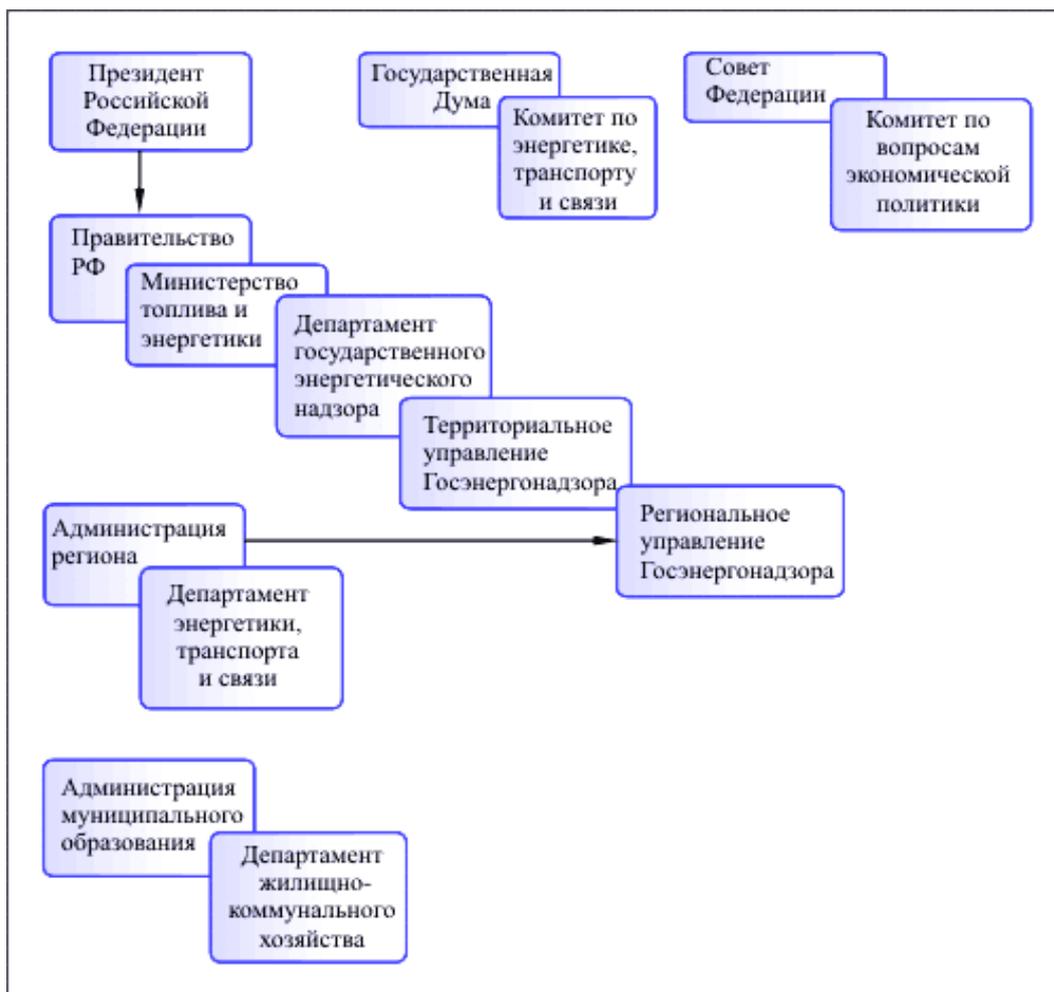
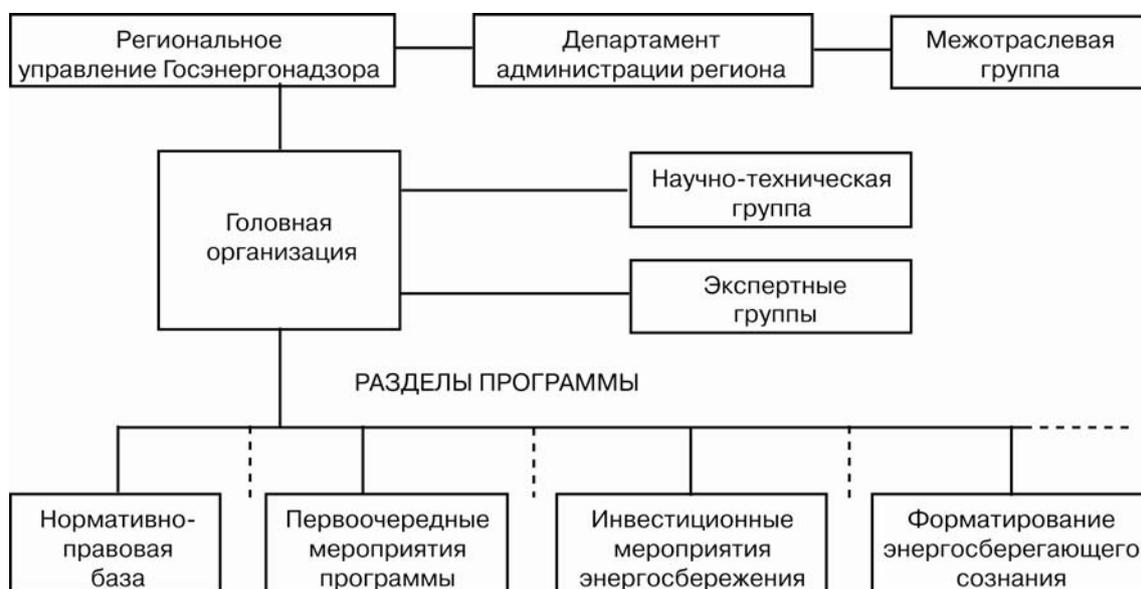


Рис. 6.13. Структура органов государственной власти



Рис. 6.14. Структура органов энергосбережения в РАО ЕЭС

Анализ структуры действующих систем управления энергосбережением показывает, что отношения подчиненности (распределения власти), отношения полномочий (распределения ответственности) и отношения коммуникаций (распределения информации) между отдельными объектами слабо развиты. Это означает, что каждый орган управления формирует свои цели, свои задачи, свои средства управления, свои ресурсы. В результате, часто складывается ситуация, характеризуемая «эффектом растопыренных пальцев». Сосредоточение сил и средств на главных направлениях при сложившейся структуре управления может быть осуществлено путем разработки и реализации целевой программы энергосбережения региона. Для управления разработкой программы целесообразно создание координирующего и контролирующего центра в соответствии со схемой на рис. 6.15.



*Рис. 6.15. Структура взаимодействия при разработке программы энергосбережения*

Для определения экономически оправданных пропорций топливно-энергетического хозяйства региона, для подготовки управляющих решений по обеспечению потребностей экономики и населения в энергоресурсах, для создания и реализации региональной системы энергосбережения и анализа ее эффективности необходимо формировать и анализировать топливно-энергетические балансы региона и муниципальных образований.

Анализ топливно-энергетического баланса, состоящий в изучении соотношений и динамики потребления энергоресурсов и сопоставлении удельных расходов в рассматриваемом объекте с аналогами, обеспечивает выявление небалансов отчетности в использовании энергоресурсов и причин их появления и выбор направлений устранения небалансов.

Важным параметром при этом является *потенциал энергосбережения*, который показывает долю потерь энергии (энергоресурса), которую можно сократить или полезно использовать, если произвести соответствующие улучшения технологических процессов. Он характеризуется соотношением коэффициентов полезного использования энергии действующего (реального) и преобразованного (перспективного) технического процесса.

В качестве последнего могут быть использованы нормативный, эталонный и идеальный процессы.

*Нормативный технологический процесс* – это процесс, в котором оборудование и его режимы соответствуют нормативным, паспортным, проектным данным.

*Эталонным процессом* следует считать такой, в котором используются технологии, соответствующие лучшим научно-техническим достижениям, реализованным в России или в мире.

*Идеальным технологическим процессом* является такой процесс, в котором используется теоретически возможная, но практически недостижимая технология.

Сравнение реального процесса энергоиспользования с эталонным и идеальными процессами позволяет создать концепцию и разработать метод определения потенциала энергосбережения, пригодный для использования на предприятиях, отраслевых комплексах региона и в регионе в целом. Оценку технологического потенциала энергосбережения целесообразно осуществлять диверсифицировано относительно организационных, технологических и инвестиционных энергосберегающих мер.

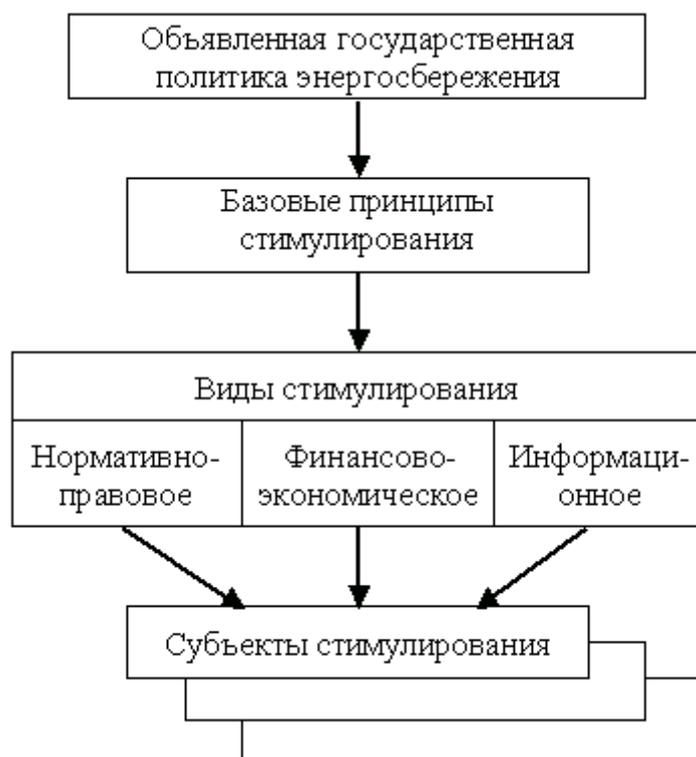
## **6.5. Стимулирование энергосбережения**

Многолетний опыт реализации энергосберегающей политики во многих странах мира и прежде всего в странах Международного Энергетического Агентства (МЭА) свидетельствует о необходимости выработки согласованных и последовательных стимулирующих мер для обеспечения реальных энергосберегающих эффектов. Сами по себе экономические выгоды, получаемые в результате энергосберегающих мероприятий и проектов, очевидные в обоснованиях, оказываются часто недостаточно сильным аргументом в их пользу. Это объясняется рядом причин:

- не все потребители имеют свободные средства, чтобы полностью оплатить приобретение энергоэффективного оборудования и услуги по энергосбережению, даже потенциально быстро окупаемых проектов;
- потребители склонны к ограничению инвестиций в настоящем, несмотря на более высокие расходы в будущем;

- счета за энергопотребление оплачиваются из собственных средств предприятия, а в качестве инвестиций чаще всего используют заемные средства (решения о займах всегда принимаются трудно).

Для осуществления реального энергосбережения необходимы весомые дополнительные стимулы, в качестве которых может применяться целый комплекс мер информационного, финансово-экономического и нормативно-правового характера (рис. 6.16). Комплексность стимулирующих мер обеспечивает охват ими всех субъектов, участвующих в процессе энергосбережения и содержательную полноту этих мер.



*Рис.6.16. Схема стимулирования энергосбережения*

При всей схожести стимулирующих мер их точная направленность на свою группу влияния обеспечивает успех воздействия. Очевидно, что меры, стимулирующие персонал предприятий, мало пригодны для стимулирования населения.

Стимулирование рационального энергопотребления должно осуществляться в соответствии со следующими принципами:

- стимулирующие меры должны быть адресными, учитывать специфику различных групп объектов энергетики;
- стимулирующие воздействия для каждой группы должны быть комплексными, сочетать финансово-экономические, нормативно-правовые и информационные стимулы;

- воздействие стимулирующих мер должно иметь двухстороннюю направленность типа «поощрение–наказание». Поощрения заслуживает энергосберегающее поведение, а наказания – энергорасточительное;
- реализация стимулирующих мер должна осуществляться последовательно во времени с применением всего спектра воздействующих факторов.

### **6.5.1. Нормативно-правовое стимулирование**

Нормативно-правовое стимулирование само по себе прямого воздействия на энергопотребление или энергосбережение не оказывает. Нормативное воздействие осуществляется через экономические механизмы, через технологии проектирования и эксплуатации, через рыночные механизмы. Нормативно-правовое стимулирование устанавливает основы взаимоотношений субъектов, участвующих в процессе добычи, производства, передачи, транспортировки, распределения, потребления энергоресурсов и утилизации отходов. Этими субъектами являются:

- органы государственной власти;
- производители энергоресурсов;
- потребители энергоресурсов;
- транспортно-сервисные компании;
- население;
- органы местного самоуправления;
- производители оборудования для добычи, производства, передачи и потребления энергоресурсов;
- средства массовой информации.

Нормативно-правовое стимулирование устанавливает:

- границы разрешенного правового поля;
- запрещенные способы, механизмы, технологии и акции.

В странах МЭА реально нашли реализацию следующие формы нормативно-правового регулирования:

- введение и исполнение обязательных и добровольных стандартов энергоэффективности;
- осуществление сертификации продукции, услуг и технологических процессов по критерию энергоэффективности.

Главная роль стандартов энергоэффективности при эксплуатации зданий, электробытовых приборов и оборудования заключается в практическом закрытии потребительского рынка для зданий и моделей энергооборудования и приборов, не удовлетворяющих определенным нормативным параметрам энергоэффективности.

В Дании, например, стандарты, основанные на показателях максимальной теплопотери зданий, были введены сразу после первого нефтяного кризиса и пересматривались в сторону ужесточения в 1977, 1982 и 1993 годов. О темпах ужесточения говорит тот факт, что последние стандарты предусматривают снижение энергопотребления до 75 % от уровня 1982 г., а к 2005 г. – еще в 1,5 раза. Единственная проблема здесь состоит в том, чтобы достигнуть этого результата без резкого повышения стоимости строительных материалов, оборудования и работ.

Обязательные стандарты на электробытовое оборудование и приборы распространены пока не так широко, как для зданий, но в ряде стран эта мера уже оказывает влияние на динамику энергоемкости коммунально-бытового комплекса.

Добровольные стандарты, используемые во многих странах МЭА, основаны на соглашении между властями и производителями конкретного типа машин и оборудования по их энергоэффективности. Сотрудничество и переговоры во многих случаях дают лучшие результаты, чем система принуждения.

Сертификация в системе повышения энергетической эффективности пока только ищет свое место в нормативно-правовой сфере. Ее идеология проста – путем заранее оговоренных процедур установить соответствие представленных устройств, приборов, технологических процессов нормам и стандартам энергоэффективности.

### **6.5.2. Информационное стимулирование**

К информационным мерам стимулирования энерго-ресурсосбережения следует отнести:

- рекламные кампании, конкурсы, ярмарки, выставки, демонстрационные акции;
- распространение передового опыта;
- повышение квалификации персонала;
- обучение;
- публичная информация о позитивном или негативном опыте.

На начальном этапе вовлечения потребителей в реализацию энергосберегающих программ чрезвычайно важным является предоставление им максимально полной информации (включая примеры из имеющегося позитивного опыта) о том, какие объемы энергоресурсов, а, следовательно, и денежных средств могут быть сэкономлены ими; как осуществить это с минимальными затратами финансовых и временных ресурсов; какие льготы предоставляет государство энергопотребителям, реализующим энергосбережение.

В основном на это ориентированы рекламно-информационные кампании, пропагандирующие энергосберегающий стиль жизни, которые проводятся при значительной финансовой поддержке со стороны государства.

Больше всего стимулирует потребителя так называемая сравнительная информация, позволяющая ему оценить свое место по отношению к потребителю, более экономно расходующему топливно-энергетические ресурсы. Такой подход хорошо зарекомендовал себя во многих европейских странах при реализации правительственных программ по энергосбережению.

Влияние на потребителя информации об энергетических характеристиках того или иного электробытового оборудования, позволяющей оценить на длительную перспективу все финансовые выгоды от его приобретения, пока, к сожалению, весьма незначительно. Покупая холодильник, стиральную машину, сушильный агрегат или электрокамин, потребитель в любой стране мира, прежде всего, ориентируется на их цену (в последнее время также и на страну сборки), сопоставляя ее со своими сегодняшними финансовыми возможностями, т. е. подтверждает стойкую приверженность настоящему времени. Однако в совокупности с рекламно-информационными кампаниями в средствах массовой информации эта мера дает определенные позитивные результаты, о чем свидетельствует ее широкое распространение в странах-членах МЭА.

### **6.5.3. Финансово-экономическое стимулирование**

Финансово-экономические стимулы, естественно, являются наиболее надежным средством обеспечения энергосбережения. В первую очередь это относится к ценам на энергетические ресурсы и к тарифам по их поставке. С одной стороны, они должны покрывать затраты энергоснабжающих организаций по производству и транспортировке энергетических ресурсов потребителям в договорных количествах, стандартного качества при заданном уровне надежности, безопасности и экономичности. С другой стороны, цены и тарифы призваны реально стимулировать энергосбережение, повышение эффективности использования энергоресурсов, снижение потерь. Очевидно, что экономические стимулы окажутся тем сильнее, чем большую долю в себестоимости будут иметь расходы на энергетику. Существенную стимулирующую роль совместно с тарифами играет применение системы скидок – надбавок. Скидка к тарифу поощряет потребителя энергоресурса дважды:

- а) экономится плата за неиспользованную часть энергоресурсов;
- б) потребленная часть энергоресурса оплачивается по более низкой цене, чем плановая, за счет скидки.

Естественно, установление скидки к тарифу для энергоэффективных потребителей может быть осуществлено лишь за счет увеличения платы по другим, неэффективным потребителям. Для них устанавливается надбавка к тарифу. Существенное значение имеет норматив, от которого отсчитывается скидка или надбавка. Норматив объективно должен отражать прогрессивный, но реально достижимый уровень энергопотребления на действующем энергетическом оборудовании.

Льготное налогообложение представляет собой мощное средство стимулирования энергосбережения, осуществляемое органами государственной власти. Потребитель энергоресурсов в этом случае получает налоговую льготу или налоговое освобождение на средства, инвестируемые в разработку и реализацию энергосберегающих проектов. Для снижения ставки налога фиксированная сумма инвестиций вычитается из налогооблагаемой базы или определенная часть суммы инвестиций вычитается непосредственно из подоходного налога. Так, например, в Германии на территории бывшей ГДР владельцы индивидуальных зданий имеют право в течение 10 лет инвестировать 10 % суммы подоходного налога (до 40 тыс. марок на здание) в мероприятия по повышению их энергоэффективности. Этим достигается преимущественное финансирование энергосбережения. Реализуется один из приоритетов государственной политики.

Дифференцированное налогообложение, как более действенная мера стимулирования по отношению к льготам, является распространенным во всем мире стимулом. Воздействие на потребителей топливно-энергетических ресурсов для перевода их деятельности на энергосберегающий путь может быть как «поощряющим», так и «наказывающим». К «наказывающим» мерам налоговой политики относится, в частности, установление высоких налогов на энергоресурсы. В результате потребительская цена энергоресурсов, включающая эти налоги, возрастает и в условиях рынка продукция становится неконкурентоспособной.

В стремлении интенсифицировать создание нетрадиционных источников энергии Дания, Норвегия, Нидерланды, Финляндия, Швеция ввели специальный налог на углерод, содержащийся в различных видах органического топлива. В результате этой меры финансовое бремя «энергетических» налогов обратно пропорционально результатам энергосберегающей активности каждого конкретного потребителя.

Финансовая поддержка государством энергосберегающих мероприятий потребителей в виде субсидий, грантов, ссуд широко практикуется во многих западных странах. Именно это стало наиболее распространенной мотивацией для осуществления мер по повышению энергоэффективности. Государством предоставляются инвестиционные гран-

ты или прямые субсидии в виде фиксированной суммы, или в виде доли от инвестиций (50×50 %), или в виде выплат, пропорциональных объему сберегаемой энергии (например, Франция предоставляет гранты в удельном измерении: 400 фр./т.у.т.). Для реализации государственных программ поддержки во многих странах введены специальные критерии и приоритетные направления, которым должны соответствовать потребители, претендующие на получение бюджетных средств для реализации энергосберегающих проектов.

Инвестиционные субсидии и гранты, предоставляемые правительством энергопотребителям, проводящим мероприятия по энергосбережению, покрывают до 30–35 % капитальной составляющей инвестиционного проекта.

Предоставление льготных займов потребителям, проводящим энергосберегающие мероприятия (прежде всего, владельцам жилых зданий) практикуется во многих странах, что, несомненно, повышает доступность инвестиций для потенциальных получателей. В Германии, например, такие займы предоставляются по ставке на 3 % ниже рыночной. Однако значительная группа малоимущих и относительно маломасштабных проектов поддержку не получает и их владельцы не только самостоятельно возмещают полную стоимость займа, но и выплачивают проценты по нему, хотя и более низкие.

Получившее широкое распространение во многих странах энергетическое обследование (энергоаудит), результаты которого берут за основу при планировании и проведении энергосберегающих мероприятий, привел к специфической форме финансовой поддержки потребителей энергоресурсов. Поскольку для его проведения привлекаются специализированные независимые консалтинговые фирмы, энергоаудит дорог. Особенно дорог для тех категорий потребителей, которые в силу специфики своей деятельности не способны давать большой доход. Стоимость услуг экспертов в сочетании со стоимостью использованного новейшего оборудования и приборов может достигать нескольких десятков тысяч долларов. Не каждое предприятие может заплатить такие деньги только за то, чтобы узнать о резервах экономии энергии. В связи с этим финансовая поддержка государством (в основном в виде субсидий) энергоаудита предприятий оказывается просто необходимой. В некоторых странах (Дания, Финляндия) для повышения привлекательности программ энергосбережения осуществляется 100%-ое субсидирование энергетических обследований. Однако, бесплатные для потребителей обследования ведут к неоправданному расходованию бюджетных средств, поскольку нет гарантии того, что потребители в будущем осуществят рекомендованные мероприятия. Поэтому в ряде стран объем

субсидирования обследований снижен до 50–80 % их стоимости в зависимости от финансового состояния, масштабов проекта и т. п. Даже при ограниченных финансовых возможностях потребителя существует механизм компенсации средств, затраченных внешним инвестором как на энергоаудит, так и на реализацию всего энергоэффективного проекта путем снижения уровня оплаты за использование энергоресурсов (схема с привлечением энергосервисных компаний – ЭСКО). Кроме того, по мнению многих специалистов, вложение собственных средств потребителя в проведение энергетического обследования будет дополнительным стимулом для скорейшего внедрения мероприятий по энергосбережению. Подобные же меры существуют в ряде стран для стимулирования специальных образовательных услуг в области энергосбережения. Специальное обучение проходит персонал предприятий, специалисты фирм, экономисты, население, государственные чиновники.

## ГЛАВА 7. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ МОЩНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Заключительная часть курса посвящена сравнительно молодому (примерно 40–45 лет) направлению науки, техники и технологии, родившемуся на стыке электроэнергетики (в частности, высоковольтной техники) и физики (физики высоких энергий). В контексте предыдущих разделов книги оно представляет значительный интерес в связи с тем, что является одним из направлений в решении проблемы как «энергетического голода», так и глобального загрязнения окружающей среды. В первом случае речь идет об использовании мощной импульсной техники в инерционном термоядерном синтезе (см. 5.1), во втором – об использовании этой техники в новых энерго-ресурсосберегающих технологиях.

В литературе используется несколько терминов для его обозначения, но наибольшее распространение в англоязычной литературе получил термин Pulsed Power.

Этим термином обозначают ряд новых направлений получения и использования супермощных импульсов электрической энергии в работах по инерционному управляемому термоядерному синтезу, мощной импульсной лазерной и ускорительной техники, по технике получения сверхсильных магнитных полей и др. Несмотря на то, что мощная импульсная энергетика в первые десятилетия развивалась преимущественно в направлении военных технологий, в последние годы, как и высоковольтная электрофизика, она стала ориентироваться также и на использование энергии высоковольтных импульсов в новых промышленных технологиях.

Мощная импульсная энергетика в качестве исходного «сырья» использует электрическую энергию как бы спрессованную во времени. В предельных случаях импульсы имеют следующие параметры: мощность  $10^{12}$ – $10^{13}$  Вт, напряжение  $10^6$ – $10^7$  В, ток  $10^5$ – $10^6$  А, длительность  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  с. Здесь главная цель – обеспечить максимальную мощность импульса.

В промышленных технологических установках нет нужды добиваться таких экстремально высоких параметров импульсов. Здесь на первое место выступают другие требования. Главным из них является большой ресурс работы высоковольтных импульсных конденсаторов, коммутирующих устройств и рабочих органов (инструментов) при высокой частоте срабатывания (десятки–сотни импульсов в секунду). Достаточно жесткие требования предъявляются к ограничению уровня акустических и электромагнитных шумов. В первом случае речь идет о создании комфортных условий для обслуживающего персонала, во вто-

ром – об электромагнитной совместимости высоковольтных технологических установок с другим оборудованием. Большое внимание должно также уделяться снижению потерь энергии в зарядном и, в особенности, разрядном контурах импульсного генератора и во всей цепочке преобразования электрической энергии в другие виды.

В зависимости от конкретных задач конечным результатом сложных преобразований импульса электрической энергии может быть сверхсильное магнитное поле, пучки заряженных частиц, электромагнитные излучения различного частотного диапазона, плазменный канал искрового пробоя непроводящих сред или электрический взрыв проводника. При всем разнообразии конечных «продуктов» и технической реализации идеи преобразования электрической энергии в другие ее виды во всех этих установках одним из основных элементов является источник импульсов высокого напряжения.

Бурное развитие мощной импульсной энергетики в последние четыре десятилетия стало возможным благодаря не только большим средствам, вкладываемым правительствами ведущих стран мира в военные технологии, но и огромному опыту, накопленному электроэнергетикой в области создания источников высокого импульсного напряжения, использовавшихся, в основном, для имитации воздействия на энергетические и другие объекты импульсов грозовых и внутренних перенапряжений [39–42].

## **7.1. Развитие высоковольтной импульсной техники**

### **7.1.1. Предыстория мощной импульсной энергетики**

В 1914 г. В.К. Аркадьев и Н.В. Баклин построили первый источник импульсного высокого напряжения (сотни киловатт) – многоступенчатый генератор импульсных напряжений ГИН, в котором для автоматического переключения параллельно заряженных конденсаторов на последовательное соединение в режиме разряда использовались шаровые разрядники, включаемые между конденсаторными ступенями.

Позднее схемы многоступенчатых ГИН более детально были разработаны и осуществлены в Германии Э. Марксом. В мировой литературе многоступенчатые ГИН называют «генераторами Маркса», в российской – «генераторами Аркадьева–Маркса». Объясняется последнее тем, что Э. Маркс запатентовал свое изобретение в 1923 г., а В.К. Аркадьев описал свое изобретение в виде научной статьи только в 1925 г., т. е. спустя 11 лет после создания ГИН (далеко не единичный пример благодушия и отсутствия деловой хватки у российских ученых). Существенный вклад в развитие теории и практики ГИН в первые годы их применения внесли Ч. Штейнмец (соратник Э. Маркса) и американец Ф. Пик [41].

Непосредственным стимулом для поиска способов и устройств генерирования импульсов напряжения амплитудой в десятки–сотни, а позже – и тысячи киловольт явилась потребность бурно развивающейся энергетики в испытании высоковольтного оборудования на стойкость к воздействию грозových (внешних) и коммутационных (внутренних) перенапряжений. Были введены стандарты, делающие обязательными импульсные испытания трансформаторов, выключателей, кабелей, разрядников, изоляторов и т. п. В свою очередь разработка новых типов высоковольтного оборудования или оборудования на более высокие классы напряжения требовала измерения импульсной электрической прочности всех диэлектрических сред – вакуума, воздуха и других газов в широком диапазоне давлений, твердых и жидких диэлектриков, а также комбинированной изоляции.

Полезность импульсных испытаний электрооборудования была доказана практикой их применения. Так, введение в США импульсных испытаний привело к снижению аварийности трансформаторов с 15 % в 1931 г. до 3 % в 1949 г.

В последующие годы в связи с ростом энергосистем, повышением номинальных напряжений сетей, проектированием и сооружением сверхдальних линий электропередач расширялись применения ГИН в процессе проектирования, производства и эксплуатации электрооборудования. В данное время ГИН является важнейшей частью оборудования каждой лаборатории высокого напряжения.

За время своего развития ГИН значительно изменились: выросли амплитуда и энергия импульсов, улучшилось использование площади и объема помещения. Уже в 1930 г. в Германии были построены два ГИН с напряжением относительно земли +5 МВ и –5 МВ, которые вместе могли дать 10 МВ между полюсами. В 1939 г. на международной выставке в Нью-Йорке эта же фирма (GES) показывала ГИН на 10 МВ.

Улучшение конструкции ГИН происходило параллельно с разработкой новых более совершенных элементов: импульсных конденсаторов, вентилях, измерительных средств.

Одновременно с совершенствованием конструкций ГИН проводились теоретические исследования с целью улучшения использования и облегчения эксплуатации установок. Большое внимание было уделено разработке рациональных методов расчета и выбора элементов ГИН, обеспечивающих получение импульса необходимых параметров. Задача осложняется сильным влиянием на форму импульса индуктивности разрядной цепи и объекта испытания (например, обмоток); отсутствием прямой аналитической связи между электрическими параметрами и формой импульса. Большой вклад в разработку аналитических, эмпирических и полуэмпирических методов

определения параметров элементов и конструкции ГИН, обеспечивающих получение импульсов с заданными параметрами, внесли ученые и инженеры Р. Хофер (R. Hofer), В. Маргер (W. Marguerre), А.М. Анжелини (A.M. Angelini), О. Салка (O. Salka), А. Фонденбуш (A. Vondenbush), Е. Флеглер (E. Flegler), Р. Эльснер (R. Elsner) и др. Среди россиян следует назвать М.Ф. Пашина, Л.Е. Машкилейсона, А.В. Стукачева, Г.А. Лебедева, С.М. Смирнова, П.В. Терентьева.

В зависимости от назначения ГИН строятся для работы в *помещениях* или на *открытом воздухе*. В тех и других случаях генераторы изготавливаются *стационарными* или *передвижными*. По конструктивному исполнению генераторы выполняются *опорными* и *подвесными*.

Генератор импульсных напряжений на несколько миллионов вольт по своим размерам и необходимой изоляционной зоне занимает значительную часть всего объема зала. Подвесная конструкция механически менее устойчива по сравнению с опорной, но позволяет использовать место под генератором для размещения измерительного шарового разрядника и испытуемого объекта. При проектировании импульсного генератора его конструкция должна обеспечить малую индуктивность разрядного контура, малый вес, доступность обслуживания и ремонта, возможность регулировки формы и амплитуды волны и возможность переоборудования с целью увеличения амплитуды волны или емкости в разряде.

Выбор конструкции зависит от места размещения ГИН, необходимых параметров импульсов, типа используемых конденсаторов.

В ГИНах высоковольтных испытательных лабораторий наибольшее применения нашли конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией четырех типов:

1. Конденсаторы в металлическом корпусе с одним или двумя проходными изоляторами имеют высокие рабочие градиенты (40–50 кВ/мм) и являются влагонепроницаемыми. Рабочее напряжение относительно невелико и не превышает 150 кВ.
2. Конденсаторы в фарфоровом изоляционном корпусе, работающие в открытой атмосфере, выполняются в виде цилиндра с ребрами, электроды имеют устройства для крепления нескольких конденсаторов в колонну.
3. Конденсаторы в изоляционном корпусе из бакелизированной бумаги или гетинакса выполняются для внутренней установки, имеют цилиндрическую форму с двумя электродами, укрепленными на торцах. Конденсаторы могут работать в вертикальном положении в колонне и в горизонтальном положении на изолирующей опорной или подвесной конструкции.
4. Конденсаторы в прямоугольном изоляционном корпусе из полихлорвинила или полиэтилена.

В качестве емкостных накопителей для ГИН иногда используют катушки кабеля нормальной или специальной конструкции с большой емкостью на единицу длины. Обкладками конденсатора в этом случае служат свинцовая оболочка и внутренняя жила. Барабан с кабелем укрепляется на изоляционной конструкции.

Многоступенчатые генераторы импульсных напряжений с опорной изолирующей конструкцией строятся четырех типов: *лестничные, этажерочные, башенные, колонные*.

В соответствии с принципом работы многоступенчатого ГИН опорно-изоляционная конструкция должна выполняться с возрастанием изоляции по отношению к земле или дерево-металлического каркаса с фарфорово-воздушной изоляцией между ступенями и землей. Конденсаторы при этом располагаются на ступенях каркаса обычно в два ряда, иногда параллельными группами в несколько штук. Опорная лестничная конструкция может иметь один, два или три марша. Генераторы, работающие на открытом воздухе, имеют один марш, а генераторы, работающие в зале, – два-три марша из-за ограниченности площади пола.

Генераторы лестничной конструкции строились как для внутренней, так и для наружной установки.

Генераторы лестничной конструкции были построены в основном в первые два десятилетия с начала создания импульсных установок высокого напряжения. Вследствие невысоких значений удельных технических характеристик крупные генераторы лестничной конструкции после 1940 г. уже не строились.

Генераторы *этажерочной конструкции* имеют каркас из деревянных или металлических рам, разделенных фарфоровыми изоляторами. В опорной конструкции генератора используются опорные изоляторы, в подвесной – линейные подвесные изоляторы, соединенные в гирлянды. Конденсаторы располагаются на полках (рамках) друг над другом либо зигзагами. Генераторы строятся для внутренней или наружной установки. Удельная энергия в генераторах этажерочной конструкции выше, чем в лестничных, и находится в пределах от 0,2 до 1,2 кДж/м<sup>3</sup>.

Генераторы *башенной конструкции* выполняются с использованием маслобарьерной изоляции между отдельными конденсаторными ступенями. Конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией, составленные из отдельных секций в виде плоских шайб, расположенных друг над другом, помещаются в изолированный цилиндр, заполненный изоляционным маслом. Шаровые коммутирующие разрядники расположены на изолирующих штангах, укрепленных около цилиндра. Башня генератора может быть составлена на нескольких самостоятельных генераторов на более низкое напряжение. Вследствие использования масляной изо-

ляции башенная конструкция позволяет создавать весьма компактные импульсные генераторы. Коэффициент использования строительного объема у них 10–25 %, в то время как у генераторов лестничной и этажерочной конструкции он составляет всего единицы процентов. Недостаток башенной конструкции генератора состоит в том, что ремонт и текущее наблюдение за состоянием изоляции отдельных элементов генератора весьма затруднены по сравнению с генераторами лестничной и этажерочной конструкций.

Возрастающие требования к импульсным генераторам в отношении высоких технических, электрических и эксплуатационных характеристик привели к созданию генераторов *колонной конструкции*. В генераторе колонной конструкции используются конденсаторы цилиндрической формы в изолирующем корпусе. Конденсаторы с изоляционным корпусом устанавливаются друг на друга, будучи разделенными по высоте изолирующими цилиндрами. В качестве разделительного изолирующего цилиндра используется корпус от применяемых конденсаторов. Внутренние полости изолирующих разделительных цилиндров иногда заполняются маслом. Генератор имеет одну или несколько колонн, состоящих из взаимозаменяемых элементов. Одноколонный генератор аналогичен генератору башенной конструкции, однако ремонт и обслуживание одноколонного генератора проще по сравнению с башенным.

Многоколонные генераторы имеют устойчивую механическую конструкцию, состоящую из двух, трех, четырех или более колонн; изолирующий остов зарядных сопротивлений генератора одновременно используется в качестве жестких связей между колоннами. Многоколонные генераторы имеют большую эксплуатационную гибкость, так как имеется возможность путем несложных переключений изменять количество параллельно и последовательно соединенных конденсаторов в одной конденсаторной ступени. Многоколонная конструкция генератора импульсных напряжений является наиболее совершенной конструкцией и позволяет создавать передвижные и стационарные генераторы, имеющие высокие технические и электрические параметры. Для построенных генераторов колонной конструкции коэффициент использования строительного объема также достаточно высок и превосходит 25 %.

В Швеции в 1949 г. для испытания аппаратуры электропередачи на 380 кВ был построен генератор на 3600 кВ и  $W = 90$  кДж колонной конструкции, состоящий из девяти бумажно-масляных конденсаторов в корпусе из бакелизированной бумаги.

В том же году в лаборатории компании Джeneral Электрик г. Питс-фильд, США, были сооружены два импульсных генератора, имеющих максимальное напряжение 7,5 МВ и  $W = 180$  кДж каждый. Когда генера-

торы заряжены до полных напряжений противоположной полярности, удавалось пробить воздушный промежуток между ними длиной 16,8 м. Один из генераторов установлен на тележке и может быть вывезен по рельсовому пути на открытую испытательную площадку. Каждый из генераторов состоит из шести колонн высотой 13,5 м.

В послевоенные годы в высоковольтных лабораториях многих стран применяются ГИН производства предприятия VEB TUR (г. Дрезден, Германская Демократическая Республика). Надежность, тщательная компоновка, хороший дизайн ГИНов, комплектная поставка вспомогательного оборудования и устройств обеспечивали на протяжении многих лет спрос на эту продукцию.

Чтобы защитить ГИНЫ наружной установки от влияния погодных условий предприятие TUR стало помещать их (окружать) в огромные изоляционные цилиндры. Такое решение использовано, в частности, при сооружении генератора, установленного на открытой испытательной площадке Истринского филиала Всероссийского электротехнического института (г. Истра Московской обл.). Интересный факт: при разряде этого ГИН на холостом ходу наблюдалось развитие с деталей верхней (высоковольтной) ступени искр длиной в несколько десятков метров, которые по сложной траектории развивались параллельно земле, пока не поражали (подобно молнии) далеко отстоящие объекты (деревья, строительные конструкции и т. п.).

В период с начала 30-х по 60-тые годы XX столетия в СССР были созданы на отечественных комплектующих элементах более 10 крупных ГИН различной конструкции напряжения в несколько мегавольт и энергии в сотни килоджоулей. Большинство из них эксплуатируются и в наши дни в высоковольтных лабораториях университетов, НИИ и заводов, выпускающих высоковольтное оборудование.

Необходимыми элементами каждого генератора импульсных напряжений, обеспечивающими надежную работу ГИН, являются успокоительные, фронтные, разрядные и зарядные сопротивления, шаровые разрядники.

Эти элементы будут рассмотрены в специальном курсе.

### ***7.1.2. Новая история мощной импульсной энергетики Pulsed Power***

Активные исследования в области мощной импульсной энергетики были начаты в начале 60-х гг. практически одновременно в СССР и в США. Одной из первых научных школ этого направления в СССР была школа А.А. Воробьева, Г.А. Воробьева, и Г.А. Месяца в Томском политехническом институте, которая своими работами именно в области

импульсных генераторов заложила прочный фундамент дальнейшим исследованиям в таких сопредельных областях, как формирование мощных электронных и ионных пучков, генерация мощного оптического, рентгеновского и СВЧ-излучения, физика газового разряда, физика плазмы, физика твердого тела и др. [23, 43, 44]. В свою очередь мощные релятивистские электронные пучки стали играть решающую роль в решении таких проблем, как нагрев плазмы до термоядерной температуры; возбуждение мощных электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона; коллективные методы ускорения заряженных частиц; создание высокоинтенсивных источников рентгеновского излучения для изучения радиационных эффектов в твердых телах, жидкостях, газах и биологических объектах при больших импульсных дозах облучения; физика высоких плотностей энергии, изучающая поведение вещества в экстремальных условиях; регистрация быстропротекающих процессов в плотных средах; физика микромира, связанная с исследованием процессов, характеризующихся малыми поперечными сечениями взаимодействия; возбуждение объемных разрядов и накачка электронным пучком мощных газовых лазеров и т. п. [25]. Перспективность применения мощных электронных пучков во многих отраслях науки и техники стимулирует разработку и сооружение импульсных сильноточных ускорителей электронов, поиск и исследование новых способов генерирования мощных электронных пучков.

Прогресс в технике получения мощных электронных пучков связан в успехах в области высоковольтной импульсной техники, а также в исследовании процесса электрического пробоя вакуумных промежутков и разработкой на этой основе мощных безнакальных источников электронов. Объясняется он также накоплением большого экспериментального материала по электрическому разряду в газах, жидкостях и твердых диэлектриках. Все эти области технической физики тесно взаимосвязаны и используют достижения многих смежных областей науки и техники.

Пионерские работы в области создания СЭУ были выполнены в Томске под руководством академика Г.А. Месяца и были логическим и очень удачным продолжением работ по созданию высоковольтной наносекундной техники. Генераторы высоковольтных наносекундных импульсов оказались мощным инструментом для изучения процессов в диэлектрических средах в экстремально высоких электрических полях ( $\sim 10^6$  В/см и более). При исследовании формирования разряда в вакууме было обнаружено явление, названное «взрывной электронной эмиссией». Суть явления заключается в том, что сверхсильные электрические поля создают высокую концентрацию энергии на поверхности катода, вызывающую перегрев микроострий и их взрывообразное разрушение. С это-

го момента не металл катода, а ионизированные пары металла, образующиеся в результате взрыва, являются поставщиками электронов в межэлектродный промежуток. Интенсивность потока электронов при этом в тысячи и более раз превосходят потоки, получаемые от самых эффективных термоэмиссионных катодов. Расход металла при каждом взрыве ничтожно мал ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  г.), поэтому катод-эмиттер может действовать долго, [45, 46]. Именно взрывная эмиссия обеспечивает извлечение больших кратковременных токов ( $10^3$ – $10^6$  А) в СЭУ.

Мощность электронного пучка существующих СЭУ и пучков лазерного излучения пикосекундного диапазона пока не превзойдена никакими другими управляемыми источниками энергии. Импульсная мощность электронного пучка крупнейшего в мире сильноточного электронного ускорителя «Аврора», сооруженного в США в 1975 г. [44], составляет  $2 \cdot 10^{13}$  Вт. Электронные ускорители имеют значительно большую энергию, запасенную в импульсе, чем лазеры. Так, в том же ускорителе «Аврора» энергия в импульсе равна 3 МДж, в то время как энергия в пучках лазерного излучения не превосходит нескольких килоджоулей. Кроме того, в сфокусированных электронных пучках может быть достигнута очень большая плотность потока энергии излучения. Так, например, плотность, полученная на ускорителе «Тритон» Института атомной энергии им. И.В. Курчатова, составляет  $5 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>.

В СССР импульсные СЭУ разрабатывались во многих научных учреждениях\* Москвы (ИАЭ им. И.В. Курчатова, ФИАН СССР им. П.Н. Лебедева), Ленинграда (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова), Новосибирска (ИЯФ СОАН СССР), Томска (ИСЭ СО РАН, НИИ ЯФ ТПИ), Харькова (ФТИ АН УССР), Горького (НИРФИ) и др. Крупнейшими зарубежными научными организациями, внесшими большой вклад в развитие техники генерирования мощных электронных пучков, и соответственно, мощных импульсов высокого напряжения, являются американские фирмы «Сандия», «Физикс интернейшнл», Военно-морская исследовательская лаборатория (США), Национальное бюро стандартов (США), английский исследовательский центр в Олдермастоне и др.

Темпы работ в области мощной импульсной энергетики на протяжении примерно 30 лет (1960–1990 гг.) были очень высокими, благодаря огромным средствам, выделяемым правительствами США, СССР, Англии и некоторых других стран, на эти исследования и разработки. Темп работ был еще более взвинчен после объявления в 1982 г. Президентом США Р. Рейганом стратегической оборонной инициативы (СОИ), названной общественностью «программой звездных войн». За-

---

\* Используются названия научных учреждений по состоянию на начало 90-х годов.

крытый режим работ, большое количество научных учреждений, вовлеченных в них, не позволяют выстроить историю становления мощной импульсной энергетики в строгой хронологической последовательности с правильной расстановкой приоритетов. Со всей определенностью можно утверждать, что лидерами были две страны – СССР и США, а в СССР Томские школы высоковольтников и физиков-ускорительщиков сыграли важную роль в гонке сверхдержав по этому стратегическому направлению научно-технического процесса.

В НИИ ядерной физики при ТПУ, основанном в 1958 г., на кафедре и в лаборатории «Техники высоких напряжений» и в созданном в 1968 г. на их основе НИИ высоких напряжений при ТПУ в институте сильноточной электроники

СО РАН (открыт в 1977 г.) в содружестве с научными группами из других вузов и научных институтов г. Томска были выполнены оригинальные исследования практически по всем ключевым проблемам Pulsed Power: физика предразрядных и разрядных явлений в вакууме [45–48], газах [49], жидких [50] и твердых [33, 51] диэлектриках; электрическая изоляция, работающая в специфических условиях импульсных генераторов, ускорителей и лазеров [52, 53]; накопители энергии [60], коммутаторы [27], взрывные и плазменные прерыватели тока [54, 59], сильноточные взрывоэмиссионные диоды [46], генераторы СВЧ-излучения [25], электроионизационные и газоразрядные лазеры [56–58] и многое другое.

В последние 10–20 лет фронт и темпы этих работ существенно сократились, особенно в России, вследствие многократного уменьшения бюджетного финансирования. Начались интенсивные поиски технологического применения Pulsed Power, а вместе с ними и поиск новых принципов накопления и коммутации энергии больших плотностей. Коммерческие применения ускорителей, лазеров, технологических установок для электроимпульсной и электроразрядной обработки материалов выводят на первое место их дешевизну, простоту обслуживания, надежность и долговечность.

Продолжается также совершенствование элементной базы классических схем генерирования мощных высоковольтных импульсов. Ниже будут кратко рассмотрены основные технические проблемы в области Pulsed Power и используемые пути их решения.

### **7.1.3. Основные технические проблемы их решения**

В состав импульсного генератора большой мощности входят, как правило, первичный накопитель энергии и система увеличения мощности, которая, в свою очередь, состоит из промежуточного накопителя – уплотнителя энергии или формирующей линии – и коммутатора. Необ-

ходимость одного или нескольких промежуточных накопителей обусловлена тем, что с увеличением запасаемой в первичном накопителе энергии возрастают паразитные параметры его разрядного контура, и поэтому этот накопитель энергии не может непосредственно обеспечить требуемые сверхвысокие параметры импульса напряжения. Коммутатор вместе с промежуточным накопителем энергии обеспечивает формирование импульса с требуемой длительностью фронта, плоской части, спада и мощности импульса [23, 24].

В высоковольтных импульсных генераторах первичный накопитель энергии может быть построен по принципу накопления энергии электрического поля в конденсаторе или энергии магнитного поля в катушке индуктивности. В случае емкостного накопителя (рис. 7.1, а) электрическая энергия, запасенная в конденсаторе  $C$ , заряженном до напряжения  $U_0$ , равна  $CU_0^2/2$  и при замыкании контура  $K$  передается в нагрузку  $R_H$ . В индуктивном накопителе (рис. 7.1, б) магнитная энергия тока  $I_0$  в катушке индуктивности  $L$  равна  $LI_0^2/2$  и передается в  $R_H$  при размыкании  $K$ . Энергия может быть запасена также в виде кинетической энергии вращающегося ротора электрической машины, электрохимической энергии аккумуляторной батареи, химической энергии взрывчатых веществ [26].

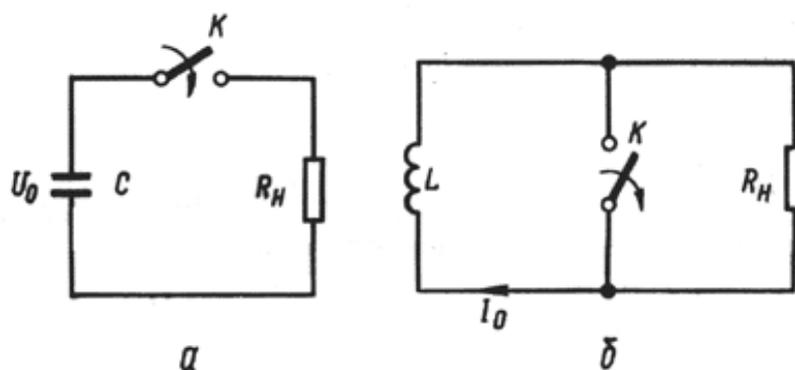


Рис. 7.1. Формирование импульса напряжения в схеме с емкостным (а) и с индуктивным (б) накопителем энергии

В табл. 7.1 приведены сравнительные характеристики накопителей энергии различного типа [25]. Указанные значения плотности энергии характеризуют эффективность накопления энергии. Учитывая реально достигнутую запасенную энергию в накопителе каждого типа, можно судить о его геометрических размерах. Удельный ток короткого замыкания и минимальная длительность формируемых импульсов позволяют сделать выводы о максимальной удельной мощности, а при учете геометрических размеров – и полной мощности в импульсе.

Таблица 7.1

| Тип накопителя                 | Плотность энергии, Дж/дм <sup>3</sup> | Достигнутая запасенная энергия, Дж | Удельный ток короткого замыкания, А/дм <sup>3</sup> | Длительность импульса, с | Удельная мощность в импульсе, Вт/дм <sup>3</sup> |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|--------------------------|--|
| Конденсаторы                   | $(0,5 \div 3) \cdot 10^2$             | $10^7$                             | $10^4$  | $10^{-8}$                | $(1 \div 5) \cdot 10^8$                          |
| Индуктивные накопители         | $(1 \div 4) \cdot 10^4$               | $10^8$                             | 1–10  | $10^{-1}$                | $(1 \div 10) \cdot 10^5$                         |
| Ударные генераторы             | $(1 \div 4) \cdot 10^4$               | $10^8$                             | 3–10  | $10^{-4}$                | $(3 \div 10) \cdot 10^4$                         |
| Аккумуляторы                   | $(1 \div 5) \cdot 10^5$               | $10^8$                             | $(3 \div 10) \cdot 10^2$                            | $10^{-3}$                | $(3 \div 10) \cdot 10^4$                         |
| Химические взрывчатые вещества | $10^7$                                | $10^8$                             | –   | $10^{-7}$                | $10^{14}$  |

### **А. Типы основных и промежуточных накопителей энергии**

В емкостных накопителях предельная плотность энергии определяется электрической прочностью выбранного диэлектрика. Благодаря использованию новой, более совершенной изоляции (бумажно-пленочная изоляция, пропитанная конденсаторным маслом или новыми синтетическими жидкостями), более эффективных способов регулирования поля удалось довести рабочую напряженность поля до  $10^6$  В/см и существенно сократить импеданс конденсатора. У современных высоковольтных импульсных конденсаторов время вывода энергии составляет около 300 нс. при энергоемкости одной «банки»  $\sim 10^4$  Дж и плотности запасаемой энергии  $(1 \div 5) \cdot 10^2$  Дж/дм<sup>3</sup>.

Предельно допустимые магнитные поля определяются механической прочностью материалов, из которых изготовлен *индуктивный накопитель*, и имеют напряженность порядка 500–600 кЭ. Плотность магнитной энергии при этом порядка  $10^5$  Дж/дм<sup>3</sup>. В отношении запасаемой энергии очевидно преимущество индуктивных накопителей энергии по сравнению с емкостными, но их использование при мегавольтном уровне напряжения сдерживается отсутствием надежных размыкателей (коммутатор *K* на рис. 7.1, б).

Индуктивные накопители с использованием явления сверхпроводимости практически не ограничены по запасаемой энергии. Однако выводить энергию из сверхпроводящих индуктивных накопителей чрезвычайно сложно. Работу сверхпроводящих индуктивных накопителей

применительно к формированию коротких мощных импульсов можно рассматривать как перспективу. Задача создания комбинированных систем размыкателей с эффективным временем коммутации  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  с для накопителей с энергией большей  $10^7$  Дж практически решена.

Механическая энергия ротора электрической машины, передаваемая на нагрузку в режиме короткого замыкания, использовалась П.Л. Капицей для получения магнитных полей большой напряженности. Позднее по этому принципу были разработаны специальные *ударные генераторы* [26]. Раскрученный до больших оборотов массивный ротор генератора обладает значительной энергией. При звуковых скоростях кинетическая энергия единицы объема ротора составляет около  $5 \cdot 10^5$  Дж/дм<sup>3</sup>. В настоящее время существуют генераторы с запасом энергии в роторе до 200–400 МДж. Однако эта энергия может быть трансформирована в электрическую за достаточно длительное время, определяемое инерцией ротора.

Еще более «медленными» накопителями энергии являются *химические аккумуляторные батареи*. Однако скорость вывода энергии химических взрывчатых веществ, преобразованной в электрическую энергию, можно существенно повысить во *взрывомагнитных генераторах*. Энергия ударных волн, получаемых при взрыве, используется для сжатия металлическими стенками магнитного потока, который был предварительно создан внешним источником.

Из сравнения накопителей энергии различных типов, приведенных в табл. 7.1, видно, что, несмотря на малое энергосодержание в единице объема, конденсаторы могут обеспечить, благодаря малому внутреннему сопротивлению, очень большие импульсные токи и значительные мощности в импульсе. Поэтому в большинстве генераторов мощных высоковольтных импульсов в качестве первичных используются емкостные накопители энергии. Определяющим при выборе параметров и конструкции емкостного накопителя энергии является применяемый тип конденсаторов. Требования к конденсаторам и к выполненным на их основе емкостным накопителям энергии совпадают: большой запас энергии, малая индуктивность используемых конденсаторов и схемы соединения конденсаторов в установке, динамическая устойчивость конденсаторов и контактных соединений, достаточный срок службы в режиме многократных разрядов на малую нагрузку.

Используется одна из двух схем включения емкостных накопителей энергии. Наиболее часто для увеличения выходного напряжения накопителя конденсаторы включают по схеме умножения напряжения, реже используют импульсный трансформатор или автотрансформатор. И в том и в другом случае невозможно получить наносекундное время нарастания высоковольтного импульса на выходе генератора из-за значительной индуктивности системы.

В последние десятилетия в связи с созданием мощных импульсных устройств техника ГИНов существенно усовершенствована. Кроме стандартных требований минимальной индуктивности, значительно возросла запасаемая энергия ГИНов. Из практики строительства ГИНов видно, что при выходном напряжении до 3 МВ ГИН с запасаемой энергией в несколько десятков килоджоулей надежно работает на воздухе. Он может быть быстро построен без значительных затрат, прост в эксплуатации и регулировке выходного напряжения.

Недостатком «воздушных» ГИНов являются значительные габариты и вследствие этого большая индуктивность, значительный уровень электромагнитных помех, возникающих при работе установки. Кроме того, по мере увеличения выходного напряжения увеличивается индуктивность связи ГИНа с промежуточным накопителем энергии, и усложняются проблемы высоковольтной изоляции места ввода высокого напряжения в промежуточный накопитель. Поэтому ГИНЫ с выходным напряжением выше 2–3 МВ и запасаемой энергией порядка 100 кДж и больше помещают в среду с высокой электрической прочностью, например, в трансформаторное масло или в атмосферу высокопрочных газов.

В трансформаторном масле размещены ГИНЫ большинства сильноточных электронных ускорителей (СЭУ), сооруженных в исследовательских центрах США и СССР. Так, первичный накопитель энергии крупнейшего в мире СЭУ «Аврора» с запасаемой энергией 5 МДж состоит из четырех работающих параллельно масляных ГИНов. Каждый содержит 95 конденсаторных ступеней, образованных четырьмя соединенными последовательно-параллельно конденсаторами с емкостью 1,85 мкФ и напряжением 60 кВ. Ударная емкость ГИНа –  $78 \cdot 10^9$  Ф, выходное напряжение – 11,4 МВ, индуктивность – 12 мкГ. Для запуска используется отдельный ГИН с выходным напряжением 600 кВ;  $6 \cdot 10^6$  кг трансформаторного масла необходимо для заполнения всей высоковольтной конструкции.

По такому же принципу созданы источники мощных импульсов питания СЭУ «Ангара» (Институт атомной энергии, Москва), «Тонус» (НИИ ядерной физики при ТПУ, Томск) и ряд других.

Кроме импульсных генераторов с умножением напряжения по схеме Аркадьева–Маркса в ускорителях мощных электронных пучков применяются генераторы с использованием других методов умножения напряжения.

Импульсные трансформаторы и автотрансформаторы используются для увеличения выходного напряжения емкостных накопителей энергии СЭУ с напряжением до 3–4 МВ.

В качестве *промежуточных накопителей энергии* в генераторах мощных высоковольтных импульсов чаще всего используют коаксиальные и полосковые линии. Основными параметрами, характеризующими линию, являются скорость распространения электромагнитной волны, определяющая длительность формируемых импульсов, и волновое сопротивление, от которого зависит при выбранном уровне напряжения ток в импульсе.

Простейшей схемой формирования импульса напряжения в генераторе на линиях с распределенными параметрами является схема разряда предварительно заряженной до напряжения  $U_0$  линии длиной  $l$  на сопротивление нагрузки  $R_H$  (рис. 7.2, а). На основе этой схемы выполнены промежуточные накопители ускорителей «Гидра», «Гэмбл-1», «Гэмбл-2», «Урал» и др.

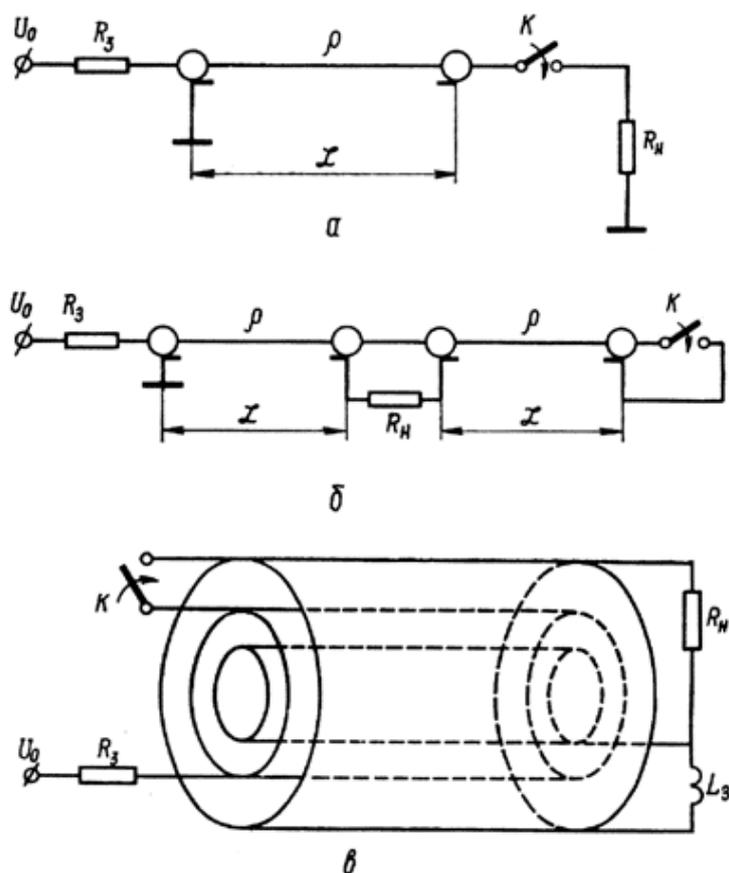


Рис. 7.2. Схемы генераторов импульсов: а – с накопительной линией; б – с двойной накопительной линией; в – с двойной коаксиальной накопительной линией

Дисковые формирующие линии целесообразно применять при необходимости получения на выходе промежуточного накопителя энергии импульса напряжением длительностью несколько десятков наносекунд и током в сотни килоампер. Объясняется это тем, что в этом случае при коаксиальном исполнении линии становится недопустимо малым отно-

шение длины линии к диаметру. Промежуточные накопители энергии на дисковых линиях естественным образом совмещают функции формирования импульса напряжения и концентрации накопленной энергии в центре линий, куда подсоединяется нагрузка, например, электронная пушка. Этим же требованиям удовлетворяют промежуточные накопители энергии, образованные полосковыми линиями, расходящимися в радиальных направлениях от расположенной в центре нагрузки. Чтобы  $\rho_d$  было постоянным при неизменном  $\varepsilon$ , должно быть постоянным отношение  $d/a$ . Это означает, что электроды линии должны представлять собой два соосных конуса с общей вершиной.

Ток, получаемый в линии любого типа, определяется диэлектрической проницаемостью изоляции, ее электрической прочностью и геометрическими размерами линии.

Применяются промежуточные накопители энергии, выполненные на основе других, более сложных схем. Исключительное место в технике формирования мощных прямоугольных импульсов напряжения заняли промежуточные накопители энергии, выполненные по принципу последовательного включения формирующих линий с распределенными параметрами. Этот принцип основан на изменении полярности напряжения формирующей линии при коротком замыкании. Схема с двойной формирующей линией (ДФЛ) (рис. 7.2, б) получила название линии Блюмляйна (по имени ее автора). ДФЛ в согласованном режиме состоит из двух одинаковых линий с волновым сопротивлением  $\rho$  и длиной  $l$ , заряжаемых до напряжения  $U_0$ . Сопротивление нагрузки  $R_n = 2\rho$  включается между линиями. При замыкании коммутатора на конце одной из линий через время  $l\sqrt{L_0C_0}$  на нагрузке образуется импульс напряжения с амплитудой  $U$ , равной зарядному напряжению, и длительностью  $2l\sqrt{L_0C_0}$ . При этом в нагрузку передается вся энергия, накопленная в ДФЛ.

Наиболее удобны коаксиальные ДФЛ, в которых внешний электрод первой линии служит корпусом промежуточного накопителя энергии, находящимся под потенциалом земли, средний электрод является общим для обеих линий, а между центральным – внутренним электродом второй линии и корпусом накопителя включается нагрузка (рис. 7.2, в). Коммутация может осуществляться как между корпусом накопителя и средним электродом, так и между средним и внутренним электродами. Для обеспечения цепи заряда внутренней линии ДФЛ ее центральный электрод соединен через катушку индуктивности  $L_3$  с заземленным корпусом промежуточного накопителя.

Промежуточные накопители на коаксиальных ДФЛ используются в высокопоточных электронных ускорителях «Аврора», «Гермес-II»,

«РЕБА», ТОНУС и др. [25]. Полосковые и дисковые ДФЛ применяются в электронных ускорителях на большие токи. В этом случае часто используют для увеличения тока в нагрузке параллельное включение линий, а для увеличения амплитуды ускоряющего напряжения – их последовательное включение. К ускорителям такого типа относятся, например, «Снарк», «Прото-II», «Пионер», «Нептун» и др. [25].

В импульсных источниках с индуктивными накопителями энергии источниками энергии накачки могут быть емкостные накопители энергии, ударные электромашинные агрегаты, мощные выпрямители. При этом индуктивный накопитель энергии играет роль промежуточного. Как уже упоминалось, существующие и разрабатываемые в настоящее время индуктивные накопители позволяют запасать энергию равную  $10^6$ – $10^8$  Дж. При этом использование криогенной техники позволяет сохранить запасенную энергию в течение более 1 с, а в случае сверхпроводников – неограниченно долго. Основная проблема – быстрый вывод энергии из индуктивного накопителя. В настоящее время эта проблема решается с помощью взрывных, плазменных и полупроводниковых прерывателей тока.

### ***Б. Коммутаторы для емкостных накопителей энергии***

В мощной импульсной энергетике вместе с проблемами накопления энергии не менее остро стоят проблемы быстрой коммутации больших мощностей. Стремление к увеличению мощности импульсов, все более широкое использование их в различных областях науки и техники обуславливают высокие требования к надежности и длительной непрерывной работы генератора. При этом коммутатор промежуточного накопителя энергии, обеспечивающего формирование импульса напряжения с необходимыми параметрами, становится одним из ответственных элементов генераторов мощных высоковольтных импульсов. В качестве коммутаторов в системах с емкостными накопителями энергии используют искровые разрядники, работающие в вакууме, атмосфере сжатого газа, в жидком и твердом диэлектриках [27].

Важнейшей характеристикой разрядника является время коммутации  $t_K$ , которое определяет минимально возможную длительность фронта импульса напряжения на выходе промежуточного накопителя энергии. Для коммутации токов в сотни килоампер за время 10–20 нс необходимо использовать параллельно работающие разрядники или один разрядник с большим числом одновременно образующихся каналов, т. е. многоканальный разрядник.

Зажечь много каналов в коммутаторе можно только в том случае, если разброс во времени запаздывания их пробоя много меньше времени

коммутации  $t_k$ . Если это условие не выполняется, то один образовавшийся канал приведет к уменьшению напряжения на электродах (срезу напряжения), что сделает невозможным образование остальных каналов.

Если решение проблемы многоканальной коммутации имеет большое значение для формирования импульсов напряжения в низкоомных промежуточных накопителях энергии на коаксиальных и полосковых линиях, то работа промежуточных накопителей на дисковых линиях в принципе возможна только при обеспечении синхронного запуска большого числа разрядников, расположенных по периметру дисковых электродов накопителя энергии. Это справедливо и для накопителей, образованных большим количеством линий и работающих параллельно на одну нагрузку.

Необходимо отметить, что все выработанные за долгие годы исследований рекомендации относительно влияния различных факторов – напряженности электрического поля, перенапряжения, ионизирующего облучения, давления, формы электрического поля и т. п. – на работу искровых разрядников с напряжением до 100 кВ справедливы и для разрядников мегавольтного диапазона. Вероятность зажигания большого числа каналов в искровом промежутке возрастает с уменьшением внутреннего сопротивления генератора. Из-за увеличения времени коммутации с ростом тока требования к уменьшению разброса времени запаздывания пробоя отдельных каналов уменьшаются. УФ-излучение из искрового разрядного канала, пробившегося первым, стабилизирует момент пробоя остальных каналов. В этих условиях зажечь много каналов тем легче, чем больше перенапряжение на промежутке. Последнее тем больше, чем больше крутизна фронта импульса зарядного напряжения, прикладываемого к высоковольтному электроду разрядника, или запускающего импульса, подаваемого на управляющий электрод разрядника.

Одно из основных требований при разработке многоканальных разрядников – малое время запуска разрядников. Поэтому в последнее время ведутся интенсивные исследования по быстрому запуску мощных мегавольтных разрядников. В этом случае находят применение как традиционные управляемые разрядники: тригатроны, искровые реле, трехэлектродные и многоэлектродные разрядники, так и сравнительно новые коммутирующие системы: разрядники с лазерным запуском; разрядники, управляемые пучком быстрых электронов; управляемые по принципу искажения электрического поля.

Наряду с улучшением временных характеристик формируемых импульсов напряжения многоканальная коммутация приводит к более эффективному использованию энергии промежуточного накопителя. Так, при коммутируемом токе 130 кА и двойной электрической длине фор-

мирующей линии 18 нс в одноискровом режиме более половины энергии накопителя теряется в коммутаторе; при работе 8 каналов потери энергии в коммутаторе не превышают 10 % запасенной в накопителе.

При увеличении зарядного напряжения промежуточного накопителя до нескольких мегавольт размеры и индуктивность газовых коммутирующих разрядников становятся недопустимо большими. При этом перспективными являются жидкостные разрядники с управляемым газовым промежутком. Схема одного из них дана на рис. 7.3. При импульсном заряде промежуточного накопителя энергии происходит перераспределение напряжения из-за наличия собственных емкостей электродов разрядника и срабатывает газовый разрядник 1. Это приводит к пробое промежутка между электродами 2 и 4, а затем и между основными электродами 3 и 4. При параллельной работе нескольких таких разрядников необходимо в газовый разрядник 1 подать пусковой импульс.

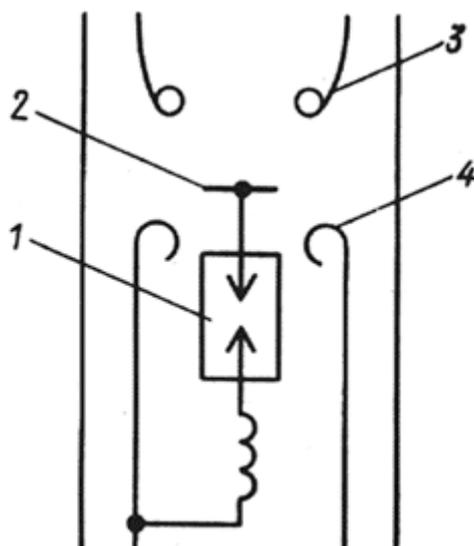


Рис. 7.3. Жидкостной разрядник с управляемым газовым промежутком

В ускорителе «Аврора» аналогичные разрядники расположены в трансформаторном масле – изоляции промежуточных накопителей энергии – коаксиальных ДФЛ. Четыре ДФЛ запускаются синхронно и формируют импульсы ускоряющего напряжения, подаваемые на четыре работающие параллельно электронные пушки.

### **В. Прерыватели для индуктивных накопителей энергии**

Известно, что если через тонкий металлический проводник пропустить импульс тока так, чтобы плотность тока в проводнике превышала значения  $10^8$ – $10^{10}$  А/см<sup>2</sup>, то произойдет *электрический взрыв проводника*. При этом из-за инерции жидкого металла он перегревается и испаряется

с интенсивностью взрыва. При испарении металлическая проводимость проводника быстро падает, что приводит к отключению тока. Разрыв цепи вызывает появление на индуктивности контура импульса напряжения пропорционально величине индуктивности и скорости изменения тока. Этот импульс может быть использован для различных целей, в том числе в качестве ускоряющего напряжения, прикладываемого к диоду СЭУ прямого действия. Так в ускорителе, схема которого представлена на рис. 7.4, первоначально энергия запасается в конденсаторе  $C$ . С помощью основного коммутатора емкость разряжается через прерыватель тока на индуктивность. В момент максимума тока срабатывает прерыватель тока ПТ. На индуктивности при уменьшении тока возникает импульс напряжения, под действием которого пробивается разрядник  $P$  и индуктивность подключается к катоду вакуумного диода. Амплитуда импульса напряжения, получаемого на катушке индуктивности  $L$  в десятки раз превосходит величину зарядного напряжения.

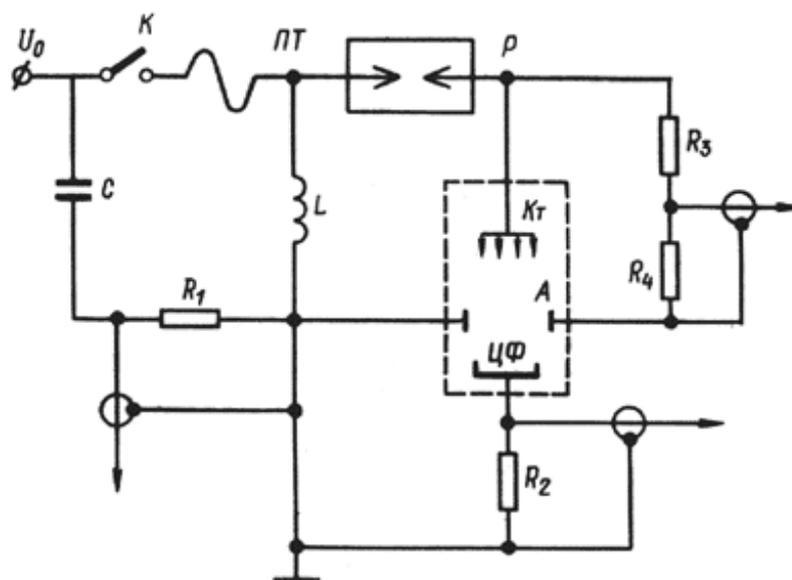


Рис. 7.4. Электрическая схема ускорителя с промежуточным индуктивным накопителем энергии:  $C$  – первичный накопитель;  $K$  – основной коммутатор; ПТ – прерыватель тока;  $L$  – индуктивность;  $P$  – разрядник;  $K_t$ ,  $A$  – катод и анод вакуумного диода;  $R_1$ ,  $R_2$  – шунты;  $R_3$ ,  $R_4$  – делитель напряжения; ЦФ – цилиндр Фарадея

Вместо конденсаторов  $C$  можно использовать многоступенчатый ГИН. В зависимости от прерывателя один и тот же импульсный генератор может иметь разные выходные параметры, что может быть использовано для создания универсальных компактных генераторов с достаточно большой мощностью и возможностью мобильно перестраивать параметры в зависимости от конкретной задачи.

В 80-х годах развитие импульсных генераторов на основе промежуточных индуктивных накопителей привело к появлению нового класса прерывателей, которые получили название *плазменных прерывателей тока* (ППТ). Эти прерыватели представляют собой плазменную переключку, включенную на выходе генератора параллельно нагрузке. В стадии вывода энергии в промежуточный индуктивный накопитель эта переключка, отсекающая нагрузку от контура генератора, представляет собой практически идеальный проводник. Параметры плазмы подбираются таким образом, чтобы в момент, близкий к моменту максимума тока в промежуточном накопителе, проводимость плазменной переключки падала, обеспечивая на нагрузке резкое нарастание напряжения с амплитудой, превышающей начальное выходное напряжение первичного накопителя. В первое время после появления ППТ казалось, что они способны обеспечить быстрый прогресс в разработке сверхмощных импульсных генераторов мультитераваттного диапазона, однако в дальнейшем этот энтузиазм несколько угас. Выяснилось, что комплекс явлений, имеющих место в плазменном прерывателе тока, настолько широк, что потребовалась разработка специальных численных методов и приближенных аналитических моделей, позволяющих хоть в каком-то приближении понять физику ППТ. Были созданы крупные установки, обеспечивающие возможность проведения полномасштабных экспериментов [59].

Третьим направлением поиска пути решения проблемы прерывателя для импульсных генераторов с индуктивным накопителем энергии явились *полупроводниковые переключатели* [28]. Однако к началу бурного развития мощной импульсной энергетики самый мощный из обычных полупроводниковых приборов, способных переключаться за несколько наносекунд – мощный полевой транзистор (MOSFET) – был способен коммутировать лишь несколько десятков ампер при напряжении в сотни вольт, что было совершенно недостаточно для задач мощной импульсной техники. Решение этой проблемы оказалось весьма неожиданным.

И.В. Греховым с сотрудниками [28] в начале 80-х годов было показано, что процесс восстановления обычного мощного кремниевого диода с глубоким диффузионным *pn*-переходом при переключении из прямого смещения на обратное в определенных условиях может протекать очень быстро, обеспечивая наносекундный обрыв большого обратного тока. Будучи подключен в цепь последовательно с индуктивным накопителем и параллельно нагрузке, такой диод за единицы наносекунд перебрасывает в нее ток накопителя; при этом ток через диод обрывается полностью. Этот прибор был назван дрейфовым диодом с резким восстановителем (ДДРВ). ДДРВ коммутирует мощность на два порядка большую, чем MOSFET, и может легко соединяться последовательно в

высоковольтные сборки. Разработка ДДРВ в свое время стимулировала быстрый прогресс в мощной полупроводниковой импульсной технике наносекундного диапазона; полупроводниковые генераторы с мощностью импульса в десятки МВт, работающие на частоте в сотни герц, стали обычной аппаратурой уже в конце 80-х годов.

Наиболее мощный из генераторов на основе ДДРВ, созданных к настоящему времени, имеет импульсную мощность 64 МВт (80 кВ, 0,8 кА) на частоте  $\sim 1$  кГц и время нарастания импульса 0,8 нс. Основными достоинствами этого прибора является очень быстрый (нано- и субнаносекундный) и полный (практически до нуля) обрыв тока, а принципиальным недостатком является сравнительно невысокая импульсная мощность прибора. Кроме того, большие сложности возникают при создании первичных коммутаторов, в особенности в цепи обратного тока, где ток в сотни и даже тысячи ампер должен нарастать за время порядка 100 нс и даже меньше. Обычно для этого используется вспомогательный ДДРВ – генератор импульсов, что усложняет конструкцию и снижает эффективность системы.

Описанные проблемы существенно упрощаются в так называемых инверсно-восстанавливающих диодах (ИВД) (Английская транскрипция IRD-Inverse Recovery Diode). В ИВД сочетаются высокое быстродействие ДДРВ-режима с большим количеством «рабочей» плазмы на единицу площади, т. е. с возможностью формирования очень мощного наносекундного импульса. В таком диоде даже при длинном (1–5 мкс) импульсе прямого тока, т. е. при большом количестве рабочей плазмы в приборе, процесс восстановления протекает аналогично ДДРВ-режиму, но при существенно (примерно в 5 раз) большей длительности обратного тока. Коэффициент обострения (отношение длительности фронта нарастания обратного тока к длительности его обрыва) у ИВД рекордно высок (500–600 по сравнению с  $\sim 100$  у ДДРВ), но плотность рабочего тока такая же, как и в ДДРВ.

В 1992–1993 гг. в Институте электрофизики Уральского отделения РАН под руководством акад. Г.А. Месяца был исследован процесс восстановления диодов с конструкцией полупроводниковой структуры, аналогичной используемой в режиме ДДРА, но при плотностях прямого и обратного токов, резко (на порядок и более) превышающих плотности, соответствующие ДДРВ-режиму. Было обнаружено, что в этих условиях в определенном диапазоне плотностей токов и длительности импульсов наблюдается резкий обрыв тока, причем механизм его явно отличается от ДДРВ. Последующие эксперименты и расчеты позволили создать физическую картину этого явления, которое авторы назвали SOS-эффектом (SOS – Silicon Opening Switch). Рабочая плотность тока

обычно находится в диапазоне 2–5 кА/см<sup>2</sup>, время обрыва тока 4–10 нс, длительность импульса прямого тока равна 300–600 нс, время нарастания обратного тока составляет 50–150 нс. Ток через диод обрывается не полностью – обычно в нагрузку переходит ~ 85 % общего тока. При очень коротких временах прямого (~ 40 нс) и обратного (~ 10 нс) токов время обрыва тока сокращается до 0,5–1,0 нс. Для создания коротких импульсов прямого и обратного токов необходим мощный генератор на SOS-диодах.

Очень высокая плотность рабочего тока в SOS-диодах позволила создать на их основе мощный генератор наносекундных импульсов со следующими параметрами: напряжение до 450 кВ (мощность импульса ~ 250 МВт), длительность импульса 30–60 нс, частота 300 Гц. В ближайшее время предполагается создание еще более мощных систем с напряжением порядка МВ [29].

Этой же группой были найдены оригинальные схемные решения, позволившие создать мощный импульсный высокочастотный ускоритель электронов с индуктивным накопителем энергии и тиратронным прерывателем тока [30].

## **7.2. Промышленные технологии на основе использования импульсов высокого напряжения**

### **7.2.1. Физические основы, классификация, достоинства**

Из рассмотрения истории развития электротехники и энергетики следует (см. гл. II), что уже в первых опытах с электрическим током просматривались попытки технического (технологического) использования этого нового явления. Можно говорить о том, что становление учения об электричестве и зарождение новых технологий – электротехнологий – шли параллельно и стимулировали друг друга.

В настоящее время *под электротехнологиями понимаются способы обработки материалов, в которых электрическая энергия используется непосредственно как инструмент для обработки.*

Эта энергия может выступать в различных видах: тлеющий, коронный, искровой или дуговой разряды; плазма; сильное электрическое и магнитное поля; пучки заряженных частиц; концентрированные пучки электромагнитного излучения различного спектрального диапазона; токи высокой частоты и др.

В соответствии с этим к электротехнологиям относятся: электроискровая, электроэрозионная, электроразрядная и электровзрывная технологии; различные виды электросварки, основанные на действии дуговых

разрядов и контактном нагреве; плазменная, электронно-лучевая и ионная обработка, лазерная обработка; магнито-импульсная обработка, обработка током высокой частоты; электрохимическая и ультразвуковая обработка.

Эти технологии можно объединить по уровню рабочего напряжения в две группы – *низковольтные* и *высоковольтные*. В технологиях первой группы используется напряжение от десятков вольт до единиц киловольт, соответственно технологии, использующие напряжения от единиц до сотен киловольт, относятся ко второй группе.

Вторую группу технологий в свою очередь можно объединить по виду рабочего напряжения также в две группы: *технологии, использующие постоянное или переменное напряжение, и технологии, использующие импульсное напряжение, – электроимпульсные технологии.*

В соответствии с профилем подготовки специалистов по магистерской программе «Техника и электрофизика высоких напряжений», для которых и написана эта книга, наибольший интерес представляет знакомство в этом курсе (и более глубокое изучение в последующих курсах) с *высоковольтными электроимпульсными, электроразрядными и электровзрывными технологиями.* Им можно дать и другое обобщающее название: *технологии на основе использования импульсов высокого напряжения.*

В соответствии со способами трансформации энергии импульса высокого напряжения в другие виды энергии можно дать следующую классификацию этим технологиям (рис. 7.5), [55].

В первую группу включены технологии, основанные на преобразовании электрической энергии в другие виды энергии в плазменных каналах, образующихся в твердых или жидких диэлектриках при их электрическом пробое. В первом случае принято использовать термин *электроимпульсные* технологии, во-втором – *электрогидравлические.*

Технологии второй группы – *электровзрывные* – базируются на трансформации электрической энергии, высвобождаемой во взрывающемся проводнике и в образующемся в его парах плазменном шнуре.

Технологии третьей группы – *электроразрядные* – базируются на трансформации энергии в маломощных и относительно низковольтных электрических разрядах: искровом, коронном, барьерном.

В каждом из трех случаев трансформация электрической энергии сопровождается комплексом таких процессов, как массоперенос и формирование ударных волн, быстрый рост локальной температуры до нескольких тысяч градусов, излучение в широком диапазоне длин волн (от инфракрасного до мягкого рентгеновского), формирование активных химических элементов и др.



Рис. 7.5. Классификация высоковольтных импульсных технологий

При всем многообразии областей применения этих технологий можно дать следующие обобщающие формулировки их преимуществ по сравнению с традиционными [31–35].

1. *Возможность обработки материалов с любыми свойствами без воздействия со стороны инструмента больших механических усилий.*

Такая возможность обусловлена тем, что обработка (съем, резание, измельчение, изменение формы и др.) происходит за счет энергии, первоначально имеющей не механическую, а электрическую природу. Например, при измельчении твердых непроводящих тел с помощью электрических разрядов, происходящих в самом твердом теле или в окружающей жидкой среде (обычно в воде), источником силового воздействия является расширяющийся плазменный канал.

2. *Отсутствие необходимости в специальных инструментах более твердых, чем обрабатываемый материал.*

В процессе обработки с применением новых технологий инструмент в общепринятом смысле вообще отсутствует. В электроразрядных технологиях его роль выполняет канал электрического разряда. Поскольку удельная подводимая к обрабатываемому материалу мощность очень высокая, технологические операции не требуют заметных механических усилий. Electrodes, между которыми осуществляется электрический разряд, могут выполняться из любого металла.

Например, при бурении скважин по электроимпульсной технологии, буровой наконечник может изготавливаться (и изготавливается) из рядовой стали.

*3. Значительное сокращение потерь ценных материалов в процессе обработки.*

Это преимущество особенно большое значение имеет при извлечении из пород драгоценных и полудрагоценных камней. Например, благодаря избирательности разрушения горных пород с помощью электроимпульсной технологии значительно увеличивается выход извлекаемых минералов и сохранность их природной формы. Эта технология позволяет также расчленять сложные конструкции, состоящие из различных материалов, на отдельные компоненты, которые становятся доступными последующей утилизации. В качестве примера можно привести железобетонные изделия, шины, электротехнические и радиотехнические изделия (например, осветительные приборы) и др.

*4. Возможность получения материалов с уникальными свойствами.*

Уникально высокие удельные мощности, обеспечиваемые новыми технологиями, могут придавать производимому продукту столь же необычные свойства. Например, порошки металлов, сплавов и соединений, полученные при электрическом взрыве металлических проводников, обладают избыточной запасенной энергией, что делает их весьма активными в различных химических процессах.

*5. Высокая производительность и экономическая эффективность.*

В некоторых технологических операциях обычные способы механической обработки подошли или подходят к пределу своих возможностей.

Новые технологии при обработке очень твердых материалов позволяют увеличить плотность энергии, вводимой в зону обработки без пропорционального увеличения затрат на оборудование, оснастку и инструмент.

Например, при бурении скважин и проходки стволов с помощью электроимпульсной технологии, скорость почти на порядок превосходит скорость, обеспечиваемую традиционными механическими способами, даже с использованием дорогостоящих буровых наконечников с алмазными вставками. Причем, преимущества электроимпульсного способа увеличиваются при увеличении твердости буримых пород и увеличении диаметра скважины.

Имеется и ряд других преимуществ этих технологий.

Не останавливаясь на детальном описании технологий на основе использования импульсов высокого напряжения, которое является предметом специальных курсов, кратко рассмотрим историю возникновения и физические основы трех основных групп этих технологий.

### 7.2.2. Электроимпульсные технологии

Традиционной областью исследований, выполняемых высоковольтниками Томского политехнического университета, являлась физика электрического разряда в различных диэлектрических средах при воздействии импульсов микро- и наносекундного диапазона.

В пятидесятые годы под руководством проф. А.А. Воробьева были начаты исследования возможностей применения разряда в твердых непроводящих материалах (прежде всего в горных породах и минералах) для дробления и измельчения. Упрощенная схема реализаций этой идеи показана на рис. 7.6, а.

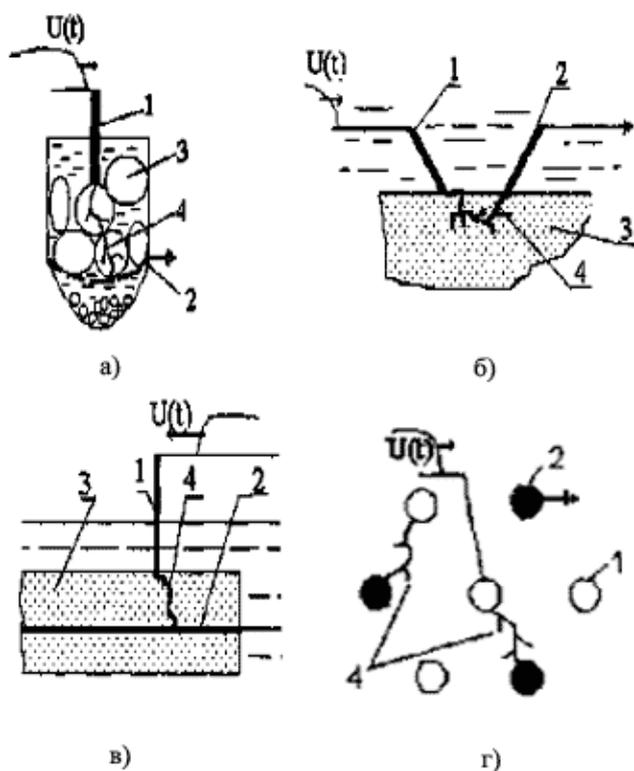


Рис. 7.6. Схема разрушения твердых непроводящих тел электрическими разрядами: 1 – высоковольтный электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – разрушаемое тело, 4 – разрядный канал; а) дробление, б) резание, снятие поверхностного слоя, бурение; в) разрушение железобетона; г) бурение

Несколько позже в Томском политехническом университет было открыто новое физическое явление, расширившее технологические возможности электрического разряда. Суть явления заключается в том, что при подаче на электродную систему, расположенную на одной поверхности твердого тела, помещенного в жидкость, импульса напряжения с большой крутизной фронта ( $du/dt$ ), канал разряда заглубляется (внедряется) в твердое тело, рис. 7.6, б.

Первые успехи в технологическом использовании электрических разрядов были столь впечатляющими, что руководство вуза и Министерства высшего и среднего специального образования Российской Федерации приняли ряд специальных мер для ускорения этих работ:

- в 1963 г. была создана проблемная лаборатория «Кедр» со штатом около 80 человек;
- в 1965 г. начата подготовка инженеров по двум новым специальностям: «инженерная электрофизика» и «физика горения и взрыва», которые в сильной степени были ориентированы на технологические и военные применения явлений электрического разряда, электрического взрыва проводников и ряда других быстропротекающих процессов;
- в 1968 г. создан госбюджетный научно-исследовательский институт высоких напряжений. Был сделан и следующий, естественный в условиях «холодной войны» шаг – тематика была засекречена и на долгие десятилетия информация об успехах и трудностях на пути новой технологии оказалась недоступной специалистам зарубежных стран. Даже в СССР доступ к ней был жестко ограничен.

Как уже отмечалось, в основе технологии лежит формирование разрядного канала в твердом теле и взрывообразное выделение энергии в нем, которое создает динамические напряжения в материале. При амплитуде импульса напряжения в  $\sim 300$  кВ и удельном энерговыделении  $\leq 100$  Дж/см, мощность достигает гигаваттного уровня, давление в разрядном канале  $\sim 10^{10}$  Па, а температура  $\sim 10^4$  °К. Канал разряда, с первоначальным диаметром 10–50 мкм, быстро расширяется до 100–500 мкм и формирует вокруг себя волны давления, разрушающие материал.

Для того, чтобы произошел разряд в твердом теле, должны быть выполнены два условия:

- амплитуда импульса должна быть больше напряжения пробоя твердого тела на длине от одного электрода до другого;
- это пробивное напряжение должно быть меньше пробивного напряжения окружающей среды и границы ее раздела с твердым телом, рис. 7.6, а, б.

Сопоставление вольт-секундных характеристик различных диэлектрических сред, выполненное А.А. Воробьевым, Г.А. Воробьевым, А.Т. Чепиковым, И.И. Каляцким и их коллегами, показало, что при длительности фронта меньше некоторой критической величины, электрическая прочность воды становится больше, чем горных пород. Это означает, что в разрядных промежутках, показанных на рис. 7.6, разряд будет развиваться не в жидкости и не по поверхности твердого тела, а в его объеме.

В настоящее время, когда стало возможным публиковать эти материалы в открытых отечественных изданиях и за рубежом, когда стали нормой взаимные визиты специалистов, большой интерес к электроимпульсной технологии проявляют практически все ведущие страны: США, Англия, Германия, Франция, Япония, и др. За последние 10–12 лет НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете выполнил несколько контрактов с фирмами этих стран на исследования и разработки в области электроимпульсной технологии. Это вдохнуло новую жизнь в работы, темпы которых в 80–90-е годы резко упали по ряду причин:

- в условиях плановой экономики гражданские (не военные) предприятия были индифферентны к научно-техническим разработкам, которые требуют вложения больших сил и средств на их доводку до промышленных образцов, пригодных для серийного производства;
- высокое напряжение является отрицательным психологическим фактором;
- использование в качестве рабочей среды жидких углеводородов (трансформаторного масла, солярового масла и др.) во многих случаях неприемлемо по экономическим, экологическим, технологическим соображениям; использование воды требует применения импульсов с очень коротким фронтом и, соответственно, более сложного оборудования;
- высоковольтные импульсные установки, которые ранее использовались, в основном, для испытания высоковольтного энергетического оборудования, не в полной мере отвечают требованиям к технологическим установкам по надежности, сроку службы, частоте посылке импульсов, электромагнитной совместимости и др. Никто не намерен производить специализированное оборудование из-за отсутствия рынка этой новой технологии, а без специализированного оборудования технология не может выйти на широкий рынок (пример ситуации в виде замкнутого круга);
- высокий уровень акустических шумов и электромагнитных помех, характерные для этой технологии, представляют собой проблемы решаемые, но усложняющие оборудование.

Чтобы ускорить полномасштабное применение электроимпульсной технологии необходима широкая международная кооперация, которая позволила бы обеспечить дальнейшие работы и инвестициями, и know-how, и богатым опытом, который накоплен в Томском политехническом университете.

Подробное описание технологии: истории, физических основ, технологических исследований и технических воплощений дано в [34, 35].

## **А. Дробление и измельчение горных пород и искусственных твердых непроводящих материалов**

Традиционная технология извлечения полезных компонентов из руды состоит из нескольких стадий (процессов), включая дробление и измельчение. По стоимости последние составляют от 30 до 70 % общих затрат. Извлечение из руды полезных минералов, сопровождается большими затратами энергии, а также износом породоразрушающего инструмента.

Традиционно используемое для этого оборудование практически не обладает селективным эффектом и, следовательно, нарушается принцип обогатителей «Не разрушай ничего сверх необходимого!».

Повышенная избирательность (селективность разрушения) этого метода обусловлена двумя основными эффектами:

- ориентацией развивающегося разрядного канала на включения, концентрирующие вокруг себя электрическое поле из-за различия их диэлектрических характеристик по сравнению с вмещающей породой;
- концентрацией ударных волн и возникновением растягивающих усилий из-за различий акустических характеристик включения и окружающего материала.

Созданные на сегодня установки в зависимости от назначения существенно отличаются производительностью, параметрами источника импульсов высокого напряжения, конструкцией высоковольтных электродов, рабочей камеры и др. Типичная производительность лежит в пределах 50–1000 кг/час, размер кусков исходного материала не более 100 мм, размер частиц конечного продукта примерно 2 мм и менее. Источником высоковольтных импульсов, как правило, является многоступенчатый ГИН, обеспечивающий импульсы амплитудой около 300 кВ с энергосодержанием 1 КДж с длительностью фронта не более 0,1 мкс и частотой следования до 20 имп/с.

Подобные установки (незначительно модифицированные) позволяют осуществлять процесс фрагментации сложных изделий, содержащих металлические и диэлектрические компоненты (радиодетали, осветительные лампы, электронные платы и т. п.). Разделение компонент обеспечивает два положительных эффекта: возврат в производство дорогостоящих металлов и исключение в производственном цикле образования отходов, создающих экологические проблемы.

## **Б. Разрушение бетона и железобетона**

В настоящее время бетон и железобетон являются одними из наиболее широко распространенных видов строительных материалов. В России ежегодно образуется около 5 млн м<sup>3</sup> отходов железобетона, при этом теряется около 150 тыс тонн арматурного железа.

Утилизацию железобетона целесообразно осуществлять в две стадии:

- а) первая, наиболее сложная стадия – отделение бетона от арматуры;
- б) вторая стадия – додробливание кусков бетона до размеров, допускающих его вторичное использование.

На второй стадии с успехом могут использоваться как традиционные механические способы дробления, так и новый электроимпульсный способ.

На первой стадии в полной мере проявляются преимущества электроимпульсного метода, реализуемого согласно схемы на рис. 7.6, в.



*Рис. 7.7. Внешний вид установки для разрушения железобетонных плит перекрытия*

Разрушаемое изделие помещается в ванну с технической (водопроводной) водой. Над поверхностью изделия перемещается каретка с укрепленными на ней высоковольтными электродами (обычно 10–20 шт.), которые могут раздельно перемещаться в вертикальном направлении по команде оператора. Заземленным электродом служит арматура.

Источник высокого напряжения – многоступенчатый генератор на напряжение 500–600 кВ. На фотографиях (рис. 7.7) показан внешний вид установки для разрушения железобетонных плит перекрытия размером до  $6,3 \times 3,2 \times 0,3 \text{ м}^3$ .

Производительность такой установки составляет 3–5 м<sup>3</sup>/час без учета времени, необходимого для загрузки изделия и выгрузки продуктов разрушения (арматуры и бетона).

Основными преимуществами такого способа разрушения железобетонных изделий являются:

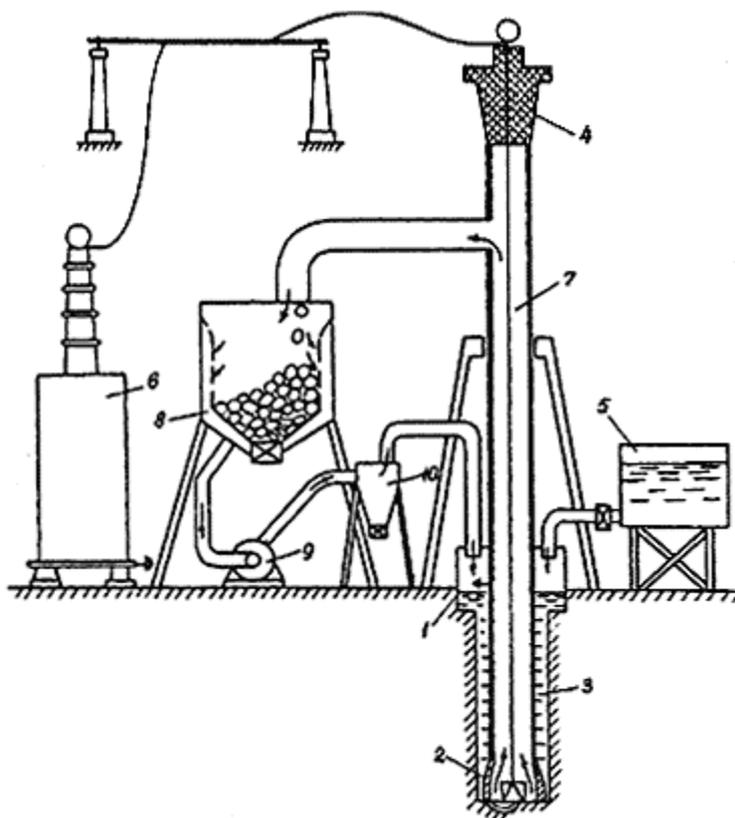
- меньшие по сравнению с механическими способами энергозатраты благодаря тому, что разрушение происходит под действием напряжений сдвига и растяжения, а не сжатия;
- возможность повторного использования железной арматуры и металлических закладных деталей, извлекаемых практически без изменения первоначальной формы.

### ***В. Бурение скважин***

Технология бурения скважин с помощью импульсов высокого напряжения отрабатывалась в НИИ высоких напряжений при ТПУ наиболее интенсивно в шестидесятые-семидесятые годы. Созданные полупромышленные электроимпульсные буровые установки были испытаны в полевых условиях в различных регионах СССР: в Восточном Казахстане, в районе Курской магнитной аномалии, на трассе Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, на Кольском полуострове и др. Было пробурено более 1000 м скважин различного диаметра и в различных геологических условиях при использовании в качестве промывочной жидкости дизельного топлива. Упрощенная технологическая схема бурения показана на рис. 7.8.

При поиске оптимальных режимов бурения испытаны установки с параметрами, изменяющимися в довольно широких пределах: диаметр буровой коронки – 80–1100 мм; расстояние между высоковольтными и заземленными электродами коронки 20–300 мм; амплитуда импульса 200–700 кВ; энергия единичного импульса 0,5–20 кДж; частота посылки импульсов от одного до 26 импульсов в секунду. При бурении скважины диаметром 250 мм и частоте посылки импульсов 10 имп/с средняя скорость проходки скважины составляла 16 м/час, что во много раз пре-

восходит скорость бурения традиционным способом. Износ буровой коронки из обычной стали был пренебрежимо малым и позволял проходить несколько сотен метров без ее замены.



*Рис. 7.8. Технологическая схема электроимпульсной буровой установки:  
1 – кондуктор; 2 – буровая коронка; 3 – буровая колонна; 4 – высоковольтный ввод (проходной изолятор); 5 – емкость с промывочной жидкостью; 6 – генератор импульсного напряжения; 7 – токопровод; 8 – сборник бурового шлама; 9 – насос; 10 – гидроциклон*

Самопроизвольное (автоматическое) перемещение разрядов между электродами является характерной чертой и главным достоинством этой технологии бурения. При разряде в одном промежутке (1) образуется полость в горной породе, которая заполняется жидкостью, электрически более прочной по сравнению с горной породой при малой длительности импульса напряжения. Следующий разряд происходит в другом промежутке, чьи электроды соприкасаются с дном скважины. Так продолжается до тех пор пока не будет разрушена порода под последней (любой) парой электродов. После этого буровая колонка опустится и займет новое положение. Описанные события циклически повторяются.

Основным препятствием на пути широкого внедрения этой технологии явилось применение в качестве промывочной жидкости дизель-

ного топлива, которое, кроме высокой цены, представляет еще экологическую опасность при неизбежных утечках из-за трещиноватости и пористости горных пород.

В настоящее время ведется поиск соответствующей конструкции бурового снаряжения для бурения в воде и новых промывочных жидкостей, которые удовлетворяли бы требованиям электроимпульсного процесса бурения, были дешевы и экологически безопасны.

### **7.2.3. Электрогидравлические технологии**

На бризантные проявления электрического разряда в жидкостях ученые обратили внимание еще в первых опытах с искрой в растительных маслах, спирте и др. Первое, известное автору, печатное свидетельство о наблюдении этого эффекта относится к 1769 г. (J. Priestly. Philos. Trans., 1769, p. 57.) Но только в середине XX столетия начался целенаправленный поиск сфер практического использования эффекта формирования ударных волн и гидродинамических течений при электрическом разряде в жидкостях названного позднее «электрогидравлическим эффектом». Первая систематизация разрозненных поисков и ряд оригинальных идей были представлены Л.А. Юткиным в книге «Электрогидравлический эффект и некоторые возможности его применения», опубликованной в 1958 г. [36]. Уже первые эксперименты показали принципиальную возможность использования электрогидравлического эффекта в таких операциях, как:

- а) дробление и тонкое измельчение хрупких материалов,
- б) очистка литья от формовочной смеси,
- в) развальцовка труб,
- г) различные виды штамповки и др.

Электрогидравлический эффект – формирование волны давления вокруг разрядного канала в жидкости – реализуется в простейшей схеме, рис. 7.9, без каких-либо жестких требований к элементам разрядной цепи.

От повысительно-выпрямительного устройства (трансформатор-выпрямитель) заряжается высоковольтный конденсатор (иногда батарея параллельно соединенных конденсаторов), который через искровой разрядник разряжается на рабочий промежуток в воде.

Типичные технические параметры разрядной цепи: напряжение – десятки киловольт (не больше 50 кВ), емкость конденсатора – единицы–десятки микрофарад, время разряда – единицы (реже десятки) микросекунд.

В момент, когда разрядный канал переключает электроды, в нем начинает выделяться энергия, запасенная в конденсаторе. Плотность тока в канале достигает, а иногда и превосходит  $10^6$  А/см<sup>2</sup>. Расширяющийся со скоростью  $\sim 10^6$  см/с канал создает в жидкости давление в несколько со-

тен меганьютонов на квадратный метр ( $300\text{--}500 \text{ МН/м}^2$ ). Ударная волна с крутым фронтом со временем отделяется от стенок канала, поскольку скорость его расширения на поздних стадиях меньше скорости распространения ударной волны. По мере движения волны скорость падает до звуковой и уменьшается давление вследствие диссипации энергии. Прилегающая к стенкам канала жидкость испаряется, а сам канал со временем трансформируется в пульсирующую газопаровую полость. В технологических процессах наибольшую роль играет энергия ударной волны, индуцируемая во время первого полупериода токовых осцилляций.

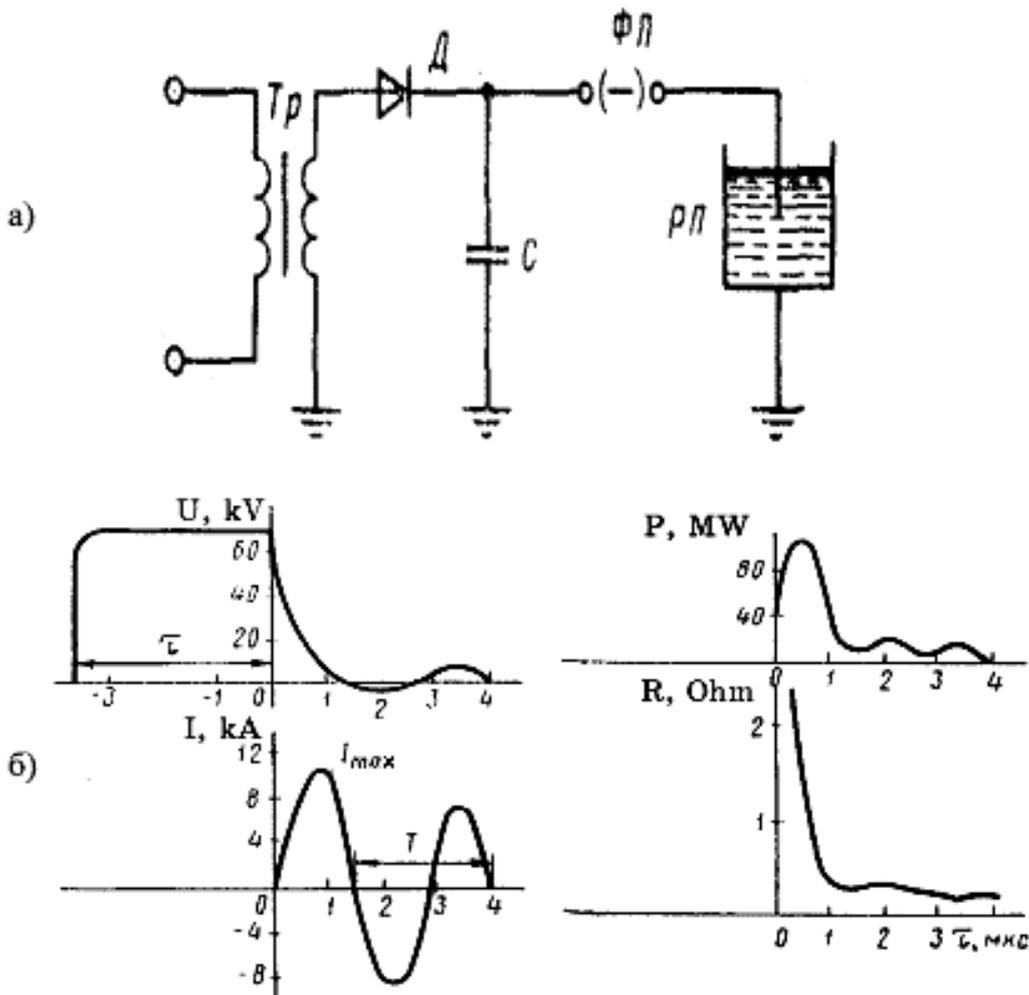


Рис. 7.9. Формирование волны давления вокруг разрядного канала в жидкости

В ряде технологий оказывается более рациональным формировать плазменный канал в жидкости не за счет электрического пробоя, а за счет электрического взрыва проводника.

В качестве примера на рис. 7.10 показаны различные схемы электрогидравлического формообразования (штамповки).

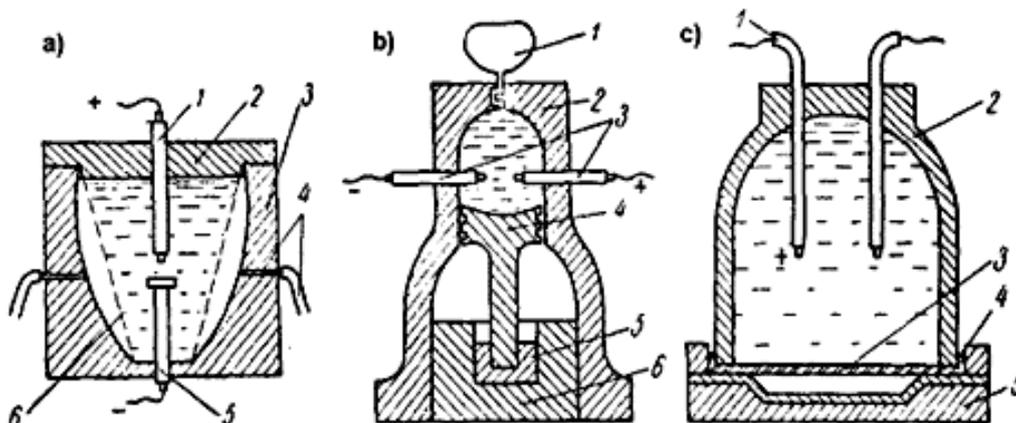


Рис. 7.10. Схемы трех основных вариантов ЭГ-формообразования.  
 а) непосредственное воздействие жидкости на заготовку: 1, 5 – электроды; 2, 3 – разборная матрица; 4 – подвод жидкости (воды); 6 – заготовка; в) воздействие с помощью промежуточного металлического тела: 1 – емкость с водой; 2, 6 – разборная матрица; 3 – электроды; 4 – металлический штамп; 5 – заготовка (деталь); с) воздействие через резиновую диафрагму: 1 – электроды; 2, 5 – разборная матрица; 3 – резиновая диафрагма; 4 – заготовка.

Некоторые другие технологические применения ЭГ-эффекта указаны на схеме (рис. 7.5).

#### 7.2.4. Электровзрывные технологии

Данный класс технологий основан на использовании явления электрического взрыва проводников (ЭВП). ЭВП представляет собой явление взрывообразного разрушения металлического проводника (обычно проводочка диаметром в десятые доли мм, реже – фольга) при пропускании по нему электрического тока высокой плотности (более  $10^{10}$  А/см<sup>2</sup>), обеспечивающего выделение в проводнике энергии плотностью  $10^8$ – $10^9$  Вт/см<sup>3</sup>.

Явление сопровождается яркой вспышкой света, резким звуком, ударными волнами, распространяющимися в окружающей среде. Продукты разрушения представляют собой пары и мельчайшие частицы металла – ультрадисперсный порошок (УДП). В начале 70-х годов группа сотрудников НИИ высоких напряжений при ТПУ (Г.В. Иванов, Ю.А. Котов, М.А. Мельников, Н.А. Яворовский) предложило использовать это явление в технологии получения сверхтонких порошков металлов. Само явление ЭВП было известно и описано значительно раньше. Последующими исследованиями было установлено, что в зависимости от состава газа, в котором осуществляется взрыв, таким методом можно получать порошки не только чистых металлов, но и сплавов, химических соединений и композиционных материалов [37, 38]. Упрощенная блок-схема установки для получения УДП показана на рис. 7.11.

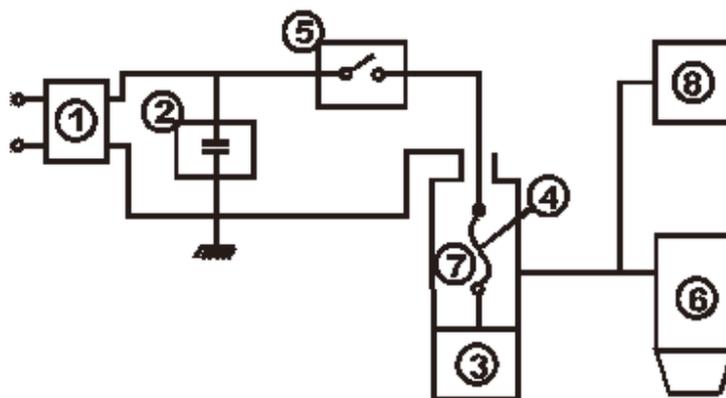


Рис. 7.11. Блок-схема установки для получения УДП: 1 – источник постоянного высокого напряжения (десятки киловольт), 2 – емкостный накопитель энергии, 3 – механизм подачи проволоки, 4 – проволока, 5 – коммутатор, 6 – устройство для сбора порошка, 7 – рабочая камера (реактор), 8 – система снабжения реактора газом

Мощность, развиваемую при взрыве проводника, можно регулировать в широких пределах –  $10^6$ – $10^{13}$  Вт. Процесс получения ЭДП характеризуется чрезвычайно высокой скоростью охлаждения частиц ( $10^5$ – $10^9$  град/с) из-за высокой скорости их разлета во время взрыва ( $(1-5) \cdot 10^5$  см/с). Это придает им ряд свойств, выгодно отличающих их от УДП, получаемых другими способами (на сегодня известно более 10 способов).

В частности:

- частицы обладают избыточной запасенной энергией;
- среднестатистический размер частиц лежит в достаточно узких для таких материалов пределах 0,05–0,5 мкм;
- частицы имеют сферическую форму (или близкую к ней);
- удельная поверхность частиц составляет 5–500 м<sup>2</sup>/г.

Необычные свойства порошков обуславливают широкий спектр их возможных применений. На сегодня можно говорить не менее, чем о 20 таких применений, в частности:

- керамика и другие композиционные материалы;
- сверхпроводники;
- солнечные батареи;
- фильтры;
- поглотители;
- красящие и магнитные пигменты;
- высокотемпературные сплавы и др.

Производительность установки одномодульного исполнения зависит от свойств металла проволоки и лежит в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен граммов в час (например, для Al-50 г., Cu-100 г., W-80 г.).

Уместно заметить, что даже эта, в общепринятом смысле невысокая производительность, превосходит производительность большинства других методов.

Как уже указывалось, явление ЭВП используется в ЭВП-прерывателях, для инициирования плазменного канала в ЭГ-технологиях. Еще одна область использования эффекта – инициирование взрывчатых веществ.

### **7.2.5. Электроразрядные технологии**

Группа технологических приемов, объединенных нами названием «Электроразрядные технологии», от электроимпульсных и электрогидравлических технологий отличается, прежде всего, существенно меньшей мощностью разряда и преобладанием в технологических операциях не механического действия разрядного канала, а действием его как источника активных химических элементов и соединений (атомарный кислород, озон, окислы и др.), ультрафиолетового излучения, высокой локальной температуры.

Существенный прогресс достигнут в применении этих технологий для очистки и обеззараживания питьевой воды.

Как уже отмечалось в гл. 3, загрязнение окружающей среды и, прежде всего, воды превращается в реальную угрозу развитию и самому существованию цивилизации. Уже сегодня большое количество стран и крупных регионов страдают от недостатка питьевой воды, а ее низкое качество медики называют в числе основных причин ряда серьезных заболеваний.

В настоящее время среди новых технологий по очистке и обеззараживанию питьевой воды наиболее перспективными являются окислительные фотохимические технологии, объединенные термином Advanced Oxidation Processes (AOP), включающие методы одновременного воздействия УФ-излучения и естественных для природной среды окислителей. К технологиям AOP относят и технологии, использующие электрический разряд. В последнее время электроразрядные технологии очистки воды интенсивно изучаются во многих странах. Используют различные виды разрядов: искровой разряд в воде, анодный микроразряд в воде, искровой разряд в водовоздушной среде, импульсный коронный и квазиобъемный разряды в водовоздушной среде.

Необходимо отметить, что акцент исследований постепенно смещается в сторону применения электрических разрядов в водовоздушной среде. Это связано с тем, что разряд в двухфазной среде позволяет генерировать кроме озона и УФ-излучений ряд активных частиц (радикал ОН, атомарный кислород, активные молекулы и возбужденные частицы). Реакционная способность у атомов кислорода во много раз выше, чем у озона, а радикал ОН является одной из самых активных промежу-

точных частиц. Созданные в достаточных количествах эти частицы в результате последующих превращений способны разложить любое органическое вещество вплоть до полной минерализации (до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) или, по крайней мере, до форм, легко подверженных биодegradации. Соли тяжелых металлов окисляются до высших форм окислов, теряя при этом свою токсичность, и легко могут удаляться фильтрацией.

Существенного повышения производительности установок для очистки воды по электроразрядной технологии удалось добиться в последние годы благодаря использованию в качестве рабочего напряжения высоковольтных импульсов наносекундной длительности (100–300 нс), [32, 65]. Были достигнуты два положительных эффекта:

- Поскольку уменьшение длительности импульса увеличивает плотность электронов в зоне разряда, это, в свою очередь, повышает эффективность образования озона и уменьшает образование таких вредных соединений, как, например, окислы азота.

- Второй очень важный положительный эффект – способность такого озонатора работать в воздухе с влажностью до 100 %. Это позволило разместить озонатор непосредственно в водовоздушном потоке и использовать для обработки воды не только долго живущий озон, но и УФ-излучение, сопровождающее газовый разряд, и коротко живущие атомарный кислород и радикал ОН. При таком подходе удалось реализовать наиболее перспективный технологический процесс – совместное воздействие УФ-излучения и природных окислителей. Максимальные энергозатраты на обработку воды в устройстве составляют всего 30–50 Вт·ч/м<sup>3</sup>. Концентрация озона в электроразрядном блоке обработки воды поддерживается в диапазоне 1,5–2 г/м<sup>3</sup>. Параметром регулирования является частота следования импульсов. Энергозатраты на производство 1 кг озона составляют 5–7 кВт·ч.

Достигнутая на сегодня производительность (в одномодульном исполнении) составляет 150 м<sup>3</sup>/ч. Обработанная по такой технологии вода хорошо осветляется механическими фильтрами.

Маломощные электрические разряды в жидкостях находят все более широкое применение для активации химических реакций, которые либо требуют использования дорогостоящих катализаторов, либо вообще не протекают без воздействия электрического разряда.

## Список литературы

1. Веников А.В., Путятин Е.В. Введение в специальность: учебное пособ. для вузов, М.: «Высшая школа», 1978. – 294 с., ил.
2. История электротехники / под ред. И.А. Глебова – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 524 с.
3. Самойлов М.В., Паневчик В.В., Ковалев А.Н Основы энергосбережения / учеб. пособ. Мн.: БГЭУ, 2002. – 198 с.
4. Литвак В.В. Основы регионального энергосбережения. ИТЛ. Томск, 2002. – 300 с.
5. Башмаков И.А. Мировая энергетика в 1990–2020 гг. Изв. АН, Энергетика, № 3, 1992. – С. 18–28.
6. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Молодюк В.В. Рынок электрической энергии в России. Состояние и проблемы развития. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 138 с.
7. Мастепанов А.М. О первоочередных мерах по реализации Энергетической стратегии России на период до 2020 года. «Экономика и финансы электроэнергетики», № 1, 2001. – С. 172–180.
8. Тарнижевский Б.В., Резниковский А.Ш. Оценка масштабов использования возобновляемых источников энергии в электроэнергетике России на период до 2015 года. Изв. АН, Энергетика, № 4, 1997. – С. 72–80.
9. Васильев Ю.С. «Гидроэнергетика России на рубеже веков». Изв. Международной Академии Наук Высшей Школы, № 3 (21), 2002. – С. 97–104.
10. Акимов В.Н., Еськов Ю.М., Коробеев А.С. и др. О возможных вариантах энергоснабжения Земли из космоса в XXI в. и предложениях по первому этапу. Известия АН, Энергетика, № 4, 1993. – 92 с.
11. Беляев Л.С., Коротеев А.С., Руденко Ю.Н. Энергия из космоса: возможная роль и влияние на развитие энергетических систем. Изв. АН, Энергетика, № 6, 1994. – С. 15–23.
12. Вайцеккер Э., Ловинс А., Ловинс Л. Фактор четыре. Новый доклад Римскому клубу / пер. с англ. под ред. Г.А. Месяца. – М.: Academia, 2000. – 400 с.
13. Дэвинс Д. Энергия / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.
14. Сибирская энергетическая школа // Л.И. Андронов, С.А. Беляев, С.П. Бугаев и др / под ред. Н.А. Вяткина и В.Я. Ушакова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 232 с.

15. Поздняков Б.С., Коптелов Е.А. Термоэлектрическая энергетика. – М.: Атомиздат, 1974. – 264 с.
16. Охотин А.С., Ефремов А.А., Охотин А.С., Пушкарский А.С. Термоэлектрические генераторы. – М.: Атомиздат, 1976. – 320 с.
17. Алиевский Б.Я. Специальные электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
18. Кодюков В.М., Рогозинский А.И., Пустовалов А.А. и др. Радиоизотопные источники электрической энергии. – М.: Атомиздат, 1978. – 304 с.
19. Фрадкин Г.М., Кодюков В.М. Радиоизотопные источники электрической энергии. – М.: Атомиздат, 1972. – 88 с.
20. Литвак В.В., Силич В.А., Яворский М.И. Региональный вектор энергосбережения. – 2-е изд. – Томск: STT, 2001 – 342 с.
21. Энергосбережение в системе образования: Сборник научно-практических и методических материалов // под общей ред. Г.А. Балыхина, АМИПРЕСС, 2000. – 143 с.
22. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электро-снабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
23. Конн Р.У., Чуянов В.А., Иное Н., Свитлин Д.Р. Международный термоядерный экспериментальный реактор. В мире науки, № 6, 1992. – С. 43–49.
24. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М., «Советское радио», 1974.
25. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. – М. Атомиздат, 1977. – 280 с.
26. Физика и техника мощных импульсных систем: сб. ст. / под ред. акад. Е.П. Велихова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
27. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. – Новосибирск, Изд-во « Наука», 1979. – 176 с.
28. Грехов И.В. Генерация мощных наносекундных импульсов с помощью полупроводниковых размыкателей тока. Изв. АН. Энергетика, № 1, 2000. – С. 56–63.
29. Дарзбек С.А., Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н. SOS – эффект: наносекундный обрыв сверхплотных токов в полупроводниках. ДАН, т. 334, № 3, 1994. – С. 304–306.
30. Котов Ю.А., Соковнин С.Ю.. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ – 0,2. Приборы и техника эксперимента, № 4, 1997. – С. 84–86.

31. Михайлов М.М.. Основы электротехнологий / учеб. пособ. – Томск: Изд. ТПУ, 1998. – 239 с.
32. Ushakov V.Ya. High-Voltage Engineering. Textbook, Tomsk, TPU – Press, 2001. – 285 P.
33. Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Заводовская Е.К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. – Томск, Изд-во ТГУ, 1971. – 223 с.
34. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И.. Основы электроимпульсного разрушения материалов. С.- Петербург, Изд-во « Наука», 1995. – 276 с.
35. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд. Кельского научного центра РАН, 2002. – 324 с.
36. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. – М.-Л.: Машгиз, 1955. – 50 с.
37. Яворовский Н.А. Производство ультрадисперсных порошков при электрическом взрыве проволочек. Изв. Вузов, Физика, № 4, 1996. – С. 114–136.
38. Proc. of Intern. Confer. on Pulsed Power Applic., March 27–29, Gelsenkirchen, 2001.
39. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. Под ред. А.А. Воробьева. – М., Госэнергоиздат, 1960.
40. Фрюнгель Ф. Импульсная техника / пер. с нем. М.-Л., «Энергия», 1965.
41. Смирнов С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. – М., «Энергия, 1969.
42. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / под ред. В.С. Комелькова. – М., Атомиздат, 1970. Авт.: П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, В.С. Комельков, Г.С. Кучинский, Н.Н. Никольская, П.И. Шкуропат, Г.А. Шнеерсон.
43. Воробьев Г.А., Месяц Г.А.. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. – М., Госатомиздат, 1963.
44. Bernshtein V., Smith J.. «Aurora», an electron accelerator. – IEEE. Trans., v. NS-20, № 3, 1973. – 294 p.
45. Месяц Г.А. Эктоны. Ч.1. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993 – 184 с. Ч.2. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 243 с. Ч. 3. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. – 262 с.
46. Mesyats G.A.. Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark and the Arc. – М.: Nauka, 2000. – 400 p.
47. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1982.

48. Mesyats G.A., Proskurovsky D.I. Pulse Electrical Discharge in Vacuum. Springer – Verlag, Berlin, 1989. – 293 p.
49. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, 1982.
50. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск. Изд-во ТГУ, 1975. – 258 с.
51. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1966. – 224 с.
52. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.
53. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
54. Ковальчук Б.М., Котов Ю.А., Месяц Г.А. Наносекундный высокопоточный ускоритель электронов с индуктивным накопителем. ЖТФ, в. 44, 1974. – С. 215–217.
55. Ushakov V.Ya., Dulson A.A. Performance Capability of Technological Installations Using the Electrical Discharge or Conductor Electrical Explosion Energy. Proc. of Intern. Confer. on Pulsed Power Applic., March 27–29, Gelsenkirchen, 2001. – pp. A. 03/1 – A. 03/6.
56. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Импульсный разряд в газе в условиях интенсивной ионизации электронами. УФН, Т. 126, в. 3, 1978. – С. 451–477.
57. Аполлонов В.В., Бункин В.Ф., Бычков Ю.И., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Тарасенко В.Ф., Фирсов К.Н. СО<sub>2</sub> – лазер с энергией излучения 3 кДж, возбуждаемый в согласованном режиме. Квантовая электроника, т. 8, № 6, 1981. – С. 1331–1333.
58. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. Pulsed gas-lasers. Bellingham: SPAI, Optical Engineering Press, 1995. – 374 p.
59. Быстрицкий В.М., Месяц Г.А., Ким А.А., Ковальчук Б.М., Красик Я.Е. Микросекундные плазменные прерыватели тока. Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1992, Т. 33, в. 1, С. 19–57.
60. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов. – Новосибирск: Наука, 1987.
61. Топливо-энергетический комплекс. Основы политики Минэнерго России в области развития науки и технологий на период до 2010г. и дальнейшую перспективу // Приложение к обществ.-дел. журн. «Энергетическая политика». – М.: ГУ ИЭС, 2002. – 84 с.
62. Энергетика. Проблемы и планы гиганта (интервью с Ю.Н. Кучеровым). «Наука и жизнь», № 9, 2002. – С. 42–49; № 10, 2002. – С. 54–59.

63. Сборник докладов на Всероссийском Энергетическом Форуме «ТЭК России в XXI веке». Актуальные вопросы и стратегические ориентиры, Москва, 18–19 декабря 2002 г. – 162 с.
64. Журнал «Эксперт», № 39, 2002. – С. 18–22.
65. Yavorovsky N.A., Peltzman S.S., Khaskelberg M.B., Kornev J.I. Pulsed Barrier Discharge Application for Water Treatment and Disinfection. Proc. of Intern. Confer. on Pulsed Power Applic., March 27–29, Gelsenkirchen, 2001. – pp. В. 02/1 – В. 02/6.

## Оглавление

|  |            |
|--|------------|
| Предисловие .....  | 3          |
| <b>ГЛАВА 1. ЭНЕРГЕТИКА – ОСНОВА ПРОГРЕССА<br/>И УГРОЗА БИОСФЕРЕ .....</b>                            | <b>5</b>   |
| 1.1. Основные понятия и определения.....   | 5          |
| 1.2. Энергетика и развитие цивилизации.....  | 10         |
| 1.3. Технический прогресс и биосфера .....   | 14         |
| 1.3.1. Соотношение мощностей естественных и технологических<br>процессов. ....                       | 14         |
| 1.3.2. Развитие энергетики в ее взаимосвязи с окружающей средой.....                                 | 16         |
| <b>ГЛАВА 2. ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ<br/>И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ.....</b>                               | <b>24</b>  |
| 2.1. Истоки науки об электричестве и практической электротехники .....                               | 24         |
| 2.2. Рождение и развитие электроэнергетики. Электрификация в СССР .....                              | 32         |
| 2.3. Сведения из истории высшего энергетического<br>и электротехнического образования в России ..... | 41         |
| 2.4. Становление энергетического образования Сибири .....  | 43         |
| <b>ГЛАВА 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ЗЕМЛИ И РАЗВИТИЕ<br/>ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ .....</b>                  | <b>49</b>  |
| 3.1. Запасы энергетических ресурсов.....   | 49         |
| 3.2. Тенденции энергопотребления и производства электрической<br>и тепловой энергии .....            | 59         |
| 3.2.1. Тенденции потребления энергии человечеством.....  | 59         |
| 3.2.2. Пути развития мировой электроэнергетики.....  | 64         |
| 3.3. Современное состояние энергетики России.....  | 71         |
| <b>ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ<br/>ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....</b>                 | <b>76</b>  |
| 4.1. Необходимость поиска новых источников энергии .....   | 76         |
| 4.2. Использование энергии воды.....   | 82         |
| 4.2.1. «Большая» гидроэнергетика .....   | 82         |
| 4.2.2. Мини- и микрогэс.....   | 84         |
| 4.2.3. Гидроаккумулирующие электрические станции (ГАЭС).....   | 86         |
| 4.2.4. Приливные и волновые электрические станции .....  | 91         |
| 4.3. Геотермальные электростанции .....  | 94         |
| 4.4. Солнечные электростанции.....   | 97         |
| 4.5. Ветровые электростанции .....   | 104        |
| 4.6. Биоэнергетика.....  | 109        |
| <b>ГЛАВА 5. НЕТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ<br/>ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....</b>                      | <b>113</b> |
| 5.1. Термоядерная энергетика .....   | 113        |
| 5.2. Магнитогидродинамическое преобразование энергии .....   | 120        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.3. Радиоизотопные источники энергии.....  | 125        |
| 5.4. Термоэмиссионные преобразователи.....  | 131        |
| 5.5. Термоэлектрические генераторы.....   | 133        |
| 5.6. Электрохимические генераторы.....  | 140        |
| <b>ГЛАВА 6. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ.....</b>   | <b>143</b> |
| 6.1. Проблемы энергоэффективности в сфере потребления<br>на примере российской экономики..... | 143        |
| 6.2. Особенности и закономерности энергосбережения.....                                       | 149        |
| 6.3. Энергосбережение – новый энергетический ресурс.....                                      | 154        |
| 6.4. Управление энергосбережением.....  | 159        |
| 6.5. Стимулирование энергосбережения.....   | 165        |
| 6.5.1. Нормативно-правовое стимулирование.....  | 167        |
| 6.5.2. Информационное стимулирование.....   | 168        |
| 6.5.3. Финансово-экономическое стимулирование.....  | 169        |
| <b>ГЛАВА.7. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ МОЩНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ<br/>ЭНЕРГЕТИКИ.....</b>                  | <b>173</b> |
| 7.1. Развитие высоковольтной импульсной техники.....  | 174        |
| 7.1.1. Предыстория мощной импульсной энергетики.....  | 174        |
| 7.1.2. Новая история мощной импульсной энергетики Pulsed Power.....                           | 179        |
| 7.1.3. Основные технические проблемы их решения.....  | 182        |
| 7.2. Промышленные технологии на основе использования импульсов<br>высокого напряжения.....    | 195        |
| 7.2.1. Физические основы, классификация, достоинства.....                                     | 195        |
| 7.2.2. Электроимпульсные технологии.....  | 199        |
| 7.2.3. Электрогидравлические технологии.....  | 206        |
| 7.2.4. Электровзрывные технологии.....  | 208        |
| 7.2.5. Электроразрядные технологии.....   | 210        |
| Список литературы.....  | 212        |

Учебное издание

УШАКОВ Василий Яковлевич

# ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ

Учебное пособие

Выпускающий редактор *Т.С. Савенкова*

Редактор *С.П. Барей*

Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*

Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

Подписано к печати 01.12.2010. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 12,73. Уч.-изд.л. 11,51.

Заказ 2106-10. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Тел/факс: +7 (3822) 56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)