

В.А. Кириллин

лучшие
ДЭ
школьники

Энергетика сегодня и завтра





ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КИРИЛЛИН — известный советский ученый в области термодинамики, теплофизики и энергетики, академик АН СССР, лауреат Ленинской и Государственных премий, почетный доктор наук университетов и технических вузов ряда стран. Родился в 1913 г. в Москве. Окончил Московский энергетический институт (МЭИ). В настоящее время заведует кафед-

рой инженерной теплофизики МЭИ, а также работает в Институте высоких температур АН СССР.

Более 20 лет В. А. Кириллин находился на партийной и государственной работе. Из них 15 лет был заместителем председателя Совета Министров СССР и председателем Государственного комитета по науке и технике СССР.

В. А. Кириллин

Библиотечка
Детской
энциклопедии



Редакционная
коллегия:

И. В. Петрянов
(главный редактор),
И. Л. Кнунянц,
А. Л. Нарочницкий

Энергетика сегодня и завтра



Москва
«Педагогика», 1983

ББК 31
К.43

Рецензенты:

Л. А. Мелентьев, академик АН СССР;

М. А. Стирикович, академик АН СССР

Кириллин В. А.

К 43 Энергетика сегодня и завтра.—М.: Педагогика, 1983.—с. 128, ил.—(Б-чка Детской энциклопедии «Ученые — школьнику»).

35 коп.

В книге известного советского ученого академика В. А. Кириллина в популярной форме рассказывается о масштабах и темпах развития энергетики XX в., об энергетических ресурсах нашей страны, транспортировке и аккумуляции электроэнергии. Большое внимание уделяется энергетике будущего.

Для школьников среднего и старшего возраста

4802000000-002

К ————— **52-83**
005(01)-83

ББК 31
6П2

© Издательство «Педагогика», 1983 г.

В развитии материальной базы современного общества важнейшую роль играет энергетика, электрификация. Эта мысль в предельно ясной и лаконичной форме была высказана В. И. Лениным в декабре 1920 г. на VIII Всероссийском съезде Советов: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны». В. И. Ленин видел в электрификации действенное средство для подъема промышленности и всего народного хозяйства страны, для его успешного роста.

Почему же электрификация так важна для развития экономики?

Современный человек с детских лет, день за днем убеждается в том, что электричество, электрическая энергия делает его жизнь лучше: интереснее, удобнее, богаче. С каждым годом растет потребление энергии промышленностью, транспортом, сельским хозяйством.

Научно-технический прогресс невозможен без развития энергетики, электрификации. Для повышения производительности труда первостепенное значение имеет механизация и автоматизация производственных процессов, замена человеческого труда (особенно тяжелого или монотонного) машинным. Но подавляющее большинство технических средств механизации и автоматизации (оборудование, приборы, ЭВМ) имеет электрическую основу.

Почему же так быстро растет спрос именно на электрическую энергию, в чем ее преимущество?

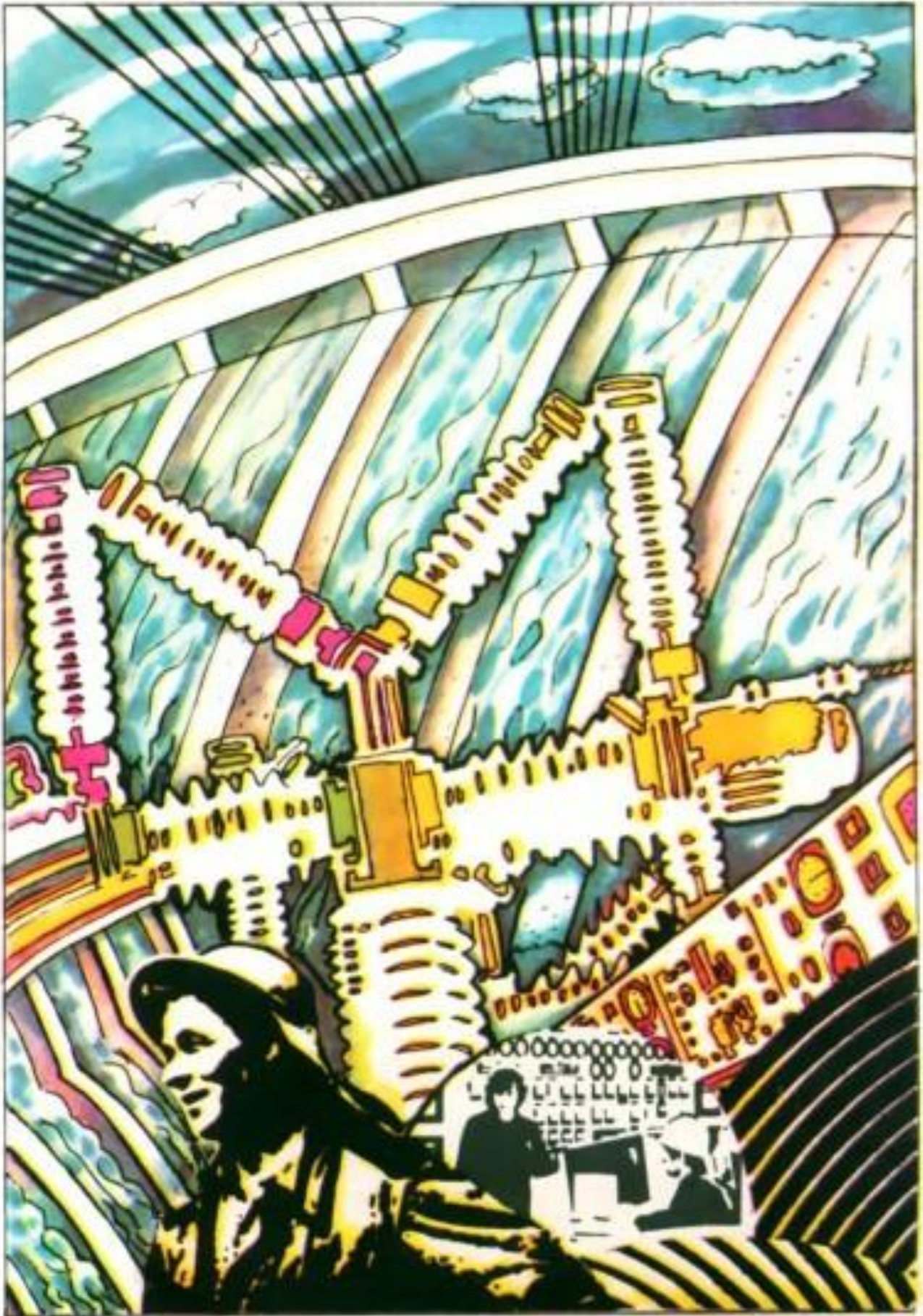
Электрическая энергия универсальна, она может быть использована для самых различных целей. В частности, ее очень просто превратить в тепло. Это

и делается, например, в электрических лампочках накаливания, или, как теперь говорят, в электрических источниках света. Электрический ток заставляют протекать по тонкой вольфрамовой нити, которая вследствие этого нагревается до температуры $2100—2600^{\circ}\text{C}$ и ярко светится. Вольфрам избран потому, что он имеет очень высокую температуру плавления, около 3380°C . Так как вольфрам окисляется уже при температуре $400—500^{\circ}\text{C}$, то для продления срока службы вольфрамовой нити воздух из стеклянной колбы, в которой помещается вольфрамовая нить, откачивается и заменяется инертным, не содержащим кислорода газом. Электричество превращается в тепло в технологических печах, широко используемых, например, в металлургии, в различных нагревательных и отопительных устройствах.

Особенно широкое применение электрическая энергия получила для привода в действие электрических моторов. Мощность электрических машин (в зависимости от их назначения) различна: от долей ватта (микродвигатели, применяемые во многих отраслях техники и в бытовых изделиях) до огромных величин, превышающих миллион киловатт (генераторы электростанций).

Простота передачи электрической энергии по проводам как на малые, так и на большие расстояния делает возможной доставку любых количеств электроэнергии с электростанций, где она вырабатывается, всем ее потребителям.

Мощность всех электростанций дореволюционной России составляла в 1913 г. около 400 тыс. кВт, а выработка электроэнергии — примерно 2 млрд. кВт · ч в год. Даже по масштабам того времени это было очень мало: на одного жителя России в год приходилось тогда лишь около 12,5 кВт · ч. В 1980 г. в Советском Союзе на одного жителя приходилось уже около 5300 кВт · ч в год, что примерно в 425 раз больше.



После Октябрьской революции электрификация страны стала рассматриваться как важнейшее дело. В 1920 г. на VIII Всероссийском съезде Советов был принят Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО), разработанный по инициативе и под руководством В. И. Ленина. Этим планом предусматривалось за 10—15 лет построить 30 новых тепловых и гидравлических электростанций общей мощностью 1750 тыс. кВт.

Много это или мало? Если смотреть с позиций того времени, то очень много. Действительно, как уже говорилось, общая мощность всех электростанций дореволюционной России составляла всего около 400 тыс. кВт, а в 1920 г. она была и того меньше. Следовательно, по плану ГОЭЛРО за 10—15 лет было намечено построить новые электростанции, общая мощность которых должна была превысить мощность всех электростанций России накануне первой мировой войны почти в 4,4 раза. Это был глубоко продуманный и смелый план, успешное выполнение которого создало основу не только экономического развития Советского Союза, но и системы государственного планирования в СССР.

С тех пор прошло много лет. Энергетика Советского Союза быстро развивалась. В настоящее время мы занимаем второе место в мире, после США, по выработке электрической энергии и по суммарной мощности электростанций. Если в 1913 г. производство электроэнергии в России составляло только 8% от производства электроэнергии в США, то в 1950 г. в Советском Союзе было произведено уже 22% от выработки электроэнергии в США, а в 1979 г. — 50%.

XXVI съезд КПСС определил, что производство электроэнергии в СССР за одиннадцатую пятилетку должно возрасти с 1295 млрд. кВт · ч в 1980 г. до 1550—1600 млрд. кВт · ч в 1985 г., т. е. на 20—24%.

Энергетика, или, как теперь часто говорят, топливно-энергетический комплекс, Советского Союза быстро растет по масштабам, ее технический уровень непрерывно повышается.

Энергетика сегодня

Немного истории. Чем более развитым становится человеческое общество, тем все больше его потребность в энергии.

В очень далекие от нас времена человек начал применять топливо в основном растительного происхождения (дрова, камыш и т. п.) в целях получения тепла — для отопления, приготовления пищи и нагревания воды, обжига изделий из глины, позже для получения и обработки металла и т. д. Создание водяных и ветряных двигателей дало возможность ему повысить мощность для получения механической энергии. Крупнейшим событием было изобретение в середине XVIII в. паровой машины. Это позволило в больших по тому времени масштабах получать механическую энергию из тепловой энергии, образующейся в результате сжигания топлива. Вторая половина XVIII в. — время непрерывного совершенствования паровой машины и ее широкого использования. Переход от мануфактурного ручного производства к машинному, известный под названием промышленного переворота, произошел с помощью паровой машины. Она находила все большее применение как на фабриках, так и на транспорте. К концу XIX в. мощность всех паровых машин достигает 120 млн. лошадиных сил (88,2 млн. кВт).

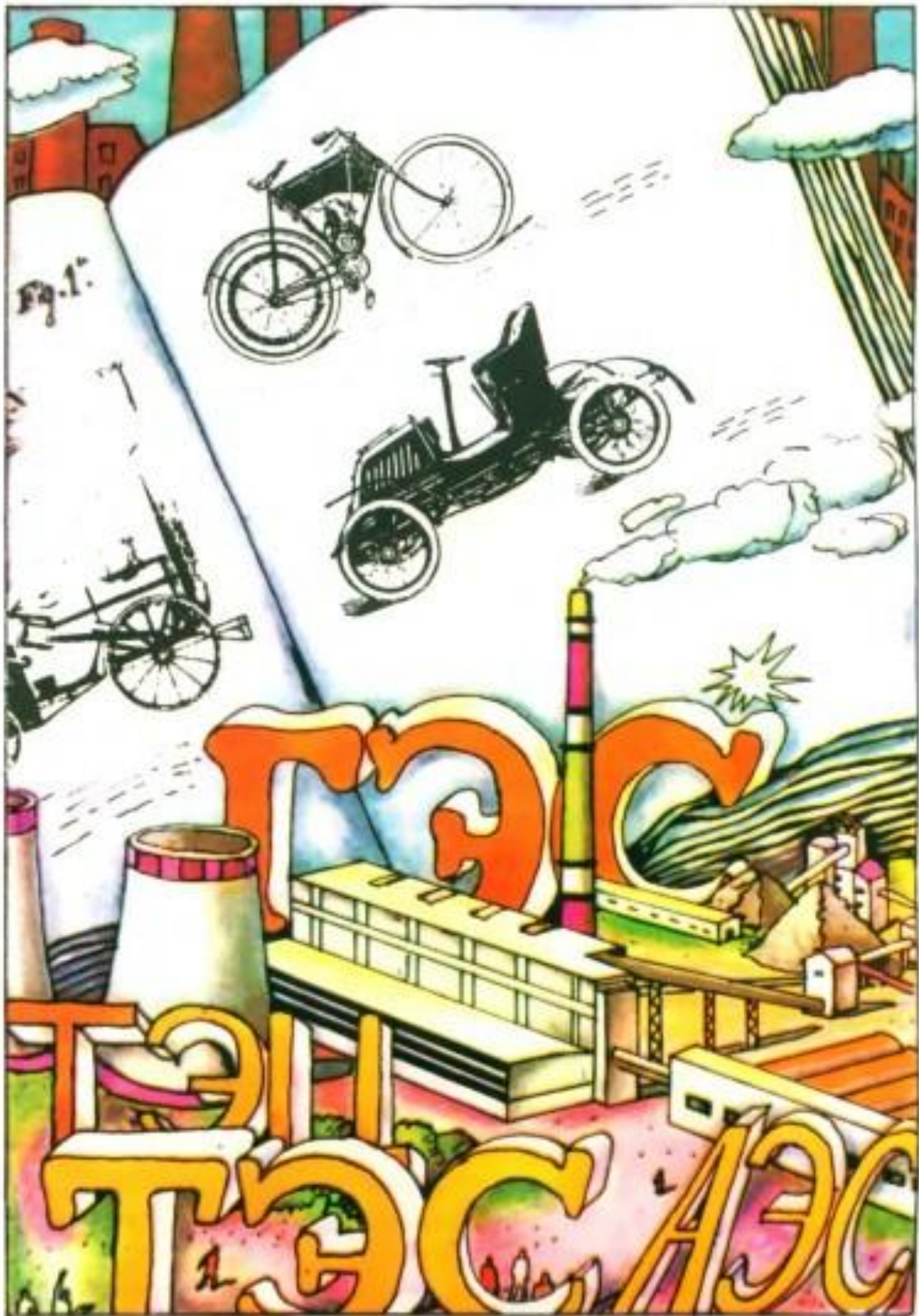
Потребность в двигателях очень высокой мощности привела к созданию и использованию в XX в. паровых турбин. Во второй половине XIX в. начал применяться двигатель (поршневой) внутреннего сгорания, в котором сгорание топлива происходит

внутри двигателя, в цилиндре. Этот двигатель благодаря небольшому весу и малым габаритам стал заменять паровую машину на транспорте. Поршневая паровая машина имела очень большое значение в развитии цивилизации.

Следующим большим шагом в развитии техники явилось открытие и широкое применение электричества. На протяжении нескольких веков постепенно открывались электрические явления и делались попытки их обобщения, создавалась общая теория электричества. К ним можно отнести электризацию тел при трении (начало XVII в.); электрические заряды, их взаимодействие (XVIII в.); явления атмосферного электричества (вторая половина XVIII в.); химические источники электричества, электрический ток (конец XVIII в.); установление взаимосвязи между электрическими и магнитными явлениями; электромагнитная индукция; электрическое и магнитное поля; электромагнитная природа света; элементарный электрический заряд — электрон (XIX в.).

Что же такое электричество? Общепринятого ответа нет. Мы приведем определение, данное известным советским ученым С. М. Рытовым: электричество — электрические заряды и связанные с ними электромагнитные поля. Здесь названы два основных понятия, из которых и складывается представление об электричестве: заряды и электромагнитное поле.

Электрические заряды могут быть микроскопическими и макроскопическими. Микроскопические (элементарные) заряды присущи элементарным частицам материи, в частности отрицательный элементарный заряд — электрону, положительный — протону. Заметим, что само название «электрон» было дано в 1891 г. английским ученым Д. Стони именно элементарному электрическому заряду. Те-



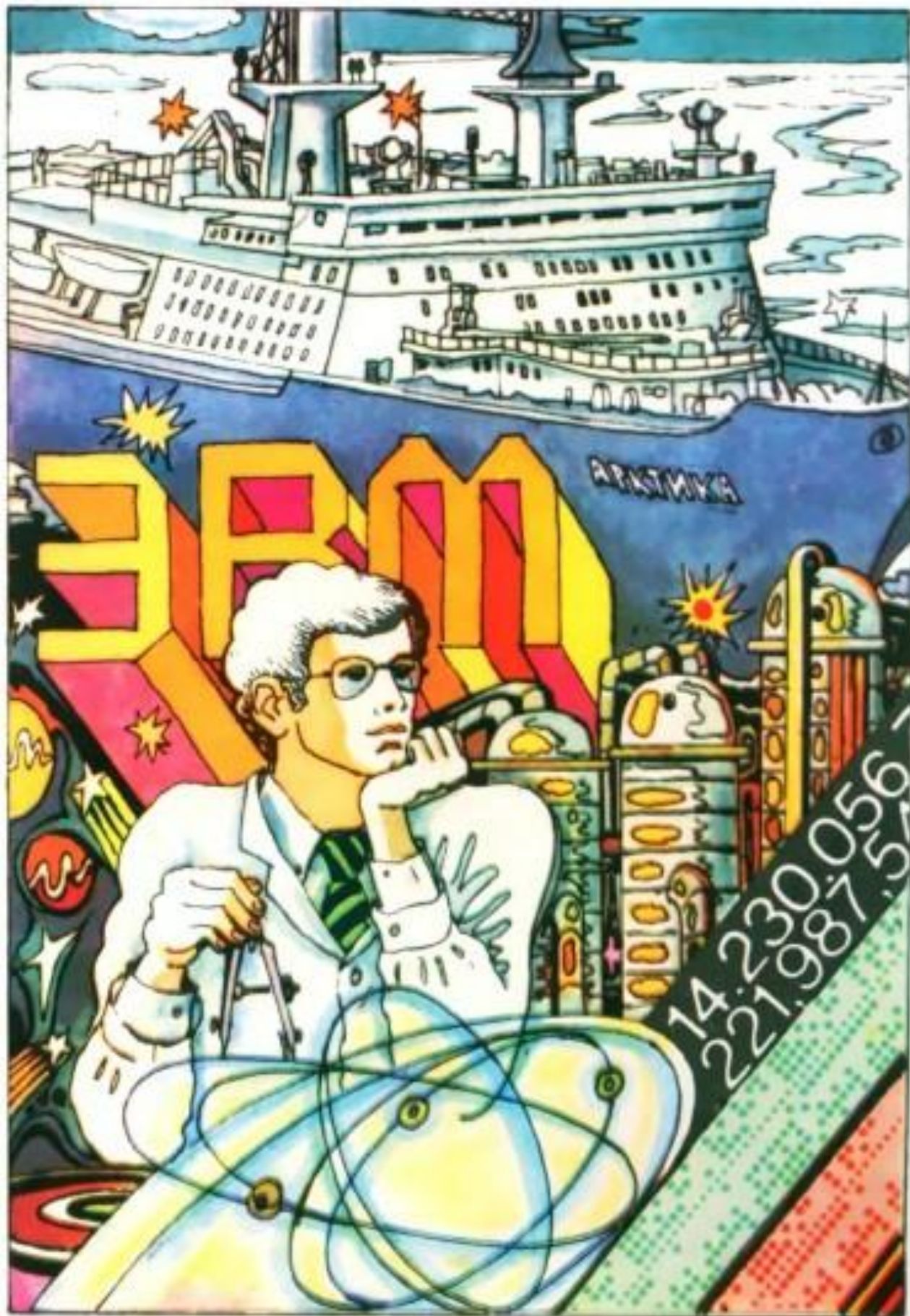
перь, как известно, это название носит отрицательно заряженная элементарная частица. Макроскопические заряды могут носить такие тела, размеры, массы и другие характеристики которых можно непосредственно измерить, т. е. тела, состоящие из огромного числа элементарных частиц, принадлежащие, как говорят в физике, к макромиру.

Открытие электрических зарядов, развитие электрического эксперимента, появление в дальнейшем химических источников тока (гальванических элементов) привели к возникновению понятий электрического потенциала и электрического тока — длительного движения электрических зарядов по проводникам.

Физическое поле, одним из видов которого является электромагнитное поле, представляет собой одно из фундаментальных понятий современного естествознания. Физическое поле есть не что иное, как особая форма существования материи. К такому выводу пришла наука после долгих дискуссий, длившихся на протяжении более трех столетий, со времен Р. Декарта и И. Ньютона.

Электромагнитное поле, основные представления о котором были созданы в XIX в. М. Фарадеем и Д. Максвеллом (хотя они оба предполагали существование мирового эфира), по современным взглядам, обладает, как и отдельные частицы и механические системы, энергией, количеством движения (импульсом), моментом количества движения. Поле может обмениваться с частицами и макроскопическими телами энергией, количеством движения и моментом количества движения. В этом случае законы сохранения этих величин действуют для всей замкнутой системы, состоящей из поля, частиц и макроскопических тел.

Электромагнитное поле может с конечной скоростью распространяться в пространстве. Это явле-



ние именуется электромагнитными волнами. Как известно, свет представляет собой не что иное, как электромагнитные волны длиной 0,1—1 мкм.

Начало широкого применения электричества в технике можно, пожалуй, отнести к середине XIX в. После открытия электромагнитной индукции начали создаваться электродвигатели и генераторы тока, основанные на превращении механической энергии в электрическую, а также усовершенствованная телеграфная аппаратура, осветительные приборы, аппаратура для электролиза и многое другое.

День сегодняшний. Развитие цивилизации сопровождается быстрым ростом потребления энергии: тепловой, механической, электрической. Доля последней с каждым годом растет.

В 1975 г. потребление первичных энергоресурсов всеми странами мира составило огромную цифру — $78 \cdot 10^{12}$ кВт · ч, т. е. 78 триллионов кВт · ч. Под первичными энергоресурсами понимаются органическое топливо, гидравлическая и атомная энергия и некоторые другие (солнечная энергия, энергия ветра и морских приливов, геотермальная энергия).

Немногим более половины всей потребляемой энергии используется в виде тепла для технических нужд, отопления, приготовления пищи; оставшаяся часть — в виде механической (главным образом в транспортных установках) и электрической энергии. Превращение тепловой энергии во все другие виды энергии и наоборот имеет принципиальное различие. На этом более подробно остановимся далее. Отметим только, что для получения, например 1 кДж (килоджоуля) тепла достаточно иметь 1 кДж механической или электрической энергии. Для получения же 1 кДж механической или электрической энергии потребуется более 1 кДж тепла.

Специалисты всех стран мира предполагают, что и в дальнейшем будет происходить рост потребления энергии. За 20 лет, с 1980 по 2000 г., она возрастет примерно в 2 раза.

Мы уже говорили о том, что в развитии энергетики Советским Союзом достигнуты очень большие успехи. Особенно быстро она развивалась после второй мировой войны. Ускорилось строительство новых тепловых электростанций (ТЭС), работающих на органическом топливе (угле, природном газе, относительно дешевых продуктах переработки нефти, горючих сланцах, торфе); улучшились их технико-экономические показатели (себестоимость электроэнергии, стоимость строительства ТЭС и др.) благодаря повышению мощности основных агрегатов ТЭС (парового котла, турбины, электрического генератора, трансформатора тока), увеличению давления и температуры получаемого в котле и используемого в турбине водяного пара, широкому применению особенно выгодной совместной выработки электрической и тепловой энергии, т. е. строительству теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), автоматизации основных технологических процессов ТЭС и повышению надежности работы ТЭС.

В настоящее время в Советском Союзе находится в эксплуатации ряд ТЭС весьма большой мощности, среди них самые крупные в Европе Запорожская и Угледорская — мощностью по 3,6 млн. кВт; ведется строительство ТЭС на базе Канско-Ачинского угольного месторождения мощностью 6,4 млн. кВт.

В послевоенные годы было развернуто широкое строительство мощных гидроэлектростанций (ГЭС) сначала на Волге, а в дальнейшем на сибирских реках: Ангаре, Енисее и др. Сооружены крупнейшие в мире ГЭС: Братская на Ангаре (мощность свыше 4 млн. кВт), Красноярская на Енисее (мощность 6 млн. кВт). Завершается строительство самой мощ-

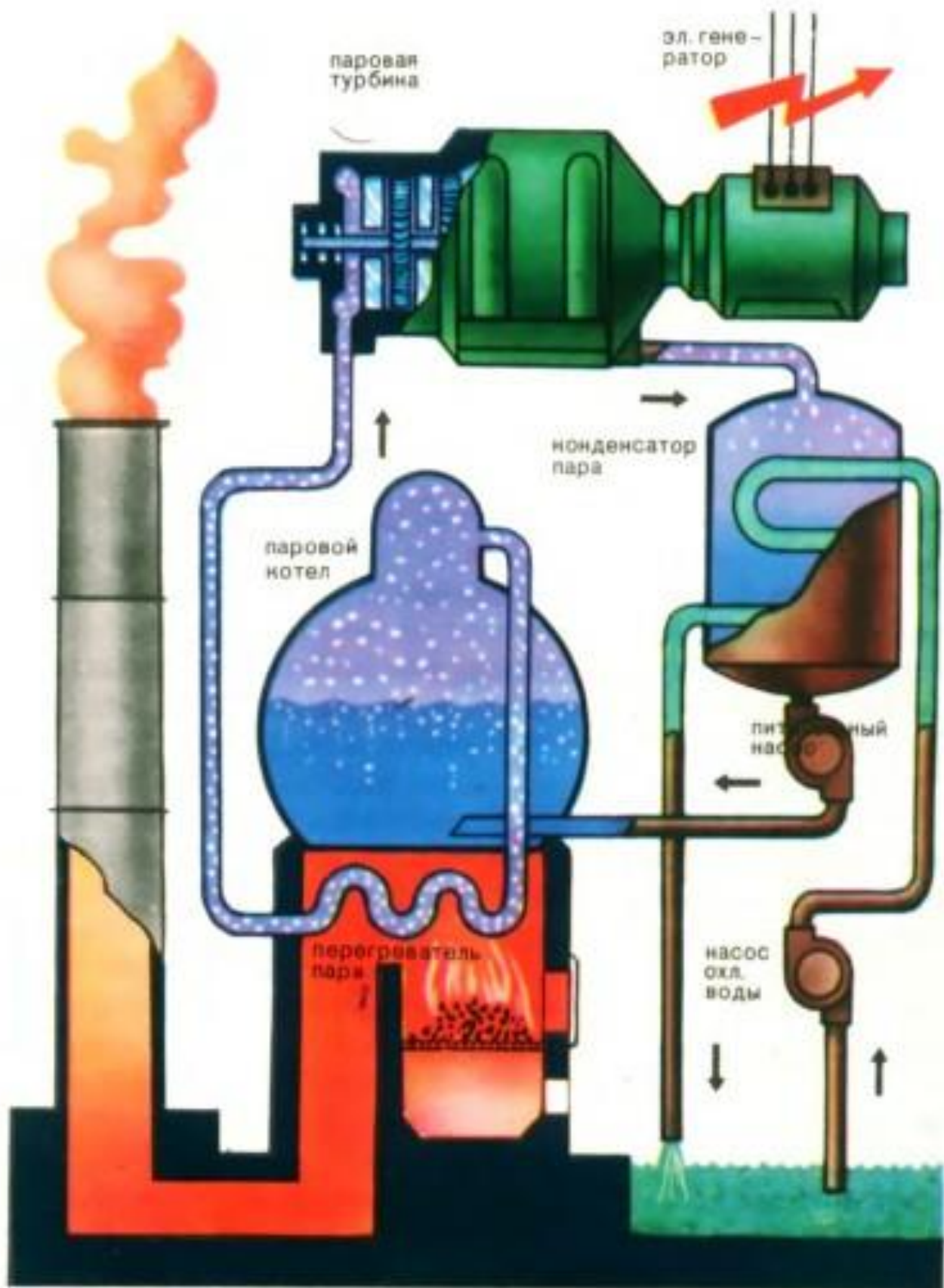
ной в мире Саяно-Шушенской ГЭС. Ее мощность по окончании строительства достигнет 6,5 млн. кВт. К этому же периоду относится рождение и затем быстрое развитие атомной энергетики.

Суммарная мощность атомных электростанций (АЭС) во всех странах мира в 1980 г. превысила 100 млн. кВт. В СССР такие станции, оснащенные ядерными реакторами с единичной электрической мощностью 1 млн. кВт и более, сооружаются высокими темпами. Наряду со строительством электростанций разных типов проводятся большие работы по открытию и освоению новых бассейнов органического топлива и развитию уже эксплуатируемых, объединению всех электростанций в единую систему и ряду других направлений, важных (как это сейчас представляется) для завтрашнего дня энергетики.

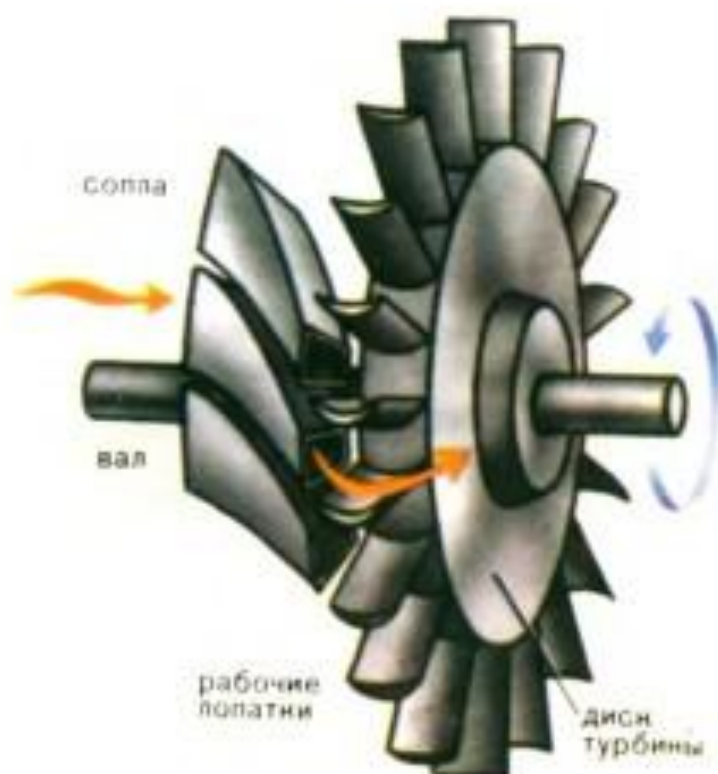
Тепловая электростанция (ТЭС). Все процессы, связанные с преобразованием тепловой энергии, например превращением тепла в механическую энергию, на первый взгляд кажутся весьма простыми. При внимательном ознакомлении возникает много вопросов, ответы на которые требуют глубоких знаний.

Рассмотрим принципы работы ТЭС (см. рис.). Топливо и окислитель, которым обычно служит подогретый воздух, непрерывно поступают в топку котла. В качестве топлива чаще всего используется уголь, а также такой дешевый вид топлива, как сланцы. До сих пор довольно широко применяются природный газ и мазут — продукт переработки нефти, точнее сказать, остаток, образующийся после отгонки из нефти бензина, керосина и других легких фракций. Совершенно очевидно, однако, что использование природного газа и особенно мазута будет сокращать-

Упрощенная
схема ТЭС



Способ преобразования
тепловой энергии
в механическую
в паровой турбине.



ся: природный газ и нефть, а также продукты переработки нефти — слишком ценные вещества, чтобы использовать их как котельное топливо (энергетические котлы способны использовать практически любое топливо, в то время как авиационные, автомобильные, тепловозные, тракторные и другие двигатели внутреннего сгорания более разборчивы в этом отношении). Даже применение торфа для этих целей с каждым годом сокращается, так как он является прекрасным удобрением и веществом, хорошо влияющим на структуру почвы.

За счет тепла, образующегося в результате сжигания топлива в паровом котле, вода превращается в пар с температурой около 550°C . Можно было бы получить пар и с более высокой температурой, но это не выгодно. Правда, коэффициент полезного действия (КПД) ТЭС, т. е. отношение полученной электрической энергии к теплу, образовавшемуся при сжигании топлива, растет при повышении начальной температуры пара. Но зато, если температура пара пре-

вышает 550°C , приходится для наиболее ответственных деталей установки (испытывающих большие механические нагрузки в сочетании с высокой температурой) применять высококачественные дорогие стали. Выигрыш в КПД не компенсирует повышенных затрат на металл. Поэтому, по крайней мере в настоящее время, начальную температуру пара ограничивают 550°C , а чаще даже 540°C .

Водяной пар из котла поступает в паровую турбину, назначение которой — превращать тепловую энергию пара в механическую. Все движущиеся части турбины жестко связаны с валом и вращаются вместе с ним. Вал турбины и вал электрического генератора соединены между собой. Таким образом, благодаря отсутствию возвратно-поступательного движения поршня не нужен коленчатый вал, шатун и другие механизмы, свойственные поршневым машинам. В этом одно из главных преимуществ паровой турбины перед паровой (поршневой) машиной.

В турбине способ преобразования тепловой энергии пара в механическую состоит в следующем (см. рис.). Пар высокого давления и температуры, имеющий большую тепловую энергию, из котла поступает в сопла турбины. Соплами называются неподвижно укрепленные (не вращающиеся вместе с валом турбины), сделанные из металла каналы, в которых температура и давление пара уменьшаются, а значит, уменьшается и его тепловая энергия, но зато увеличивается скорость движения потока пара. Другими словами, за счет уменьшения тепловой энергии пара возрастает его механическая (кинетическая) энергия.

Струя пара с высокой скоростью, чаще выше звуковой, непрерывно вытекает из сопел и поступает на рабочие лопатки турбины, укрепленные на диске, жестко связанном с валом. Вал, диск и рабочие лопатки вращаются совместно, обычно с неизменно

большим числом оборотов, равным, как правило, 3000 об/мин. Во многих конструкциях турбин температура и давление пара на рабочих лопатках не изменяются, в некоторых — продолжают снижаться. Но скорость потока пара, его механическая (кинетическая) энергия, всегда уменьшается. В этом суть дела. Канал между рабочими лопатками криволинейен. Поток пара, протекая по криволинейному каналу, меняет направление и величину скорости; благодаря центробежной силе он оказывает давление на вогнутые поверхности лопаток. Вследствие этого рабочие лопатки, диск, вал — весь ротор приходит во вращение в направлении, показанном на рисунке на с. 16 стрелкой. При этом механическая энергия потока пара превращается в механическую энергию ротора турбины, а точнее говоря, в механическую энергию ротора турбогенератора, так как валы турбины и электрического генератора соединены между собой.

Неправильно было бы думать, что ротор вращается вследствие удара струи пара о стенки рабочей лопатки. Наоборот, конструкторы всячески стремятся к тому, чтобы недопустить входного удара или, по крайней мере, максимально его уменьшить, так как следствием удара являются потери и снижение КПД.

Современные паровые турбины для ТЭС — весьма совершенные, быстроходные, высокоэкономичные машины с большим ресурсом работы. Их мощность в одновальном исполнении достигает 1 млн. 200 тыс. кВт, и это не является пределом. Такие машины всегда бывают многоступенчатыми, т. е. имеют обычно несколько десятков дисков с рабочими лопатками и такое же количество, перед каждым диском, групп сопел, через которые протекает струя пара. Давление и температура пара постепенно снижаются.

В электрическом генераторе механическая энер-

гия преобразуется в электрическую. После паровой турбины водяной пар, имея уже низкое давление, как правило около 0,04 бара, или почти такую же долю атмосферы, и температуру около 25°C , поступает в конденсатор (см. рис. на с. 15). Здесь пар с помощью охлаждающей воды, прокачиваемой по расположенным внутри конденсатора трубкам, превращается в воду, которая с помощью специального насоса снова подается в котел. Цикл начинается заново.

Следует отметить, что количество охлаждающей воды должно быть в несколько десятков раз больше, нежели количество конденсируемого пара. В этом легко убедиться, сделав самый простой расчет. Для превращения 1 кг водяного пара в воду от него, как минимум, должно быть отведено тепло, равное скрытой теплоте парообразования. Эта величина для водяного пара при названном выше давлении (0,04 бара) составляет около 600 ккал на 1 кг. В то же время 1 кг охлаждающей воды может быть нагрет примерно на 10°C (зимой несколько больше, летом несколько меньше). Таким образом, на 1 кг конденсируемого пара требуется около 60 кг охлаждающей воды.

По этой причине ТЭС строят поблизости от крупных водных источников. Экономичность ТЭС, их КПД, достигает в настоящее время 0,4, или 40%. Это значит, что 40% от всего тепла, полученного при сжигании топлива, превращается в электрическую энергию, а остальные 60% теряются.

Особенности тепловой энергии. Наука и опыт утверждают, что невозможно всю имеющуюся в нашем распоряжении тепловую энергию превратить в механическую, электрическую или другие виды энергии. Тогда как обратное преобразование всех других видов энергии в тепловую возможно без всяких ограничений. Возникает вопрос: в чем причина

этого? Может быть, тепловая энергия весьма существенно отличается от других видов энергии?

Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним гениального француза С. Карно (1796—1832). В 1824 г. он написал замечательное произведение «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», которое издал на свои средства. Он высказал очень важную мысль о том, что для получения механической энергии из тепла необходимо иметь разность температур. С. Карно объяснял тепловые явления с позиций теплорода — гипотетической, невесомой, неуничтожаемой и невозникающей заново жидкости, перетекание которой из одного тела в другое означает, согласно широко распространенному в то время взгляду, переход тепла. Поэтому он считал, что количества тепла, получаемого и отдаваемого телом при производстве механической энергии, равны. Механическая же энергия получается благодаря тому, что тепло (теплород, по С. Карно) переходит от более высокой температуры к более низкой, так же как вода, перетекая от более высокого уровня к более низкому, может произвести механическую (кинетическую) энергию.

Тепло, по С. Карно, может само собой переходить только от более нагретого тела к менее нагретому. Если же нужно передать тепло от менее нагретого тела к более нагретому, то при этом не только не может быть получена механическая энергия, но, наоборот, ее необходимо израсходовать. Кстати говоря, в настоящее время такой процесс широко применяется в холодильных машинах.

Эти идеи С. Карно, составляющие существо второго закона термодинамики, несмотря на то что теория теплорода давно отвергнута, вошли в науку. Они имели огромное, определяющее значение для развития теории тепловых двигателей и полностью сохранили свое значение и теперь.

С точки зрения современной науки тепловая энергия есть не что иное, как сумма энергий мельчайших частиц: атомов, молекул, электронов и др. Следовательно, современное представление о природе тепловой энергии основано на общепринятом теперь дискретном строении материи.

В газе, например, мельчайшие частицы находятся в беспорядочном, хаотическом движении, а энергия каждой из них определяется скоростью (точнее, кинетической энергией) и положением в отношении других частиц (потенциальной энергией частицы). Как заметил австрийский физик Л. Больцман, единственным законом этого движения является отсутствие всякого закона.

Задача определения тепловой энергии газа, например, путем суммирования энергий составляющих этот газ мельчайших частиц вещества кажется после всего сказанного невероятно трудной. Особенно если вспомнить, что в одной граммолекуле газа, т. е. в газе, вес которого (в граммах) равен его молекулярному весу, содержится около $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул. Число это (именуемое в честь итальянского ученого А. Авогадро числом Авогадро) так велико, что трудно даже проиллюстрировать всю его огромность. Заметим только, что если расстояние от Земли до Солнца, равное примерно 150 млн. км, выразить в миллиметрах, то полученная цифра ($1,5 \cdot 10^{14}$ мм) будет в 4 млрд. раз меньше числа Авогадро.

Лучшей, с нашей точки зрения, иллюстрацией, показывающей очень малые размеры молекул и огромное их число в единице объема, является пример, предложенный известным английским физиком У. Томсоном (Кельвиным). Если взять стакан воды, говорит У. Томсон, каким-либо образом пометить все находящиеся в нем молекулы, вылить этот стакан воды в океан и хорошо размешать, то, в каком бы месте Мирового океана ни почерпнуть заново стакан

воды, в нем окажется около 100 меченых молекул (точнее, скорее всего, от 90 до 110).

Тем не менее эту трудную задачу решить удалось. Этот успех является большим достижением важной области физики, именуемой статистической физикой. Статистическая физика, рассматривая вещество состоящим из совокупности очень большого числа мельчайших частиц (вспомним число Авогадро), т. е. принимая за основу дискретное строение вещества и используя законы теории вероятностей, тем более точные, чем большее число объектов (молекул, атомов) рассматривается, а при количестве объектов порядка числа Авогадро — практически совершенно точные, дает возможность решать многие важные задачи и, уж во всяком случае, составить правильное представление о существовании тепловой энергии и тепловых процессов.

Термодинамика и статистическая физика — науки, решающие разными способами близкие, а иногда и совпадающие по смыслу задачи, — дают возможность ответить на поставленный вопрос: не является ли тепловая энергия в чем-то весьма существенном отличной от других видов энергии?

Да, является. Сущность этого отличия заключается в том, что тепловая энергия — результат неупорядоченного движения мельчайших частиц вещества, в то время как другие виды энергии — результат упорядоченного движения.

Более ста лет назад был установлен фундаментальный закон физики — закон сохранения энергии, согласно которому энергия не может быть уничтожена или получена из ничего, она может лишь переходить из одного вида в другой.

В начале XX в. великим ученым-физиком А. Эйнштейном была разработана теория относительности, давшая новое представление об общих свойствах пространства и времени и, в частности, показавшая,

что при изменении скорости движения тел изменяются их протяженность и промежутки времени и что масса тела пропорциональна запасенной в нем энергии. Иными словами, А. Эйнштейн установил, что энергия и масса эквивалентны. Выражая эту мысль несколько упрощенно, можно сказать, что уменьшение массы тела или системы тел на 1 г приводит к выделению энергии, равной $9 \cdot 10^{13}$ Дж, что равно теплотворной способности 3000 т условного топлива (тут).

В большинстве макроскопических процессов изменением массы тела можно пренебречь, но только не при ядерных превращениях. При анализе ядерных процессов используется специальный термин — дефект массы, под которым подразумевается уменьшение массы вещества в ядерной реакции и соответствующее увеличение энергии.

Теория относительности А. Эйнштейна является развитием представлений И. Ньютона о пространстве, времени и тяготении. Новые законы движения, установленные А. Эйнштейном, при скоростях, гораздо более малых, чем скорость света (напоминаем, что скорость света в вакууме равна 300 тыс. км/с), сводятся к законам И. Ньютона.

Разумеется, на тепловую энергию наряду со всеми другими видами энергии полностью распространяется закон сохранения энергии.

Однако, как о том сказано выше, тепловая энергия имеет существенное отличие от других видов энергии, обусловленное тем, что в основе ее лежит неупорядоченное движение мельчайших частиц вещества. Порядок просто превратить в хаос, упорядочить же хаос гораздо труднее. Все виды энергии легко и полностью превращаются в тепловую, и лучший пример этого — вездесущее трение. Тепловая же энергия не всегда, но в любом случае не полностью превращается в другие виды энергии. Условия

превращения тепловой энергии в другие виды энергии определяются вторым законом термодинамики.

Следовательно, закон сохранения энергии, частным случаем которого является первый закон термодинамики, устанавливает взаимную превратимость всех видов энергии. Второй же закон термодинамики, существо которого было установлено С. Карно еще до того, как был сформулирован закон сохранения энергии, определяет важную особенность тепловой энергии и ограничения в отношении ее превращения в другие виды.

Термодинамикой установлено, что для непрерывного получения механической энергии из тепловой необходимо иметь три основных элемента: резервуар тепла с относительно высокой температурой, резервуар тепла с более низкой температурой и так называемое рабочее тело, непрерывно совершающее круговой процесс, или цикл, с помощью которого тепловая энергия превращается в механическую.

В результате совершения кругового процесса рабочее тело возвращается в исходное состояние. Следовательно, механическая энергия не может производиться за счет рабочего тела: сколько бы раз ни совершался цикл, состояние рабочего тела в сходных точках не изменяется. Оно является не более чем инструментом, с помощью которого происходит преобразование энергии. Экономичность процесса преобразования энергии теоретически не зависит от выбора рабочего тела. Практически же свойства рабочего тела весьма существенно влияют на КПД цикла. Наибольшее применение в качестве рабочего тела имеют продукты сгорания топлива — в двигателях внутреннего сгорания (автомобиле, самолете, теплоходе, тепловозе и др.) и водяной пар — в энергетических теплосиловых установках. Реже используются углекислота и гелий (главным образом на АЭС), фреон и аммиак (в холодильных



установках) и немногие другие. Однако главным производителем механической энергии из тепловой является не рабочее тело, а резервуары тепла, или, как их обычно называют в термодинамике, источники тепла.

Из второго закона термодинамики следует, что источники тепла обязательно должны иметь различную температуру: один из них — более высокую (горячий источник), а второй — более низкую (холодный источник). В каждом цикле от горячего источника передается рабочему телу определенное количество тепла, а от рабочего тела переходит в холодный источник также определенное, но всегда меньшее количество тепла. Так как рабочее тело после завершения цикла возвращается в исходное состояние, то произведенная за один цикл механическая энергия обязательно должна быть равна разности двух количеств тепла: полученного от горячего источника и переданного холодному источнику. При этом мы молчаливо допускали, что потери на трение и другие отсутствуют. Но так как на самом деле потери имеются всегда, то реально получаемая механическая энергия меньше разности двух количеств тепла на величину потерь. В этом заключается существо процесса непрерывного производства механической энергии из тепловой в тепловом двигателе.

КПД описанного процесса зависит в первую очередь от температур источников тепла. Для повышения КПД температура горячего источника должна быть как можно выше, а холодного источника — как можно ниже. Что касается холодного источника тепла, то здесь выбирать не приходится. Этим источником всегда является окружающая среда — вода и воздух. Иначе обстоит дело с горячим источником. Конечно, горячий источник может быть избран из числа созданных природой: энергии Солнца или тепла глубинных слоев Земли. Но в

настоящее время в подавляющем большинстве случаев используются искусственные источники тепла, создаваемые в результате сжигания органического топлива или проведения экзотермической управляемой ядерной реакции в атомном реакторе. В первом случае может быть достигнута температура порядка 3000°C , а во втором — можно сказать, неограниченно высокая.

Теоретически для повышения КПД процесса всегда выгодно увеличивать начальную температуру. Практически же повышение начальной температуры имеет предел. Во-первых, он определяется реальными техническими возможностями материалов, а во-вторых, их ценой. Если иметь источник тепла с температурой 400K (127°C) и принять температуру среды, рассматриваемой как холодный источник, равной $300\text{K} = 27^{\circ}\text{C}$, то из 1 Дж тепловой энергии можно получить не более $0,25\text{ Дж}$ механической энергии. Если же горячий источник тепла имел бы температуру $1000\text{K} = 727^{\circ}\text{C}$, то из 1 Дж тепловой энергии можно было бы получить до $0,7\text{ Дж}$ механической энергии. Тепловая энергия при температуре окружающей среды, т. е. в случае, когда нет двух источников тепла с различными температурами, не может быть использована для производства механической энергии.

Перспективы развития ТЭС. Для дальнейшего успешного развития ТЭС большое значение имеет решение ряда вопросов. Повышение КПД ТЭС может быть достигнуто посредством увеличения начальной температуры водяного пара сверх принятых $540^{\circ}\text{C} = 813\text{K}$. Но для того, чтобы это сделать, необходимо располагать такими материалами (прежде всего металлами), которые могли бы длительно и надежно работать при высокой температуре и больших механических нагрузках (рабочие лопатки паровых

турбин), да к тому же (что весьма важно) стоили бы не слишком дорого. Работа по созданию высококачественных дешевых материалов имеет первостепенную важность.

Далеко не безразлично, какое топливо сжигается в топках котлов ТЭС. Естественно, что наиболее выгодно сжигать дешевое, недефицитное топливо: уголь и сланцы, поэтому необходимо увеличить их добычу.

Большое значение имеет также комплексное использование топлива. Дело в том, что органическое топливо — ценное сырье для получения нужных веществ и материалов.

В Советском Союзе достигнуты большие успехи в создании ТЭЦ, отличающихся от обычных ТЭС тем, что в их задачу входит снабжение потребителей не только электроэнергией, но и теплом, т. е. комплексная выработка электроэнергии и тепла. Это очень выгодно. При сжигании топлива только для получения тепла, например для отопления, весь «температурный напор» примерно от 1500 до 100°С, т. е. от температуры, получаемой при сжигании топлива, до температуры, нужной для отопления, никак не используется. Тепловая энергия обесценивается. Гораздо выгоднее использовать этот температурный интервал (больше 1000°С) для получения из тепловой энергии механической, а тепло (около 100°С) направить на отопление. Конечно, в этом случае механической энергии при том же количестве сжигаемого топлива получится меньше за счет повышения конечной температуры примерно на 70°С (с 30 до 100°С). Но такое повышение температуры необходимо. Кому же нужна для отопления вода с температурой 30°С?

ТЭЦ гораздо экономичнее по сравнению с ТЭС. КПД ТЭС в лучшем случае приближается к 40%, а коэффициент использования топлива на ТЭЦ до-

Схема устройства ГЭС.



стигает 60—70%, т. е. в 1,5—1,7 раза выше. Именно поэтому общая мощность ТЭЦ в СССР превышает 50 млн. кВт. Такого развития ТЭЦ не получили ни в одной другой стране мира. Задача заключается в дальнейшем, расширяющемся строительстве ТЭЦ, повышении их технического уровня и экономичности, создании атомных ТЭЦ.

И наконец, хотелось бы остановиться еще на одной проблеме — неравномерности загрузки электростанции. Потребителю требуется по понятным причинам электроэнергии днем больше, чем ночью, в рабочий день недели больше, чем в субботу и воскресенье, зимой больше, чем летом (разница исчисляется

десятками процентов). Следовательно, необходимо, во-первых, обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии в часы максимального ее потребления (при себестоимости 1 кВт · ч электроэнергии около 1 коп. экономический ущерб вследствие недопоставки потребителю 1 кВт · ч составляет, по расчетам, 4 коп.) и, во-вторых, в часы минимума потребления энергии не допускать такой разгрузки оборудования, которая существенно сокращает срок его работы.

Для того чтобы решить эти трудные задачи, нужно создать такое оборудование, которое обладало бы высокой маневренностью (так называемые пиковые и полупиковые установки, особенно гидроаккумулирующие электростанции и воздушно-аккумулирующие газотурбинные установки); повышать маневренность основного оборудования электростанций; создать энергоаккумулирующие установки; экономить электроэнергию.

Гидравлическая электростанция (ГЭС). Схема устройства ГЭС показана на рисунке. Принцип работы ее прост и хорошо известен. Для ГЭС используется энергия рек. Создание разности уровней воды достигается сооружением плотины — самого важного и самого дорогостоящего элемента ГЭС. Вода, перетекая с верхнего уровня на нижний либо по специальным трубам — турбинным трубопроводам (см. рис.), либо по выполненным в теле плотины каналам, приобретает большую скорость. Струя воды поступает далее на лопасти гидротурбины. Ротор гидротурбины приводится во вращение под воздействием центробежной силы струи воды. Так же как и в паровых турбинах, принимаются меры к тому, чтобы исключить или, по крайней мере, уменьшить удар струи в данном случае воды о стенки лопастей гидротурбины.

Гидроэнергия относится к числу так называемых

возобновляемых источников энергии, она в противоположность органическому топливу практически неиссякаема. Гидроэнергия, как и многое другое на Земле, солнечного происхождения (вода совершает свой круговорот за счет энергии Солнца). Полные гидроресурсы мира оцениваются огромной цифрой — около 10^{15} кВт · ч в год (1000 триллионов кВт · ч), что соответствует примерно 300 млрд. т условного топлива (тут) в год, т. е. в 30 раз больше, чем используется в год всех энергоресурсов всеми странами мира в настоящее время. Реальные гидроресурсы Земли оцениваются более скромной, но все же огромной цифрой — 10 млрд. тут в год (она примерно равна всему энергопотреблению мира в настоящее время). Суммарная мощность всех действующих гидроэлектростанций мира составляет около 500 млн. кВт. Таким образом, гидроэнергостроительство имеет хорошие перспективы.

В Советском Союзе, обладающим большими гидроэнергоресурсами (12% от мировых), развернуто широкое строительство гидроэлектростанций.

Строительство ГЭС целесообразно проводить как для выработки электроэнергии, так и для развития речного судоходства, сельского и рыбного хозяйства.

Физические основы атомной энергетики. Освобождение и использование атомной энергии являются одним из наиболее крупных событий XX в. К сожалению, это великое открытие было использовано не только в мирных, но и в военных целях. Как это ни печально, большинство людей на Земле узнали об одном из самых замечательных за всю историю человечества достижений науки из сообщений о взрывах американских атомных бомб над японскими городами Хиросима и Нагасаки 6 и 9 августа 1945 г.

В 1938 г. немецкие ученые О. Ган и Ф. Штрассман показали, что в результате бомбардировки урана

нейтронами образуются ядра щелочноземельных элементов, в частности бария. Вслед за тем австрийские физики Л. Майтнер и О. Фриш установили, что ядро изотопа урана с атомным весом 235, ^{235}U под воздействием нейтрона делится на два осколка; они дали название этому явлению — деление ядра (по аналогии с биологическим процессом деления клетки). В 1940 г. советские ученые Г. Н. Флеров и К. А. Петржак зафиксировали процесс спонтанного, т. е. самопроизвольного, без воздействия со стороны, деления ядер атомов, являющегося разновидностью радиоактивного распада ядра.

При делении ядер элементов с большим атомным весом (уран, плутоний, торий) масса тяжелого ядра перед реакцией несколько больше суммы масс продуктов ядерной реакции, мы встречаемся здесь с дефектом массы. Следовательно, при делении тяжелых ядер происходит большое энерговыделение. В итоге образуется тепловая энергия.

Очень важно, что число нейтронов, испускаемых при делении тяжелого ядра, больше единицы. Например, при делении ядра ^{235}U , происходящем в результате попадания в ядро так называемого медленного, или теплового, нейтрона, испускаются два или три нейтрона, а в среднем 2,46 нового нейтрона. Это позволяет осуществить цепную ядерную реакцию. Необходимо так распорядиться образующимися в процессе деления ядер нейтронами, чтобы сократить их потери.

Природный металлический уран, получаемый из руд, состоит почти исключительно из двух изотопов: ^{238}U и ^{235}U . Основой ядерной энергетики, по крайней мере в настоящее время, является ^{235}U . Его ядро под действием нейтрона делится с выделением огромного количества тепла и испусканием двух или трех нейтронов, обеспечивающих дальнейшее протекание ядерной реакции. При делении 1 кг ^{235}U

выделяется (в виде тепла) энергия, равная $1,9 \cdot 10^{10}$ ккал, или $2,22 \cdot 10^7$ кВт · ч. Помня, что 1 кг условного топлива имеет теплотворную способность 7000 ккал, легко подсчитать: 1 кг ^{235}U эквивалентен $2,7 \cdot 10^6$ кг условного топлива. Иначе говоря, 1 г ^{235}U энергетически эквивалентен 2,7 т условного топлива. Поэтому АЭС, имеющая электрическую мощность 1 млн. кВт, расходует в сутки с учетом реальных потерь только 3 кг ядерного горючего.

Однако в природном металлическом уране содержится всего 0,7% ^{235}U . Остальные 99,3% составляет ^{238}U .

Каково же значение ^{238}U ? Может ли этот изотоп урана найти полезное применение? Да, может. Но процесс его использования сложнее, чем ^{235}U , и он еще полностью не освоен. Суть в следующем. Атомная энергетика имеет дело с нейтронами двух существенно отличающихся друг от друга категорий: обладающими большей энергией, или, как их чаще всего называют, быстрыми нейтронами, и обладающими существенно меньшей энергией, обычно именуемыми медленными, заторможенными, или тепловыми, нейтронами. Быстрые нейтроны возникают в результате их излучения при делении ядра. При этом вследствие дефекта массы происходит огромное тепловыделение. Если быстрый нейтрон достигнет ядра ^{238}U , то последнее непосредственно не делится, но превращается в ядро плутония с атомным весом 239, ^{239}Pu . Его ядра способны к делению при воздействии на них нейтронов. Одним словом, по своим энергетическим свойствам ^{239}Pu схож с ^{235}U , а по энерговыделению даже превосходит последний. Вследствие относительно быстрого распада (время полураспада — $2,4 \cdot 10^4$ лет) в природе плутоний практически отсутствует, он является элементом, искусственно созданным человеком.

Эффективность процесса превращения ^{238}U в

^{239}Pu оценивается так называемым коэффициентом воспроизводства, который есть не что иное, как отношение количества вновь образовавшегося плутония к количеству израсходованного ядерного топлива. При бомбардировке ядер ^{238}U быстрыми нейтронами коэффициент воспроизводства больше единицы. Он лежит в пределах от 1,4 до 1,5. Значит, весь ^{238}U может быть превращен в ^{239}Pu .

Итак, процесс, в котором находят применение быстрые нейтроны, очень выгоден: он позволяет использовать весь природный уран, в том числе его главный ингредиент ^{238}U . Однако использование непосредственно быстрых нейтронов связано с большими трудностями. Необходимо предохранить быстрые нейтроны от потери ими энергии, от замедления, сохранить высокую интенсивность нейтронного потока и в то же время «приспособиться» к этому интенсивному нейтронному потоку.

Для того чтобы предохранить быстрые нейтроны от замедления, ни в коем случае нельзя использовать в зоне их существования материалы и вещества, сколь-нибудь заметно поглощающие нейтроны и снижающие их энергию. По этой причине, в частности, приходится обычную воду, являющуюся по ряду показателей хорошим охлаждающим веществом, но довольно активно замедляющую нейтроны, заменять жидким натрием, гораздо слабее, чем вода, поглощающим и замедляющим нейтроны. Такая замена технически вполне возможна, но отнюдь не упрощает дела.

«Приспособиться» к интенсивному нейтронному потоку — значит прежде всего решить сложные задачи материаловедческого характера. При работе в плотном нейтронном потоке прочность применяемых конструкционных материалов снижается, так как облучение быстрыми нейтронами приводит к тому, что атомы этих материалов выбиваются из их

фиксированных положений в кристаллической решетке. Следовательно, необходимо создавать новые материалы, более приспособленные для работы в интенсивном нейтронном потоке.

Имеются еще более сложные проблемы, связанные с решением не только научно-технических, но и экономических вопросов. Суть в том, что необходимо выделять плутоний, полученный из ^{238}U , отделять его от имеющегося еще ^{238}U , нептуния, высокорadioактивных продуктов деления.

Ко времени, когда ядерные реакторы, работающие на быстрых нейтронах, получают широкое применение, необходимо создать заводы нужной производительности для выделения плутония, для переработки ядерного топлива. Эти предприятия будут, вероятно, стоить недешево, особенно учитывая высокую радиоактивность материала, с которым придется иметь дело.

Есть и другие не до конца еще решенные задачи. Коэффициент воспроизводства топлива выше в том случае, когда в качестве ядерного топлива используется не ^{235}U , а ^{239}Pu . Объясняется это тем, что при делении ядра ^{239}Pu излучается больше нейтронов (в среднем около трех), чем при делении ядра ^{235}U (в среднем 2,46 нейтрона). Значит, при первоначальной загрузке ядерного реактора, работающего на быстрых нейтронах, выгоднее помимо природного урана использовать плутоний. На загрузку одного реактора требуется довольно много плутония — более тонны. Поэтому ядерные реакторы, работающие на быстрых нейтронах, должны обеспечивать плутонием первоначальную загрузку вновь вводимых в эксплуатацию реакторов этого типа. Нарработка нового плутония определяется временем удвоения плутония по отношению к количеству первоначальной его загрузки. Выдвигается требование: время удвоения должно быть не более 10 лет. Ядерный

реактор, работающий на быстрых нейтронах, является по своему существу высоконапряженным аппаратом. Удельное тепловыделение в нем может быть до 1000 кВт на 1 л объема. Это, однако, выдвигает свои проблемы.

Итак, непосредственное использование быстрых нейтронов в ядерном реакторе является выгодным и перспективным. Однако для широкого применения этого процесса необходимо решить названные выше отнюдь не простые проблемы. Ныне же не остается ничего другого, как применять процесс с участием медленных нейтронов, хотя в этом случае можно использовать лишь малую долю природного урана.

Так как при делении ядра ^{235}U или ядра ^{239}Pu испускаются быстрые нейтроны, то их необходимо замедлить. Энергия замедленных нейтронов примерно в 100 раз меньше энергии быстрых нейтронов. Для таких превращений применяется замедлитель, чаще всего графит, обычная или тяжелая вода. Замедление нейтронов происходит в результате их столкновений с ядрами замедлителя. При этом нейтроны не только замедляются (что и требуется), но частично поглощаются замедлителем (что плохо, так как в результате этого приходится использовать большее количество ядерного горючего, ^{235}U или ^{239}Pu). По эффекту замедления на первом месте стоит обычная вода, затем тяжелая вода и, наконец, графит. Но обычная вода в большей мере поглощает нейтроны (с образованием дейтерия). В меньшей мере нейтроны поглощает графит и еще меньше — тяжелая вода. Поэтому при использовании обычной воды или графита природный уран необходимо обогащать изотопом ^{235}U до 3—4% (вместо природных 0,7%). В то время как, используя в качестве замедлителя тяжелую воду, можно обойтись без обогащения природного урана.

Мы уже знаем, что ядро ^{235}U так же, как и ядро

^{239}Pu , делится при попадании одного нейтрона. При делении ядра ^{235}U испускается в среднем 2,46 нейтрона, один из которых для продолжения ядерной реакции поглощается ядром ^{235}U . Таким образом, из образующегося в среднем на один акт деления ядра ^{235}U , 2,46 нейтрона один нейтрон, или примерно 40%, расходуется по прямому назначению — для продолжения цепной ядерной реакции. Не менее 50% нейтронов поглощается замедлителем, ^{238}U и конструкционными материалами. Поэтому потеря (утечка) нейтронов не должна превышать 10%. В противном случае прекратится цепная реакция.

Чем меньше объем пространства, тем больше отношение поверхности этого пространства к его объему. Например, для куба с гранями 2 м отношение поверхности к объему составляет $\frac{24 \text{ м}^2}{8 \text{ м}^3} = 3 \frac{1}{\text{м}}$,

а для куба с гранями 1 м — $\frac{6 \text{ м}^2}{1 \text{ м}^3} = 6 \frac{1}{\text{м}}$. Эта простая истина имеет в технике большое значение, в частности для рассматриваемой нами цепной ядерной реакции.

Чем больше объем, тем больше в единицу времени образуется нейтронов. Чем больше поверхность, тем, естественно, больше и утечка нейтронов. Но с ростом объема отношение поверхности к величине объема уменьшается. Поэтому с ростом объема, в котором происходит ядерная реакция, утечка нейтронов по абсолютному значению растет, а по относительному значению (выраженная в процентах, например, к числу образующихся за то же время нейтронов) уменьшается. Из этого заключения следует, что существует минимальный, именуемый критическим, объем, при котором утечка нейтронов не превышает максимально допустимой (в нашем случае 10%), и, значит, возможна цепная ядерная реакция. Если же объем меньше критического, цепная ядерная реакция протекать не будет.

В этом, кстати говоря, и заключается принципиальная основа атомной бомбы. Чтобы произвести ядерный взрыв, нужно соединить в одно целое несколько кусков делящегося материала, обычно ^{239}Pu . Общий объем делящегося материала превысит критический, а масса его — критическую массу, начнется саморазвивающаяся ядерная реакция, произойдет взрыв.

Почему же не происходит взрыва на атомной электростанции? Потому, очевидно, что в атомной бомбе ядерная реакция протекает неуправляемо, а на АЭС ею управляют с помощью так называемых компенсирующих стержней, сделанных из материала, являющегося сильным поглотителем нейтронов, обычно из карбида бора. Извлечение стержней из зоны, где протекает ядерная реакция, или, наоборот, погружение в эту зону соответственно усиливает или ослабляет реакцию. Возникновение взрыва в ядерном реакторе практически исключено.

В атомной технике существует понятие: реактивность ядерного реактора. Оно характеризует протекающий в реакторе процесс — идет ли расширяющаяся ядерная реакция (мощность реактора растет) или, наоборот, суживающаяся (мощность реактора уменьшается). Говорят, что в первом случае реактивность реактора положительна, во втором случае — отрицательна. Очевидно, что при положительной реактивности число возникающих нейтронов больше числа полезно расходуемых, поглощаемых и теряемых в результате утечки нейтронов, вместе взятых, при отрицательной реактивности — наоборот.

Если число возникающих и расходуемых нейтронов одинаково, то мощность реактора будет оставаться неизменной. Он будет работать в установившемся режиме. Это достигается с помощью компенсирующих стержней.

Нельзя сказать, что в ядерной реакции, протекающей с замедлением нейтронов, ^{238}U не может использоваться вовсе. Поскольку медленные нейтроны ядрами ^{238}U поглощаются и процесс преобразования ^{238}U в ^{239}Pu все же происходит, в ядерной реакции с замедленными нейтронами может быть использовано на тонну природного урана 7 кг ^{235}U (весь ^{235}U) и примерно 10 кг ^{238}U (всего лишь около 1% ^{238}U).

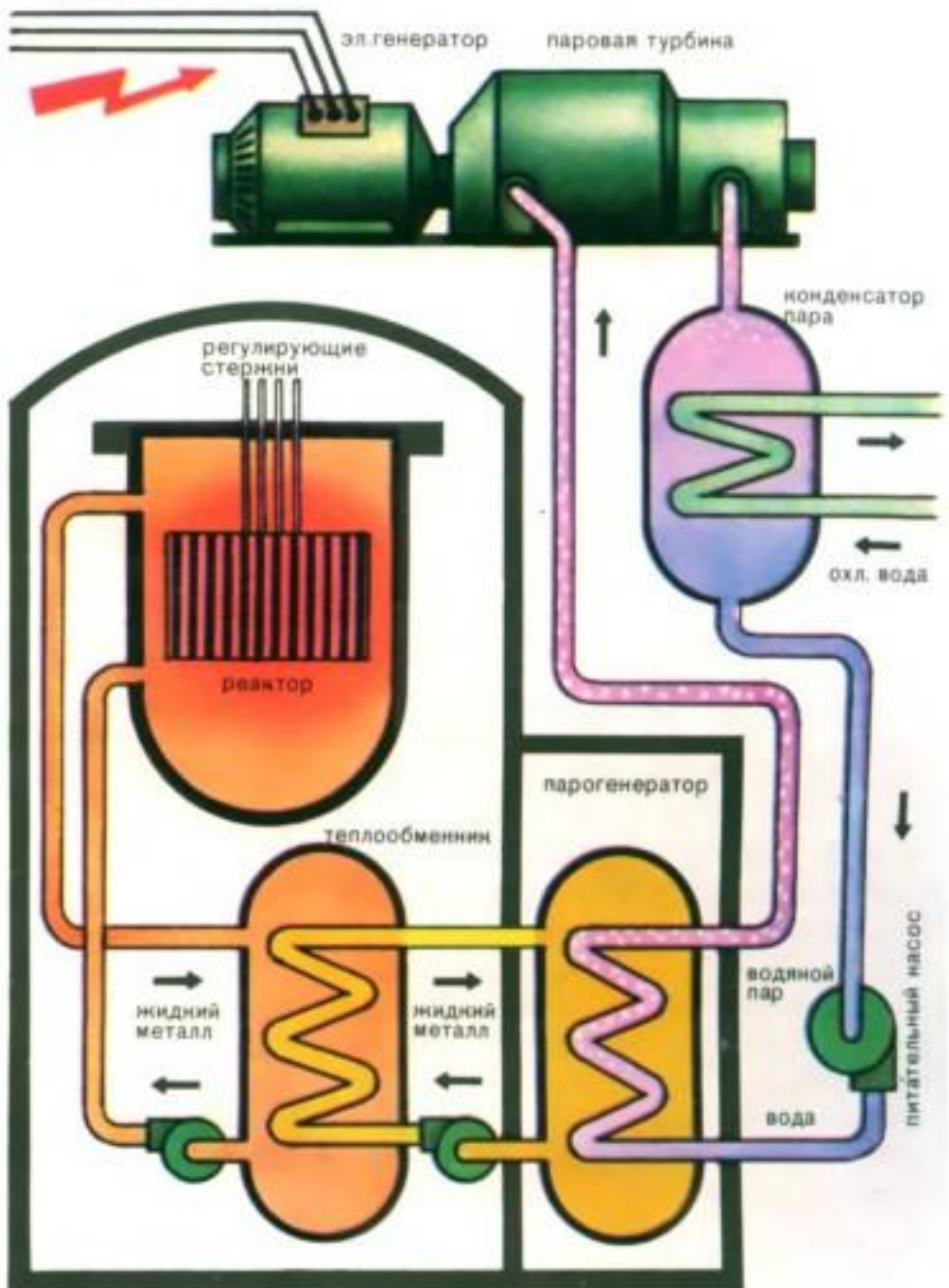
Атомная электростанция (АЭС). Ядерные реакторы АЭС могут быть двух основных типов — работающие на быстрых нейтронах (их часто называют реакторами-размножителями или бридерами) и работающие на замедленных (тепловых) нейтронах. Применяя первый тип реактора, можно гораздо полнее использовать природное ядерное горючее. Единственным имеющимся в природе веществом, ядра которого могут самопроизвольно (спонтанно) делиться, является изотоп урана ^{235}U . Ядра изотопов плутония ^{239}Pu и урана ^{233}U , имеющих способность самопроизвольного деления, являются делом человеческих рук; в природе эти изотопы практически не встречаются. Изотопы урана ^{238}U и тория ^{232}Th имеются в природе в относительно большом количестве, но их ядра не делятся. Эти изотопы могут быть превращены в ^{239}Pu и ^{233}U путем бомбардировки их ядер нейтронами. Таким образом, применительно к реактору-размножителю можно рассматривать ^{239}Pu и ^{233}U как исходное ядерное топливо, а ^{238}U и ^{232}Th — как своего рода сырье, из которого в реакторе получается вторичное ядерное топливо: новые порции ^{239}Pu и ^{233}U . Следовательно, в реактор-размножитель загружается исходное ядерное топливо (^{239}Pu или ^{233}U) и «атомное сырье» (^{238}U или ^{232}Th). Реактор производит тепловую энергию, преобразуемую на АЭС в электрическую, дает вторичное ядер-

ное топливо (^{239}Pu или ^{233}U) в количествах, превышающих первоначальную загрузку (вспомним, что коэффициент воспроизводства равен 1,6), — отсюда и название: реактор-размножитель. Итак, не будем забывать, что начало всем описанным ядерным превращениям дает ^{235}U — единственное природное, первичное ядерное топливо. Расходуемое и воспроизводимое ядерное топливо является, как правило, одними и теми же изотопами в одних реакторах ^{239}Pu , в других — ^{233}U .

На рисунке представлена одна из возможных схем АЭС с реактором на быстрых нейтронах. Сразу же бросается в глаза, что правая часть схемы, оборудование которой не входит в состав реакторной установки (границы реакторной установки очерчены в левой части схемы), ничем не отличается от схемы паросиловой установки (см. рис. на с. 15).

Действительно, в обоих случаях мы видим те же элементы: паровую турбину, электрический генератор, конденсатор, водяной насос. Принципиальное различие заключается в том, что в паросиловой установке водяной пар производится в котле (парогенераторе) за счет тепла сжигаемого органического топлива, а на АЭС (с реакторами как на быстрых, так и на тепловых нейтронах) — в теплообменнике-парогенераторе или непосредственно в реакторе за счет тепла ядерной реакции. Паровой котел и ядерный реактор — вот два взаимоисключающих элемента ТЭС и АЭС, делающие эти два типа электростанций различными. Реакторы на быстрых нейтронах, как мы уже говорили, находятся в настоящее время в стадии разработки и опытной эксплуатации. В Советском Союзе (после проведения опытных работ на установках относительно малой мощности) первый крупный атомный реактор на быстрых нейтронах был введен в действие в 1973 г. в г. Шевченко на берегу Каспийского моря. Его приведенная электрическая

Схема устройства АЭС с реактором на быстрых нейтронах.



мощность составляет 350 МВт. Поэтому реактор называется БН-350. Его действительная электрическая мощность 150 МВт. Большое количество тепла расходуется на опреснение морской воды. На Белоярской АЭС (на Урале) введен в действие еще более крупный реактор на быстрых нейтронах — БН-600 электрической мощностью 600 МВт. Работы в этом направлении продолжаются.

Практически же в настоящее время используются энергетические реакторы второго типа, работающие на замедленных тепловых нейтронах. Первый атомный реактор был сооружен в 1942 г. в США под руководством Э. Ферми, а первый в Европе атомный реактор был построен в СССР в 1946 г. под руководством И. В. Курчатова. Первая в мире промышленная АЭС была пущена в эксплуатацию в нашей стране (г. Обнинск Калужской области) 27 июня 1954 г. Ее электрическая мощность составляет 5 тыс. кВт. Атомная энергетика особенно за последнее десятилетие развивается очень быстро. В настоящее время мощность АЭС всех стран мира превышает 100 млн. кВт. Единичная мощность (электрическая) ядерных реакторов достигает 1 млн. кВт и даже больше, в недалеком будущем она составит 1,5—2 млн. кВт, а вполне возможно и более.

В реакторе на тепловых нейтронах обязательно должны присутствовать в качестве главных элементов ядерное топливо и замедлитель, которые размещаются вместе. Объем, в котором они находятся, называется активной зоной реактора. Активная зона — это сердце реактора. В ней протекают ядерные реакции, сопровождаемые выделением огромной энергии, происходит замедление быстрых нейтронов, производится с помощью специального вещества (теплоносителя) отвод тепла — конечного продукта реактора.

Ядерное топливо, находящееся в активной зоне

реактора, распределяется по тепловыделяющим элементам (ТВЭЛам). Тепловыделяющий элемент состоит из сердечника и оболочки. Основной «материал» сердечника — ядерное топливо, которое может быть в виде чистого, металлического урана или плутония, сплавов этих металлов с алюминием, цирконием, хромом или висмутом, в виде керамических изделий (окислов или карбидов). Сердечник может содержать «сырьевое» ядерное вещество ^{238}U или ^{232}Th . Сердечники делаются различной формы, но чаще всего цилиндрической.

Оболочка ТВЭЛа должна надежно отделять сердечник от омывающего ТВЭЛ теплоносителя и потому быть герметизирующей. К материалу оболочки предъявляются очень высокие требования. Он должен обладать большой механической прочностью, высокой коррозионной и термической стойкостью, устойчивостью в интенсивном нейтронном потоке. Чаще всего оболочка делается (в зависимости от условий работы, прежде всего от температуры) из сплавов алюминия и циркония, нержавеющей стали или графита высокой плотности.

ТВЭЛы собирают в специальные пакеты, кассеты и блоки (так называемые сборки) и размещают в активной зоне реактора, которую для сокращения утечки нейтронов окружают отражателем нейтронов, состоящим чаще всего из того же вещества, что и замедлитель. Применение отражателя, как показывает само его название, позволяет вернуть в активную зону часть «выскочивших» из нее нейтронов. Это происходит в результате упругих столкновений нейтронов с ядрами атомов отражателя. Вслед за отражателем, снаружи реактора, помещается защита реактора от радиоактивных излучений, или, как ее называют, биологическая защита. Радиоактивные излучения состоят из нейтронов и других частиц. Главный источник излучения — активная зона реак-

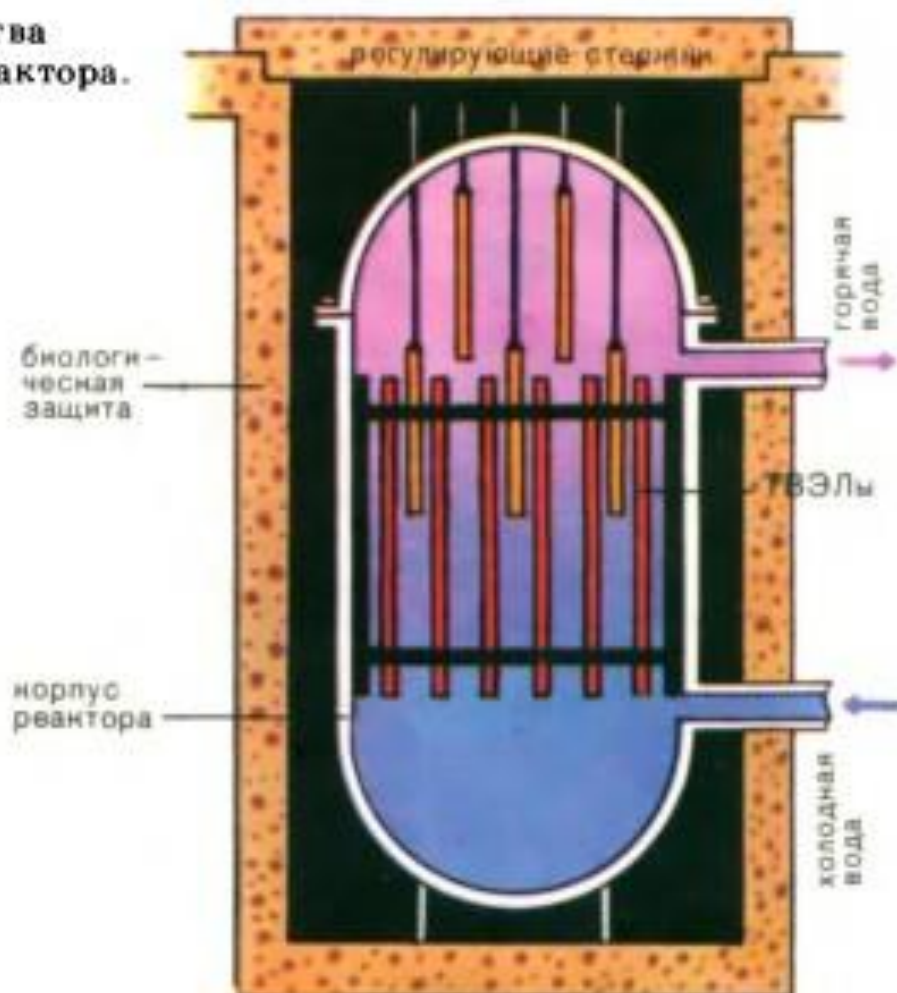
тора, а также конструкционные материалы, подвергающиеся нейтронной бомбардировке и поглощающие нейтроны (так называемое наведенное излучение).

Биологическая защита чаще всего выполняется из высококачественного бетона, который содержит около 10% воды, что имеет в данном случае большое значение, так как вода является хорошим поглотителем. В случае использования бетона как защиты от радиоактивного излучения в него часто добавляется карбид бора, являющийся сильным поглотителем нейтронов. Частицы, составляющие радиоактивное излучение, сначала в результате столкновений с ядрами атомов вещества, являющегося защитой, замедляются, а затем поглощаются. Защита резко ослабляет радиоактивное излучение ядерного реактора, но не может его полностью уничтожить. Реактор всегда является источником радиоактивного излучения, но при правильном его исполнении и эксплуатации оно весьма мало и столь же безопасно, как и излучение, поступающее на Землю из космоса. Однако безопасность — один из важнейших вопросов в атомной технике, он всегда находится в центре внимания специалистов.

Существующие конструкции реакторов различаются между собой главным образом в зависимости от того, какие вещества используются в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя, с помощью которого производится отвод тепла из активной зоны реактора.

Наибольшее распространение имеют водо-водяные реакторы, в которых обычная вода служит и замедлителем нейтронов и теплоносителем; уран-графитовые реакторы (замедлитель — графит, теплоноситель — обычная вода); газографитовые реакторы (замедлитель — графит, теплоноситель — газ, чаще всего углекислота); тяжеловодные реакторы (замед-

Схема устройства
водо-водяного реактора.



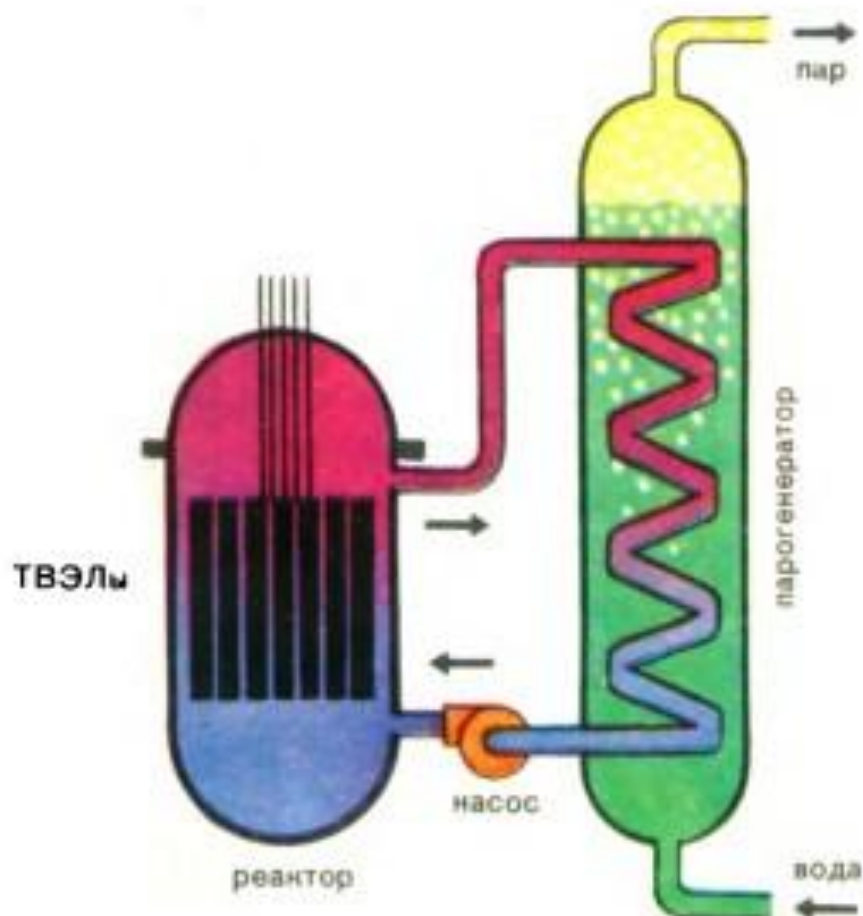
литель — тяжелая вода, теплоноситель — либо тяжелая вода, либо обычная вода).

В энергетике Советского Союза широкое применение получили водо-водяной и уран-графитовый реакторы, на которых мы кратко остановимся.

Принципиальная схема водо-водяного реактора дана на рисунке. Активная зона реактора представляет собой емкость, в которой находится вода и погруженные в нее сборки тепловыделяющих элементов. Вода непрерывно поступает в реактор, протекает через его активную зону, забирает тепло от тепловыделяющих элементов, в результате чего температура ее повышается, и выходит из реактора. Следовательно, тепло, образовавшееся в результате ядерной реакции, передается воде.

Схематически представленный ядерный реактор и теплообменник-парогенератор являются основны-

Схема
устройства
водо-водяного
реактора и
теплообменника-
парогенератора.



ми элементами АЭС с водо-водяным реактором на тепловых нейтронах. Эта схема двухконтурная. Вода, соприкасающаяся в активной зоне с ТВЭЛами и забирающая от них тепло (функция реакторной воды как теплоносителя), передает это тепло в теплообменнике также воде, но не протекающей через активную зону реактора и потому не представляющей опасности с точки зрения радиоактивного излучения. Таким образом, как это видно из рисунка, задачей первого водяного контура является передача тепла, полученного в активной зоне реактора, воде второго контура.

По причинам, о которых будет сказано ниже и о которых, возможно, читатель уже догадывается, вода второго контура в результате передачи ей тепла от воды первого контура обязательно должна быть превращена в пар. Именно поэтому теплообменник называется также парогенератором. Но вода первого

контура является греющей, а вода второго контура — обогреваемой. Следовательно, температура воды или пара второго контура никак не может быть выше температуры воды первого контура. Возможно ли испарить воду второго контура за счет тепла, передаваемого ей водой первого контура?

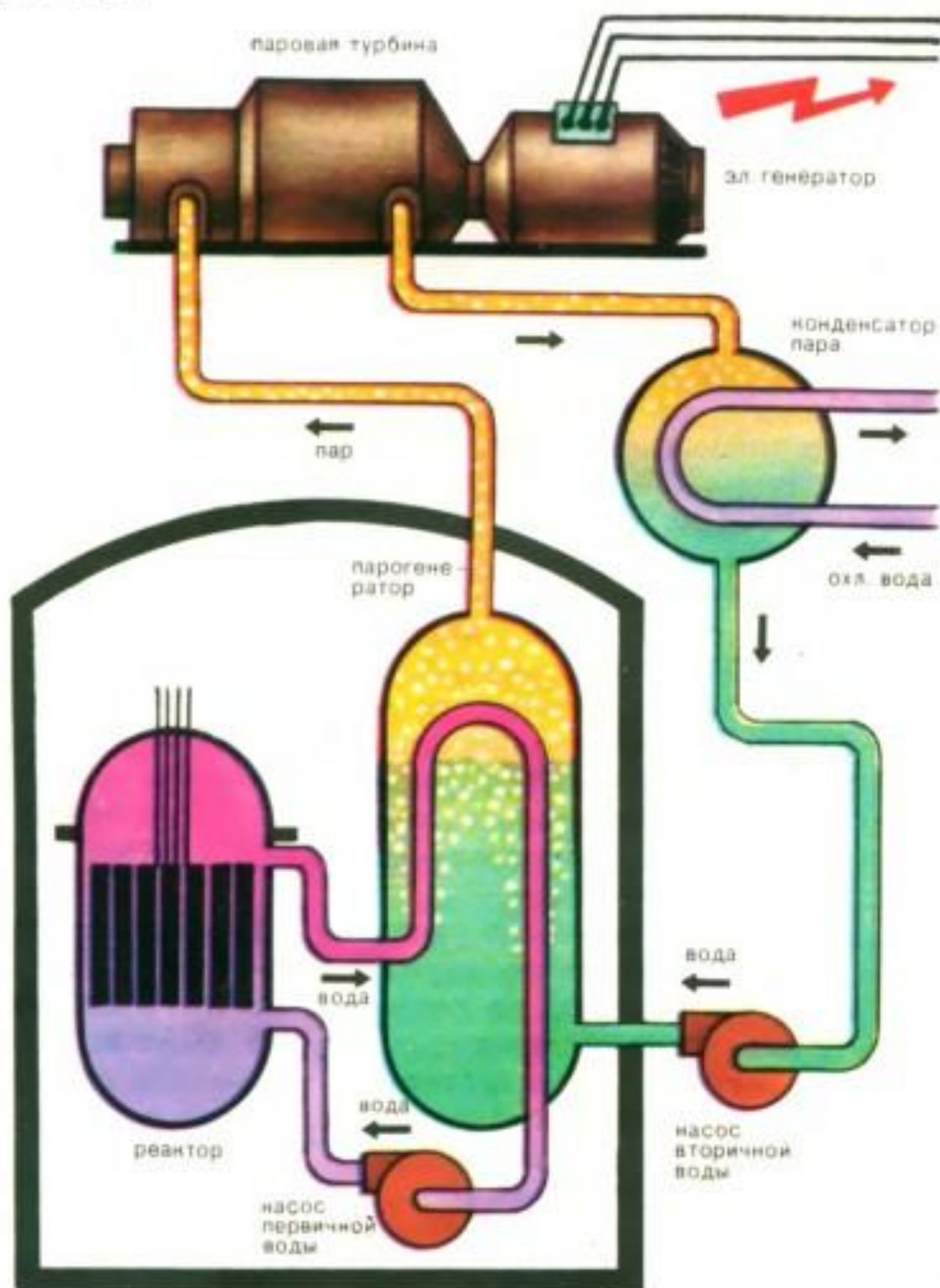
Оказывается, возможно. И даже весьма просто. Вспомним хорошо известную истину о том, что температура парообразования, т. е. температура, выше которой вода существовать не может, зависит от давления. Так, например, при давлении 0,04 абсолютных атмосферы (ата) — это как раз обычное давление пара в конденсаторе паросиловой установки (см. рис. на с. 15) — температура парообразования (конденсации) равна 29°C ; при давлении 1 ата температура парообразования равна $99,6^{\circ}\text{C}$; при давлении 160 ата — уже $347,3^{\circ}\text{C}$. Поэтому, если давление воды в первом контуре выше, чем во втором контуре, воду второго контура можно превратить в пар за счет тепла, отдаваемого водой первого контура. Так практически и поступают.

В водо-водяном реакторе мощностью 1 млн. кВт (электрических), установленном на Нововоронежской АЭС, давление воды первого контура избрано 160 ата, а давление воды второго контура — 60 ата. Температуры парообразования равны соответственно $347,3$ и $275,6^{\circ}\text{C}$.

Поскольку давление воды в первом контуре всегда бывает высоким, активную зону водо-водяного реактора необходимо размещать в прочном, толстостенном корпусе, выполненном из высококачественного металла. Следовательно, водо-водяные реакторы всегда корпусного типа. Водо-водяные энергетические реакторы сокращенно именуется ВВЭР. Например, реактор Нововоронежской АЭС мощностью 1 млн. кВт (1000 МВт) именуется ВВЭР-1000.

На рисунке представлена схема устройства АЭС

Схема устройства АЭС с водо-водяным реактором.



с водо-водяным реактором на тепловых нейтронах. Она во многом похожа на схему устройства АЭС с реактором на быстрых нейтронах (см. рис. на с. 41). Различие заключается в устройстве реакторной части. Схема АЭС с реактором на быстрых нейтронах сложнее: здесь используется трехконтурная схема вместо двухконтурной, в качестве теплоносителя применяется жидкий щелочной металл. О трудностях, связанных с прямым использованием быстрых нейтронов, мы уже говорили.

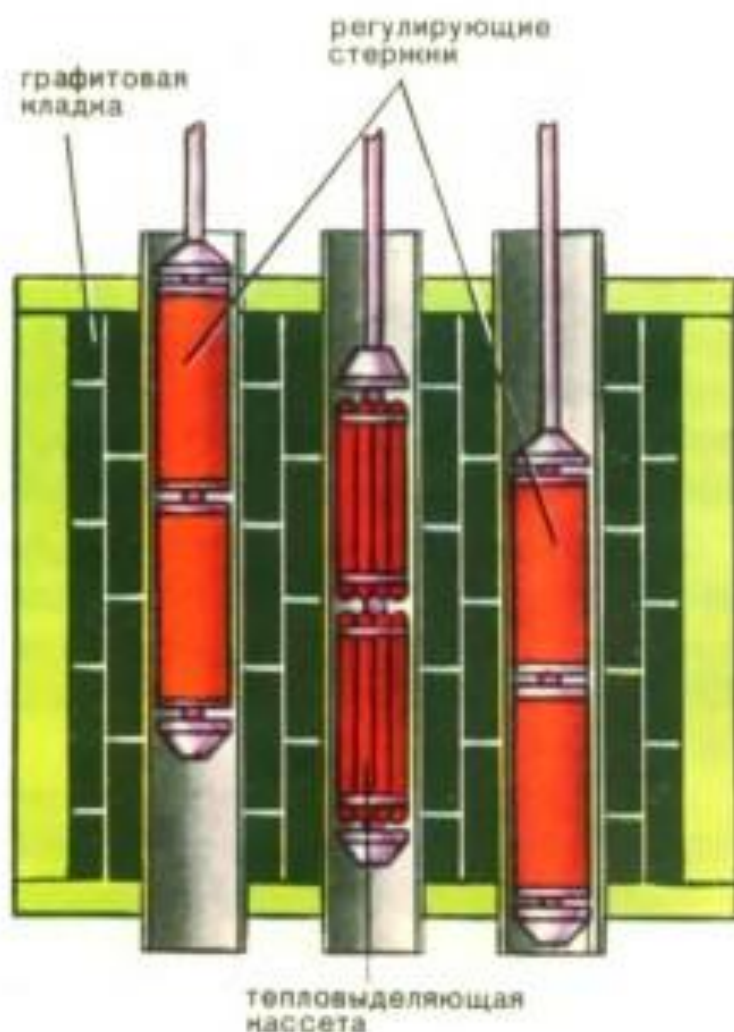
Водо-водяные реакторы на тепловых нейтронах в настоящее время являются наиболее распространенными на АЭС. Они используются в СССР, США, Франции, ГДР, Болгарии, Чехословакии, Финляндии и других странах.

В настоящее время наши ученые ведут работу по увеличению мощности ВВЭР до 2000 МВт.

Другим широко распространенным в Советском Союзе типом энергетических ядерных реакторов на тепловых нейтронах является уран-графитовый реактор, где замедлителем нейтронов служит графит, а теплоносителем — обычная вода. Этот реактор не корпусной, а канальной конструкции.

На рисунке представлена схема устройства активной зоны уран-графитового энергетического канального реактора. Активная зона состоит из графитовой кладки, в которой сделаны вертикальные каналы. В большинстве каналов размещены тепловыделяющие кассеты. Топливом служит обогащенный уран, находящийся в кольцевом пространстве ТВЭЛа между внутренней рассчитанной на высокое давление трубкой, в которой протекает теплоноситель (обычная вода), и внешней тонкостенной трубкой. Схема АЭС с канальным уран-графитовым реактором на тепловых нейтронах существенно отличается от схемы АЭС с водо-водяным реактором (см. рис. с. 48). Это одноконтурная схема. Тепло-

Схема устройства активной зоны уран-графитового канального реактора.

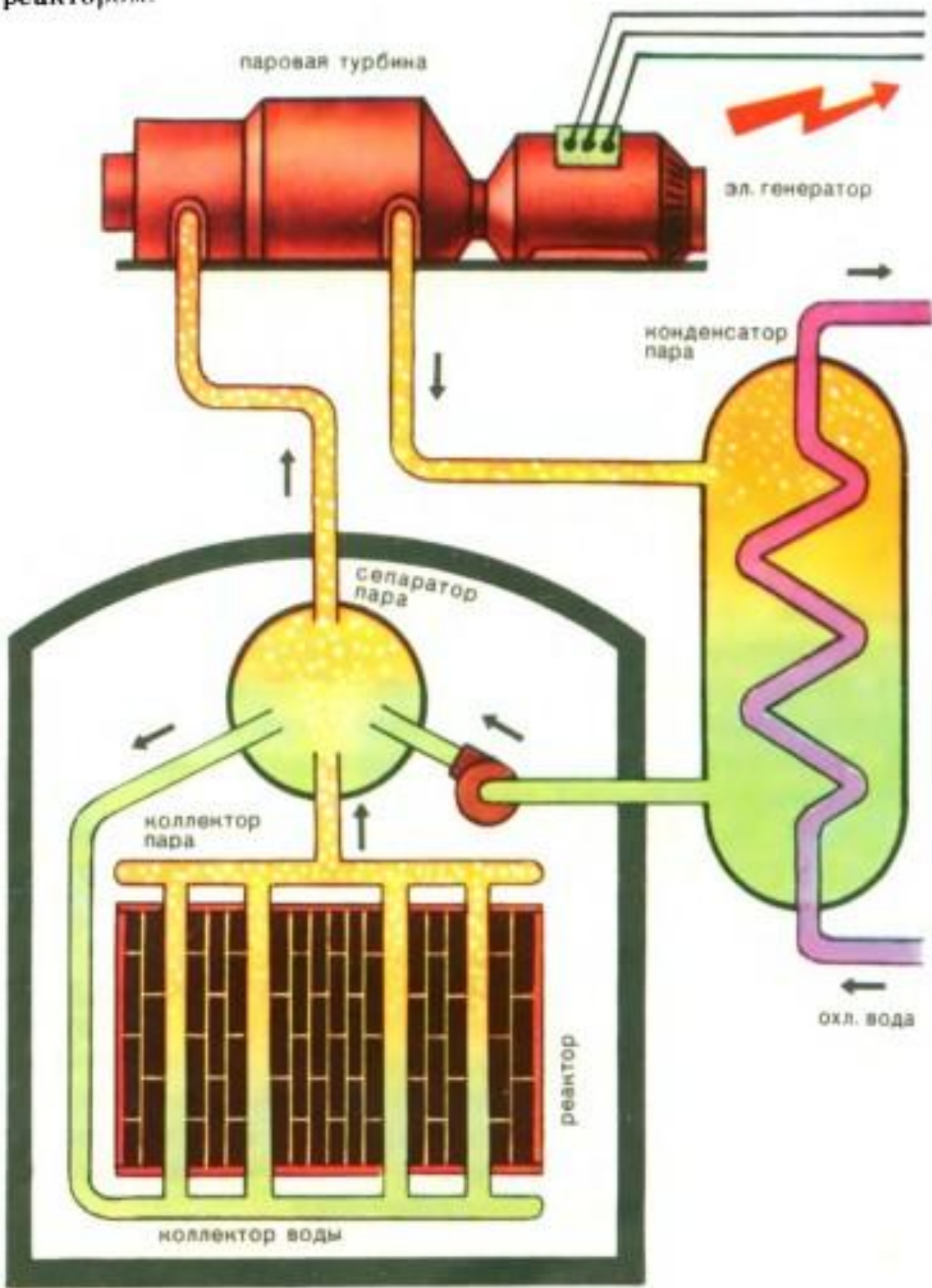


носитель — обычная вода, проходя через технологические каналы реактора, не только нагревается до температуры насыщения (парообразования), соответствующей давлению воды, но и частично испаряется. Реакторы такого типа, в которых вода (или другой теплоноситель) превращается в пар, называются кипящими.

Образовавшийся влажный пар (смесь пара и воды при одной и той же температуре насыщения) поступает в сепаратор, назначение которого — разделить влажный пар на сухой насыщенный пар и воду. Полученный сухой пар направляется в паровую турбину.

В правой части схемы показаны паровая турбина, электрический генератор, конденсатор пара, водяной

Схема АЭС с каналным уран-графитовым реактором.



насос. Это для читателя уже привычно. Вода из конденсатора подается в реактор, предварительно подогреваясь. Таково в принципе действие АЭС с канальным, кипящим, уран-графитовым реактором. Эти реакторы большой мощности получили краткое наименование — РБМК.

Важным этапом явилось создание большой серии реакторов РБМК мощностью 1 млн. кВт каждый. Первый реактор этой серии, установленный на Ленинградской АЭС, был передан в эксплуатацию в конце 1973 г. РБМК-1000 производит насыщенный пар при давлении 65 ат, или около 6,5 МПа, и температуре примерно 280°C. Реакторы этого типа являются основными при создании АЭС мощностью 4—6 млн. кВт каждая. Развитие АЭС на базе РБМК связано с дальнейшим ростом мощности этих реакторов.

Немного экономии. Итак, мы очень кратко ознакомились с устройством и принципом работы трех типов электростанций: ТЭС, ГЭС и АЭС. В настоящее время сумма мощностей всех электростанций этих трех типов практически равна мощности электроэнергетической системы мира.

Какой же из этих трех типов электростанций предпочтительнее? В качестве примера рассмотрим (сопоставим) экономические характеристики ТЭС и ГЭС.

Для электростанции любого типа наиболее важны два экономических показателя: стоимость 1 кВт установленной мощности — показатель, получаемый делением общих затрат на строительство электростанции (капитальные вложения) на мощность электростанции; себестоимость 1 кВт · ч выработанной электростанцией электроэнергии.

Ясно, что первый показатель — удельные капиталовложения — свидетельствует о том, сколь доро-

го сооружение объекта, в данном случае электростанции, или, как часто говорят инженеры и экономисты, характеризует капиталоемкость объекта. Второй показатель — себестоимость продукции — свидетельствует о величине текущих, эксплуатационных затрат, являющихся суммой отнесенных к единице продукции расходов на сырье, ремонт оборудования, оплату труда и др. Из практики хорошо известно, что удельные капиталовложения для ГЭС значительно больше, чем для ТЭС. Себестоимость же произведенного киловатт-часа электроэнергии, наоборот, для ГЭС значительно меньше, чем для ТЭС.

Как же быть? Какому показателю отдать предпочтение?

Приведенный пример имеет отношение практически к любой области производства. Решать подобные задачи необходимо при строительстве большинства объектов.

Особенно отчетливо эти трудности обнаруживаются при проектировании линии электропередачи. Очевидно, что чем больше взять сечение провода, тем меньше будут потери электроэнергии. Но зато будет выше стоимость провода, так как больше пойдет дорогого металла. И наоборот: если сечение провода выбрать меньше, то потери электроэнергии возрастут, а стоимость линии электропередачи при прочих равных условиях снизится.

Как же найти научно обоснованное решение?

К счастью, экономическая наука дает ключ к ответу. Для этого пришлось ввести понятие приведенных, или расчетных, затрат.

Приведенные затраты Z , $\frac{\text{коп.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ могут быть подсчитаны

по формуле $Z = \frac{100K \varphi}{\tau} + C$,

где $K, \frac{\text{руб.}}{\text{кВт}}$ — удельные капиталовложения;

$\tau, \frac{\text{ч}}{\text{год}}$ — число часов работы электростанции в год на полной проектной мощности;

$C, \frac{\text{коп.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ — себестоимость электроэнергии;

$\varphi, \frac{1}{\text{год}}$ — коэффициент, представляющий со-

бой обратную величину срока окупаемости (обычно принимается равным 0,15, что соответствует 7 годам окупаемости).

Срок окупаемости капитальных вложений для предприятия определяется как частное, числителем которого являются капитальные вложения, необходимые для строительства данного предприятия, а знаменателем — прибыль, получаемая в течение года в результате работы предприятия.

Второй член уравнения приведенных затрат — себестоимость продукции.

Первый член уравнения приведенных затрат представляет собой как бы тот «налог», которым мы хотим обложить каждую единицу выпускаемой продукции (в данном случае киловатт-час). Величина «налога» на 1 кВт · ч устанавливается такой, чтобы при работе электростанции за время, равное сроку окупаемости, суммарная величина «налога» равнялась капитальным вложениям на строительство электростанции.

Так как коэффициент φ , есть, согласно определению, величина, обратная сроку окупаемости, то совокупность φ , находящегося в числителе (или, что то же самое, числа лет окупаемости — в знаменателе), и числа часов работы электростанции в год τ представляет собой не что иное, как число часов работы электростанции, но уже не за один год, а за весь срок окупаемости. Но ведь на каждый киловатт установленной мощности за время, равное сроку

окупаемости, производится именно такое количество киловатт-часов. Следовательно, первый член уравнения приведенных затрат есть не что иное, как величина капитальных вложений, выраженная в копейках (для этого цифра 100 в числителе) и отнесенная к одному киловатт-часу, произведенному электростанцией за время, равное сроку ее окупаемости.

Значение коэффициента ϕ , представляющего собой обратную сроку окупаемости величину, должно, конечно, быть реальным, но директивным. Чем больше значение коэффициента ϕ , т. е. чем меньше срок окупаемости капитальных вложений, тем лучше для экономики. Обычно величина коэффициента ϕ избирается одинаковой, по крайней мере для данной отрасли производства.

Таким образом, высшей экономической эффективности отвечает минимум приведенных затрат.

Следует также заметить, что «налог», которым облагается выпускаемая продукция (в данном случае электроэнергия в кВт · ч), обеспечивает возможность расширенного производства и общегосударственные расходы (управление, социально-экономические нужды, оборону и т. д.).

Пользуясь средними данными удельных капитальных вложений и себестоимости произведенной электроэнергии для разных типов электростанций, сведенными в табл. 1, а также формулой приведенных затрат, можно произвести сопоставление ТЭС, ГЭС и АЭС.

Воспользовавшись формулой и данными табл. 1, можно убедиться, что значения приведенных затрат для различных типов электростанций относительно близки. В практике определение приведенных затрат производится не для средних значений удельных капитальных вложений и себестоимости электроэнергии, а для конкретных данных с учетом ре-

Таблица 1

Вид электростанции	Удельные капитальные вложения, руб./кВт	Себестоимость электроэнергии, коп./кВт ч
ТЭС	200	1,00
ГЭС	350	0,05
АЭС	370	0,80

альных условий строительства электростанции и ее дальнейшей эксплуатации.

Для ТЭС, например, решающее значение имеет место расположения намечаемой к строительству электростанции. Если ТЭС предполагается построить на большом расстоянии от места добычи топлива, то в этом случае стоимость топлива будет значительно выше за счет расходов на перевозку. Следовательно, будут выше себестоимость производимой электроэнергии и приведенные затраты. Именно поэтому ТЭС, как правило, создаются вблизи мест добычи топлива. По этой причине признано нецелесообразным дальнейшее строительство ТЭС в европейской части Советского Союза. Так как выгодные для энергетического использования гидроэнергоресурсы европейской части СССР в основном уже используются, то здесь наибольшие перспективы строительства имеют атомные электростанции.

Проблемы и трудности энергетики

Ресурсы органического и ядерного топлива. В настоящее время ежегодно расходующая всеми странами мира энергия (полученная из всех доступных источников) составляет 0,1% в отношении возмож-

ных для использования запасов угля, природного газа и нефти, вместе взятых.

Но ведь потребление всех видов энергетических ресурсов быстро растет. Что же будет дальше?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо представить себе, каковы ресурсы органического топлива (угля, природного газа, нефти) на Земле. Они разделяются на общие и извлекаемые. Практически невозможно добыть и использовать все 100% топлива, имеющегося в данном месторождении. Коэффициент извлечения зависит от вида топлива, характера месторождения и техники добычи: для нефти — в пределах 0,3—0,4, для природного газа — 0,5—0,8, для угля — 0,25—0,5. Такое низкое значение коэффициента извлечения для угля принимается потому, что среди его месторождений имеется много тонких пластов, лежащих глубоко под уровнем земли. Специалисты оценивают имеющиеся извлекаемые ресурсы органического топлива Земли (угля, нефти и природного газа, вместе взятых) величиной $4 \cdot 10^{12}$ тут, т. е. 4000 млрд. условного топлива.

Много это или мало?

В 1980 г. потребление всех видов энергетических ресурсов всеми странами мира составило примерно 10 млрд. тут. Что касается прогнозов на будущее, то эксперты полагают, что потребление всех видов энергетических ресурсов на Земле в 2000 г. составит около 20 млрд. тут. Если принять эту цифру, то запасов только органического топлива человечеству хватило бы еще на 200 лет. Правда, при этом мы не учитываем быстро развивающуюся атомную энергетику с ее запасами ядерного горючего, гидроэнергетические, а также другие источники энергии (Солнца, тепла глубинных слоев Земли и др.).

Каковы же ресурсы ядерного горючего, в какой мере эти ресурсы могут повлиять на обеспечение человечества энергией?

Поскольку торий пока не нашел практического применения в энергетике, мы будем говорить только о ресурсах урана (хотя многие специалисты считают, что тория на Земле больше).

Уран широко распространен на Земле. Но концентрация, в которых он встречается в граните и других породах, а также в морской воде, очень невелика. Чем меньше содержание добываемого вещества в руде, тем, конечно, дороже получать это вещество. Поэтому, рассматривая вопрос о ресурсах урана, обычно выбирают допустимую цену за 1 кг природного металлического урана (следовательно, состав ^{235}U —0,7% и ^{238}U —99,3%) и рассчитывают, естественно весьма ориентировочно, какое количество природного урана может быть добыто при этой цене. Такие расчеты сделаны специалистами США.

Таблица 2

Допустимая цена природного металлического урана, дол./кг	Тип ядерного реактора	Энергетический эквивалент извлекаемого металлического урана, тВт
200	На тепловых нейтронах	10^{17}
	На быстрых нейтронах	10^{16}
500	На тепловых нейтронах	10^{17}
	На быстрых нейтронах	10^{16}

Из табл. 2 видно, что ресурсы извлекаемого ядерного топлива, даже без учета тория, очень велики. Если даже ограничить цену 1 кг добываемого природного урана 200 дол. и использовать только реакторы на тепловых нейтронах, то ресурсы природно-

го урана примерно равны извлекаемым ресурсам органического топлива, т. е. угля, газа, нефти, вместе взятых. Если же принять максимально допустимую цену за 1 кг природного урана равной 500 дол. и считать, что будут использоваться реакторы на быстрых нейтронах, то извлекаемые ресурсы природного урана оказываются в 1000 раз больше извлекаемых запасов органического топлива.

Интересно отметить, что цена ядерного горючего в пересчете на тонну условного топлива очень сильно зависит от того, для какого типа реактора предназначается добытый уран. При цене 1 кг природного урана 200 дол. цена ядерного горючего, отнесенная к тонне условного топлива (тут), для реактора на тепловых нейтронах будет в пределах 10 руб./тут, а для реактора на быстрых нейтронах — всего лишь 10 коп./тут. При цене 1 кг природного урана 500 дол. соответствующие цифры будут равны: 25 руб./тут и 25 коп./тут. Отсюда следует, что ресурсы ядерного горючего огромны.

Какие же выводы можно сделать? Можно констатировать, что ресурсы органического и ядерного топлива очень велики и человечеству не придется столкнуться с энергетическим голодом, влекущим якобы за собой крушение цивилизации. Тем более что наука непрерывно ищет и находит новые возможности для развития материальной основы общества и его процветания.

В чем же тогда причины возникновения современного энергетического кризиса? Органическое топливо, а также ядерное топливо — невозобновляемые источники энергии. Но пока потребление энергии было не так уж велико, об их невозобновляемости особенно не вспоминали. Теперь же потребление энергии стало заметной величиной на фоне ресурсов органического топлива. Особенно остро стоит вопрос с нефтью. Быстрое развитие автомобильного транс-

порта и авиации, использующих в качестве топлива практически только продукты нефтепереработки (бензин, дизельное топливо, керосин), привело к большому увеличению потребления нефти. В 1970 г. доля нефти и газа в потреблении органического топлива поднялась почти до 70%, хотя в ресурсах органического топлива нефть и газ, вместе взятые, составляют менее 20%. Тут было о чем подумать. Повышение мировых цен на нефть, а также неравномерное распределение ее запасов между странами мира еще более подчеркивали незакономерность столь гипертрофированно высокого потребления нефти по сравнению с другими источниками энергии.

Поэтому необходимо: повысить удельный вес ядерного топлива и угля в энергетическом балансе, что позволит снизить процент потребления нефти; разработать и широко использовать высокоэкономичные процессы получения искусственного жидкого топлива из угля, так как имеются такие потребители энергии, которые используют только высококачественное жидкое топливо (бензин, керосин, дизельное топливо), и в настоящее время трудно сказать, когда удастся перевести хотя бы некоторые из них на другие источники энергии; разработать высокоэффективные методы использования так называемых возобновляемых источников энергии, таких, как солнечная энергия, гидроэнергия, энергия ветра, приливов, морских волн, тепло глубинных слоев Земли, и широко их использовать; всемерно экономить энергетические ресурсы (между прочим, это непосредственно касается всех читателей книги).

Транспорт энергии. Потребление электроэнергии растет с каждым годом. Место расположения электростанций не может быть выбрано произвольно: для ГЭС оно определяется гидроэнергоресурсами, для ТЭС — в большой мере зависит от ресурсов топлива

и источников водоснабжения, для АЭС имеется возможность гораздо более широкого выбора, но и в этом случае должен быть поблизости источник водоснабжения (требуется большое количество охлаждающей воды для конденсации пара). Эти два обстоятельства — рост потребления и, следовательно, производства электроэнергии и отсутствие свободы в выборе места расположения электростанции — делают транспорт энергии одним из важнейших вопросов современного развития энергетики.

При выборе места расположения ТЭС и ГЭС транспортные расходы должны учитываться. Для ТЭС могут рассматриваться и сопоставляться: передача электроэнергии по проводам, железнодорожный и трубопроводный транспорт топлива. Для ГЭС — только передача электроэнергии.

В настоящее время наиболее выгодным видом транспорта энергии среди всех названных выше является перекачка нефти и нефтепродуктов по трубопроводам. Близка к ней по экономичности перевозка нефти и продуктов ее переработки на больших танкерах. Именно вследствие малых затрат на транспортировку мировые цены на нефть мало зависят от места ее потребления. Как и все жидкости, нефть почти несжимаема, и поэтому расход энергии на ее перекачку определяется только необходимостью преодоления сил трения в трубопроводе, т. е. является относительно малым. В электроэнергетике, однако, нефть и получаемые из нее продукты используются все меньше. Эта тенденция в дальнейшем не только сохранится, но и усилится.

Перекачка по трубопроводам природного газа стоит уже значительно дороже. Так как газ сжимаем, то вместо употребляемых на нефтепроводах насосов здесь приходится использовать компрессоры.

Представляет интерес перекачка газа в сжиженном состоянии. Расход энергии на перекачку резко

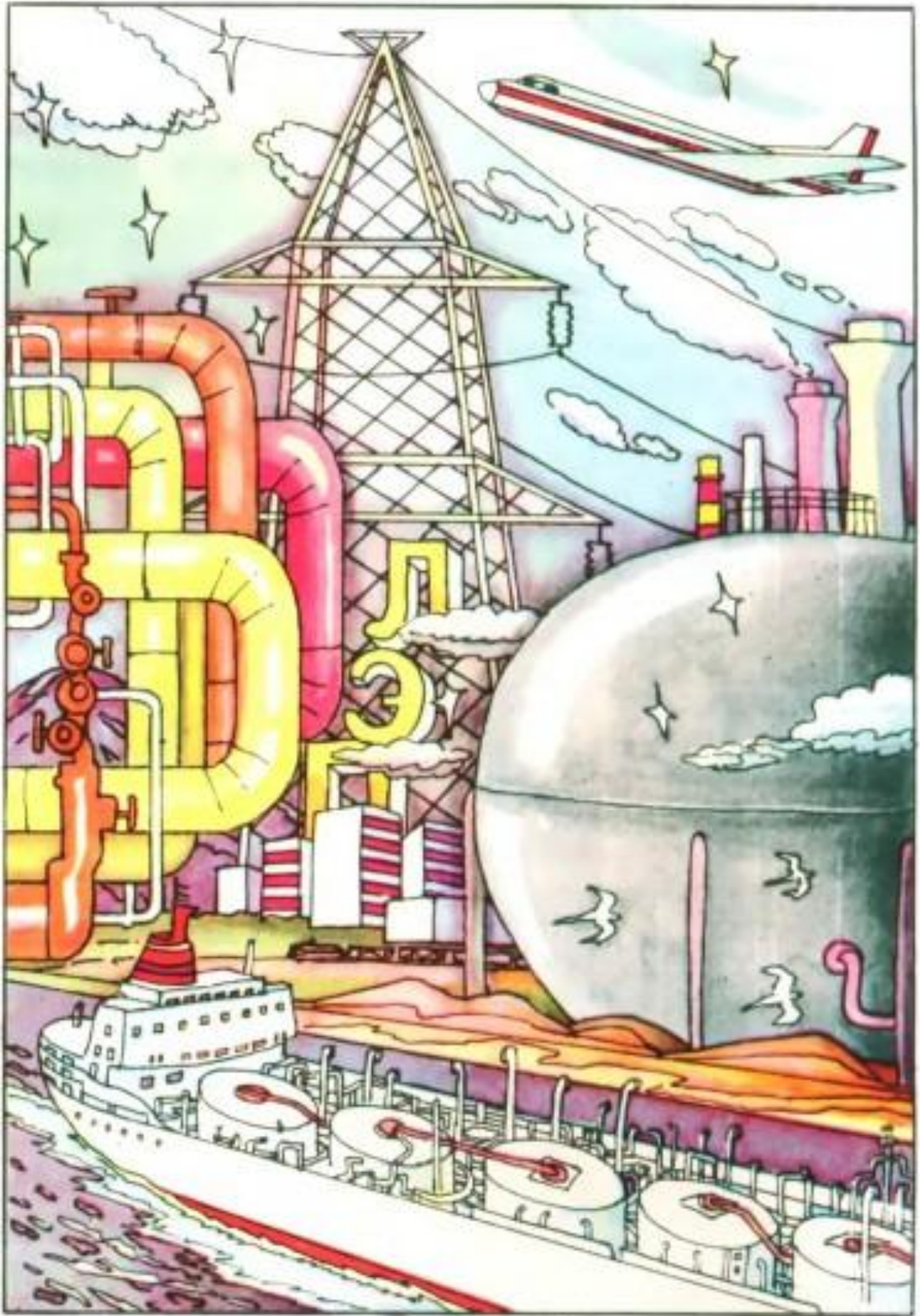
снижается, а диаметр трубопровода при том же количестве транспортируемого газа может быть выбран гораздо меньше.

Что касается транспорта угля на дальнее расстояние, то для этой цели используется только железнодорожный и водный транспорт.

За последнее время проявляется большой интерес к транспорту угля по трубопроводу в контейнерах и в виде пульпы, т. е. примерно пятидесятипроцентной смеси измельченного угля с водой. Это направление действительно интересно.

Более универсальным средством транспорта энергии являются линии электропередачи (ЛЭП). Их назначение не только односторонняя передача энергии, как это происходит, например, с помощью нефте- и газопроводов, но и осуществление связи между отдельными электростанциями и целыми энергетическими системами. Такая связь помогает повысить надежность работы энергосистемы, сократить необходимый резерв мощности, облегчить работу системы в периоды максимальной и минимальной потребности в электроэнергии.

По основным экономическим показателям — удельным капиталовложениям и эксплуатационным расходам ЛЭП пока уступают не только нефтепроводам, но и газопроводам. Общая тенденция развития дальних линий электропередачи — повышение электрического напряжения: чем оно выше, тем меньше электрический ток и, следовательно, тем меньше потери электроэнергии в проводах. Характер этих потерь обычный: электрическая энергия превращается в тепловую, а эта последняя рассеивается. Главное, что ограничивает повышение напряжения в ЛЭП, — это проводимость воздуха. Дальние линии электропередачи в настоящее время делаются воздушными: металлические провода, по которым течет электрический ток, с помощью специальных



опор и изоляторов подвешиваются в воздухе. Электрическое сопротивление воздуха должно быть достаточно большим, чтобы не происходило «пробоя воздуха». Беда в том, что проводимость воздуха резко растет после достижения определенного предела по напряжению.

Широко применяются в настоящее время ЛЭП, работающие на переменном и постоянном токе. Каждый из этих двух типов ЛЭП имеет свои преимущества и недостатки.

ЛЭП на постоянном токе используются все шире ввиду более высокого допустимого рабочего напряжения в линии (в 1,5—2 раза больше, чем для ЛЭП на переменном токе). По этой причине они могут сооружаться на более дальние расстояния.

Недостатком ЛЭП на постоянном токе является необходимость иметь два преобразователя тока: один — на передающем конце линии для превращения переменного тока в постоянный и другой — на принимающем конце линии для преобразования постоянного тока в переменный. Хотя в преобразовательной технике за последнее время достигнуты большие успехи, (на место вакуумных устройств пришли полупроводниковые), тем не менее стоимость преобразователей остается высокой.

Поскольку на ЛЭП из соображений экономии капитальных вложений устанавливаются только два преобразователя тока — на передающем и принимающем концах линии, производить промежуточный отбор энергии невозможно. В дальнейшем, очевидно, ЛЭП на постоянном токе будут использоваться для передачи электроэнергии на наиболее дальние расстояния (например, из Восточной Сибири, где имеются огромные ресурсы угля и гидроэнергии, в европейскую часть СССР).

В Советском Союзе достигнуты большие успехи в создании современных ЛЭП как на переменном,

так и на постоянном токе. Освоены ЛЭП переменного тока на напряжение 750 кВ (750 тыс. В), ведутся работы по созданию ЛЭП на напряжение 1150 кВ. Построены ЛЭП постоянного тока на напряжение 800 кВ (± 400 кВ), ведется работа по созданию ЛЭП постоянного тока на напряжение 1500 кВ (± 750 кВ).

Перспектива дальнейшего развития передачи электроэнергии по проводам связывается теперь не только с воздушными, но и с кабельными ЛЭП, которые обычно располагаются под землей. В этом случае электрический провод вместе с изоляцией заключен в герметическую оболочку.

В одном из разрабатываемых вариантов кабельных ЛЭП в качестве изоляции предполагается использовать находящийся под относительно высоким давлением газ, обладающий низкой электропроводностью и высокой электрической прочностью. Таким газом, уже нашедшим применение в технике, является шестифтористая сера (SF_6), именуемая среди электротехников элегазом.

Другое направление развития ЛЭП заключается в создании так называемых криогенных и сверхпроводящих линий электропередачи. Идея криогенных ЛЭП основывается на том известном факте, что электрическое сопротивление металлов (особенно чистых) падает со снижением их температуры. Например, если чистый алюминий (99,99 Al) охладить до температуры 20 К (-253° С — температура жидкого водорода), то его электрическое сопротивление уменьшится примерно в 500 раз.

Явление сверхпроводимости служит отправным пунктом создания сверхпроводящих ЛЭП. Это явление, с практическим использованием которого связываются сегодня многие направления технического прогресса, состоит в том, что при достижении определенных низких температур некоторые чистые металлы и сплавы становятся сверхпроводящими, т. е.

их электрическое сопротивление делается равным нулю. Температура, при которой это происходит, именуется критической. К сожалению, для достижения сверхпроводимости необходимо охлаждение проводников до температуры, близкой к гелиевой (температура жидкого гелия = 4,2 К, или $-268,8^{\circ}\text{C}$).

Наука не ставит каких-либо запретов, по крайней мере на уровне современных знаний, на возможность существования таких сверхпроводящих материалов, критическая температура для которых была бы выше. Представьте себе, каким огромным достижением было бы открытие такого сверхпроводящего вещества, критическая температура для которого была бы близка к комнатной! Однако до сего времени не удалось отыскать вещество, которое приобретало бы сверхпроводящие свойства даже при температуре жидкого азота (-196°C). Поиски в этом направлении продолжаются.

Конструкцию сверхпроводящего кабеля можно представить себе в следующем виде. Сверхпроводящий провод помещается в трубе, заполненной жидким гелием. Снаружи труба должна быть хорошо теплоизолирована. В качестве сверхпроводника может быть использован, например, сплав ниобия, титана и циркония, критическая температура для которого составляет 9,7 К ($-263,3^{\circ}\text{C}$).

Итак, преимущества сверхпроводящей ЛЭП очевидны: отсутствие потерь электроэнергии и большая экономия металла, из которого делаются провода. Правда, стоимость сверхпроводящего материала пока высока, но можно надеяться, что она существенно снизится при увеличении его производства. Кроме того, потребуются значительные расходы энергии для поддержания низкой температуры сверхпроводника и криогенное оборудование.

Относительно криогенных линий электропередачи можно сказать, что их возможная конструкция,

а также их достоинства и недостатки в принципе такие же, как и для сверхпроводящих линий.

Заканчивая разговор о проблемах транспорта энергии, хотелось бы совсем кратко сказать о еще одном, может быть перспективном, способе передачи энергии. Мы говорим «может быть перспективным» потому, что идеи, составляющие его существо, настолько новы и необычны, что очень трудно оценить даже возможность их реализации.

Речь идет о создании мощных атомных или солнечных электростанций, вынесенных с целью охраны окружающей среды в околоземное космическое пространство. В этом случае электрическую энергию, производимую на этих станциях, имеется в виду передавать на Землю с помощью электромагнитного излучения в сверхвысокочастотном диапазоне. Излучение такого рода может передаваться узким направленным пучком, так как оно, подобно световому лучу, поддается фокусировке.

Аккумуляция энергии. Существуют различные виды аккумуляторов энергии. Мы расскажем о наиболее интересных из них.

Механические аккумуляторы. На рисунке представлена схема гидроаккумулирующей электростанции — ГАЭС. Избыток электроэнергии (в период снижения ее потребности) используется на ГАЭС для перекачки воды из нижнего резервуара в верхний. Таким образом «лишняя» электрическая энергия превращается в механическую (потенциальную) энергию. Во время повышенного спроса на электроэнергию производится перепуск воды из верхнего резервуара в нижний. При этом вода протекает через гидротурбогенератор, в котором производится электрическая энергия.

На рисунке показаны верхний и нижний резервуары, соединяющий их трубопровод, базовая ра-

ботающая на неизменной нагрузке электростанция. Агрегат насос-турбина может работать и как насос, и как гидравлическая турбина, он соединен с мотором-генератором, который в свою очередь может работать и как электрический мотор для привода в действие насоса, и как электрический генератор.

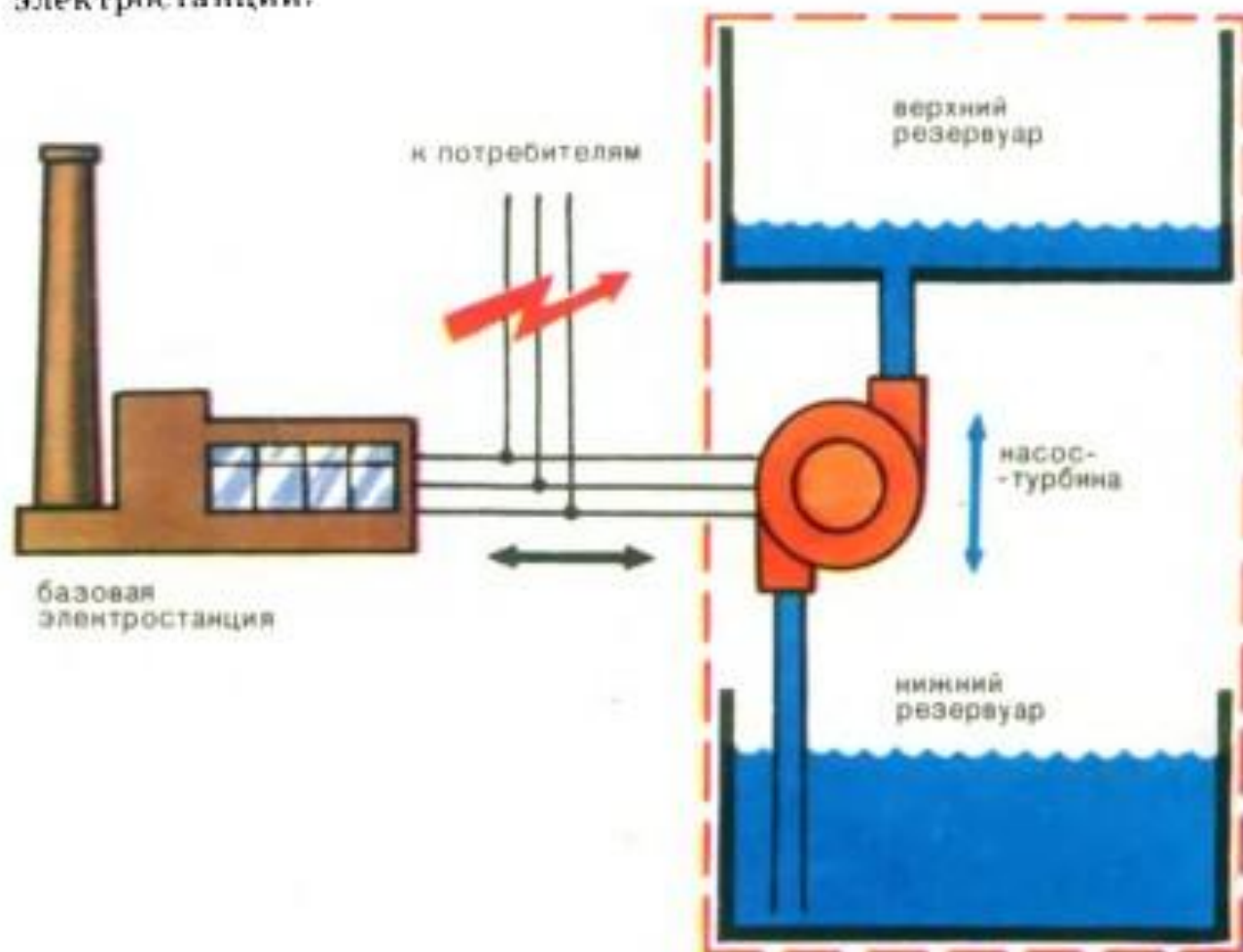
В настоящее время ГАЭС является лучшим аккумулялирующим устройством для электростанций. Она устроена просто и надежна в работе. Время ее пуска очень малое: несколько минут, а в случае необходимости — и в пределах минуты.

Стоимость строительства ГАЭС довольно высока. Но она значительно снижается, если рельеф местности способствует созданию двух резервуаров на разных уровнях. Другой недостаток ГАЭС — относительно низкий КПД, около 70%. Это значит, что только 70% от использованной на ГАЭС электроэнергии может быть отдано потом потребителю. Но зато в самое нужное время!

Существует другой тип механического аккумулятора, который предназначается для транспортных устройств. Принцип его работы удивительно прост. Аккумулятор — это маховик, обладающий большой массой и раскручиваемый до очень высокого числа оборотов. Запасаемая им энергия не что иное, как кинетическая энергия самого маховика. Для ее повышения нужно увеличивать массу маховика и число оборотов вращения. Для маховиков, масса которых измеряется многими десятками килограммов, а частота вращения достигает 200 тыс. об./мин, должны использоваться самые прочные материалы: сталь и стеклопластик.

Потери энергии при вращении маховика вызываются трением между поверхностью маховика и воздухом и трением в подшипнике. Для уменьшения потерь маховик помещают в кожух, из которого откачивается воздух. Кроме того, применяются са-

Схема гидроаккумулирующей электростанции.



мые совершенные конструкции подшипников. В этих условиях годовая потеря энергии маховиком может быть менее 20%. В настоящее время созданы опытные образцы городских автобусов с аккумулятором энергии этого типа.

Электрохимические аккумуляторы. Мы остановимся на них кратко, поскольку в настоящее время они имеют весьма узкое применение в качестве основного источника энергии. Электрохимический аккумулятор заряжается (накапливает энергию) путем питания его электрической энергией, которая в аккумуляторе преобразуется в химическую энергию. Выдает потребителю же он снова электрическую энергию. Современные

электрохимические аккумуляторы могут действовать сотни и даже тысячи циклов заряда-разряда без существенного снижения качества. Они применяются главным образом для запуска двигателей внутреннего сгорания. В настоящее время больше всего используются сравнительно дешевые свинцово-кислотные аккумуляторы; более высокие показатели имеют серебряно-кадмиевые аккумуляторы, но они стоят дороже.

Главный недостаток электрохимических аккумуляторов — низкое значение удельной (т. е. отнесенной к 1 кг веса аккумулятора) энергии, запасаемой аккумулятором. Если мы хотим сделать более мощный аккумулятор, например, для привода в движение автомобиля да еще желаем, чтобы между зарядками аккумулятора он прошел бы несколько сотен километров, то такой автомобиль практически не мог бы транспортировать ничего другого, кроме питающего его аккумулятора. Свинцово-кислотный аккумулятор обладает удельной энергией порядка 100 кДж/кг, серебряно-кадмиевый — около 400 кДж/кг, в то время как бензин имеет теплотворную способность примерно 40 000 кДж/л. Именно по этой причине электромобили с электрохимическими аккумуляторами находят пока узкое применение, например в случаях, когда радиус пробега мал, а остановок приходится делать много (городские автомобили для почты, для развозки молока и т. п.).

Аккумуляторы тепла. С каждым годом увеличивается интерес к этим аккумуляторам. За последнее время солнечная энергия для нагревания используется во многих районах земного шара. Но для земных условий Солнце не постоянный источник энергии: днем солнечная радиация имеется, ночью — нет. По этой причине отопление за счет энергии Солнца возможно только при использова-



Схема конденсатора.

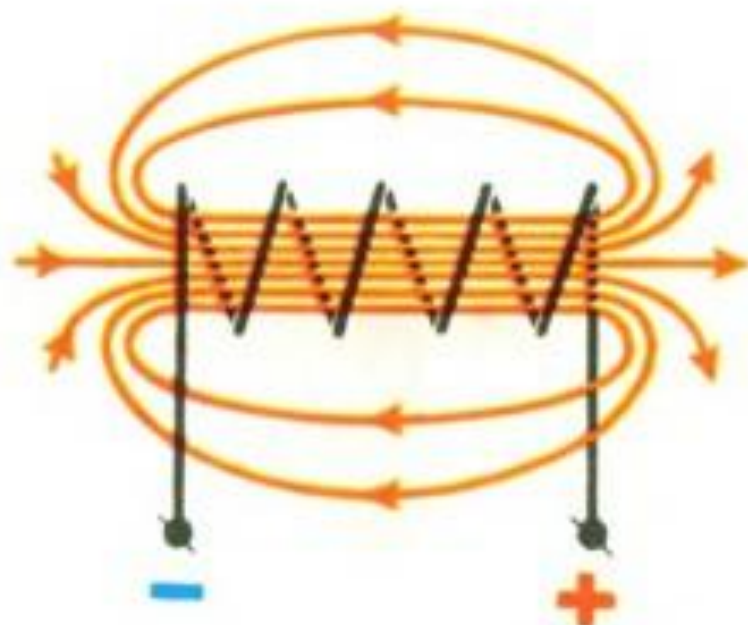
нии аккумулятора тепла: днем он должен запасать тепло за счет солнечного излучения, а ночью — отдавать.

Аккумуляторы тепла подразделяются на две основные группы: во-первых, запасующие тепло путем нагревания рабочего тела аккумулятора, температура которого при этом повышается, во-вторых, накапливающие тепло в результате перехода рабочего тела из одного агрегатного состояния в другое, чаще всего из твердого в жидкое; в этом случае температура рабочего тела не изменяется или изменяется мало.

Передача тепла потребителю от аккумуляторов I группы происходит за счет охлаждения рабочего тела и понижения его температуры, а от аккумуляторов II группы — путем возвращения рабочего тела в первоначальное агрегатное состояние (замерзания).

Каким бы ни было устройство аккумулятора тепла, необходимо придерживаться главного принципа: температура рабочего тела должна поддержи-

Схема соленоида.



ваться как можно более высокой, по возможности близкой к температуре того источника тепла, от которого «заряжается» аккумулятор. Чем выше температура источника тепла, тем более ценно запасенное им тепло. В пределе, если бы источник тепла имел температуру среды, то ни он сам, ни запасенное им тепло не представляли бы никакой ценности и никому не были бы нужны. Кроме того, рабочее тело должно иметь хорошую тепловую изоляцию от окружающей среды, с тем чтобы в максимальной мере снизить неизбежные потери тепла и сохранить более высокую температуру.

Большое значение имеют размеры аккумулятора тепла (вспомним критическую массу для ядерного горючего). Чем больше объем его рабочего тела, тем меньше отношение его поверхности к объему и, следовательно, меньше относительные (удельные) потери тепла (например, отнесенные к единице запасенного тепла или к единице массы рабочего тела).

Электрические аккумуляторы. Мы рассмотрели некоторые типы аккумуляторов энергии, которые применяются в настоящее время. А как обстоит дело с аккумуляторами, накапливающими

непосредственно электрическую энергию, без преобразования ее на время «хранения» в другие виды энергии? Есть ли в этой области интересные идеи?

Идеи есть, но конструкции такого аккумулятора пока еще не существует. Более того, трудно даже сказать, когда может появиться такой аккумулятор. Однако этот вопрос безусловно представляет интерес.

Остановимся сначала на электрическом аккумуляторе, в котором энергия хранится в виде энергии электрического поля. По существу дела это не что иное, как электрический конденсатор, состоящий из двух электродов (верхнего и нижнего), именуемых обкладками, и находящегося между ними диэлектрика (см. рис. на с. 71). Название конденсатора — стеклокерамический, слюдяной, бумажный, пленочный, электролитический, полупроводниковый — определяется используемым диэлектриком.

Система обкладок и диэлектрика обладает электрической емкостью. Когда переключатель замкнут на источник тока (на рис. — налево), происходит зарядка конденсатора. В заряженном конденсаторе энергия хранится в виде энергии электрического поля диэлектрика. Если переключатель перевести в крайнее правое положение и замкнуть электрическую сеть на потребителя, происходит разрядка конденсатора.

Удельная энергия, запасаемая конденсатором, невелика (практически от 10 до 400 Дж/кг). Длительность возможного хранения энергии вследствие имеющейся ее утечки небольшая. Этот тип аккумулятора энергии применяется только в тех случаях, когда надо отдать электроэнергию потребителю за очень короткое время при кратком сроке ее хранения.

Другим видом аккумулятора, запасующим непосредственно электрическую энергию, является

соленоид — катушка, намотанная из изолированного провода (см. рис. с. 72). При протекании постоянного тока по обмоткам соленоида возникает, как это показано на рисунке, магнитное поле. Электрическая энергия в этом случае аккумулируется в виде энергии магнитного поля. Поэтому этот тип накопителя именуется электромагнитным. Он не может быть использован в тех случаях, когда количество запасаемой энергии должно быть велико, а время разрядки и время хранения энергии — достаточно длительным (измеряться часами, а еще лучше — сутками). На самом деле время выдачи энергии электромагнитными аккумуляторами обычно измеряется даже не секундами, а долями секунды.

Следует отметить, что работа по улучшению основных показателей электромагнитных накопителей энергии и расширению диапазона их возможного применения ведется интенсивно. Создание сверхпроводящих соленоидов, электрическое сопротивление обмоток которых равно нулю, сделало бы возможным использование больших значений электрического тока, и следовательно, увеличение запасаемой аккумулятором энергии.

Энергетика и охрана окружающей среды. В настоящее время основной задачей в области охраны окружающей среды является предотвращение загрязнения воздуха и воды на нашей планете.

По имеющимся оценкам, ежегодно в атмосферу Земли в результате сжигания органического топлива выбрасывается около 150 млн. т золы, 100 млн. т окислов серы, 60 млн. т окислов азота, 300 млн. т окиси углерода (СО). Существенная часть этих загрязняющих атмосферу веществ приходится на долю тепловых электростанций, где сжигается огромное количество органического топлива. На состояние водных источников (гидросферы) заметное воздей-

ствие оказывают гидростанции. Атомные электростанции несут в себе меньшую угрозу загрязнения воды и воздуха; разумеется, при строгом контроле за тем, чтобы радиоактивное излучение не выходило за пределы установленных норм.

Главные загрязнители атмосферы Земли — всех видов установки, сжигающие органическое топливо: автомобили, котлы ТЭС, отопительные устройства, различные промышленные печи и др.

Попадающие в атмосферу и загрязняющие ее вещества могут существовать там разное время. Так, крупные твердые частицы золы оседают за время, измеряемое часами и даже минутами, окислы же серы и азота, а также весьма мелкие твердые частицы могут существовать в атмосфере недели, пока не будут вымыты осадками.

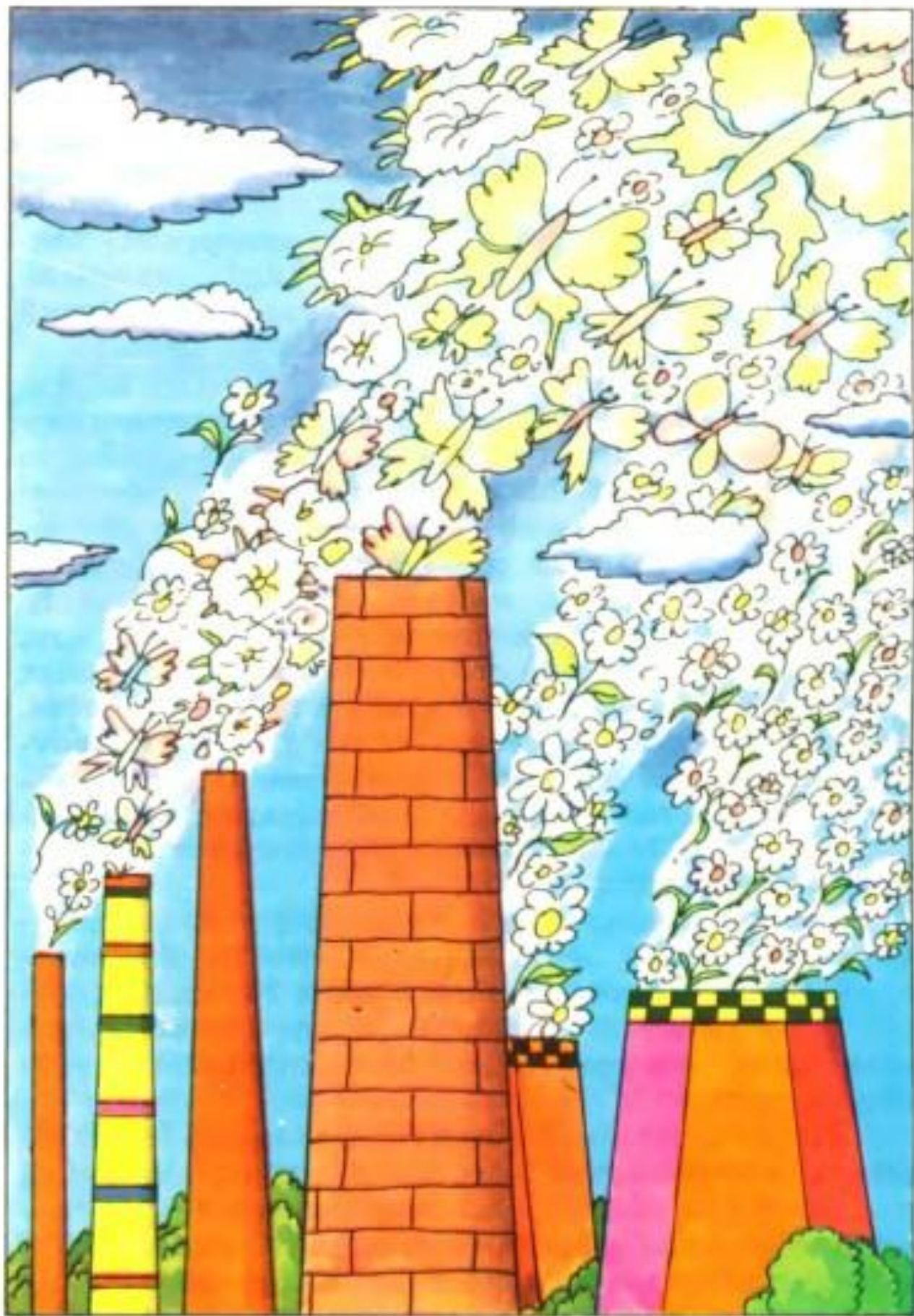
Во многих странах больше всех загрязняют атмосферу автомобили. Отопительные установки жилых зданий также вызывают загрязнение атмосферы. Что касается ТЭС, то в результате хорошо организованного в большинстве котлов процесса горения (практически полного сгорания топлива) содержание СО и сажи в продуктах сгорания невелико. Котлы оборудованы золоуловителями, имеющими высокий КПД. Вследствие этого содержание золы в продуктах сгорания ТЭС также относительно низко. Гораздо труднее бороться с окислами азота и особенно серы. Окислы азота образуются при сжигании топлива в зонах высокой температуры. В настоящее время разрабатываются способы, позволяющие уменьшить их образование в несколько раз.

В Советском Союзе охрана атмосферы от загрязнения рассматривается как дело государственного значения. Принимаются меры по сокращению вредных выбросов. Здания, в которых живут около 80% городского населения, отапливаются централизованно, т. е. с помощью ТЭЦ или крупных котель-

ных. Это существенно сокращает вредные выбросы.

В последнее время большое внимание уделяется так называемому тепловому загрязнению атмосферы, т. е., попросту говоря, ее нагреванию. Нагревание атмосферы за счет человеческой деятельности может произойти главным образом по двум причинам: непрерывный рост производства энергии и повышение содержания CO_2 в атмосфере Земли. Хотим мы этого или нет (вспомним об особенностях тепловой энергии и о втором законе термодинамики), почти вся произведенная человеком энергия в конечном счете превращается в тепло. В настоящее время в энергетическом балансе Земли (превалирующее количество энергии Земля получает за счет солнечной радиации) энергия, произведенная человеком, составляет около 0,01%. Многие специалисты считают, что, когда эта цифра возрастет до 1%, т. е. увеличится в 100 раз, температура поверхности Земли может за счет деятельности человека повыситься на 0,5—1°C. Что произошло бы в результате этого, определенно сказать трудно, но имеются опасения, что даже такое малое изменение температуры, вызванное вмешательством человека в энергетический баланс Земли, может привести к изменению климата Земли со всеми вытекающими отсюда нежелательными последствиями. Атмосфера Земли обладает так называемым парниковым эффектом: она хорошо пропускает коротковолновую солнечную радиацию и значительно хуже — длинноволновое излучение Земли. Оказывается, увеличение содержания углекислоты в атмосфере ведет к увеличению парникового эффекта и, следовательно, к повышению температуры поверхности Земли.

Вопрос о возможном потеплении поверхности Земли в результате деятельности человека изучен недостаточно. Необходимы дальнейшие исследования в этой области.



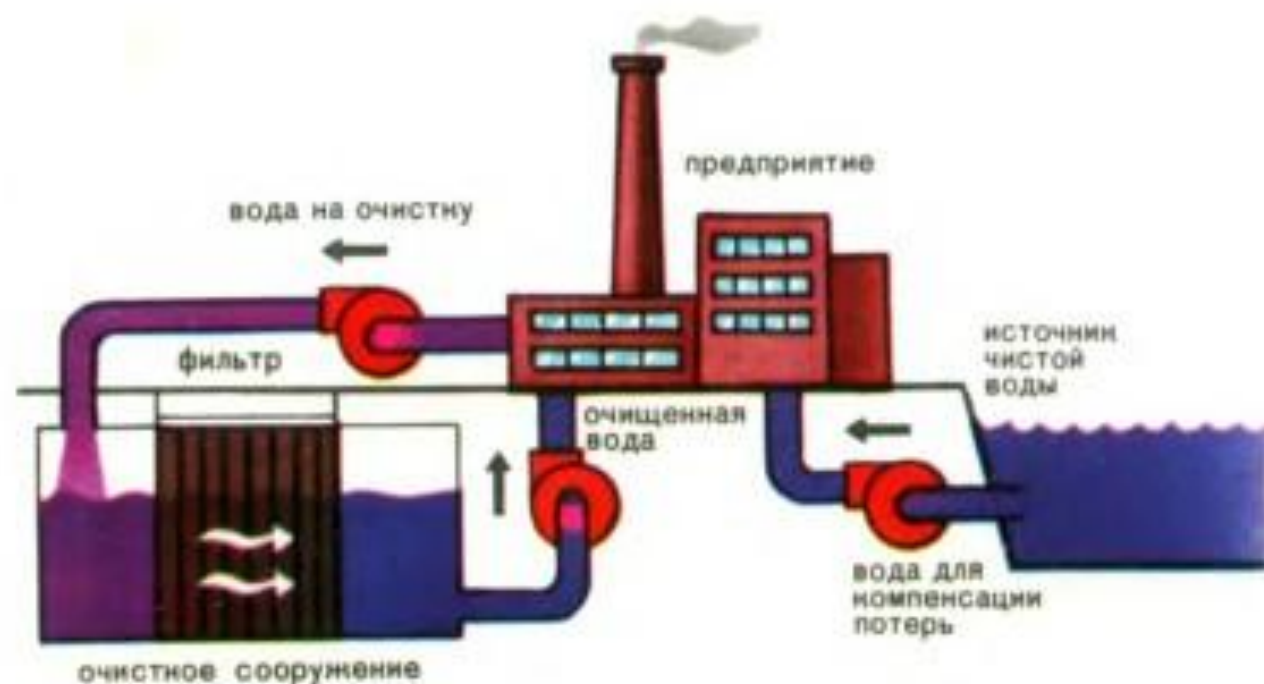
Охрана от загрязнения имеющейся на Земле воды (гидросферы) является также одной из главных задач, решаемых в целях защиты окружающей человека среды.

Большую опасность для гидросферы представляют многие промышленные предприятия (особенно предприятия химической и нефтехимической, целлюлозно-бумажной, металлургической промышленности). Для очистки сбросных вод предприятий сооружаются дорогостоящие фильтры: механические, химические и биологические. Однако кардинально решить эту проблему только с помощью даже самых совершенных фильтров нельзя. Необходимо вносить такие изменения (улучшения) в производственный технологический процесс, которые позволили бы очищенную воду снова использовать в производстве. Это позволит уберечь водоемы от какого бы то ни было загрязнения и ликвидировать или, по крайней мере, резко сократить потери полезных и по большей части ценных веществ (в частности, сырья). Вода используется в этом случае в замкнутом контуре (см. рис.) Из водоема забирается лишь малое количество воды для компенсации неизбежных ее потерь. Такая технология именуется замкнутой или безотходной.

Большую опасность для гидросферы представляют также плохо очищенные и тем более вовсе не очищенные бытовые сбросы воды городов и других населенных пунктов, а также недостаточно очищенные сбросы воды сельскохозяйственного производства.

ТЭС, АЭС и тем более ГЭС не имеют сколько-нибудь значительных сбросов воды, загрязненной опасными для гидросферы веществами. Тем не менее они наносят ущерб водным источникам: ТЭС и АЭС — за счет сброса большого количества теплой воды (охлаждающая вода конденсатора) и нагрева-

**Схема
использования воды
в замкнутом контуре.**



ния вследствие этого водоемов, а ГЭС — главным образом в результате создания большого числа мелководных (или частично мелководных) водохранилищ.

Повышение температуры воды, например, в реках всего лишь на 1°C может привести к увеличению потребления кислорода биоорганизмами на 10—20%. А это может вызвать дефицит кислорода в воде со всеми вытекающими отсюда нежелательными последствиями. Этот вопрос заслуживает всестороннего изучения, особенно потому, что сброс теплой воды будет возрастать (вследствие ускоренного строительства АЭС, отдающих окружающей среде, в основном воде, почти в 1,5 раза больше низкотемпературного тепла по сравнению с ТЭС).

Следует заметить, что для замкнутых водоемов (прудов, озер), расположенных в умеренных и холодных широтах, сброс теплой воды не только не

вреден, но даже полезен. В таких подогреваемых водоемах можно, например, организовать высокоэффективное рыбное хозяйство.

Строительство ГЭС на равнинных реках приводит к затоплению больших территорий. Значительная часть площади образовавшихся водохранилищ — мелководье. В летнее время за счет солнечной радиации в них активно развивается водная растительность, происходит так называемое цветение воды. Изменение уровня воды, достигающее нередко на мелководье до полного осушения, приводит к гибели растительности.

Большим злом, вызывающим загрязнение поверхности морей, является утечка нефти при ее добыче на морском шельфе и при транспортировке танкерами, а также сброс загрязненной балластной воды при загрузке танкеров нефтью. Не входя в подробности, следует отметить, что загрязнение поверхности морей может быть устранено или, по крайней мере, резко сокращено путем проведения несложных технических и организационных мероприятий.

Энергетика завтра

Проблемы использования атомного реактора на быстрых нейтронах, транспорта энергии и ее аккумуляирования, энергетики и охраны окружающей среды уже обсуждались на страницах этой книги. Все они представляют первостепенный интерес для энергетики завтрашнего дня. В этой главе мы хотим рассказать о термоядерной энергетике, возобновляемых источниках энергии, методах прямого преобразования энергии, искусственном жидком топливе.

Термоядерная энергетика. Принцип действия термоядерного реактора, над созданием которого

работают крупнейшие физики многих стран мира, имеет общее с принципом действия обычного атомного реактора. В обоих случаях основой являются ядерные реакции, масса вещества перед реакцией несколько больше массы продуктов ядерной реакции. Другими словами, и здесь и там имеется дефект массы, и в результате огромное энерговыделение. 1 кг исходного для термоядерной реакции вещества энергетически эквивалентен 10 тыс. т. условного топлива. Иначе, 1 г этого вещества энергетически эквивалентен 10 т. Таким образом, энерговыделение в термоядерной реакции, отнесенное к единице массы исходного вещества, примерно в 4 раза больше по сравнению с ядерной реакцией деления ^{235}U .

Отличие заключается в том, что термоядерная реакция есть реакция соединения (синтеза) ядер, а не их деления. Реакции деления ядер, сопровождаемые огромным энерговыделением, свойственны тяжелым элементам, обладающим большим атомным весом. Ядерные же реакции с большим выделением энергии, участниками которых являются легкие элементы с малым атомным весом, — это реакции синтеза ядер.

В реакции деления ядер делящееся вещество (уран, плутоний) является, как часто говорят в физике, мишенью. Активная же роль принадлежит нейтронам — инициаторам ядерной реакции. В реакции синтеза ядер дело обстоит иначе. Ядерная реакция этого типа может осуществиться только в том случае, когда ядра атомов окажутся достаточно близко друг от друга, на расстоянии порядка 10^{-13} см, или 10^{-9} мк (одна миллиардная часть микрона).

Сближению атомов противостоят электростатические силы отталкивания (ядра атомов имеют одинаковый положительный заряд), и, чтобы оно произошло, необходимо, чтобы взаимодействующие частицы обладали большой кинетической энергией. Другими словами, вещество должно иметь в отличие от реак-

ции деления ядер очень высокую температуру, измеряемую многими десятками миллионов градусов. Именно по этой причине реакция синтеза ядер названа термоядерной. При такой высокой температуре вещество пребывает в так называемом плазменном состоянии. Плазма отличается от обычного газа тем, что ее составляют не молекулы и атомы, а ядра атомов и свободные электроны: при температуре примерно 10 тыс. градусов, атомы любого вещества теряют свои электронные оболочки.

Частицы, из которых состоит плазма, имеют электрические заряды. Электроны — отрицательные, а ядра атомов — положительные. Это имеет очень большое значение, в чем читатель скоро убедится.

Напомним, что водород имеет три изотопа: протий (H) — обычный водород, ядром атома которого является протон; дейтерий (D) — более тяжелый водород, его атомное ядро состоит из протона и нейтрона; тритий (T) — еще более тяжелый водород, его атомное ядро состоит из одного протона и двух нейтронов. Атомные веса трех названных изотопов водорода (H, D, T) относятся между собой, как 1:2:3.

По современным научным представлениям, источником энергии звезд, в том числе нашего Солнца, служит термоядерная реакция, в результате которой водород превращается в гелий и выделяется огромное количество энергии. Такая реакция протекает в недрах звезд, но осуществить ее в земных условиях, по-видимому, невозможно. Значительно проще, оказывается, осуществить реакцию между ядрами дейтерия и трития. При этом образуются ядра гелия, нейтроны и также происходит огромное энерговыделение.

Возможность осуществления в земных условиях термоядерной реакции, исходными веществами для которой служат тяжелые изотопы водорода — дей-



терий и тритий, доказана. Именно такая реакция протекает в термоядерной (водородной) бомбе, где она носит характер неуправляемого, кратковременного, мощного взрыва, результатом которого является разрушение. Для того чтобы использовать термоядерную реакцию в мирных целях, нужно научиться ее регулировать, заставить протекать спокойно.

Следует заметить, что тяжелый изотоп водорода тритий — вещество радиоактивное, период его полураспада — около 12 лет. Поэтому тритий на Земле практически не встречается. Но это не создает безвыходного положения. Вспомним, что плутония (^{239}Pu) тоже не было на Земле. Однако теперь ^{239}Pu является одним из самых распространенных ядерных топлив для атомных реакторов. Оказывается, тритий можно получать из щелочного металла лития (Li) путем бомбардировки его атомных ядер быстрыми нейтронами, образующимися, в частности, в термоядерной реакции слияния ядер D и T. Можно даже вместо трития помещать в термоядерный реактор «тритиевое сырье» — литий. В процессе работы реактора тритий в нужных количествах будет воспроизводиться из лития.

Что касается ресурса ядерного топлива для термоядерной дейтерий-тритиевой реакции (или, как иногда ее именуют, D+T-реакции), то в конце концов дело сводится к запасам лития. Действительно, ресурс дейтерия на Земле очень велик. При использовании дейтерия, содержащегося в воде морей и океанов (а получение дейтерия из воды рассматривается как дело несложное и экономически вполне оправданное), его запасы по энергетическому эквиваленту во много миллионов раз превышают ресурсы всех видов органического топлива, вместе взятых.

В отношении лития, даже с учетом того, что для получения трития «в дело идет» только изотоп лития (^6Li), содержащийся в природном литии в коли-

честве 7,4%, можно сказать, что его запасы достаточно велики. Они принимаются специалистами равными по энергетическому эквиваленту запасам урана на Земле.

Если удастся использовать термоядерную $D+D$ -реакцию (а не $D+T$ -реакцию), то энергетический ресурс можно рассматривать как практически неограниченный.

Следовательно, для того чтобы использовать термоядерную реакцию в мирных, полезных для людей целях, необходимо создать такой термоядерный реактор, в котором $D+T$ -реакция протекала бы спокойно и контролируется. Решить эту задачу очень трудно. Прежде всего нужно разогреть дейтерий-тритиевую плазму (обычно смесь является пятидесятипроцентной: половина дейтерия и половина трития) до температуры порядка 100 млн. градусов и длительно удерживать ее в этом состоянии.

В Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова под руководством Л. А. Арцимовича были разработаны установки типа Токамак. Название «Токамак» произошло от сокращения слов «тороидальная камера с магнитным полем». В этой установке нагревание плазмы до столь высокой температуры достигается за счет протекания через плазму электрического тока очень большой силы, порядка сотен тысяч ампер. Этот огромный ток возбуждается внешним индуктором. Вследствие электрического сопротивления плазмы образуется «джоулево» тепло, за счет которого происходит нагрев плазмы.

Еще более сложной задачей является сохранение (удержание) горячей плазмы. Не может быть и речи, конечно, о соприкосновении плазмы со стенкой — на свете нет такого материала, который остался бы цел (не испарился бы) после такого соприкосновения. В Токамаках удержание плазмы производится с помощью магнитного поля. Решающим является то,

что плазму составляют частицы, имеющие электрический заряд, — ядра атомов и электроны, на которые можно воздействовать магнитным полем.

Высокотемпературная плазма в Токамаке помещается в сосуде, который имеет форму кольца, схож с баранкой или спасательным кругом. Такое геометрическое тело называется тором. С помощью магнитной системы, размещенной вовне тора, создается сильное магнитное поле, интенсивность которого возрастает по мере удаления от оси кольцевого канала тора. Плазма отжимается магнитным полем к оси канала и не соприкасается с его стенками. Именно в этом и заключается простая, но всегда восхищающая тех, кто с ней знакомится, идея Токамака.

Для того чтобы термоядерная реакция могла протекать с большим выделением энергии, требуется еще иметь необходимую концентрацию ядер дейтерия и трития в единице объема (иначе говоря, плотность плазмы), а также достаточное время удержания плазмы. Эти две величины взаимосвязаны: чем выше концентрация ядер атомов, тем меньше необходимое время удержания, и наоборот. Численно эта зависимость выражается критерием Лоусона: для каждой термоядерной реакции и температуры плазмы имеется минимальное необходимое значение произведения концентрации ядер и времени удержания плазмы. Для $D+T$ -реакции и температуры 100 млн. градусов критерий Лоусона равен $3 \cdot 10^{14}$. Это значит, что при концентрации ядер атомов, равной 10^{14} $1/\text{см}^3$, время удержания должно быть, во всяком случае, не меньше секунды.

Как же обстоит дело в настоящее время с достижением необходимых значений температуры плазмы, концентрации ядер атомов и времени удержания?

Необходимая для $D+T$ -реакции температура, равная 100 млн. градусов, пока еще не достигнута. Удалось, правда, подойти к ней довольно близко.

Возможно, что для достижения требуемой температуры окажется целесообразным вспыскивать в плазму разогнанные в ускорителе элементарные частицы высокой энергии.

В соответствии с критерием Лоусона для D+T-реакции при уже достигнутой плотности плазмы 10^{14} 1/см³ и еще не достигнутой температуре 100 млн. градусов нужно время удержания более секунды. Пока еще оно менее десятой доли секунды.

Получение необходимой температуры и времени удержания плазмы в большой мере зависит от размеров реактора. Снова (в который уже раз!) приходится сталкиваться с геометрическим фактором: отношением поверхности объекта к его объему. Оказывается, что из камеры Токамака, в которой заключена плазма, несмотря на магнитное поле, все-таки происходит утечка частиц (относительная, выраженная, например, в процентах) так же, как утечка нейтронов из активной зоны атомного реактора; она становится тем меньше, чем больше объем камеры Токамака, т. е. чем меньше отношение величины поверхности камеры к ее объему. Этот вывод проверен практикой.

Следовательно, способ увеличения времени удержания плазмы Токамака найден! Это — увеличение размеров установки. Можно предполагать, что трудные задачи — повышение температуры и времени удержания плазмы — будут решены. В этом направлении ведется большая работа специалистами Советского Союза, США, Японии, Франции и других стран.

По-видимому, первыми войдут в практику гибридные ядерно-термоядерные реакторы. Энергия, образующаяся в результате термоядерной реакции, воспринимается примерно на 80% рождающимися в реакции нейтронами и на 20% ядрами атомов гелия (α -частицами), также рождающимися в результате слияния ядер дейтерия и трития. Нейтроны, не имеющие электрического заряда, а потому не подвер-

гающиеся действию электромагнитного поля, свободно выходят из плазмы и попадают на окружающую ее оболочку, именуемую бланкетом (от английского слова blanket — «одеяло»).

В гибридном ядерно-термоядерном реакторе бланкет должен содержать исходное ядерное топливо («атомное сырье»), ^{238}U или ^{232}Th , под действием очень быстрых нейтронов, излучаемых плазмой, оно преобразуется в ^{239}Pu или ^{233}U , атомные ядра которых обладают свойством самопроизвольного деления. В бланкете также должны быть каналы с циркулирующим по ним теплоносителем, которому передается тепло, образующееся в результате деления ядер плутония ^{239}Pu или урана ^{233}U . Тепло, воспринятое теплоносителем, используется, например, в паросиловой установке, для производства электроэнергии.

Таким образом, в гибридном ядерно-термоядерном реакторе термоядерная D+T-реакция используется как источник нейтронов, а сам реактор «исполняет обязанности» атомного реактора на быстрых нейтронах (реактора-размножителя). Другими словами, с помощью гибридного реактора будет производиться электроэнергия и осуществляться выработка ядерного топлива ^{239}Pu или ^{233}U . По мнению специалистов, к параметрам термоядерной реакции, используемой в гибридном реакторе, предъявляются «льготные» требования. Критерий Лоусона (произведение двух величин: концентрации ядер атомов плазмы и времени удержания плазмы), например, может быть намного меньше.

Хотя метод удержания высокотемпературной плазмы с помощью магнитного поля (метод Токамаков) в настоящее время наиболее разработан, он не является единственным. Многие ученые считают, что для проведения управляемой термоядерной реакции большие перспективы имеет также способ микровзрывов.

Из смеси дейтерия с тритием изготавливаются маленькие твердые шарики диаметром около 1—2 мм. Такой шарик облучается одновременно с разных сторон очень мощными лазерными или электронными лучами. Время облучения дейтерий-тритиевого шарика должно быть очень малым, порядка миллиардной доли секунды. За время воздействия на шарик лучей очень высокой энергии шарик не должен испариться полностью. Необходимо, чтобы испарились только его внешние поверхностные слои. В этом случае образовавшаяся дейтерий-тритиевая плазма будет не только разлетаться в разные стороны, но и сжимать неиспарившуюся центральную часть шарика. В результате сильного сжатия центральной части шарика (в сотни и даже тысячи раз) и одновременного ее нагревания возникает термоядерная реакция. Если же длительность облучения шарика будет большей, то шарик, часто именуемый мишенью, испарится полностью и термоядерная реакция не возникнет.

Разумеется, для возникновения термоядерной реакции тоже должны выполняться условия, определяемые критерием Лоусона. Следовательно, для возникновения D+T-реакции произведение плотности плазмы (концентрации ядер атомов дейтерия и трития) и времени удержания должно быть не менее определенной величины, зависящей от температуры и определяемой критерием Лоусона. В рассматриваемом случае по сравнению с Токамаками плотность плазмы намного больше (мишень — твердое тело, подвергающееся снаружи высокому давлению), а время удержания гораздо короче (время облучения мишени — миллиардная доля секунды).

Итак, термоядерная реакция в данном случае происходит в непрерывно следующих один за другим взрывах дейтерий-тритиевых шариков-мишеней. Поэтому описанный метод назван методом микровзрывов (или импульсным). В импульсном методе нет

необходимости в магнитной изоляции плазмы — время протекания термоядерной реакции настолько коротко, что реакция успевает завершиться до того, как плазма остынет.

При использовании метода микровзрывов для осуществления управляемой термоядерной реакции приходится также сталкиваться с очень сложными, требующими решения задачами. Назовем некоторые из них.

Так как облучение дейтерий-тритиевого шарика диаметром 1—2 мм должно производиться со всех сторон равномерно очень короткое время, то, по-видимому, потребуется не менее 8 лазерных или электронных лучей, направленных на шарик. Лучи должны вспыхнуть одновременно, а время их свечения не должно превышать нескольких миллиардных долей секунды. Как показывают расчеты, суммарная энергия, передаваемая шарiku-мишени одновременно воздействующими на него лучами, должна составлять не менее 100 кДж. Время же воздействия очень мало — миллиардные доли секунды, или наносекунды. В итоге получается, что потребная (в течение всего лишь нескольких наносекунд) мощность составляет около 100 млрд. кВт. Огромная цифра. Сделать накопитель энергии, который в течение очень короткого времени создавал бы такую огромную мощность, тоже нелегко. Тем более что облучение мишеней должно следовать одно за другим. Существуют и другие сложные задачи, на которых мы здесь останавливаться не будем.

Использование управляемой термоядерной реакции в энергетике — дело очень важное, нужное для экономики. Но задача до сих пор остается до конца не решенной. Необходимо продолжать работу.

Солнечная энергия. К возобновляемым источникам энергии, т. е. к тем, ресурсы которых не умень-



шаются в зависимости от деятельности человека, относятся: солнечная энергия, гидроэнергия, энергия ветра, энергия морских приливов и волн. Все они солнечного происхождения (правда, морские приливы происходят под влиянием как солнечного, так и лунного притяжения). Обычно к возобновляемым источникам энергии относят также глубинное тепло Земли — геотермальную энергию, происхождение которой наука объясняет теплотой, образовавшейся в недрах Земли в результате распада радиоактивных элементов, химических реакций и некоторых других процессов. Солнечная же радиация проникает в глубь Земли на очень малую глубину. Геотермальную энергию относят обычно к возобновляемой, вероятно, потому, что ресурсы ее велики, практически неисчерпаемы. Мы тоже будем следовать этой традиции.

Самый большой источник возобновляемой энергии — солнечная радиация. Полная мощность излучения Солнца выражается огромной цифрой — $4 \cdot 10^{26}$ Вт, или $4 \cdot 10^{14}$ млрд. кВт. Эта цифра так велика, что трудно выбрать для сопоставления с ней какую-либо подходящую величину, привычную для нас в наших земных масштабах. Даже вблизи Земли, т. е. на расстоянии около 150 млн. км от Солнца, на каждый квадратный метр поверхности, расположенной перпендикулярно солнечным лучам, приходится 1,4 кВт лучистой энергии.

Зная поперечное сечение Земли, равное примерно $127,6 \cdot 10^6$ км² (средний радиус Земли равен 6370 км), легко подсчитать полную мощность солнечной радиации, поступающей на Землю: примерно $178,6 \cdot 10^{12}$ кВт. Следовательно, в течение года на Землю в виде лучистой энергии передается около $1,56 \cdot 10^{18}$ кВт · ч.

Не так давно опубликована интересная статья¹,

¹ Ланге В, Ланге Т. Об удельной мощности человека и Солнца. — Квант, 1981, № 4, с. 9.

авторы которой сравнивают удельную мощность человека и Солнца и получают на первый взгляд удивительные результаты. Они оценивают мощность человека величиной около 140 Вт. Такая же цифра уже называлась нами. Мощность Солнца только что была определена. Она составляет $4 \cdot 10^{25}$ кВт. Следовательно, мощность Солнца больше мощности человека в $3 \cdot 10^{15}$ млрд. раз (в $3 \cdot 10^{24}$ раз).

Совсем другой результат получится, если сравнить удельные мощности человека и Солнца, т. е. мощности, отнесенные к единице массы. Масса Солнца принимается близкой к $2 \cdot 10^{30}$ кг, а массу человека оценим в 80 кг. Тогда удельная мощность Солнца окажется равной $4 \cdot 10^{23}$ кВт: $2 \cdot 10^{30}$ кг $= 2 \cdot 10^7$ кВт/кг, а мощность человека — 0,14 кВт: 80 кг $= 1,75 \cdot 10^{-3}$ кВт/кг. Получается, что удельная мощность человека почти в 10 тыс. раз больше удельной мощности Солнца. Ключ к объяснению этого кажущегося парадоксальным результата кроется снова в геометрическом факторе: отношении поверхности тела к его объему.

На 1 м^2 поверхности, расположенной вблизи Земли перпендикулярно солнечным лучам, приходится 1,4 кВт солнечной радиации, а на 1 м^2 поверхности Земли (сферы Земли) в среднем одна четверть этой величины¹, т. е. 0,35 кВт. Однако необходимо учитывать, что больше половины энергии радиации Солнца не доходит непосредственно до поверхности Земли (суши и океана), а отражается ее атмосферой. Считается, что на 1 м^2 суши и океана Земли приходится в среднем около 0,16 кВт солнечной радиации. Это все еще огромная цифра. Для всей поверхности Земли она составляет величину, близкую к 10^{14} кВт, т. е.

¹ Одна четверть получается потому, что отношение площади поперечного сечения Земли πR^2 к площади ее сферы $4\pi R^2$ равняется 0,25.

10^5 млрд. кВт. Такой мощности (и даже в тысячи раз меньшей) достаточно человечеству.

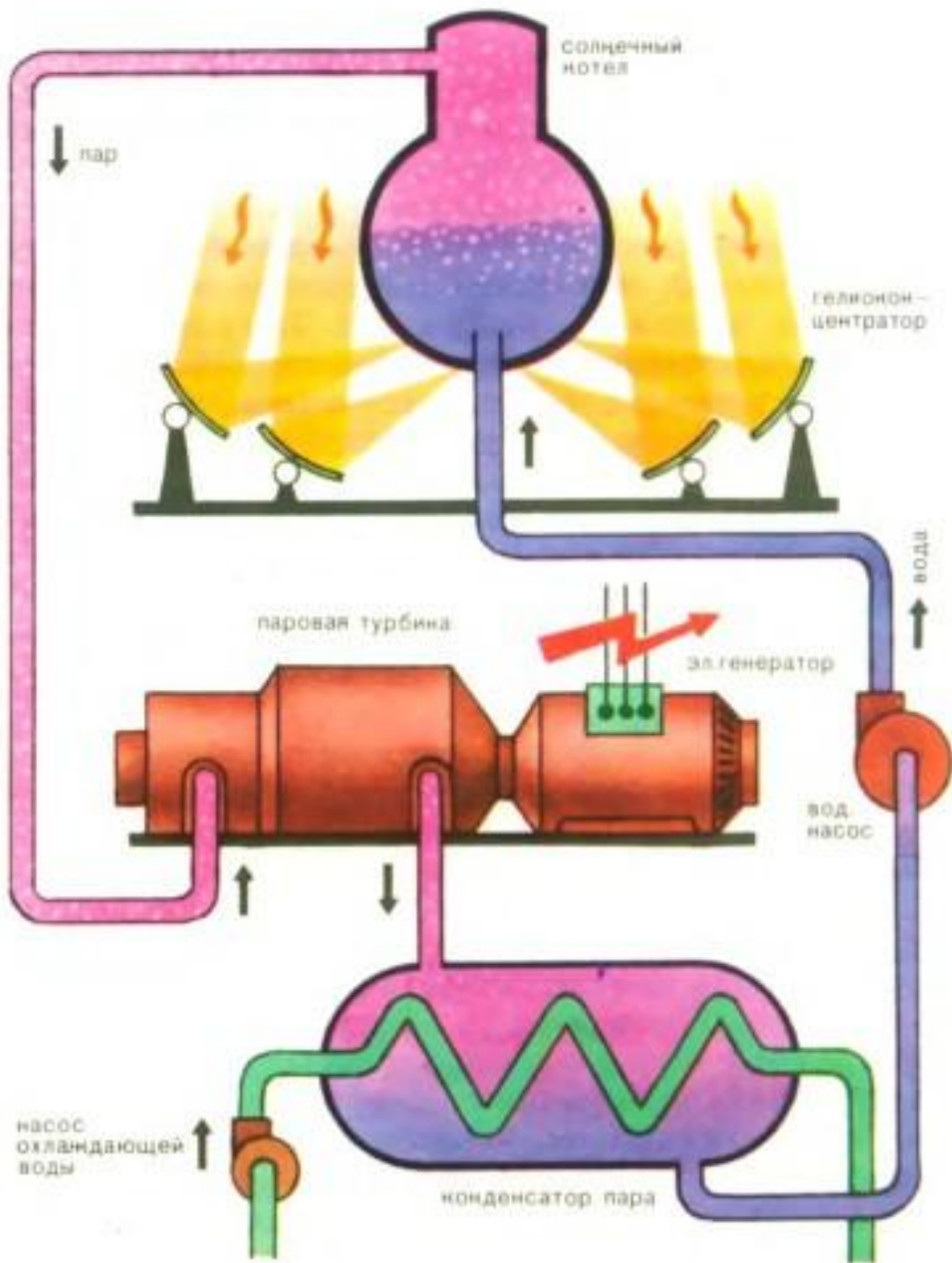
Как же в настоящее время используется солнечная энергия?

Необходимо различать использование солнечной энергии для производства электрической энергии и для получения тепла, прежде всего для отопления. В первом случае еще не достигнуто существенного успеха. Работы ведутся главным образом по двум направлениям: использование полупроводниковых фотоэлектротрансформаторов (ФЭП), способных превращать лучистую энергию непосредственно в электрическую, и создание паросиловых установок, в которых обычный паровой котел, работающий, например, на угле, заменяется «солнечным» паровым котлом.

Главными препятствиями в применении обоих способов преобразования солнечной энергии в электрическую являются очень большая рассеянность солнечной энергии на Земле, неравномерность поступающей на земную поверхность солнечной радиации в течение суток и пока еще очень высокая расчетная стоимость сооружения такого рода электроустановок. При использовании ФЭП стоимость (величина капитальных вложений) 1 кВт установленной мощности в настоящее время порядка 10 тыс. руб. и даже выше. Вспомним, что стоимость 1 кВт установленной мощности для атомной электростанции в среднем составляет 370 руб., для гидроэлектростанций — 350 и для тепловых электростанций — 200 руб. Правда, в приведенных цифрах не учитываются необходимые капитальные вложения в промышленность органического или ядерного топлива.

Такая высокая стоимость солнечных энергетических установок (или, как их часто называют, гелиоустановок) с использованием ФЭП получается вследствие того, что полупроводниковые фотоэлектротрансформаторы, главным материалом для которых

Принципиальная схема
солнечной паросиловой
установки.



обычно служит очень чистый кремний или германий, пока еще дороги. Так что основной задачей, которую предстоит решить, является существенное (примерно в 20 раз) снижение стоимости фотоэлектрических преобразователей энергии. После этого солнечные электростанции могли бы получить широкое применение. Необходимо будет приспособиться к неравномерности излучения Солнца как в течение суток, так и в зависимости от времени года.

Несмотря на высокую стоимость ФЭП, гелиоустановки этого типа уже успешно и широко используются в космических аппаратах в качестве источников электроэнергии для бортовых нужд. Так как требуется небольшая мощность, то стоимость ФЭП в этом случае имеет гораздо меньшее значение. Зато надежность работы такого рода гелиоустановок, а также их вес и габариты вполне приемлемы.

Теперь мы обсудим вопрос о гелиоустановках, предназначенных для преобразования энергии излучения Солнца в электрическую «классическим» методом, с применением парового котла (в данном случае — солнечного), турбогенератора, конденсатора и водяного насоса.

На рисунке представлена принципиальная схема солнечной паросиловой установки. Для фокусировки солнечных лучей используется так называемый гелиоконцентратор, который представляет собой совокупность зеркал или линз. Назначение гелиоконцентратора — собрать (сфокусировать) солнечные лучи, в результате чего повышается плотность солнечной радиации и температура обогреваемого объекта. Аналогичное явление можно наблюдать, если заставить вспыхнуть спичку, помещенную в фокусе линзы, на которую падают солнечные лучи. Любопытно отметить, что в последнем случае линзу можно сделать из льда — она при этом не расплавится. Это свидетельствует об особом характере передачи тепла

излучением, имеющим электромагнитный волновой характер.

Однако с помощью солнечных лучей и линзы для любого другого гелиоконцентратора никак нельзя достигнуть температуры, более высокой, чем температура поверхности Солнца, т. е. примерно 5800 К¹. Объясняется это тем, что обогреваемый объект не только воспринимает излучение, но и излучает сам, причем тем в большей мере, чем выше становится его температура. Если бы температура обогреваемого объекта достигла температуры поверхности Солнца, то дальнейшее его нагревание стало бы невозможным: объект получал бы столько же тепла, сколько и излучал.

Нагревание любого тела до температуры, более высокой, чем температура источника излучения, противоречило бы второму закону термодинамики и поэтому неосуществимо.

Принципиальная схема солнечной паросиловой установки отличается от схемы ТЭС (см. рис. на с. 15) только лишь устройством котла, да еще тем, что в первой из них имеется дополнительный элемент — гелиоконцентратор. Сооружение солнечной паросиловой установки не встречает больших трудностей, оно вполне осуществимо. Однако широкому использованию такого рода установок по-прежнему препятствует высокая стоимость их сооружения (по грубой оценке, примерно в 5 раз дешевле, чем для солнечной электростанции с фотоэлектропреобразователями, но еще в 5—10 раз дороже, чем для ТЭС). Поэтому чтобы эффективно и широко использовать солнечную энергию для производства электрической энергии, т. е. для создания солнечных электростанций, необ-

¹ Температура поверхности Солнца гораздо ниже температуры его глубинных слоев, достигающей 10—15 млн. градусов К.

ходимо в первую очередь существенно снизить удельные капитальные вложения.

Что касается использования солнечной энергии для получения тепла, то достигнутые технико-экономические показатели дают основание для широкого строительства солнечных установок этого типа, особенно в районах с хорошей солнечной радиацией. По оценкам специалистов, гелиоустановки для получения тепла экономически рентабельны уже сегодня в зоне от 50° южной широты до 50° северной широты (см. рис. на с. 99).

Гелиоустановки для получения тепла могут быть устроены как с концентраторами солнечной энергии, так и без них. Если используется концентратор, то может быть достигнута более высокая температура теплоносителя (или любого другого нагреваемого объекта). Зато установка в этом случае стоит дороже. Без использования концентратора чаще всего делают отопительные гелиоустановки, солнечные опреснители воды, установки бытового назначения (например, душевые), установки для сушки фруктов.

В качестве примера рассмотрим солнечный опреснитель воды (см. рис.). Корпус опреснителя закрыт сверху стеклом. Для солнечных лучей, относящихся к видимой части спектра, стекло прозрачно — оно их не задерживает, а для обратного излучения (из опреснителя), лежащего в инфракрасной части спектра, стекло не прозрачно. Таким образом, стекло превращает опреснитель в ловушку солнечных лучей. В сосуд наливается вода повышенного соледержания, которую требуется опреснить. Вода испаряется за счет тепла солнечной радиации, а образовавшийся пар конденсируется на нижней (внутренней) поверхности стекла, имеющего близкую к окружающей среде температуру (вспомним сделанную из льда линзу). Так как стекло расположено наклонно, то обессоленный конденсат через воронку сливается в



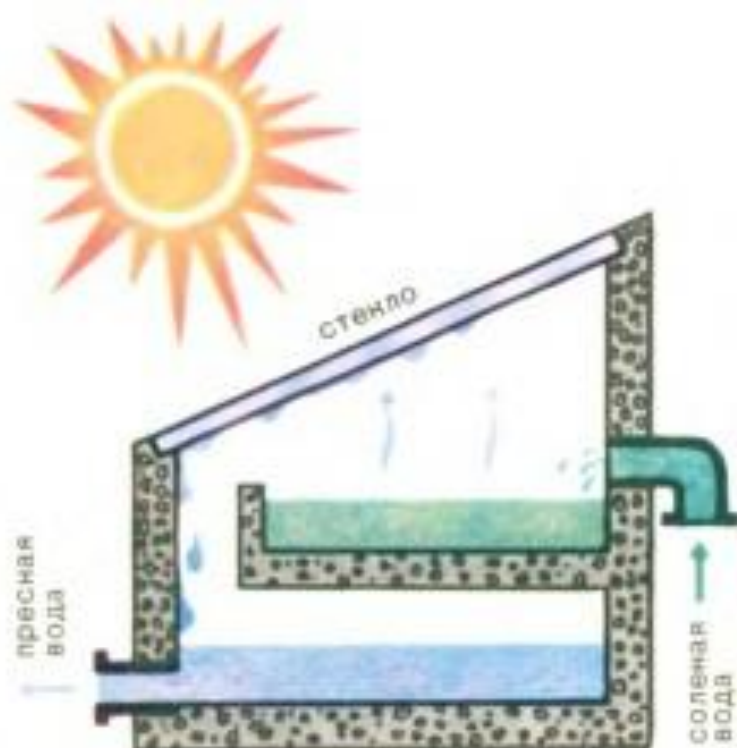
Зона наиболее выгодного использования солнечной энергии.

нижний сосуд, откуда он может быть получен через трубку.

Не следует забывать, что в отопительных и некоторых других гелиоустановках, учитывая зависимость солнечного излучения от времени суток и погоды, необходимо иметь аккумуляторы тепла. Их роль могут играть баки с водой, нагретой за счет радиации Солнца. Однако полностью солнечная отопительная установка заменить обычную отопительную установку в большинстве случаев не может. Тем не менее использовать отопительную гелиоустановку выгодно, так как удастся сэкономить до 50—60% топлива.

Некоторые солнечные установки, предназначенные для получения тепла более высокой температуры, должны оснащаться концентраторами радиации Солнца. К ним в первую очередь относятся солнечные печи для плавки металлов (когда требуется получить очень чистый металл). Достигаемая в фокусе концентратора температура соизмерима с температурой поверхности Солнца (на солнечной печи, построенной во Франции, в Пиренеях, удается получить температуру свыше 3000°C).

Солнечный опреснитель воды.



Геотермальная энергия. Глубинные слои Земли, по современным представлениям, сильно разогреты (ядро Земли, по-видимому, имеет температуру до 5000°C), и поэтому их «твердость» относительна. «Твердая» сфера Земли, или, как ее часто называют, «твердая» Земля, состоит из трех сфер: земной коры, имеющей толщину от 7 (под океанами) до 130 км; мантии, простирающейся до глубины около 2900 км; земного ядра (см. рис.). Радиус «твердой» сферы Земли — около 6371 км.

Установлено, что с увеличением глубины земных слоев температура повышается. Так, на глубине 50 км она составляет около $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$, на глубине 500 км — около $1500\text{--}2000^{\circ}\text{C}$, на глубине 1000 км — примерно $1700\text{--}2500^{\circ}\text{C}$, на глубине 2900 км (граница между мантией и ядром) — порядка $2000\text{--}4700^{\circ}\text{C}$ и, наконец, в центре Земли, т. е. на глубине 6371 км, — $2200\text{--}5000^{\circ}\text{C}$.

Повышение температуры с ростом глубины объясняется существованием теплового потока, направленного от земного ядра к периферии «твердой» Земли, главная причина существования которого —

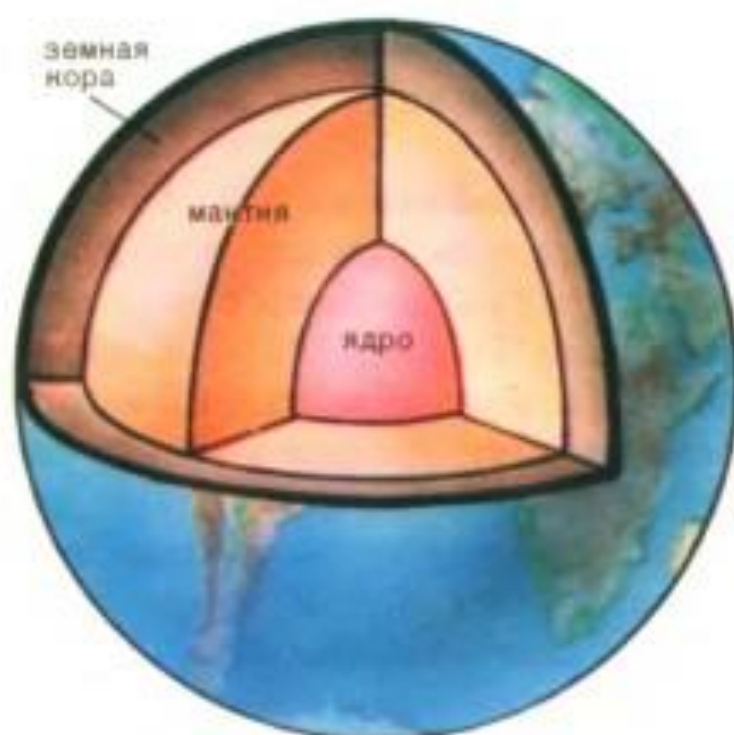
продолжающееся выделение тепла в результате распада содержащихся в Земле радиоактивных элементов.

Современная наука объясняет историю Земли так. Образовалась Земля из роя метеоритных тел, причем температура ее недр сразу же после образования составляла $700—2000^{\circ}\text{C}$. Скорее всего, Земля никогда не была расплавленной. Впрочем, в отношении ядра Земли точки зрения ученых различны. В дальнейшем главным образом за счет распада радиоактивных элементов глубинные слои Земли начали нагреваться. Образовался поток тепла из недр «твердой» Земли к ее поверхности. Предполагается, что глубинные слои Земли продолжают медленно нагреваться, на несколько градусов за 10 млн. лет, в то время как близкие к поверхности слои Земли еще более медленно охлаждаются.

Мощность теплового потока от центра Земли к ее периферии примерно в 4000 раз меньше мощности солнечной радиации, поступающей на Землю, но почти в 30 раз больше мощности всех электростанций мира. Тепло, поступающее из недр на поверхность Земли, является рассеянным (в среднем $0,05\text{ Вт}$ на квадратный метр) и на климат Земли никак не влияет. Тепло, накопленное в ядре и мантии Земли, огромно, и, естественно, возникает мысль о его использовании. Каковы ресурсы геотермальной энергии? Определяя запас геотермальной энергии, обычно имеют в виду количество тепла, которое может быть получено при охлаждении до температуры поверхности Земли на глубине не более $5—10\text{ км}$. Конечно, вычисленный таким образом запас геотермальной энергии является условным.

Если ограничить предельную глубину 5 км , то запас геотермальной энергии составит около $4 \cdot 10^{18}$ кДж, или $1,4 \cdot 10^{14}$ туг. Вычисленный нами запас геотермальной энергии имеет тот же порядок величи-

•Твердая• сфера Земли.



ны, что и ресурс всех видов органического топлива на Земле, вместе взятых. Не будем при этом забывать, что определенный нами ресурс геотермальной энергии к тому же является практически возобновляемым. Как же в настоящее время используется геотермальная энергия?

Геотермальное тепло — это тепло, содержащееся в подземной горячей воде и водяном паре, и тепло нагретых сухих пород. Температура воды в большинстве случаев невелика — меньше 100°C , а температура горячего источника тепла, как помнит читатель, — важнейший показатель, по которому судят о целесообразности и эффективности его использования. Запасы горячей воды и тем более пара относительно невелики — большая часть геотермальной энергии сосредоточена в сухих породах. Кроме того, нагретая вода и пар сравнительно редко выходят на поверхность Земли, образуя гейзеры и горячие источники. В большинстве случаев для вывода их наружу необходимо бурить скважины. Тем не менее до сего времени геотермальная энергия используется почти исключительно в виде нагретой воды и пара, самопроиз-

вольно выходящих на поверхность, в основном для нагревания.

Что касается тепла нагретых сухих пород, то до настоящего времени для их использования не проводилось каких-либо практических работ. Объясняется это большими трудностями. По-видимому, единственным реально осуществимым способом (по крайней мере, так представляется в настоящее время) является бурение не менее двух достаточно глубоких и удаленных друг от друга скважин, в одну из которых должна закачиваться холодная вода, а из другой эта же, но уже нагретая вода должна забираться. При этом имеется в виду, что вода фильтруется через нагретую породу от первой скважины ко второй.

Но как обеспечить такую структуру нагретой породы, протекая через которую по многочисленным каналам малого диаметра (иначе поверхность теплообмена будет недостаточной и вода нагреется очень слабо) вода нагрелась бы до минимально необходимой температуры? Сколько может стоить, хотя бы ориентировочно, проведение таких работ? На эти и другие сложные вопросы достаточно определенных ответов пока еще нет.

Итак, проблема геотермальной энергии, особенно в части использования ее для удовлетворения потребителей тепла, является актуальной.

Достигнутый уже сегодня научно-технический уровень в этой области дает все основания для широкого использования тепла горячей воды и пара, самопроизвольно выходящих на поверхность Земли, для отопления теплиц, жилых и других зданий.

Другие важные вопросы использования геотермальной энергии (бурение скважин для вывода наружу горячей воды и пара, использование тепла нагретых глубинных сухих пород, электрической энергии) требуют для их решения проведения научно-исследовательских и технико-экономических работ.

Ветер и другие возобновляемые источники энергии.

В физике существует понятие абсолютно черного тела. Так называется тело, которое поглощает весь падающий на него поток излучения. На самом деле абсолютно черных тел не существует, но все реальные тела (серые тела) могут быть сопоставлены с гипотетическим абсолютно черным телом при помощи так называемого коэффициента черноты (отношение поглощательных способностей сопоставляемого и абсолютно черного тел). Некоторые реальные тела, например сажа, близки по свойствам к абсолютно черному телу.

Различные участки поверхности Земли имеют неодинаковый коэффициент черноты и поэтому нагреваются за счет солнечной радиации до различной температуры. Неравномерный нагрев имеют также и нижние слои атмосферы. В результате давление воздуха на одной и той же высоте неодинаково, имеется горизонтальное распределение давления. Это приводит к перемещению больших масс воздуха, возникает ветер.

Скорость ветра и его направление в большей или меньшей мере не одинаковы. Ветер, имеющий скорость 5—8 м/с, считается умеренным, а больше 14 м/с — сильным, скорость 20—25 м/с — штормом, а свыше 30 м/с — ураганом. В некоторых случаях наблюдаются порывы ветра порядка 100 м/с.

Около 2% поступающей на Землю солнечной радиации превращается в энергию ветра. Ветер — очень большой возобновляемый источник энергии. Его энергию можно использовать почти во всех районах Земли. Трудность, однако, заключается в очень большой рассеянности энергии ветра и в непостоянстве ветра.

В настоящее время многие специалисты Советского Союза в этой области считают, что использование энергии ветра является делом перспективным. Существует два основных направления: сооружение отно-

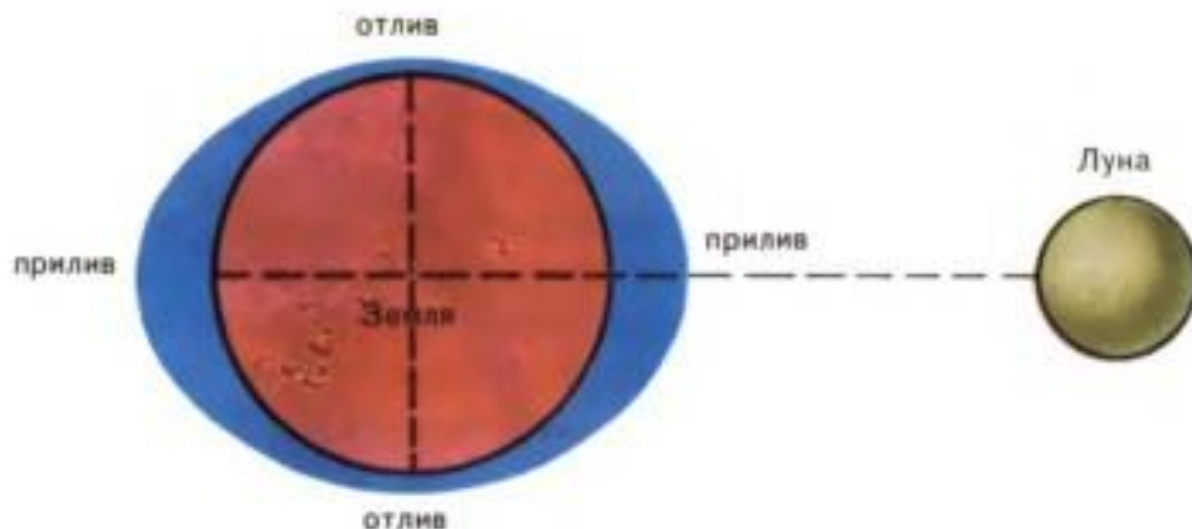
Ветроагрегат.

сительно небольших установок (мощностью до 15 кВт, а в большинстве случаев — меньшей мощности), предназначенных главным образом для подъема и перекачки воды, а также для подзарядки электрических аккумуляторов; разработка и создание более мощных ветродвигателей для производства электроэнергии.

Ветроустановки, предназначенные в первую очередь для отдаленных сельскохозяйственных ферм, выпускаются промышленностью СССР; в настоящее время в эксплуатации их насчитывается свыше 10 тыс. На рисунке показана одна из них. Работа по созданию мощных ветроэнергетических установок для производства электрической энергии, проводимая в СССР, США, Франции, ФРГ и некоторых других странах, находится еще на стадии опытов.

К возобновляемым источникам энергии относится также энергия морских приливов и волн. Морские приливы и отливы представляют собой, как известно, периодические колебания уровня моря, вызываемые силами притяжения Луны (главным образом) и Солнца.





В соответствии с теорией И. Ньютона (который для упрощения допускал, что вся поверхность Земли покрыта водой) под действием сил притяжения Луны поверхность гидросферы превращается из сферической в эллипсоидальную с большой осью, направленной на Луну (см. рис.). За счет вращения Земли вокруг своей оси приливы имеют периодический характер — за сутки 2 раза происходит прилив и 2 раза отлив. Максимальные колебания уровня моря должны достигать, по И. Ньютону, всего 1 м.

На самом же деле вследствие того, что океан покрывает не всю Землю, а очертания береговой линии имеют часто причудливый характер, величина и характер приливов зависят не только от взаимного расположения Земли, Луны и Солнца, но и от географической широты, глубины моря и береговой линии. В некоторых местах у берегов изменение уровня моря достигает полутора десятков метров и даже более. Например, в некоторых пунктах береговой линии Ла-Манша наибольшая величина прилива составляет 15 м, в Пенжинской губе Охотского моря — 13 м, в некоторых точках побережья Белого моря — до 10 м, а в некоторых местах атлантического побережья



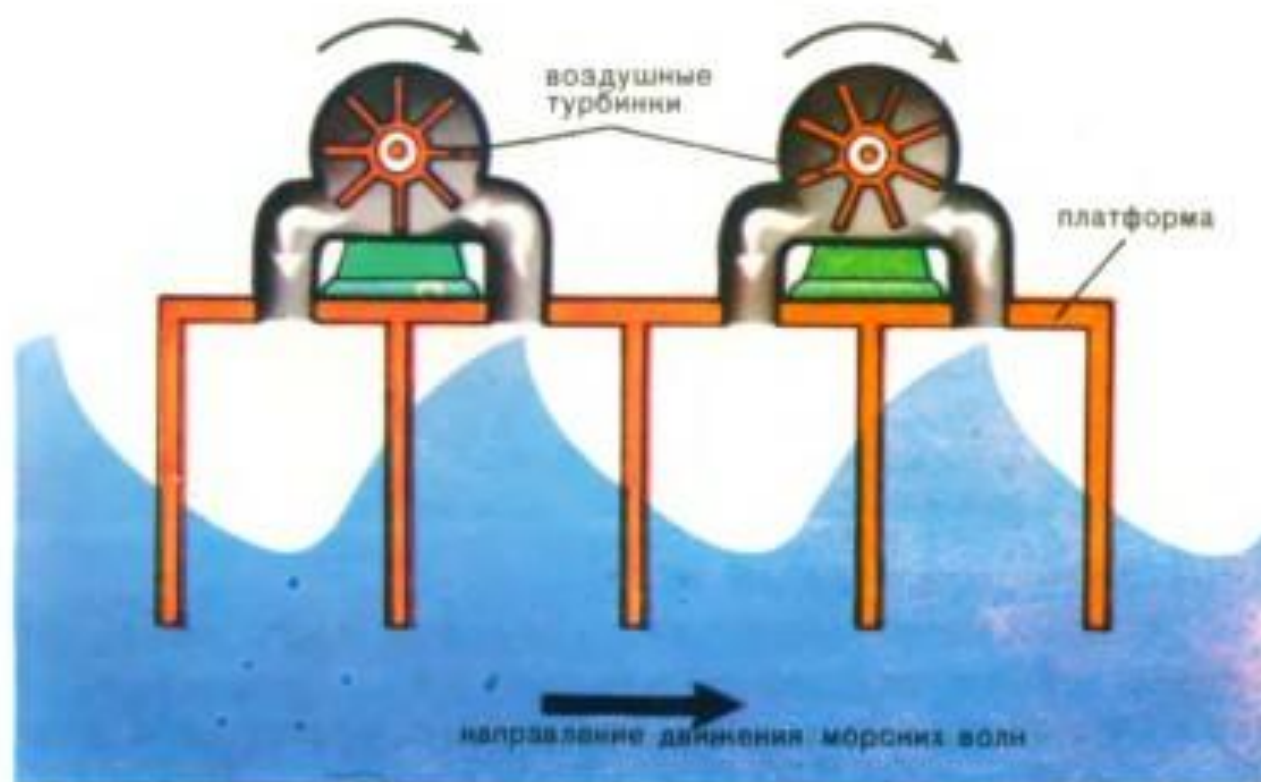
Канады — даже до 18 м.

До настоящего времени построены всего лишь две относительно крупные приливные электростанции (ПЭС): одна из них — в 1966 г. во Франции, на реке Ранс, мощностью 240 тыс. кВт и вторая — Кислогубская ПЭС — в 1968 г. в Советском Союзе, на побережье Баренцева моря, близ г. Мурманска, мощностью 800 кВт.

Устройство ПЭС в принципе простое (см. рис.). Прежде всего выбирается подходящее место для строительства электростанции с возможно большими приливами. На рисунке высота h представляет собой разность уровней моря во время прилива и отлива. Сооружается плотина, и образуется бассейн. Агрегат желательно иметь «обратимым», чтобы он мог работать как гидротурбогенератор при протекании воды в обе стороны, и при приливе и при отливе (на рисунке положение, соответствующее отливу). Не трудно догадаться, что гидротурбогенератору практически никогда не приходится работать при максимальном напоре.

Общая мощность приливов всех морей и океанов

Схема воздушного двигателя, использующего энергию морских волн.



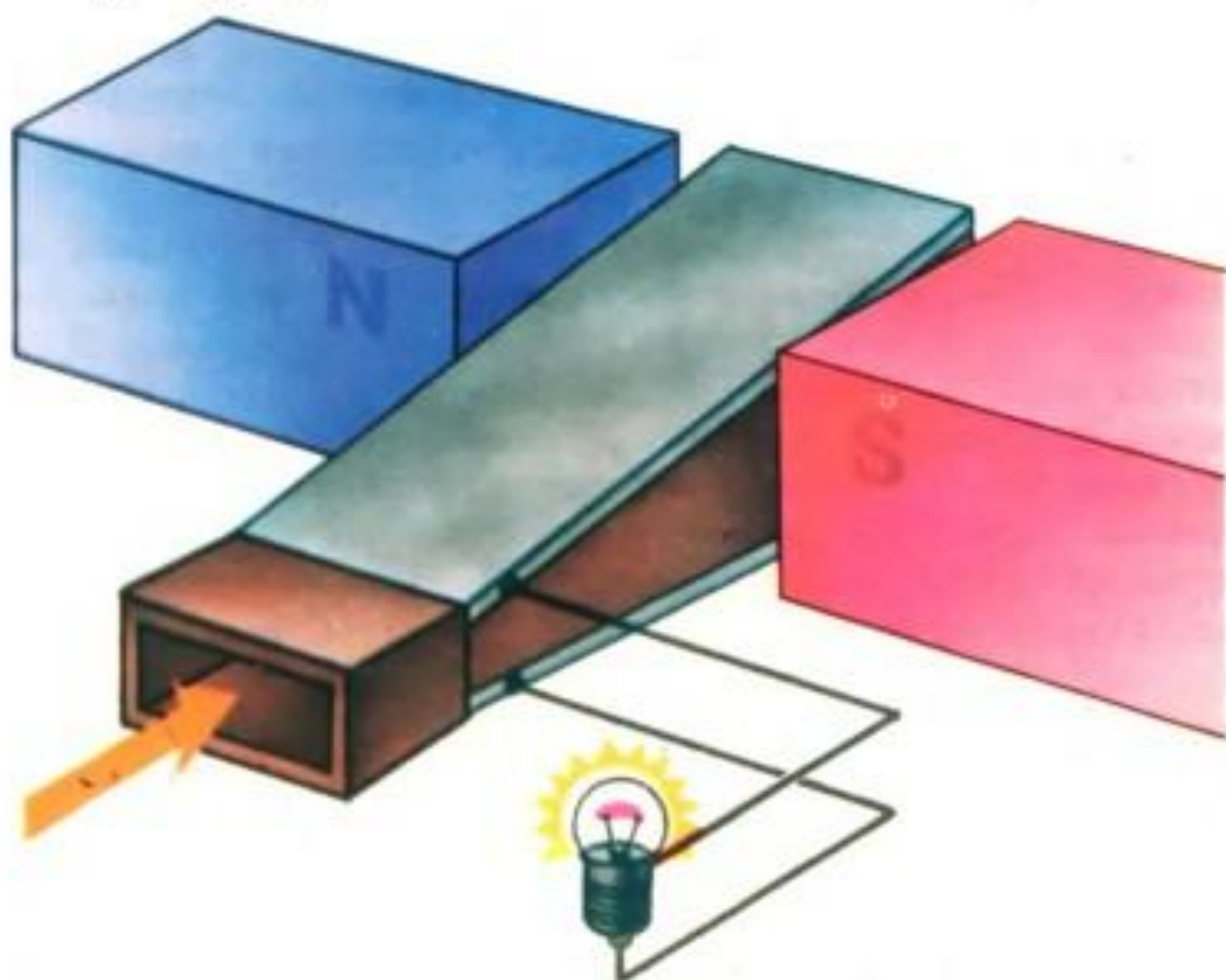
Земли оценивается в 3 млрд. кВт. Это большая цифра. Однако перспектива сколько-нибудь широкого строительства ПЭС, по-нашему мнению, является весьма сомнительной. Дело в том, что общее число пунктов, в которых сооружение ПЭС более или менее экономически оправдано, по-видимому, не превышает 30, а их суммарная мощность будет не выше 100 млн. кВт. Кроме того, расчетное число часов работы в год на номинальной мощности для ПЭС мало, а стоимость их сооружения значительно выше, чем ГЭС.

Очень кратко остановимся еще на одном возобновляемом источнике энергии — морских волнах. Морские волны порождаются ветром, их энергия определяется состоянием поверхности моря. Среднегодовая мощность морских волн довольно велика, она измеряется в большинстве случаев десятками киловатт на 1 м длины фронта волн, т. е. на 1 м на-

правления, перпендикулярного движению волны. Общепринятой в настоящее время является точка зрения, что энергию волн целесообразнее использовать в открытом море, а не у берега (не энергию прибоя), так как в последнем случае она снижается вследствие трения и обратной, в отношении движения волн, циркуляции воды.

Предлагаемые способы сводятся в основном к тому, чтобы использовать разность уровней воды на гребне волны и в промежутке между волнами. Для этого можно, например, поместить на поверхности моря достаточно большую, практически не колеблющуюся вместе с волнами платформу (необходимо, чтобы линейные размеры платформы существенно превосходили длину волн), имеющую форму перевернутого, открытого снизу ящика (см. рис.). Платформа разделена на открытые снизу, заполненные воздухом секции, играющие роль цилиндров воздушного двигателя. Волны, проходя под платформой, сжимают поочередно находящийся в секциях воздух. Когда данная секция находится над гребнем волны, объем находящегося в ней воздуха уменьшается, воздух сжимается, его давление растет. Когда же секция находится над междуволновой впадиной, давление воздуха снижается. Волна играет роль поршня. Следовательно, в секциях поочередно, по мере прохождения под ними волн, давление воздуха будет то больше, то меньше. Если теперь дать возможность воздуху перетекать из секции с большим давлением в секцию с меньшим давлением (направление перетекания воздуха будет, конечно, периодически изменяться в соответствии с изменением давления воздуха в секциях), а на пути воздушного потока установить соединенную с электрическим генератором воздушную турбинку, то это устройство будет служить для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию.

Преобразование
энергии
в МГД-генераторе.



Конечно, при штиле это устройство работать не будет. Устройства, принцип работы которых подобен описанному, применяются в Японии для питания электроэнергией плавающих буев.

Существуют также устройства, в которых преобразование энергии морских волн в электрическую энергию производится с помощью гидравлических турбин. Но все это только первые шаги.

Методы прямого преобразования энергии. Под этими методами понимается такое производство электрической энергии из тепловой, при котором число промежуточных ступеней преобразования энергии сокращается, процесс получения электроэнергии из

тепловой упрощается. Чаще всего исключается промежуточное превращение тепловой энергии в механическую. В более широком смысле слова под методом прямого преобразования энергии понимается получение электрической энергии не только из тепловой, но и из химической (в топливных элементах) и из энергии электромагнитного излучения (в фотоэлектропреобразователях).

Мы познакомимся с магнетогидродинамическим методом, являющимся наиболее разработанным для получения больших количеств электроэнергии. Существо МГД-метода преобразования тепловой энергии в электрическую состоит в следующем. В результате сжигания органического топлива (допустим, природного газа) образуются продукты сгорания. Необходимо, чтобы их температура была не ниже 2500°C . При этой температуре газ становится электропроводным, переходит в плазменное состояние. Это означает, что происходит ионизация газа: от молекул газа отрываются электроны. Плазма при такой относительно низкой температуре (не меньше 2500°C) ионизирована лишь частично: она состоит не только из продуктов ионизации — электрически заряженных свободных электронов и ионов (имеющих положительный заряд частиц, образующихся в результате потери молекулой электронов), но и «сохранившихся в целости», еще не подвергшихся ионизации молекул.

Чем выше температура, тем больше ионизация газа и, следовательно, его электропроводность. При температуре порядка 10 тыс. градусов любой газ ионизируется полностью — он состоит только из свободных электронов и ядер атомов.

Рассматривая термоядерные процессы, мы говорили о высокотемпературной плазме (ее температура измеряется многими миллионами градусов). Плазма же, используемая в МГД-генераторах и имею-

щая температуру, измеряемую тысячами градусов, именуется низкотемпературной.

Для того чтобы низкотемпературная плазма продуктов сгорания имела достаточную электропроводность при температуре около 2500°C , к ней необходимо добавить какое-нибудь легкоионизирующееся вещество (натрий, калий или цезий). Пары этих веществ ионизируются при более низкой температуре.

Плазма с небольшой добавкой легкоионизирующегося вещества при температуре, скажем, 2600°C (см. рис.) поступает в канал МГД-генератора и за счет уменьшения ее тепловой энергии разгоняется там до скорости, близкой к звуковой или даже более высокой. Протекая по каналу, электропроводная плазма пересекает силовые линии специально созданного магнитного поля, имеющего большую индукцию. Если направление движения потока перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, а электропроводность плазмы, скорость потока и индукция магнитного поля достаточно велики, то, в соответствии с законами электродинамики, в направлении, перпендикулярном и движению потока, и силовым линиям магнитного поля, от одной стенки канала к другой возникнет электрический ток, протекающий через плазму. Для этого, конечно, необходимо электроды, размещенные на противоположных стенках канала, замкнуть на внешнюю цепь.

Мы видим, что принцип работы МГД-генератора не отличается от принципа работы обычного электро-механического генератора. В обоих случаях электрический проводник пересекает силовые линии магнитного поля, в результате чего в проводнике генерируется электродвижущая сила. В электро-механическом генераторе проводником служит электропроводящий металл ротора, а в МГД-генераторе —

поток электропроводящей плазмы.

Взаимодействие электрического тока, протекающего через плазму, с магнитным потоком создает силу, тормозящую движение плазмы по каналу. Таким путем кинетическая энергия потока плазмы превращается в электрическую энергию.

В чем же привлекательная сторона МГД-генератора?

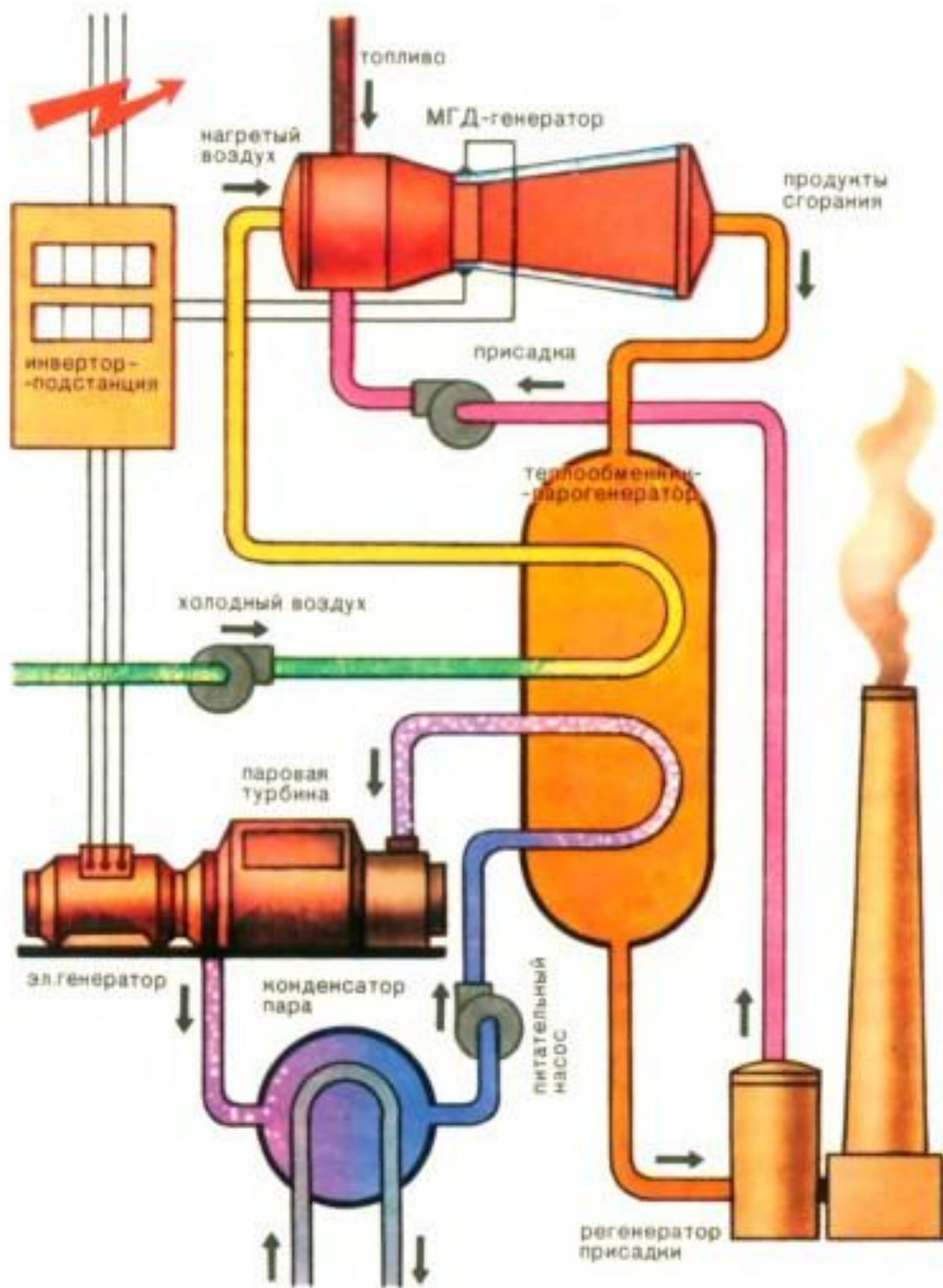
Как нам известно, для увеличения КПД теплового двигателя необходимо повышать начальную температуру рабочего тела. Но в тепловых двигателях ТЭС — паровых турбинах начальную температуру водяного пара не поднимают выше 540°C . Это объясняется тем, что наиболее ответственные элементы турбины (особенно рабочие лопатки) испытывают одновременное воздействие высокой температуры и большой механической нагрузки. В канале МГД-генератора вообще нет движущихся частей, и поэтому материал, из которого сделаны наиболее ответственные элементы конструкции, не испытывает сколько-нибудь значительных механических усилий. В этом состоит одно из самых важных преимуществ МГД-генератора.

Вы можете возразить, что не существует материала, способного выдержать температуру 2600°C . Не делает ли это идею МГД-генератора неосуществимой?

Действительно, такого материала не существует, высокотемпературные элементы конструкции приходится охлаждать (обычно водой). Но одно дело охлаждать неподвижные элементы конструкции, как в МГД-генераторе, и совсем другое дело — вращающиеся (да еще с очень большой скоростью), как в турбине.

На выходе из канала МГД-генератора продукты сгорания все еще имеют высокую температуру, обычно около 2000°C . При такой температуре

Схема
МГД-электростанции
открытого цикла.



плазма делается недостаточно электропроводной, и поэтому продолжение процесса в МГД-генераторе невыгодно. В то же время продукты сгорания на выходе из канала МГД-генератора обладают еще высокой температурой (более высокой, чем в топке котла), и их тепловую энергию, конечно, надо использовать. Проще всего решить эту задачу, сделав установку двухступенчатой (см. рис.)

В камеру сгорания подается топливо, легкоионизирующаяся присадка и нагретый окислитель (обычно обогащенный кислородом воздух). Продукты сгорания, имеющие температуру около 2600°C , поступают через сопло в канал МГД-генератора¹, а из канала (при температуре около 2000°C) — в парогенератор. Здесь за счет тепла, отдаваемого уходящими газами, происходит нагревание воды, образование и перегрев водяного пара. В парогенераторе или в отдельном воздухоподогревателе производится подогрев направляемого в камеру сгорания окислителя. Из парогенератора отводится (и затем используется вновь) легкоионизирующаяся присадка. Показанная на рисунке паросиловая часть схемы в принципе не отличается от изображенных схем ТЭС и АЭС.

Главным преимуществом МГД-электростанции является возможность получения высокого КПД, который, по-видимому, достигнет $50\text{—}60\%$ ² против 40% для лучших ТЭС. Большинство существующих и строящихся в настоящее время опытных и опытно-промышленных МГД-установок рассчитано для

¹ Канал на рисунке изображен схематично. Не показаны создающая магнитное поле магнитная система, токоотводящая система, охлаждение стенок канала.

² Столь широкий интервал значения КПД МГД-электростанции объясняется главным образом возможностью использования различных технических решений и достигнутой температурой подогрева окислителя (от 1500 до 2000°C).

работы на газовом топливе. Однако в дальнейшем наиболее перспективно, как и для других типов ТЭС, применение угля. Другое важное преимущество МГД-электростанций — их высокая маневренность, создаваемая возможностью полного выключения МГД-ступени.

Представленная на рисунке схема МГД-электростанции называется открытой потому, что рабочим телом МГД-генератора в этом случае являются продукты сгорания, которые после прохождения канала и парогенератора выбрасываются в атмосферу.

В работе по созданию мощных МГД-генераторов приходится сталкиваться со сложными научно-техническими вопросами. К их числу относится проблема материалов для МГД-каналов, в первую очередь для их горячих стенок и электродов. Конечно, можно было бы с помощью интенсивного охлаждения снизить температуру стенок и электродов до вполне приемлемой с точки зрения их длительной эксплуатации, но это привело бы к большой потере тепла с охлаждающей водой и к снижению КПД МГД-генератора, а также к снижению температуры пристенных и приэлектродных слоев плазмы, уменьшению их электропроводности и ухудшению работы генератора.

Задача заключается в том, чтобы создать такие материалы для горячих стенок и электродов, которые могли бы работать длительно и надежно при возможно более высокой температуре. Большие надежды возлагаются на двуокись циркония в качестве материала для электродов и на окислы металлов, в частности окись магния, для горячих стенок.

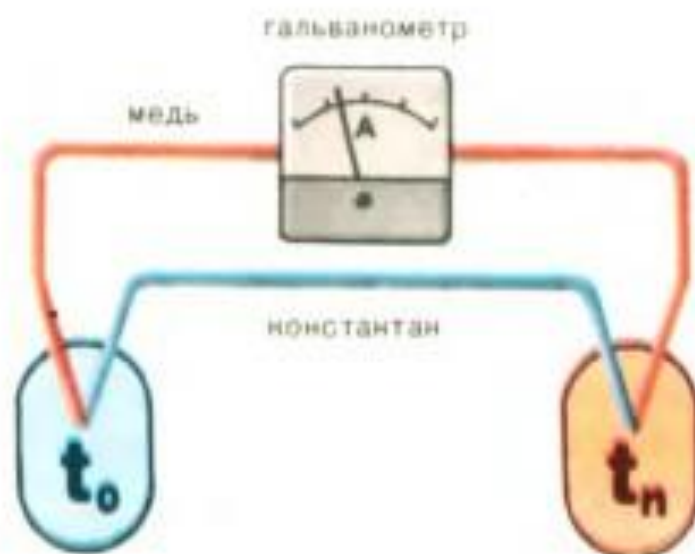
Не легким делом является создание магнитной системы, особенно при условии, что индукцию желательно иметь 5—6 тесла (50—60 тыс. гаусс), а длина

канала составляет около 20 м. Наиболее перспективной считается сверхпроводящая магнитная система, охлаждаемая жидким гелием.

Есть и другие сложные, требующие решения вопросы. В частности, необходимо создать эффективный электрический инвертор для преобразования постоянного тока в переменный (в МГД-генераторе получается постоянный ток), устройство для вывода легкоионизирующей присадки, специальный парогенератор.

Несмотря на все трудности, в Советском Союзе работы в области МГД-преобразования энергии продвинуты настолько, что в настоящее время сооружается промышленная МГД-установка мощностью около 500 МВт. Можно предполагать, что в перспективе мощные МГД-установки будут использоваться на АЭС. В этом случае место камеры сгорания займет атомный реактор, а рабочим телом МГД-генератора будут, уже конечно, не продукты сгорания, а более легко ионизирующийся газ, например гелий. Так как гелий, естественно, будет циркулировать по замкнутому контуру (такая схема МГД-электростанции называется закрытой), то в качестве легко ионизирующейся присадки может быть использован более дорогой, но зато существенно увеличивающий электропроводность плазмы металл цезий. Значит, необходимая максимальная температура гелий-цезиевой плазмы может быть ниже: порядка 1500°C (а не 2600°C , как для рассмотренной открытой схемы). Следовательно, в атомном реакторе гелий должен быть нагрет не менее чем до 1500°C . Пока таких высокотемпературных атомных реакторов не существует. Но можно надеяться, что их создание — вопрос времени.

Из других способов прямого преобразования энергии большой интерес представляет применение фотоэлектропреобразователей (о них уже говори-



лось в разделе «Солнечная энергия»), термоэлектрогенераторов, термоэмиссионных преобразователей и топливных элементов. Однако перспектива использования этих методов и устройств в большой энергетике пока еще не ясна. Поэтому мы остановимся на них очень кратко.

Работа термоэлектрического генератора основана на хорошо известном в физике эффекте Зеебека, который заключается в том, что в электрической цепи, состоящей из различных элементов, при условии, что контакты (спаи) между ними имеют различную температуру, возникает электродвижущая сила. На рисунке представлена такая электрическая цепь. Она состоит из двух проводников — меди и константана (сплава меди и никеля), используется для измерения температуры. Один из спаев находится при температуре, которую требуется измерить (t_1), а другой — при постоянной температуре (t_0), например при практически неизменной температуре смеси воды и льда. По величине электродвижущей силы, измеряемой гальванометром, можно с высокой степенью точности определить (t_1).

Если составить электрическую цепь из последо-

вательно соединенных различных материалов (обычно полупроводников), иначе говоря, цепь из отдельных термоэлементов, то получится термоэлектрический генератор. Электродвижущая сила, создаваемая термоэлектрическим генератором, пропорциональна числу термоэлементов, составляющих термоэлектрогенератор (ТЭГ).

Термоэлемент, так же как и МГД-генератор, преобразует тепловую энергию в электрическую. Следовательно, КПД термоэлемента регламентируется вторым законом термодинамики.

К сожалению, термоэлектрические генераторы пока еще дороги, а их КПД невелик. Поэтому они находят применение в качестве небольших, как правило автономных, источников энергии.

Если какое-либо твердое тело¹ (металл, полупроводник) поместить в вакуум, то известное количество электронов этого тела перейдет в вакуум. Это явление называется термоэлектронной эмиссией, а твердое тело, испускающее электроны, — эмиттером. Эмиссия электронов тем больше, чем выше температура эмиттера. В процессе эмиссии электронов эмиттер охлаждается. Через некоторое время после начала электронной эмиссии (после помещения тела в вакуум) установится равновесие: сколько электронов в единицу времени будет выходить из твердого тела за счет электронной эмиссии, столько же будет возвращаться в результате так называемой конденсации электронов. Охлаждение твердого тела в состоянии равновесия более не происходит.

Но можно поступить иначе: поместить в вакуум два тела (два электрода), причем к одному из них (электроду-эмиттеру) подводить тепло и поддерживать его при более высокой температуре, а от второго (электрода-коллектора) тепло отводить,

¹ Описываемое явление наблюдается и у жидкостей.

с тем чтобы его температура оставалась более низкой. Если теперь эмиттер и коллектор замкнуть внешней электрической цепью, то по ней потечет ток, описанное устройство явится источником тока, именуемым термоэмиссионным преобразователем (ТЭП). ТЭП (так же как и ТЭГ) преобразует тепловую энергию в электрическую, минуя ступень механической энергии, и, следовательно, подчиняется ограничениям, установленным вторым законом термодинамики.

Если бы, используя ТЭП, можно было получать большие количества электроэнергии, а его основные технико-экономические показатели (стоимость и КПД) были благоприятны, то энергетика получила бы в лице ТЭП хороший электрический генератор, работающий по принципу прямого преобразования энергии.

В настоящее время еще не достигнуты такие технико-экономические показатели ТЭП, которые могли бы удовлетворить энергетику. Поэтому ТЭП пока что используются, как и ТЭГ, в случаях, когда требуются относительно малые мощности. Однако работа по улучшению показателей ТЭП ведется высокими темпами.

В топливном элементе осуществляется прямое преобразование химической энергии в электрическую. В чем заключается принцип работы и каково устройство топливного элемента?

Можно, например, сжечь водород в атмосфере кислорода. В результате образуется вода и выделяется тепло, которое затем можно использовать в теплосиловом двигателе. А можно пойти другим путем, как это и делается в топливном элементе, разделив реакцию горения водорода на два процесса, в одном из которых участвует водород, а в другом — кислород.

Схема топливного элемента представлена на

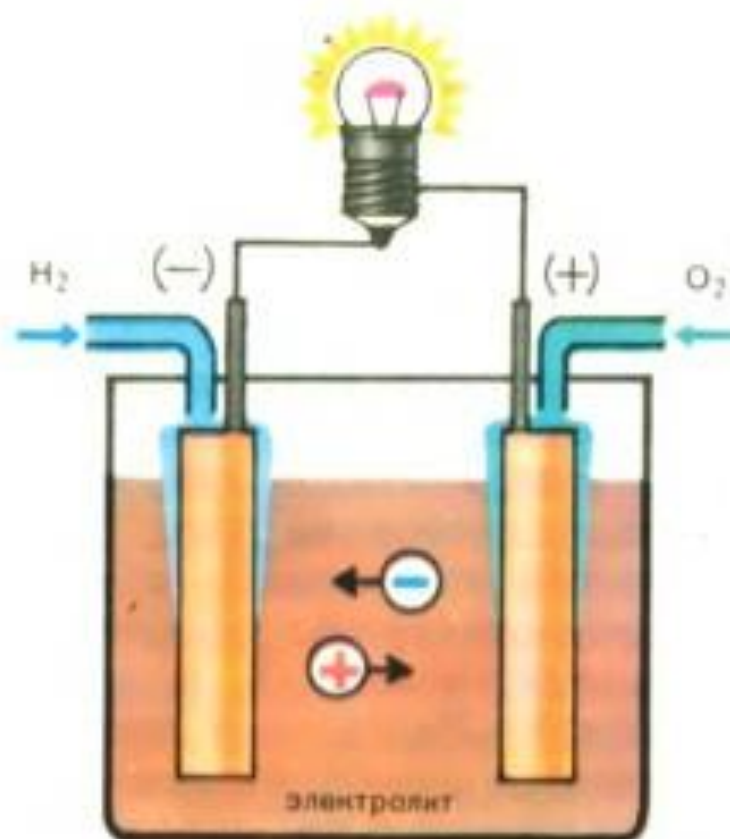
рисунке. Элемент состоит из двух электродов (на один из которых подается водород, а на другой — кислород) и электролита. Существенным отличием топливного элемента от электрического аккумулятора является то, что запас горючего и окислителя в топливном элементе, в данном случае водорода и кислорода, непрерывно пополняется.

Водород, попадая на металлический электрод и находясь на разделе трех фаз — твердого электрода, электролита и газовой фазы, переходит в атомарное состояние (его двухатомная молекула разделяется на атомы), а его атомы делятся на свободные электроны и ядра атомов (ионы). Электроны уходят в металл, а ядра атомов — в раствор (электролит). Вследствие этого электрод насыщается отрицательно заряженными электронами, а электролит — положительно заряженными ионами.

Аналогичный процесс происходит на втором электроде, на который подается кислород. В результате проходящих у поверхности электрода процессов на нем появляются положительные электрические заряды. Кроме того, возникают отрицательно заряженные ионы ОН, которые остаются в электролите и, соединяясь с ионами водорода, образуют воду. Если соединить внешней цепью оба электрода, то возникнет электрический ток (см. рис.). Таким путем химическая энергия превращается в электрическую. Поскольку в топливном элементе отсутствует промежуточная стадия преобразования химической энергии в тепловую, его КПД не имеет ограничений, присущих тепловому двигателю. Водородно-кислородный топливный элемент работает при низкой температуре, а его КПД вполне может достигать 65—70%.

Не следует думать, что создание топливного элемента является простым делом. Идея топливного элемента появилась еще в середине XIX в., а под-

Схема топливного элемента.



ходящей конструкции для широкого применения нет и по сей день.

В решении проблемы топливного элемента много трудностей: проведение всех процессов с большой скоростью (залог получения больших абсолютных и удельных мощностей); выбор материала и создание высококачественных электродов; создание высокоэффективных электролитов (жидких и твердых, в зависимости от типа топливного элемента); возможность работы на дешевом топливе.

Наше время — начальный период применения топливных элементов. Они используются в случаях, когда не требуется большая мощность, чаще всего как автономные источники тока. Крупнейший специалист в области электрохимии академик А. Н. Фрумкин считал, что первыми крупными потребителями топливных элементов будут космические аппараты, нуждающиеся в небольших по мощности бортовых источниках тока, и автомобили, точнее сказать —



электромобили. В космических аппаратах топливные элементы (водородно-кислородные) уже находят применение, что касается электромобилей, то здесь пока создаются опытные образцы. Следует заметить, что удельная мощность топливных элементов хотя и во много раз больше, чем у электрических аккумуляторов, но еще примерно в 3 раза меньше по сравнению с бензиновыми двигателями.

Можно предполагать, что топливные элементы в дальнейшем найдут применение и в большой энергетике. Но строить какие-либо прогнозы по этому вопросу пока еще рано. Во всяком случае сначала должен быть решен вопрос об использовании не водорода и кислорода (это дорого), а более дешевого топлива и окислителя, например горючего газа (природного или продукта газификации угля) и воздуха. В этом случае топливные элементы будут высокотемпературными, что, по-видимому, несколько снизит их КПД.

Искусственное жидкое топливо. Водород. Так как запасы нефти ограничены, а некоторым потребителям необходимо только жидкое топливо, получаемое в результате переработки нефти, то большое значение приобрел вопрос о получении жидкого топлива (керосина, бензина) из угля, ресурсов которого гораздо больше. Вопрос этот не новый, но интерес к нему особенно усилился за последнее десятилетие.

Во многих странах в настоящее время широко ведутся исследовательские и опытные работы, цель которых заключается в создании такой технологии получения жидкого топлива из угля (или, как его часто называют, искусственного жидкого топлива — ИЖТ), в результате применения которой себестоимость жидкого топлива была бы приемлемой. До сих пор эта задача не решена.

В настоящее время имеются 4 основных способа переработки угля в жидкое топливо: синтез, в основе которого лежит превращение под давлением угля (в качестве первой фазы процесса) в смесь горючих газов с использованием при этом водяного пара, воздуха или кислорода; экстракция, т. е. термическое растворение угля, причем в качестве растворителей используются вещества, участвующие в процессах дальнейшей переработки угля; гидрирование (или гидрогенизация) — способ, заключающийся в насыщении угля водородом¹, взаимодействии угля с содержащими водород веществами при высокой температуре и давлении; пиролиз — нагрев угля в отсутствие окислителя. Ни один из названных способов не имеет явного преимущества перед другими, и каждый из них заслуживает дальнейшей разработки. Это даст нам возможность судить, какому (или каким) из них следует отдать предпочтение.

Представляет также большой интерес вопрос газификации угля, т. е. получения из угля не жидкого, а газообразного топлива. Дело заключается в том, что в некоторых технологических процессах использование угля затруднительно, в то время как использование газа весьма целесообразно. Кроме того, и это не менее важно, получение горючего газа из угля дает возможность сократить расходы на транспорт газа. Горючий газ, конечно, выгоднее всего получать вблизи месторождения угля. Но месторождения угля и газа расположены в различных, чаще всего весьма удаленных друг от друга местах. Поэтому при газификации угля отпадает необходимость подачи природного газа в районы месторождения угля.

Последний вопрос, которого мы хотим коснуть-

¹ Следует иметь в виду, что в составе угля содержится примерно в 3 раза меньше водорода, чем в жидких углеводородах, составляющих основу жидких моторных топлив.

ся, — использование водорода в качестве топлива. Водород — высококалорийный газ, который может найти применение в авиации и у многих других потребителей вместо жидкого топлива. Большим преимуществом водорода является то, что в результате его сжигания образуется только водяной пар и, следовательно, не происходит загрязнения атмосферы. Существенно также и то, что водорода на Земле так много, что его ресурсы можно рассматривать как неисчерпаемые.

В настоящее время большой интерес вызывает вопрос о получении водорода путем электролиза воды и использовании его вместо дефицитного жидкого топлива. На первый взгляд, высказанные соображения кажутся совершенно бесперспективными. Действительно, электрическая энергия, необходимая для электролиза воды, может быть получена из первичного источника сырья с КПД не более 35% (учитывая потери в электрических сетях и др.). КПД процесса получения водорода из воды методом электролиза составит, допустим, 80%, и, наконец, КПД водородного теплового двигателя примем 40%. Перемножив эти три значения КПД (т. е. 0,35, 0,8 и 0,4) между собой, получим 0,11 или 11%. Следовательно, общий КПД процесса получения водорода и его использования в тепловом двигателе невелик.

Однако это только одна сторона дела. Не следует забывать, что для получения жидкого топлива из угля также требуется большой расход энергии, а КПД этого процесса невелик. Существенно, что электролиз воды может проводиться в часы, когда потребление электрической энергии относительно невелико, т. е. в ночное время, в свободные от работы дни — субботу, воскресенье, праздничные дни. Для системы снабжения народного хозяйства электрической энергией чрезвычайно невыгодны резкие суточные и недельные периодические сокращения в потреблении элект-

роэнергии. Дело заключается в том, что большинство ТЭС и особенно АЭС не приспособлены к частому и значительному снижению нагрузки. Это влечет за собой быстрый износ оборудования и, следовательно, большие экономические потери. Поэтому проведение электролиза воды и получение водорода, хотя и сопровождается большим расходом электроэнергии, экономически может оказаться приемлемым.

Получать водород можно, кроме того, с помощью химических процессов с участием реагентов, содержащих водород, а также катализаторов. Использование водорода в энергетике — вопрос перспективный, он заслуживает большого внимания.

Итак, рассказ об энергетике, о перспективах ее дальнейшего развития закончен. Хотелось бы надеяться, что знакомство с этой областью науки и техники, столь важной для жизни современного общества, будет полезным.



Энергетика сегодня и завтра

*Кириллин
Владимир
Алексеевич*

для среднего и старшего
школьного возраста

Художники:
Г. Ш. Басыров,
Ю. П. Мартыненко

Зав. редакцией
В. Ю. Кирьянов

Редактор
Н. Н. Габисонин

Младший редактор
Т. В. Плотникова

Художественный редактор
В. П. Лобачев

Технические редакторы
Л. Л. Милюк, Т. Е. Морозова

Корректор
М. А. Суворова

ИБ № 678

Сдано в набор 16.03.82. Под
писано в печать 09.08.82.
А07488. Формат 70×100/32
Бумага офсетная № 1. Усл.
печ. л. 5,16. Уч.-изд. л. 5,54.
Усл. кр.-отт. 21,12. Тираж
200 000 экз. Печать офсет-
ная. Гарнитура школьная.
Заказ 1082. Цена 35 коп.

Издательство «Педагогика»
Академии педагогических
наук СССР и Государствен-
ного комитета СССР по де-
лам издательств, полигра-
фии и книжной торговли
Москва, 107847, Лефортов-
ский пер., 8

Ордена Трудового Красного
Знамени Калининский по-
лиграфический комбинат
Союзполиграфпр.-а при Го-
сударственном комитете
СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной тор-
говли г. Калинин, пр. Ле-
нина, 5

Содержание

Введение

3

Энергетика сегодня

7

Проблемы и трудности энергетики

56

Энергетика завтра

80



Читайте
следующую
книгу
серии
«Ученые —
школьнику»!

Что такое СЭВ?

●
Какие задачи стоят перед этой международной организацией, в которую входят 10 стран социализма?

●
Как Совет Экономической Взаимопомощи участвует в выполнении программ социалистической экономической интеграции?

●
Как верстаются интеграционные пятилетки и возводятся совместные стройки, для чего нужен единый стандарт и коллективная валюта?

●
Об этом ведут разговор с читателем заместитель председателя Госплана СССР кандидат экономических наук Н. Н. Иноземцев и журналист-международник Ю. А. Сняков, авторы книги «СЭВ: социалистическая интеграция в действии».



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ПЕДАГОГИКА»