

НОВЫЕ ПУТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В.А. ГРАНОВСКИЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЗНАНИЕ

ТЕХНИКА

1961
СЕРИЯ IV

22

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Доктор физико-математических наук,
профессор
В. Л. ГРАНОВСКИЙ

НОВЫЕ ПУТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва

1962

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Ресурсы энергии на Земле	5
Основные современные пути получения электроэнергии	7
Возможные пути генерации электроэнергии	11
Способы генерирования электроэнергии, отличные от уже освоенных	13
Электростатический генератор	14
Магнитогидродинамический генератор	16
Термоэлектрические генераторы	21
Термоэлектронные генераторы	27
Топливные элементы	31
Солнечные электростанции и солнечные батареи	34
Ядерные источники электроэнергии	41

Автор **Вениамин Львович Грановский**

Редакторы **Л. Ф. Верес, Е. В. Дубровский**

Техн. редактор **Л. Е. Атрощенко**

Корректор **Е. А. Соколов**

Обложка художника **К. А. Павлинова**

Сдано в набор 9.XII 1961 г.	Подписано к печати 15.I 1962 г.	Изд. № 410.
Формат бумаги 60×92 ¹ / ₁₆ .	Бум. л. 1,5.	Печ. л. 3,0.
Ф 00010.	Цена 9 коп.	Уч.-изд. л. 2,84.
	Тираж 45.000 экз.	Заказ 3790.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ВВЕДЕНИЕ ¹

Стремительный рост техники и всего народного хозяйства Советского Союза, намечаемый семилетним и двадцатилетним планами его развития, требует подъема энергетики, значительно опережающего рост народного хозяйства в целом. В первую очередь имеется в виду производство основного и технически наиболее прогрессивного вида энергии — электрической энергии.

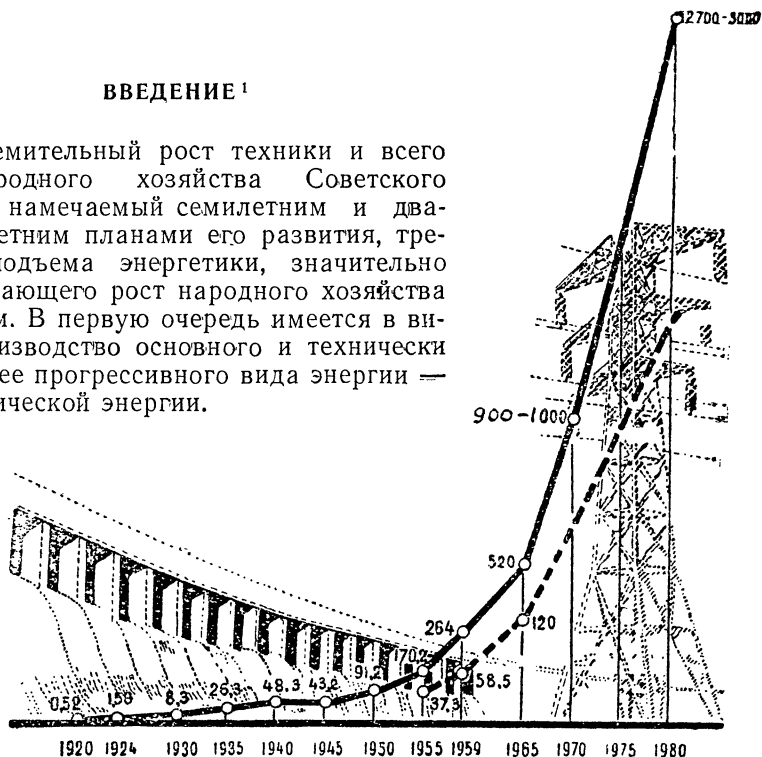


Рис. 1. Рост электрификации в СССР.

Сплошная линия — годовое производство электроэнергии в млрд. кВт-ч; пунктирная линия — установленная мощность электростанций в млн. кВт.

Читатель хорошо знает знаменитый тезис В. И. Ленина, указывающий на электрификацию как на техническую базу построения коммунистического общества. Новая Программа КПСС также отводит ведущую роль электрификации всей страны как определяющей области технического прогресса — этого стержня строительства материально-технической базы

¹ В работе над рукописью автору оказал большую помощь инженер П. А. Софронов, которому автор выражает свою благодарность.

коммунизма. Темпы развития электрификации в СССР представлены на рис. 1. Если в 1920 году, когда был утвержден первый план электрификации (Ленинский план ГОЭЛРО), было произведено только 0,52 млрд. *квт-ч*, то уже в 1959 году выработка электроэнергии достигла 264 млрд. *квт-ч*, к 70-м годам она достигнет триллиона (тысячи миллиардов) киловатт-часов.

Мощность всех электростанций страны должна превысить 200 млн. *квт*. Для сравнения можно вспомнить, что установ-

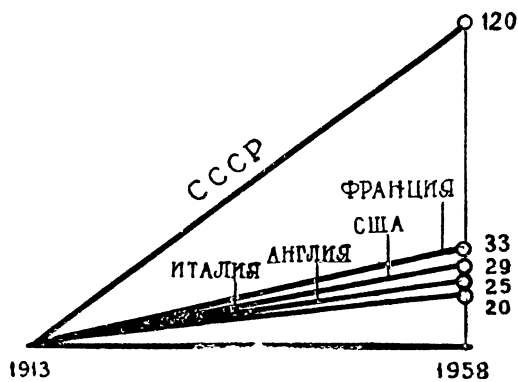


Рис. 2. Сравнительный рост выработки электроэнергии в некоторых странах. (уровень 1913 г. принят за единицу).

ленная мощность первенца плана ГОЭЛРО — Волховской ГЭС составляла всего 58 тыс. *квт*, а мощность Днепрогэса — 550 тыс. *квт*¹.

В капиталистических странах выработка электроэнергии также возрастает (рис. 2), но темпы роста намного ниже.

Мировое потребление электроэнергии в 1958 году (по данным справочника ООН) составило 30 триллионов *квт-ч*. В переводе на эквивалентное количество угольного топлива это составляет 3,8 млрд. *т*.

Подобный бурный рост потребности в электроэнергии ставит перед учеными и инженерами два основных важнейших вопроса:

из каких же ресурсов черпать энергию, необходимую для нашего народного хозяйства во все возрастающем масштабе?
как наиболее целесообразно производить электроэнергию?

¹ Подробнее о развитии электрификации СССР см. А. В. Винтер и А. Б. Марин. Электрификация нашей страны. М., Госэнергоиздат, 1956; А. М. Некрасов. Развитие энергетики СССР в 1959—1965 гг. М., Изд-во «Знание», 1959; В. А. Веников. Единая энергетическая система. М., Изд-во «Знание», 1960.

Прежде всего рассмотрим ресурсы энергии, которыми мы располагаем на Земле в целом. Данные о них на 1956 год сведены в табл. 1.

В первом разделе этой таблицы представлены различные виды углеродистого топлива. Данные о запасах различных видов этого топлива являются сегодня уже неточными, так как геологическая разведка ежегодно приносит сведения о новых, ранее не известных залежах горючих ископаемых. Но величина мировых запасов углеродистых топлив все же ограничена. Необходимо также отметить, что уголь, нефть и газы являются ценным сырьем для химической промышленности и простое сжигание их в топках крайне нежелательно.

К невозобновляемым энергоресурсам относится и так называемое «ядерное горючее». Во-первых, это тяжелые радиоактивные элементы уран и торий, которые уже сейчас стали источниками энергии, доступными для использования в промышленных масштабах. Они обнаружены в количестве, соответствующем сотне триллионов тонн угля. Это значительно больше, чем все уже известные запасы углеродистого топлива. Во-вторых, это новый вид топлива, который наука пока еще не умеет использовать для промышленной энергетики. Речь идет о втором изотопе водорода (дейтерий, или «тяжелый водород»); сюда же следовало бы отнести и некоторые встречающиеся на Земле изотопы других легких элементов. Этот источник энергии станет доступным только тогда, когда наука найдет реальный и экономичный способ управления так называемыми термоядерными реакциями, т. е. процессами слияния (синтеза) атомных ядер.

Во второй части табл. 1 представлены такие ресурсы энергии на Земле, которые пополняются непрерывно в результате процессов, протекающих в природе без участия человека. Прежде всего это солнечная энергия, попадающая на поверхность Земли. Поверхности Земли достигает ежегодно поток солнечного излучения, эквивалентный энергии 78 триллионов тонн угля, т. е. в 11—12 раз превосходящий энергию всех известных запасов угля на Земле.

К возобновляемым запасам относится также энергия ветра, энергия рек и озер, энергия морских приливов и, наконец, энергия дров. В таблицу не включена еще энергия теплоты земной коры и океанов.

Из всех перечисленных ресурсов основой современного производства электроэнергии в большом масштабе служат два: во-первых, углеродистые топлива; во-вторых, энергия рек. В стадии промышленного освоения находятся энергия ядер тяжелых атомов (атомные электростанции) и теплота

Основные промышленные энергоресурсы мира
(По данным пятой Мировой энергетической конференции в Вене в 1956 г.)

I. Невозобновляемое топливо

Виды топлива	Вероятные запасы		Удельная концентрация энергии в топливе		Примерное время истощения в годах
	млрд. т угольного эквивалента	10^{12} квт-ч	квт-ч/т	квт-ч/м ³	
Уголь всех видов	6900	55 500	2500—8000		5200
Нефть	46	370	12 000		65
Природный газ	27,5	220		10 660—14 000	
Торф	46	370	4000		5350
Прочие виды	30	239			
Итого	7049,5	58 850			

1. Углеродистое топливо

2. Ядерное топливо

Уран и торий	100 000	$8 \cdot 10^8$		$19 \cdot 10^9$	50 000
Дейтерий	10^{11}	$8 \cdot 10^{14}$		$22 \cdot 10^9$	$50 \cdot 10^9$

II. Восстанавливаемая энергия

Виды энергии	Примерный угольный эквивалент млрд. т в год	Нынешнее ежегодное количество 10^{12} квт-ч.	Удельная концентрация	
			квт/м ²	квт-ч/м ³
Солнечная энергия, падающая на поверхность Земли	78 000	$620 \cdot 10^3$	$\approx 0,13$	
Гидроэнергия рек	41	32,9		
Энергия ветра	57,5	460		
Дрова	13,2	105		4000

земной коры. С древних времен освоено человечеством использование энергии ветра. В прошлом она использовалась, разумеется, не для производства электроэнергии, а для передвижения (парус) и обработки материалов (помол зерна — мельница). Сейчас существуют ветроэлектрические станции, приводимые в движение ветром и вырабатывающие электроэнергию. Но развитие ветроэлектрических станций идет пока медленно.

Остальные источники энергии на Земле человек в сущности только начинает осваивать, если говорить о получении энергии в больших масштабах¹.

Анализируя данные табл. 1, мы приходим к ряду выводов:

1. Запасы углеродистого топлива на Земле сравнительно ограничены.

Что делать дальше, когда те или иные виды топлива будут исчерпаны?

2. Энергетические ресурсы неравномерно распределены по поверхности Земли. Как быть в тех странах и тех краях, где уже освоенных ресурсов энергии мало?

3. Все больше возрастает потребность в энергии на транспорте всех возможных видов — наземном, водном, воздушном, а теперь и космическом. Каким образом целесообразно производить электроэнергию в движущихся системах, не связанных с определенным местоположением на Земле, размеры которых (а следовательно, и потребность в энергии) все возрастают?

4. Рациональны ли распространенные теперь способы преобразования различных видов энергии в электроэнергию? Не теряется ли часть энергии зря и какая именно часть?

Настоящая брошюра не может, разумеется, дать ответа на все эти вопросы. В ней рассматривается только одна сторона дела — физические основы принятых в настоящее время способов массового производства электроэнергии и тех способов, которые могут их дополнить или, может быть, даже заменить.

ОСНОВНЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ПУТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Таких путей, как уже указывалось, пока два. Первый из них осуществлен на теплоэлектростанциях (ТЭС). Здесь можно указать два основных варианта: паросиловая конденсационная станция, где работает паровая турбина, и газотурбинная станция, где паровая турбина заменена газовой. Второй путь реализован на гидроэлектрических станциях (ГЭС). Схемы преобразования энергии на станциях этих типов показаны на рис. 3.

Конечная стадия процесса — собственно получение электроэнергии, происходит в принципе одинаково (как в ТЭС, так и в ГЭС) — на основе явления электромагнитной индукции.

¹ О различных формах энергии и их ресурсах на Земле, а также о разных предложениях по их использованию можно прочесть в книгах: М. В а с и л ь е в. Энергия и человек. М., Изд-во «Советская Россия», 1958; П. П. Л а з а р е в. Энергия, ее источники на Земле и ее происхождение. М., Изд-во АН СССР, 1959.

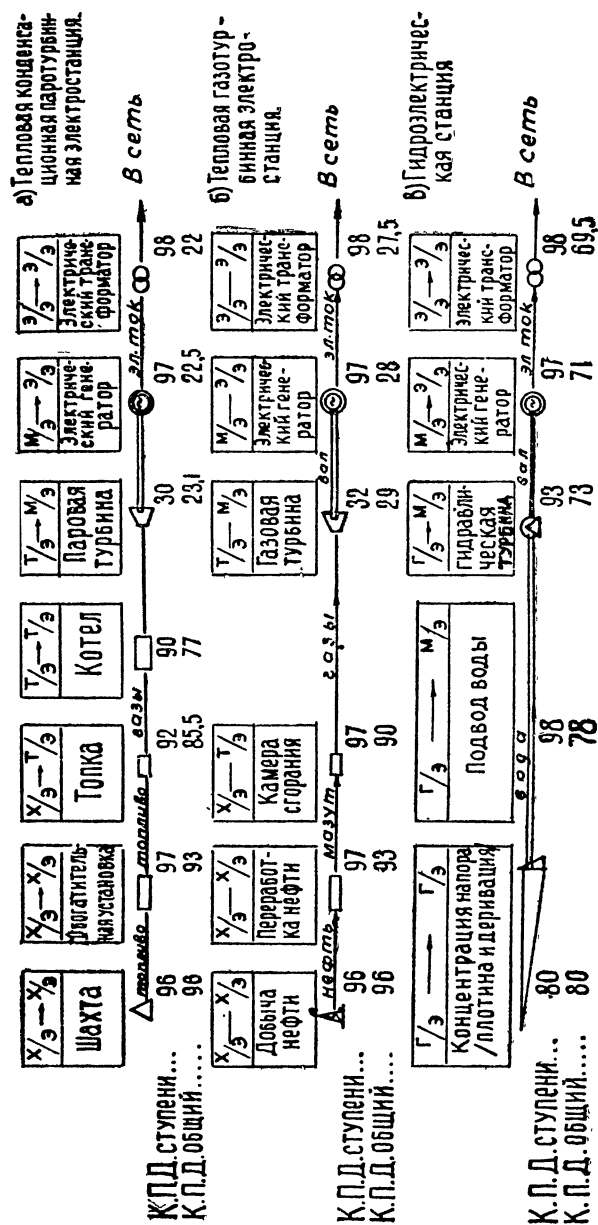


Рис. 3. Схемы и к. п. д. основных способов генерации электроэнергии в настоящее время.

Генераторы, установленные на электрических станциях, состоят из двух основных частей: неподвижной — статора и подвижной, вращающейся, — ротора. В обмотках ротора (индукторах) протекает ток возбуждения, который создает магнитное поле, непрерывно меняющее свое направление благодаря вращению ротора. Вследствие этого в неподвижных обмотках статора возникают индукционные токи. Это — переменные токи. Мощность их может быть во много раз больше, чем мощность токов возбуждения¹. Магнитное поле этих токов противодействует вращению ротора; поэтому турбина, вращающая ротор, должна совершать все время работу, поддерживая его вращение с постоянной скоростью. Таким образом, в турбогенераторном агрегате происходит преобразование мощности, развиваемой турбиной, в электрическую энергию.

Обычно электрические токи, возникающие в генераторе, не поступают прямо в передающие линии или в распределительную сеть; они сначала трансформируются (преобразуются) на более высокое напряжение в последнем агрегате электростанции — трансформаторе.

Если на этих последних стадиях оба пути генерации электроэнергии одинаковы, то в предыдущих стадиях они совершенно различны. В обоих случаях первоначальная энергия испытывает множество последовательных преобразований раньше, чем она превращается в конечную, нужную нам форму.

Начнем со схемы тепловой паротурбинной электростанции. Топливо, добытое в шахте, поступает в топку, где химическая энергия топлива превращается в тепловую энергию (или, как говорят в термодинамике, внутреннюю энергию) горячих топливных газов. Затем в котле происходит передача этой теплоты рабочему веществу, обычно воде, которая превращается в пар с последующим его перегревом². Перегретый водяной пар поступает в паровую турбину, где своим напором приводит ротор турбины во вращение. Таким образом энергия пара превращается в кинетическую энергию ротора турбинного агрегата.

Схема преобразования энергии на газотурбинной станции проще, чем на паротурбинной, так как содержит на один элемент меньше. И здесь происходит сжигание топлива; однако топка и котел заменены одним элементом — камерой сгорания.

¹ Подробнее об устройстве и работе генераторов электрического тока см. во всех учебниках электротехники.

² Пар, образующийся при кипении жидкости под определенным давлением, имеет определенную температуру, соответствующую точке кипения при этом давлении. Чтобы еще повысить его температуру и внутреннюю энергию, его нужно дополнительно нагреть в сосуде (перегревателе), не содержащем жидкости. При этом пар становится перегретым.

ния, а газы, образующиеся в результате сгорания топлива, являются одновременно рабочим веществом, поступающим в турбину. Передача тепла от топочных газов к рабочему веществу (пару) здесь отсутствует. Поэтому общий к. п. д. всего устройства несколько выше, чем в паросиловой установке. Но в обоих рассмотренных случаях в начале процесса происходит превращение химической энергии топлива в тепловую энергию. А тепловая энергия в силу своей природы обладает одной чрезвычайно неприятной особенностью — это энергия беспорядочного движения частиц вещества — молекул. Нам же нужно преобразовать ее в кинетическую энергию упорядоченной формы движения — течения газа. При таком преобразовании всегда, к сожалению, имеет место неполное использование тепловой энергии.

Теория тепловых процессов (термодинамика) показывает, что максимальный к. п. д. тепловой машины в идеальном случае выражается так: $k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, где T_2 — абсолютная температура ¹ холодильника, а T_1 — абсолютная температура нагревателя. В данном случае мы видим (рис. 3), что при переходе энергии пара в энергию вращения турбоагрегата к. п. д. составляет всего 30%. Эта величина, правда, сейчас не является предельной; в современных тепловых станциях сверхвысокого давления достигается к. п. д. порядка 40%. Но все же в этой ступени преобразования происходит наибольшая потеря энергии, превосходящая 50—60%.

Эта же стадия преобразования имеет место и в газотурбинной станции. Здесь к. п. д. немного больший. Полный к. п. д. использования топлива на тепловых электростанциях не превышает 30—40%.

Значительно лучше используется первоначальный запас энергии на гидроэлектростанции. Здесь нет процесса преобразования исходного вида энергии в промежуточную форму тепловой энергии. Поэтому нет ни одной ступени, где к. п. д. падал бы так низко. И общий к. п. д. всего процесса оказывается гораздо выше — доходит до 70%.

Несмотря на то, что на гидроэлектростанциях к. п. д. выше, и, кроме того, сам источник энергии — потенциальная энергия воды рек и озер — является даровым, все-таки теплоэлектростанции являются и по сей день основным поставщиком электроэнергии. Более того, по нашим планам увеличение производства электроэнергии в СССР на ряд ближайших лет намечается главным образом за счет тепловых электростанций.

Поэтому важнейшим является вопрос, как лучше исполь-

¹ Абсолютной температурой называется температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, которому соответствует по шкале Цельсия температура $-273,1^\circ$.

зовать тепловую энергию, от которой мы до сих пор при массовом производстве электроэнергии используем 30—35%, максимум 40%. Какие же физические явления и какие принципы физики могут быть применены для лучшего производства электроэнергии?

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В табл. 2 (стр. 24—25) сведены основные ресурсы энергии на Земле и возможные пути их преобразования в электрическую энергию.

В верхней строке приведены основные ресурсы энергии на Земле. Стрелками показаны те пути, по которым эти виды энергии через одну, а иногда через ряд промежуточных форм преобразовываются в электроэнергию. В кружках указаны физические явления, которые используются в каждом из этих процессов для преобразования энергии; в квадратах — промежуточные формы, в которые преобразуется энергия при каждом из этих процессов. На последних этапах преобразования помечено, какому типу генератора он соответствует. Некоторые пути отмечены двойной стрелкой, чтобы подчеркнуть, что это уже широко используемые способы получения электроэнергии. Таково, например, превращение химической энергии топлива в тепловых силовых устройствах. Начиная со стадии тепловой энергии газа, этот путь раздваивается. В паросиловой установке происходит процесс теплопередачи в котле; в газотурбинных установках этого нет. Но в обоих случаях кинетическая энергия газа или пара путем давления на твердое тело, а именно на лопатки ротора в турбине, преобразуется в кинетическую энергию твердого тела. Далее, в электромагнитном генераторе, связанном с турбиной, эта энергия преобразуется в электрическую.

В гидроэлектростанциях используется потенциальная энергия воды в реках. Здесь также используется давление на твердое тело, только в данном случае жидкости, а не газа, как на тепловых станциях.

Имеется целый ряд путей преобразования различных видов энергии в электрическую, которые с физической стороны на конечных стадиях сравнительно мало отличаются от двух вышеописанных основных способов, широко применяемых в энергетике.

Например, от физических процессов гидроэлектростанции незначительно отличаются процессы **ветроэлектростанции**. Основное различие между ними, с точки зрения физики, в том, что движущуюся жидкость (воду) в ветровой ЭС заменяет движущийся газ (воздух)¹. Исходная форма энергии здесь—

¹ В техническом и экономическом отношениях различие между ГЭС и ветровой ЭС, конечно, очень велико.

кинетическая энергия ветра, которая сразу путем давления на твердое тело (лопатки ротора ветросиловой установки) превращается в кинетическую энергию вращения ротора. Ветро-двигатель приводит в движение генератор, и дальнейший путь получения электроэнергии тот же самый, что и на гидроэлектростанции.

Основным недостатком ветра, как источника электроэнергии, является его непостоянство по направлению и особенно по силе, вследствие чего мощность, вырабатываемая ветро-электростанцией, все время колеблется и по временам падает до нуля. Поэтому приходится вырабатываемую электроэнергию запасать, например, с помощью аккумуляторов, с тем чтобы этот запас расходовать в часы безветрия. Все же благодаря простоте конструкции и экономичности ветросиловые установки в настоящее время находят широкое применение в сельском хозяйстве и в арктических районах как в нашей стране, так и за рубежом.

Интересна идея **приливной** электростанции. В ней так же, как и в ГЭС, используется течение воды, вызванное тяготением, правда, не земным, а лунным. Но движение это в течение суток меняет свою скорость и направление (приливы сменяются отливами). Поэтому для непрерывной подачи воды в турбину в одном направлении морская вода поступает в турбины приливной ГЭС не непосредственно «с набегающей волной», а через систему бассейнов и шлюзов, обеспечивающих питание турбин водой в одном направлении с требуемым напором. В этом основное отличие приливной ГЭС от речной ГЭС¹.

Схемы тепловых электростанций, точнее говоря паросиловых электростанций, с некоторыми видоизменениями также находят себе применение при использовании других ресурсов энергии, помимо углеродистого топлива. В первую очередь это относится к использованию внутренней **теплоты Земли на геотермических** электростанциях. Известно, что тепловые электростанции, питаемые паром или горячей водой от источников вулканического происхождения, уже работают успешно в ряде стран. Так, в Новой Зеландии строятся геотермические ТЭС на общую мощность 290 тыс. *квт*, из них уже пущены в эксплуатацию 67 тыс. *квт*. В Италии уже работают такие электростанции с общей установленной мощностью в несколько сот тысяч киловатт. У нас также строятся геотермические электростанции на Камчатке. В принципе эти электростанции мало чем отличаются от обычных ТЭС. Но поскольку горячая вода или пар здесь естественного происхождения, надобность в топке отпадает.

¹ Такая приливная электростанция мощностью в 240 тыс. *квт* строится сейчас во Франции на берегу Ла-Манша, в устье реки Ранс.

Несколько иные проекты предложены для использования тепловой энергии морей. Существуют два технических направления в этих проектах. В теплых морях предполагается использовать разность между температурой поверхностных слоев воды (превышающей 20°C), которые должны служить нагревателем, и глубинными слоями, где температура составляет всего несколько градусов выше нуля и которые служат холодильником. Заставляя воду испаряться при температуре около 20°C , мы получаем пар очень малого давления (несколько десятков миллиметров ртутного столба). В «холодильнике» при температуре около 0°C он будет конденсироваться. Поэтому при достаточно большом объеме турбины можно заставить ее работать даже под таким низким давлением. Конечно, лучше использовать в качестве рабочего вещества не воду, а какую-нибудь другую жидкость, которая давала бы при этой температуре более высокое давление паров. Станция, построенная по такому проекту Ж. Клодом и П. Бушери, находится на атлантическом побережье Африки.

Существует и другой проект тепловой электростанции, предназначенной для работы в условиях очень высоких широт (в Арктике), разработанный инженером А. Баржо. Здесь нагревателем должна служить холодная вода, температура которой едва превышает 0°C , а холодильником служит воздух, находящийся над льдом, температура которого ниже 0°C на несколько десятков градусов. Давление водяного пара при температуре «нагревателя» около 0°C всего 4,5 мм ртутного столба, т. е. 5—6 г на 1 см^2 . Турбина для работы под таким давлением должна была бы иметь еще более непрактичные размеры. Поэтому здесь необходимо другое рабочее вещество. В качестве такого Баржо избрал изобутан — органическую жидкость, которая при температуре -17°C уже кипит под атмосферным давлением. В рассматриваемых случаях разность между T_1 и T_2 очень невелика — всего несколько десятков градусов, тогда как T_1 — порядка $270\text{—}300^{\circ}\text{K}$.

Поэтому теоретический к. п. д. здесь мал, а практический к. п. д. еще меньше. Весь смысл этих устройств состоит в возможности получать электроэнергию пусть с небольшим к. п. д., но из тепла, которое сейчас вовсе никак не используется, и в таких местах, куда доставка топлива до освоения атомного топлива была чрезвычайно затруднена.

СПОСОБЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ОТЛИЧНЫЕ ОТ УЖЕ ОСВОЕННЫХ

Наряду с хорошо изученными схемами тепловых и гидро-электрических станций существуют и такие новые пути производства электроэнергии, которые еще чрезвычайно мало изучены и практически совсем не освоены. Примерами явля-

ются использование явлений пирoeлектричества (т. е. появления электрического заряда в кристалле при его нагревании) и пьезoeлектричества (получение электрической энергии прямо, в результате давления на твердое тело, минуя промежуточные этапы превращения энергии). Последнее явление сейчас уже освоено техникой, во-первых, для измерительных целей, во-вторых, для генерации звуковых волн. Но его использование непосредственно для получения электрического тока в энергетике пока мало разработано. Поэтому мы не коснемся этих способов. Напротив, мы остановимся на тех путях, которые более или менее разработаны технически или, по крайней мере, позволяют судить о перспективах их использования.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

В настоящее время существует множество типов электростатических генераторов. Во всех этих генераторах прост-

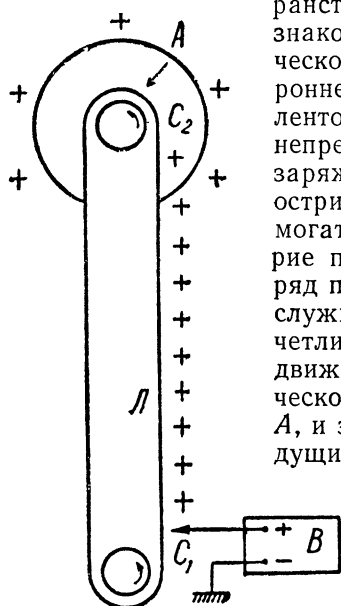


Рис. 4. Схема электростатического ленточного генератора.

ранственное разделение зарядов различных знаков осуществляется посредством механической тяги, которая играет здесь роль сторонней э. д. с. Это особенно ясно на примере ленточного генератора (рис. 4), где лента L , непрерывно движущаяся на двух валиках, заряжается зарядом одного знака, обычно с острия¹ C_1 , питаемого от какого-либо вспомогательного источника B (на рис. острие положительно). Лента несет этот заряд по направлению к коллектору, которым служит шар большого радиуса A . Здесь отчетливо видно, что положительные заряды движутся вместе с лентой против электрического поля, создаваемого зарядами шара A , и это движение осуществляется тягой ведущих валиков. Пройдя внутри шарового

коллектора, заряды снимаются с ленты посредством острия² C_2 и переходят на внешнюю поверхность шара. Таким образом, на шаре собирается положительный заряд, который может зарядить эту систему до достаточно высоких напряжений. Уже сейчас построены электроста-

¹ На острие возникает так называемая электрическая корона (вид электрического тока в газе), в которой к острию притягиваются носители заряда, противоположные по знаку заряду острия, и, напротив, удаляются носители заряда, одноименные с зарядом острия.

² С острия C_2 на ленту «стекает» отрицательный заряд, нейтрализующий заряд ленты; остающийся на острие свободный положительный заряд уходит на внешнюю поверхность шара.

тические генераторы, позволяющие получать постоянную разность потенциалов порядка 5 млн. в относительно земли. Между двумя такими шарами можно получить разность потенциалов порядка 10 млн. в. Однако максимальный ток таких генераторов не превышает долей миллиампера.

Примерно так же устроен и пылеструйный генератор, в котором роль участков ленты играют частички пыли, переносимые потоком газа и несущие на себе электрические заряды одного знака.

В пароструйном генераторе, внешне сильно отличном от двух предыдущих типов, по существу происходит нечто анало-

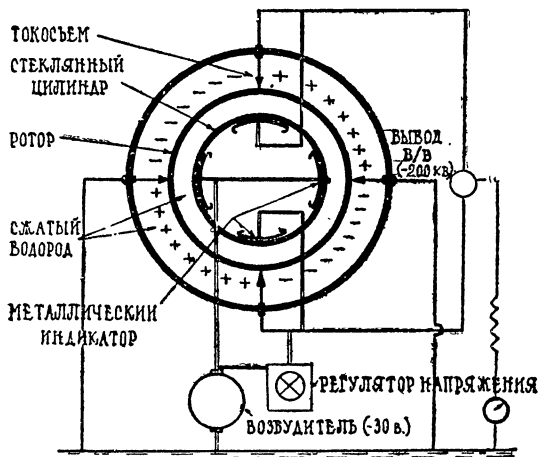


Рис. 5. Электростатический генератор с вращающимися цилиндрами.

гичное. Роль ленты, несущей заряды, здесь играет поток пара. Роль э. д. с. в обоих последних типах генераторов играет разность давлений, приводящая газ в движение.

В жидкостном генераторе капли жидкости разбрызгиваются и вместе с тем заряжаются, проходя под давлением через сито, к которому приложено электрическое напряжение от источника возбуждения. Под действием силы тяжести заряженные капли падают в коллектор, при этом они движутся против поля зарядов, уже собранных в коллекторе. Роль э. д. с. здесь играет сила тяжести. Капли отдают свой заряд коллектору, изолированному от источника струи; таким образом, получают постоянное напряжение.

Существуют более отработанные конструкции электростатических генераторов. К ним относится генератор с вращающимися цилиндрами (рис. 5). Он представляет собой такой же генератор с твердым носителем заряда, как и ленточный гене-

ратор, но только лента заменена вращающимися цилиндрами. Для повышения допустимого напряжения вся система цилиндров и коллекторов помещена в атмосфере сжатого газа. Такой генератор позволяет получать мощность в несколько киловатт при сравнительно небольших размерах устройства. Таким образом, мы видим, что электростатические генераторы различных типов позволяют получать сравнительно высокое напряжение, исчисляемое в десятках и сотнях тысяч и даже в миллионах вольт. Но токи наиболее мощных электростатических генераторов измеряются миллиамперами. Поэтому и мощность, вырабатываемая этими генераторами, невелика — она не превышает нескольких киловатт. Отсюда ясно, что здесь пока еще не идет речь о генерации мощности в промышленном масштабе. И это не случайно — не потому, что конструкция неудачна, а вследствие принципа действия этих генераторов. Здесь приходится перевозить заряд одного знака на движущемся транспорте (твердом, жидком или газообразном). Такой некомпенсированный электрический заряд одного знака создает вокруг себя сильное электрическое поле. Перевозить заряд большой плотности невозможно, так как это приводит к возникновению очень сильных электрических полей, вызывающих электрические пробой окружающего газа и твердых изоляторов, которые поддерживают и направляют движение носителя заряда. Поэтому пока не будут найдены диэлектрики (изоляционные вещества), которые намного, по крайней мере в 10 раз, превосходят по своей электрической прочности диэлектрики, применяемые до сих пор, нельзя намного увеличить мощность таких генераторов.

Электростатические генераторы, как хорошие источники высокого постоянного напряжения, нашли применение в исследовательской лабораторной практике, например в ядерных лабораториях для ускорения элементарных частиц, а также в целом ряде специальных технологических процессов, где требуется повышенное постоянное напряжение, например в пылеулавливании, в окраске путем пульверизации и т. д. Для генерации же электроэнергии в большом масштабе этот путь пока перспектив не имеет.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

Значительно лучшие перспективы экономичного получения больших количеств электроэнергии представляет разработка и внедрение новых путей использования энергии топлива. Эти пути не открывают новых энергетических ресурсов, но они позволяют думать о лучшем, более экономном или более удобном использовании уже имеющихся. Сравнительно близким по идее к существующей схеме тепловой электростанции является магнитогидродинамический генератор. В основе

его работы лежит тот же принцип, что и в основе обычного генератора (динамомашины) постоянного тока: принцип наведения индукционного тока в проводнике, движущемся в магнитном поле. Но в отличие от простейшей машины постоянного тока роль движущегося проводника здесь должен играть не металлический провод, а струя сильно ионизованного газа. Схематически это представлено на рис. 6. Между полюсами магнита N (северный) и S (южный) по трубе движется поток сильно ионизированного газа—плазмы¹. В этом движущемся проводнике возникает наведенная э. д. с., направление которой перпендикулярно направлению движения газа и направлению магнитного поля. В данном случае э. д. с. индукции будет направлена сверху вниз. Чтобы ее использовать, нужно к этому ионизованному газу, движущемуся в магнитном поле, присоединить внешнюю цепь. Для этого газ должен двигаться между электродами (на рис. 6 показаны зачерненными пластинами). Если к этим электродам присоединить внешнюю цепь, то в ней возникает наведенный ток. Он получается за счет энергии движения газа в магнитном поле. Магнитное поле тормозит движение ионизованного газа, поэтому газ, двигаясь в магнитном поле, должен преодолевать большее сопротивление. Добавочная работа на преодоление магнитного поля и будет преобразовываться в электрическую энергию.

Поток ионизированного газа можно получить различными способами. В частности, и это очень важно, ионизированный газ получают, просто нагревая любой газ до температуры в несколько тысяч градусов. На сколько именно—это зависит от того, с каким газом мы будем иметь дело. Воздух, например, сильно ионизируется при температуре 5000—6000°С. Если же добавить в воздух пары щелочных металлов, то можно получить сильную ионизацию уже при температуре порядка 2500—

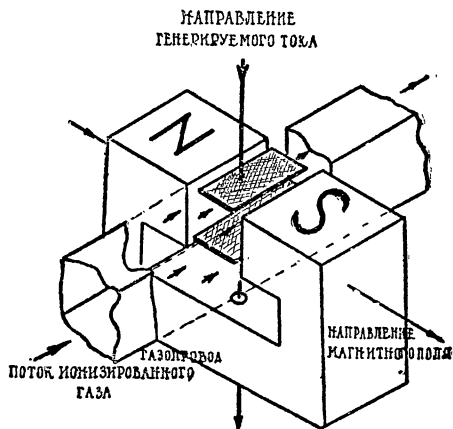


Рис. 6. Принцип магнитогидродинамического генератора.

¹ Газовой плазмой называется газ, в котором значительная часть (или даже все 100%) образующих его атомов или молекул ионизирована. Поэтому плазма — смесь ионов, свободных электронов и нейтральных молекул, оставшихся неионизированными.

3000°C. Такую температуру мы можем создать в пламени, возникающем при сгорании различных видов топлива. При этом нужно добиваться и высокой электропроводности газа, и его движения с большой скоростью. Для этого камера сгорания должна быть снабжена соплом наподобие сопла турбины или ракеты. При сгорании топлива в замкнутой камере возникает не только высокая температура, но и высокое давление. Под действием этого давления газообразные продукты сгорания устремляются в сопло; специально рассчитанная форма сопла позволяет добиться высоких скоростей истечения, превышающих скорость звука.

Таким образом, применение вместо металла горячего ионизованного газа позволяет генерировать электроэнергию за счет тепловой энергии, минуя ее преобразование в кинетическую энергию вращения твердых тел (роторов турбины и генератора). По сравнению с газотурбинной электростанцией мы сокращаем оборудование на один очень существенный агрегат — газовую турбину, заменяя турбину и генератор одним устройством. А по сравнению с паровой станцией магнетогидродинамический генератор позволяет исключить два агрегата — здесь отсутствует еще и паровой котел. Выигрыш в конструктивном отношении очевидный. В энергетическом отношении тоже можно ожидать выигрыша. За счет того, что мы экономим по крайней мере одну ступень преобразования энергии. Правда, к сожалению, мы все-таки имеем дело с тепловой энергией. Поэтому термодинамический к. п. д. $k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ (см. стр. 10) и здесь является предельным, как и у всякой тепловой машины.

Мы не можем добиться полного использования тепловой энергии, так как она здесь должна превращаться в энергию упорядоченного движения (электрического тока), что не может быть сделано полностью. Но мы не только можем, но и обязаны использовать очень высокую температуру нагревателя (камеры сгорания). О температуре в 650°, которая для паровой ТЭС является сейчас пределом, и говорить нечего; здесь нужно работать при температурах порядка 2500—3000°C. Само по себе получение и пропускание сквозь генератор потока газа такой температуры представляет собой нелегкую техническую проблему: нужны жаростойкие вещества, которые могут длительно выдерживать такие температуры.

Что же в этом направлении сделано сейчас? Существуют и описаны в литературе работающие модели м. г. д. генераторов, развивающие мощности от 1 до 200 кВт в течение нескольких минут или даже секунд. Это экспериментальные модели, предназначенные для исследования принципа работы и испытания материалов. Промышленного значения все эти модели еще не имеют. Но уже в течение двух лет на Западе существует

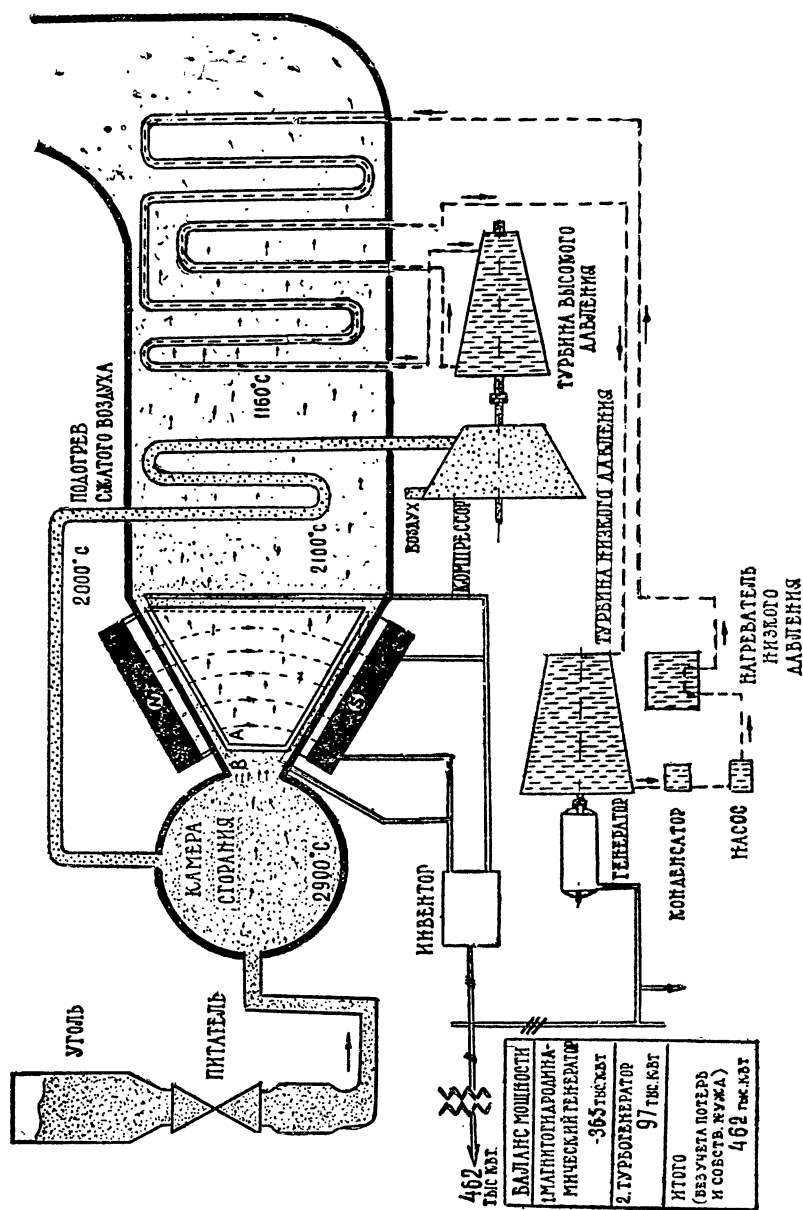


Рис. 7. Проект магнитогидродинамической электростанции.

проект (см. рис. 7, правда, пока что это только картинка) м. г. д. генератора большого масштаба.

В камеру сгорания поступает и сгорает распыленный уголь. Для получения более высокой температуры воздух вдувается в камеру сгорания предварительно подогретым. Продукты сгорания, нагретые до температуры порядка 2900°C и обогащенные парами натрия или калия, поступают мощным потоком в сопло, где ускоряются и затем проходят между коллекторными пластинами (A и B) в магнитном поле между полюсами электромагнита (N и S). При этом значительная часть теплоты используется для генерации тока. Однако все тепло в м. г. д. генераторе полностью нельзя использовать. Выходящие из него горячие газы должны иметь еще достаточно высокую температуру — порядка 2100°C , иначе они перестанут проводить ток. Поэтому неизрасходованное ими тепло используется в дальнейшем. Во-первых, часть его расходуется для предварительного подогрева воздуха, вдуваемого в камеру сгорания; во-вторых, остающееся после этого тепло, соответствующее температуре 1160°C , применяется для работы вспомогательного паросилового цикла, который позволяет утилизировать еще некоторую часть тепла ¹.

Расчетная мощность всей установки ≈ 460 тыс. *квт*, из них м. г. д. генератор вырабатывает 365 тыс. *квт*, а остальные 95 тыс. *квт* получают от добавочного паросилового цикла. Из этой мощности часть будет расходоваться в самом генераторе на возбуждение магнитного поля электромагнитами и другие «собственные нужды»; остальная энергия должна поступать во внешнюю сеть. Ожидаемый к. п. д. всей станции в целом может доходить до 65%. Этот проект сильно разрекламирован, вероятно, с целью привлечь к нему внимание и капиталовложения. В настоящее время над ним, по-видимому, серьезно работает большая группа ученых (Спорн, Кантровиц и др.).

Наши ученые также работают над аналогичными проблемами. В частности, на прошедшей летом 1960 года 2-й Всесоюзной конференции по магнитной гидродинамике представители одного из советских научных учреждений докладывали свои проекты магнитогидродинамических генераторов переменного тока, спроектированных аналогично тому, что мы привыкли видеть в обычном генераторе трехфазного тока. Эта система, несмотря на свои большие масштабы, по существу — простейшая машина, которая должна вырабатывать постоянный ток; лишь в специальном дополнительном устройстве этот постоянный ток путем инвертирования должен превратиться

¹ На рис. 7 в этой части установки показаны две паровые турбины: первая из них связана с компрессором, всасывающим воздух для дутья, а вторая приводит в движение генератор, вырабатывающий добавочную электроэнергию.

в переменный. Желательно — и такую задачу ставят перед собой некоторые из ученых, разрабатывающих м. г. д. генераторы, — вырабатывать в них непосредственно переменный ток.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В отличие от магнитогидродинамического генератора, использующего явление электромагнитной индукции и позволяющего в цепи преобразований энергии сэкономить одну ступень (вращение твердого тела), термоэлектрические генераторы основаны на непосредственном превращении теплоты в электроэнергию, что позволяет избежать еще одной ступени — перехода теплоты в энергию потока газа или пара. Явление термоэлектрического тока было открыто еще в 1821 году Зеебеком. До недавнего времени оно практически применялось главным образом для измерения температуры и для обнаружения небольшого количества тепла (во всякого рода автоматических устройствах, связанных с нагревом тел, и т. д.).

Можно ли использовать термоэлементы и их сочетание в виде батареи иначе — для генерации электроэнергии? Сам по себе этот вопрос также не нов: первый термогенератор электроэнергии был построен еще в начале века. Однако и мощность, и к. п. д. термоэлемента, как генератора, оказались очень невысокими.

Выясним, отчего это происходит. Цепь термоэлемента в простейшем случае (рис. 8, а) состоит всего из двух разнородных проводников *I* и *II*. Один их спай поддерживается при более высокой температуре T_1 ; противоположный спай *B* все время охлаждается и имеет более низкую температуру T_2 . В таком случае происходят два явления.

Во-первых, в этой цепи появляется э. д. с. и течет электрический ток. Э. д. с. термоэлементов малы (доли вольта), а потому и мощность термоэлектрического тока мала. Причина этого в следующем. В основе этих явлений лежит контактная разность потенциалов, появляющаяся между двумя соприкасающимися проводниками. Она обусловлена тепловым движением носителей зарядов в проводниках — свободных электронов или «электронных дырок» (см. ниже). Проще всего пояснить дело в том случае, если в одном проводнике (*I*) имеются отрицательные носители (электроны), а в другом (*II*) — положительные («дырки»). Тогда вследствие теплового движения в месте соприкосновения проводников из *I* в *II* перейдет некоторое число электронов, а из *II* в *I* перейдет какое-то число «дырок». В результате проводник *I* зарядится положительно, проводник *II* — отрицательно. Между проводниками появится напряжение — контактная разность потенциалов. Она будет повышаться до тех пор, пока не затормозит дальней-

шего перехода электронов и «дырок» из одного проводника в другой¹. Для оценки возникающей при этом разности потенциалов учтем, что средняя кинетическая энергия теплового движения электронов при температуре 7460°C равна одному электронвольту. Так как мы не можем нагреть твердый металл до температуры выше 3500°C (при этих температурах самые тугоплавкие металлы плавятся), то нельзя ожидать возникновения большого напряжения таким путем. Действительно, контактная разность потенциалов не превышает нескольких вольт. Эта разность зависит от материалов проводников, но, кроме того, зависит еще от температуры спая или контакта. Если температура одного контакта больше, чем другого, то контактные разности потенциалов в них различны. Термоэлектродвижущая сила термоэлемента не просто разность потенциалов, это разность контактных разностей потенциалов двух спаев — горячего и холодного. Поэтому это еще меньшая величина, чем напряжение в одном спае: термоэлектродвижущая сила термоэлемента не превышает долей вольта.

Во-вторых, наряду с электрическим током, который мы можем извлечь из термоэлемента, в нем течет и второй поток — это поток тепла от нагретого спая к холодному спаю *В*. Этот поток течет по обоим проводникам *I* и *II* параллельно; он течет и в том случае, если электрическая цепь термоэлемента где-либо разомкнута. Пользы от этого тепла нет; это просто потеря тепла. Есть и другие явления, на которых мы здесь не останавливаемся, но которые также связаны с передачей теплоты, например перенос тепла в местах спая проводников при протекании электрического тока (так называемая теплота Пельтье).

В схеме, изображенной на рис. 8,а, термоэлемент замкнут накоротко и электрический ток не уходит во внешнюю сеть. Чтобы использовать электрический ток термоэлемента, мы должны какой-нибудь из проводников термоэлемента разрезать (рис. 8,б) и включить в разрез нагрузку, обычно через соединительные проводники *III*. Потеря тепла мы, к сожалению, устранить этим не можем, так как у внешних концов проводников *I* и *II* должна поддерживаться низкая температура T_2 .

Чтобы получить сколько-нибудь заметную для целей энергетики э. д. с., мы должны соединить термоэлементы последовательно в виде батарей. На схеме (рис. 8,в) показан ряд термоэлементов, включенных последовательно. Здесь два метал-

¹ Возможны случаи, когда носителями тока в обоих проводниках являются электроны, но концентрации их различны (например, в *I* их больше, чем в *II*). Тогда электроны будут в большем количестве переходить из *I* в *II*, чем наоборот. В этом случае *II* приобретет лишние электроны и зарядится отрицательно; *I*, потеряв часть электронов, приобретает заряд $+$.

ла. Но если электрически термоэлементы соединены последовательно, то в смысле потери тепла они оказываются соединенными параллельно: потоки тепла идут от нагревателя (T_1) к холодильнику (T_2) по всем проводникам в одну сторону и потому складываются. Поэтому в любой термобатарее большая доля теплоты теряется безрезультатно.

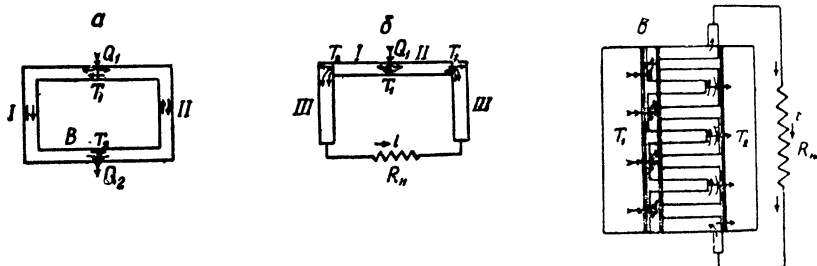
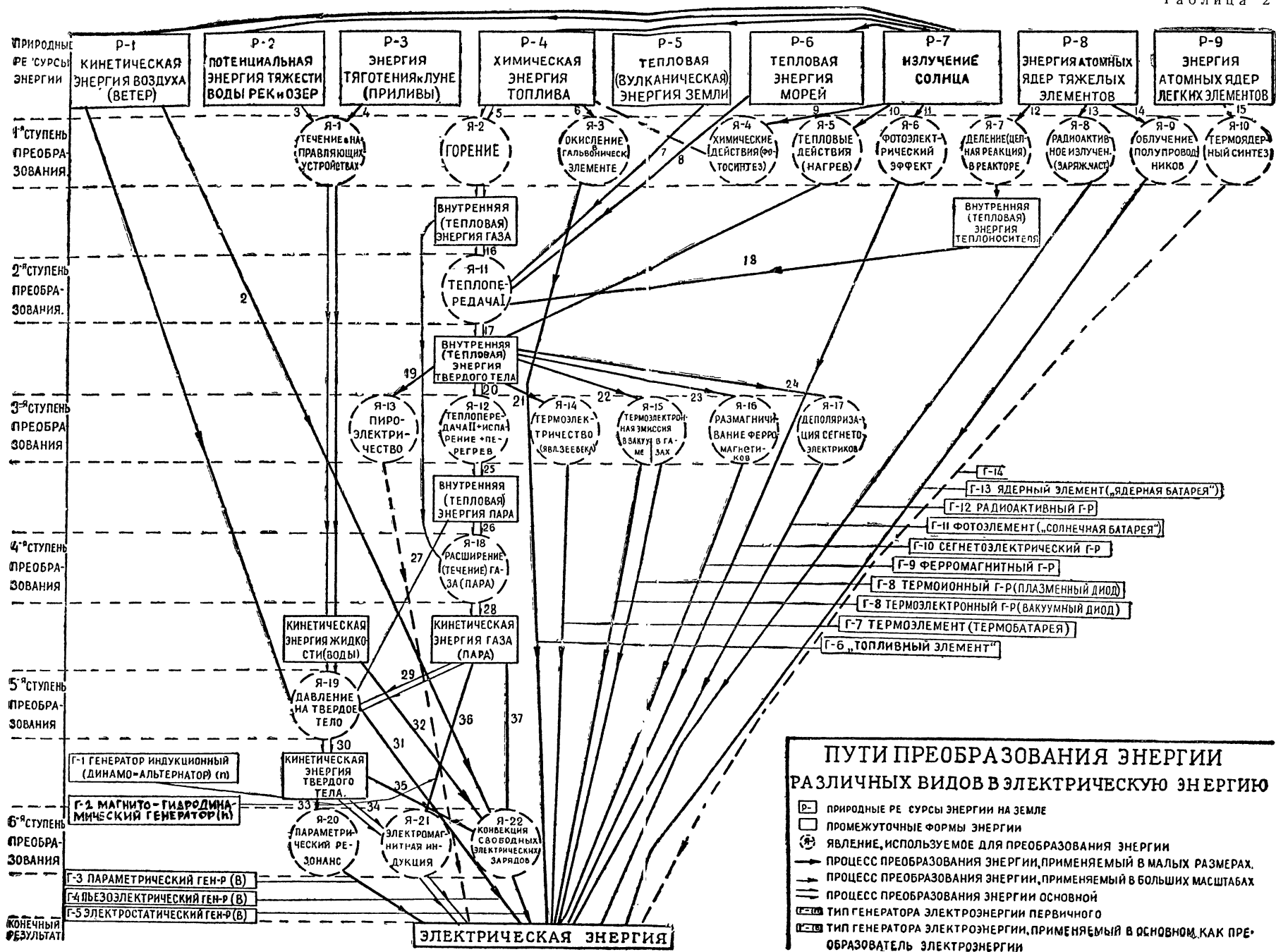


Рис. 8. Электрические и тепловые токи в термоэлементах: *а* — простейшая термопара, замкнутая накоротко; *б* — термопара с присоединенной нагрузкой; *в* — термобатарея с присоединенной нагрузкой.

Коэффициент полезного действия батареи термоэлементов, как у любой тепловой машины, тем выше, чем выше температура нагревателя T_1 и чем ниже температура холодильника T_2 . Далее, к. п. д. зависит от соотношения между внутренним сопротивлением термобатареи и сопротивлением нагрузки; это также общее положение, относящееся к любому источнику тока. Наконец, к. п. д. термобатареи зависит еще от некоторой характеристики материалов самой батареи (ее можно назвать термоэлектрической «добротностью» материала), учитывающей термоэлектродвижущую силу, электропроводность и теплопроводность материала¹. Добротность у металлов обычно порядка 10^{-5} 1/град; у полупроводников она выше и может достигать до $1.5 \div 2 \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Сказанное объясняет, почему из металлических термоэлементов не получались (и не видно, чтобы могли получиться) источники электроэнергии с к. п. д., превышающим 1—2%. Но сейчас возможности техники расширились: наряду с металлическими проводниками мы теперь широко пользуемся полупроводниковыми материалами. Их основное отличие от металлов в данном случае состоит в возможности получения большей термоэлектродвижущей силы α на один градус раз-

¹ «Добротность» материала термоэлемента Z выражается через его термоэлектродвижущую силу α , электропроводность σ и теплопроводность k формулой: $Z = \alpha^2 \frac{\sigma}{k}$.



ности температур, т. е. в большей добротности. Объясняется это следующим. В металле нагрев только ускоряет движение электронов; концентрация свободных электронов в металле практически не меняется. В полупроводниках свободных электронов при низких температурах мало, но при повышении температуры количество свободных электронов быстро растет. Средняя скорость теплового движения электронов в полупроводниках также растет быстрее, чем в металле. Уже сейчас известны полупроводниковые термоэлементы, которые развивают термоэлектродвижущую силу на порядок большую (от

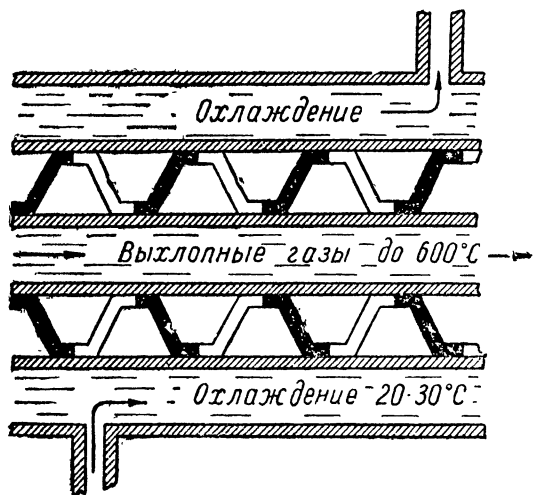


Рис. 9. Термоэлектрический генератор, нагреваемый выхлопными газами.

0,1—0,2 до 1 милливольт на градус), чем металлы (сотые доли милливольт на градус). Это позволяет получить полупроводниковые термоэлементы с к. п. д. до 10—15%. Поэтому вопрос о генерации электроэнергии с помощью термобатарей уже начинает становиться серьезным.

Техника пока еще только осваивает этот вид генераторов электроэнергии. Уже несколько лет, как выпущены в продажу термобатарей ТГК-3 с подогревом от керосиновой лампы и воздушным охлаждением с помощью радиатора, предназначенные для питания радиоприемников в местностях, где нет электросети; мощность их порядка нескольких ватт. Они разработаны Ленинградским институтом полупроводников под руководством акад. А. Ф. Иоффе. Более крупные термобатарей описаны в литературе и существуют пока в виде образцов. Ряд фирм в разных странах построил для питания электроэнергией кораблей — морских (особенно подводных), воз-

душных и космических — термобатарей на 2,5; 5 и 10 квт. Простейшая схема устройства такой батареи показана на рис. 9. Термоэлементы этой батареи составлены из кольцевых или воронкообразных проводников, соединенных между собой попеременно по окружности то большего, то меньшего диаметра. Термоэлементы располагаются в стенке между внутренним каналом, по которому протекает горячий газ («нагреватель»), и наружной полостью, служащей рубашкой охлаждения, или заменяющим ее радиатором. Горячие спаи термоэлементов обращены внутрь, к нагревателю; холодные спаи — наружу, к холодильнику. Нагрев может производиться либо пламенем специальной горелки, вставленной внутрь, либо потоком топливных газов или выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания. Можно также использовать для этой цели газ, нагреваемый ядерным реактором. Охлаждение производится либо жидкостью, протекающей по наружной рубашке (вода, масло), либо потоком холодного воздуха, либо излучением.

Об экономических перспективах этого пути в промышленной энергетике можно судить из анализа на рис. 10. Если удастся освоить термоэлементы с добротностью $Z \approx 5 \div 7 \cdot 10^{-3}$, то можно будет достичь к. п. д. 25—30% при рабочих температурах $\sim 800^\circ\text{C}$ ¹. Они еще будут уступать по к. п. д. паровым ТЭС высокого давления. Но так как оборудование термоэлектрических ТЭС будет гораздо проще (отсутствуют котельная и паровая турбина), то, как подсчитали английские исследователи, можно ожидать, что стоимость электроэнергии термоэлектрических ТЭС даже в этих условиях окажется ниже, чем у паровых ТЭС. Однако такая добротность термоэлементов пока еще не достигнута, и ТЭС на этом принципе еще не строят.

ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Казалось бы, на совершенно другом принципе основаны так называемые термоэлектронные преобразователи тепловой энергии. Любой вакуумный диод (т. е. двухэлектродная

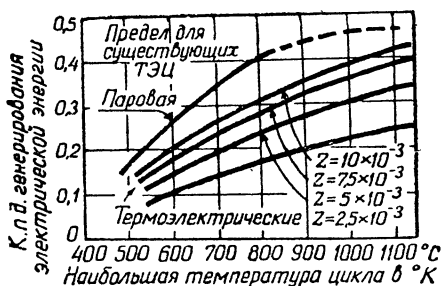


Рис. 10. К. п. д. паровой и термоэлектрической электростанций в зависимости от максимальной температуры.

¹ Есть указания в литературе на то, что соединение селена с редким металлом гадолинием позволяет получить добротность до $45^\circ \cdot 10^{-3}$ град⁻¹ и к. п. д. до 55%. Практическое применение такого материала ограничивается его редкостью и дороговизной.

лампа), содержащий два электрода — нить накала (катод) и металлическую пластинку (анод), служит простейшим образом такого преобразователя.

Идея использования вакуумного диода как генератора электроэнергии основана на следующем. При нагревании нити до высокой температуры током от какого-нибудь источника (от батареи или трансформатора) нить излучает в вакуум поток электронов. Часть из них достигнет анода. Если между катодом и анодом включить какую-либо нагрузку, то ток потечет по этой нагрузке, и на ней будет выделяться какая-то

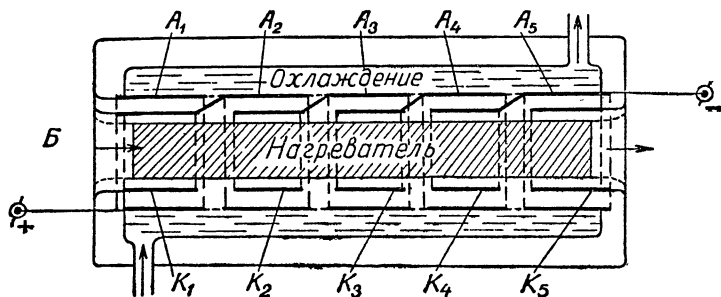


Рис. 11. Термоэлектронный генератор (схема) батареи элементов.

мощность. Электрический ток, и электрическая мощность получают в данном случае за счет кинетической энергии электронов, вылетающих из накаливаемой нити. Это простейший термоэлектронный генератор.

Однако такой пример сразу вызывает возражение: почему мы называем это преобразованием теплоты в электроэнергию, если катод накаливается электрическим током? Ведь прибор работает за счет расхода электроэнергии. Это верно. Но легко себе представить такое видоизменение конструкции преобразователя, чтобы катод подогревался на самом деле теплом от химического или ядерного источника, а не электрическим током.

Представим себе (рис. 11) катод K диода в виде полого цилиндра, а анод A в виде второго цилиндра, окружающего первый; между ними поддерживается вакуум. Внутренний цилиндр K нагревается каким-либо введенным внутрь него источником тепла: струей топочных или выхлопных газов двигателя или потоком теплоносителя, нагреваемого в ядерном реакторе. Снаружи цилиндр K может быть покрыт веществом, облегчающим испускание электронов. Такой катод накаливается непосредственно от источника тепловой энергии. Если температура катода достаточно высока для электронной эмиссии, то мы получаем действительно преобразование тепла в элек-

трическую энергию. В качестве примера такого преобразователя на рис. 12 показан один из зарубежных образцов термоэлектронного генератора, предназначенного для установки на выхлопной трубе ракетного двигателя. Его длина 300 мм, диаметр 44 мм. Катодом служит внутренний цилиндр из молибдена, покрытый танталом для увеличения эмиссии электронов; анод — медный, никелированный; зазор между ними 1 мм. Прибор развивает мощность около 270 вт при температуре катода 2200°С; его к. п. д. 8%; вес 1,5 кг.

Описанный здесь способ подогрева катода сходен с системой подогрева термоэлектронного генератора, изображенной на рис. 9. Однако сходство не ограничивается только одинаковыми способами подвода тепла. По существу термоэлектронный генератор — это тоже термоэлемент, только другого типа нежели термоэлементы металлические или полупроводниковые.

Термоэлектрическая цепь здесь состоит из катода, вакуумного промежутка с движущимися в нем свободными электронами, испущенными катодом, анода и внешней цепи. Наибольшее напряжение, которое может дать такой элемент, определяется разностью работ выхода электронов из катода и анода. Если эта разность равна нулю, то прибор не может дать никакого напряжения. Поэтому здесь также нужно иметь два проводника с разной работой выхода электронов.

Напряжение, которое может дать такой источник тока, очень невелико. Оно не превышает разности работ выхода электронов из катода и из анода, т. е. 2—3 в. Поэтому термоэлектронные генераторы целесообразно соединить между собой последовательно, как термобатарей. Пример такого соединения и показан на рис. 11; цепь содержит столько вакуумных промежутков, сколько в нее включено диодов.

Введение вакуумного промежутка в цепь имеет свои преимущества и свои недостатки. К преимуществам относится то, что вакуумный промежуток переносит теплоту только посредством излучения. Поэтому уменьшается передача тепла от нагретого участка (катода) к холодному (аноду), т. е., в конечном итоге, от нагревателя к холодильнику. Это обстоятельство позволяет применять высокие температуры катода¹, необходимые для сильной эмиссии, без больших потерь тепла. Общая формула предельного к. п. д. тепловой машины показывает, что здесь можно за счет применения очень высоких температур нагревателя теоретически ожидать большого к. п. д.

Введение вакуумного промежутка в цепь имеет тот недостаток, что такой промежуток обладает очень большим сопротивлением электрическому току. Если катод испускает большое количество электронов, то эти электроны своим элек-

¹ Так, вольфрамовый катод работает при температуре порядка 2500°.

трическим полем отталкивают следующие за ними электроны. Возникает то, что называется объемным зарядом, препятствующим протеканию тока через прибор. Если плотность тока эмиссии составляет десятые доли ампера с квадратного сантиметра, то в промежутке шириной в 1 см будет одновременно находиться 10^{11} электронов против каждого сантиметра катода.

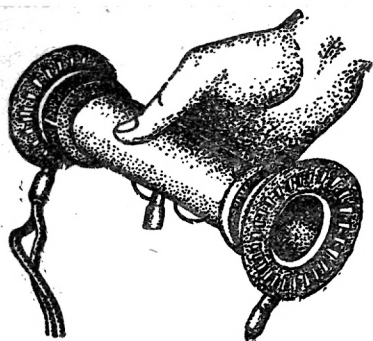


Рис. 12. Термоэлектронный генератор с подогревом выхлопными газами двигателя (опытный образец).

Чтобы они не мешали полету к аноду следующих за ними электронов, можно применить различные методы. Можно, например, придвинуть анод близко к катоду, оставив между ними зазор порядка одной-двух сотых миллиметра. В таком узком зазоре будет одновременно находиться сравнительно немного электронов, их общий отрицательный заряд невелик, и они не будут сильно тормозить движение последующих электронов. Однако трудно точно поддерживать такой узкий зазор при накале катода до высокой температуры. Мож-

но иначе устранить действие объемного заряда электронов в промежутке катод—анод, нейтрализовав их отрицательный заряд введением сюда же положительных ионов. Для этого достаточно впустить в этот промежуток пары легко ионизируемого щелочного металла, лучше всего наиболее тяжелого из них — цезия.

При попадании атома этого вещества на поверхность накаливаемого металла с достаточно сильным электрическим полем у поверхности (мерой чего служит величина работы выхода электрона из металла — не менее 3—4 эв) от атома цезия отделится электрон и войдет внутрь металла. Сам же атом цезия, ставший положительным ионом, на поверхности накаливаемого металла не удержится и вновь улетит уже в виде положительного иона. Такое явление называется «термической ионизацией». Именно эти условия имеют место на катоде, который должен поддерживаться горячим, чтобы испускать электроны¹.

¹ Здесь появляется противоречие: для того чтобы катод испускал сильный электронный ток, работа выхода электронов из него должна быть мала; для того чтобы он ионизовал пары цезия, эта работа должна быть велика. Как одно из решений этого противоречия, в литературе упоминаются так называемые «пятнистые катоды» с чередующимися участками малой и большой работы выхода электронов.

В образце термоэлектронного генератора, показанном на рис. 12, применен именно этот прием: прибор наполнен парами цезия. При этом удается довести плотность тока в таких генераторах до 60 а/см^2 и вырабатываемую мощность до 30 вт/см^2 . На таком же принципе спроектированы генераторы, использующие для нагрева катода солнечное тепло и ядерную энергию.

Сравнение практически осуществленных термоэлектрических и термоэлектронных генераторов показывает, что первые из них работают при температурах до $800\text{—}1000^\circ\text{C}$, вторые — при 2000°C и выше. Согласно теории тепловых машин, вторые должны поэтому обладать более высоким к. п. д. Однако потери тепла происходят и в термоэлектронных генераторах. Катод хоть и отделен от анода вакуумным промежутком, но из-за своей высокой температуры теряет много тепла излучением, которое достигает анода и нагревает его (в некоторых конструкциях до 600°C). Следует позаботиться об использовании и этой части подводимого тепла. Существуют конструкции комбинированных термоэлектронно-термоэлектрических генераторов, имеющих целью решить эту задачу. Источник тепла нагревает катод термоэлектронного генератора; часть тепла путем излучения, а также вместе с электронным током достигает анода; на аноде укреплены горячие спай термоэлектрической батареи, которая использует эту часть тепла, также преобразуя ее в электроэнергию. Образцы таких комбинированных генераторов построены пока на малые мощности.

ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

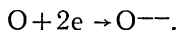
В ернемся снова к источнику энергии тепловых электростанций — к топливу. Во всех вышеописанных способах генерации электроэнергии топливо сжигалось; его внутренняя (химическая) энергия превращалась в тепло, которое дальше преобразовывалось в электроэнергию прямо или косвенно. Нельзя ли научиться использовать энергию топлива, не сжигая его? Заманчива мысль получать электрическую энергию прямым преобразованием химической энергии топлива, минуя превращения этой химической энергии в тепловую. При этом мы избегаем удручающе невыгодного процесса обратного преобразования теплоты в механическую энергию.

Можно ли это сделать? В принципе можно. Для этого нужно заменить сжигание топлива его окислением в гальванических элементах. До сих пор гальванические элементы не давали возможности непосредственно преобразовать энергию топлива в электроэнергию, так как в гальванических элементах использовалось не природное топливо, а различные металлы и другие химические вещества.

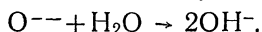
По существу идея «топливного элемента» сводится к следующему. Процесс горения — это химическая реакция окисле-

ния горючего, сопровождающаяся выделением большого количества энергии в виде тепла. Другие химические реакции, идущие с выделением энергии, как, например, растворение цинка в серной кислоте, давно используются для получения электрического тока в гальванических элементах. Это возможно потому, что при подобных химических реакциях происходит переход электронов от атомов одних веществ к другим¹. Чтобы энергия, освобождающаяся при таких электронных переходах, превращалась в работу электрического тока, а не в тепло, нужно заставить электроны переходить не непосредственно от одних реагирующих атомов к другим, а сначала пройти обходный путь через электроды, введенные в зону реакции, и внешнюю электрическую цепь; в последней они должны отдать освобождаемую энергию. Это и происходит в гальванических элементах, включенных в замкнутую цепь.

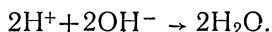
Аналогичным образом нужно организовать и реакцию горения. В качестве примера рассмотрим процесс «сгорания» водорода в кислороде, проведенный таким образом. Этот процесс распадается на следующие ступени. С одной стороны, молекулы водорода расщепляются каждая на два отдельных атома и они ионизируются, причем освобождаются два электрона: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}$. Их нельзя пустить сразу перейти к атомам кислорода. Нужно заставить их предварительно выделиться на аноде элемента и пройти через внешнюю электрическую цепь к другому электроду. Здесь атом кислорода, составляющий половину молекулы кислорода, получает 2 электрона, пришедшие из внешней цепи и превращающие этот атом в отрицательный ион кислорода:



Ионы O^{--} в одном растворе образуют с молекулами воды отрицательные гидроксильные ионы:



Наконец, большая часть ионов водорода H^+ и гидроксидов OH^- , образовавшихся при этом процессе, соединяются в молекулы воды:



Непосредственное горение смеси H и O приводит к выделению 137 килокалорий тепла на 1 моль² (т. е. грамм-молекулу) сгоревшего водорода. А при проведении этого процесса в гальванической цепи можно теоретически получить работу, эквивалентную 113 килокалориям. Это дало бы к. п. д. в 83%.

¹ На этом основана современная электронная теория химической валентности, излагаемая в учебниках химии.

² Моль — сокращенное название грамм-молекулы, т. е. количества данного вещества, содержащего столько граммов, сколько единиц в его молекулярном весе.

При использовании энергии угля идет другой процесс—соединение углерода с кислородом. Атом углерода должен отдать 4 электрона во внешнюю цепь: $C \rightarrow C^{++++} + 4e$. С помощью этих электронов два атома кислорода превращаются в 2 отрицательных иона: $O_2 + 4e \rightarrow 2O^{--}$ которые в воде образуют 4 гидроксильных иона: $2O^{--} + 2H_2O \rightarrow 4OH^{--}$. В действительности процесс происходит несколько сложнее, так как он практически должен проводиться при участии других веществ, например едкого натра. Тогда в целом реакция выглядит так:

$$C + O_2 + 2H_2O + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + 3H_2O.$$

Каков же энергетический баланс этой реакции? Тепловой эффект реакции сгорания углерода при температуре в $25^\circ C$ равен 94 килокалориям на моль. Максимальная работа, которую можно получить от этой реакции (в частности, это относится и к работе в гальваническом элементе), может составить тоже 94 килокалории на моль. К. п. д. здесь теоретически 100%! При этом ожидается э. д. с. 1,02 в. Если посмотреть таким же путем другие реакции горения (например, $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$), то мы встретимся здесь с теоретическими значениями к. п. д., превышающими 100%. Это может на неподготовленного читателя произвести впечатление мистификации. Но на самом деле все это вполне серьезно. Понимать это нужно так: энергетический выход выше 100% указывает, что помимо тепла, освобождаемого в самом процессе, здесь еще отбирается и используется тепло от окружающей среды. Это так называемая эндотермическая реакция. Такие реакции, если их произвести в гальваническом элементе, могут привести к тому, что даже часть тепла окружающей среды перейдет в электроэнергию.

Принципиальная схема такого топливного элемента показана на рис. 13. В сосуд с электролитом, например с раствором щелочи, введены две пористые трубки из электропроводных материалов. Через одну пропускается горючее — водород или какой-либо углеводород, через другую — кислород. Эти же трубки служат электродами, и к ним присоединяется внешняя цепь.

В действительности устройство топливных элементов гораздо сложнее. Сжигание даже газообразного топлива в галь-

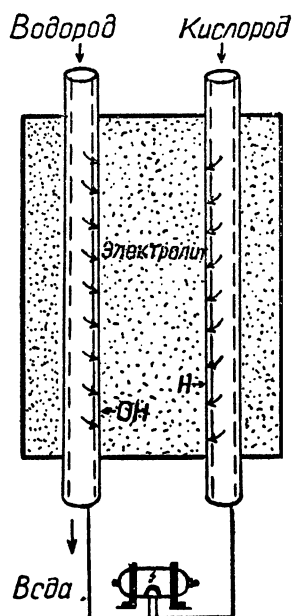


Рис. 13. Схема топливного элемента.

ваническом элементе — задача далеко нелегкая; она требует подбора подходящих условий (давления и температуры газов, состава электролита, материала и структуры трубок — электродов и т. д.). Она становится еще сложнее, если нужно сжигать твердое топливо — уголь, так как реакция окисления углерода даже при температуре 200—300°C идет крайне медленно. Приходится переходить к температурам порядка 700—800°C и применению веществ, ускоряющих реакцию (катализаторов). В результате упорной работы, начавшейся еще в прошлом веке в разных странах, разработаны опытные образцы топливных элементов и батарей; мощность их уже достаточна для ряда практических задач, хотя еще далека от промышленной энергетики.

В Англии Бэконом изготовлены элементы, в которых водород сгорает в кислороде при давлении 29—57 атм. и температуре 200—240°C. Элемент диаметром 250 мм и длиной 700 мм развивает э. д. с. в 1,02 в и позволяет получать ток до 0,7 а/см² и мощность до 0,41 вт/см². Эти элементы действуют до 1500 час. Генератор из 40 таких элементов вырабатывает мощность в 5 квт при напряжении 24 в.

В Амстердамском университете (Голландия), в США и других странах построены батареи с электролитом в виде расплавленных углекислых солей щелочных металлов, работающих при 600—800°C и давлении в 2 атм. С окисью углерода (СО) в качестве горючего получался к. п. д. до 89% (при малой нагрузке), а с водородом — до 98%. Американская фирма «Элис-Чэлмерс» объявила о построенной топливной батарее для питания трактора с электродвигателем. Топливом здесь служит горючий газ пропан (C₃H₈); развиваемая мощность — около 15 квт.

Из всех направлений работ по рациональному использованию энергии топлива это направление в принципе наиболее значительно потому, что позволяет обойтись без преобразования энергии топлива в энергию беспорядочного теплового движения и связанных с этим потерь энергии при ее дальнейших превращениях. Но трудности в его осуществлении также велики.

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

В табл. 1 (стр. 6) указано, что Солнце ежегодно посылает на Землю больше энергии, чем ее содержится во всех запасах угля на Земле. При этом и запасы угля, и энергия рек, и ветер, и теплота морей — все это также солнечная энергия, аккумулированная в разное время. Но аккумуляция на Земле подвергается только около 3% приходящей солнечной энергии; остальное (97%) отражается или излучается

вновь в космос поверхностью суши, воды и атмосферой, как видно из следующих данных:

Поток солнечного излучения на Землю $620 \cdot 10^{15}$ квт-ч/г	100%
из них:	
задерживается в атмосфере	60%
в том числе превращается в энергию ветра	2,5%
попадает на водные пространства Земли	25,5%
в том числе становится гидроэнергией	0,04%
попадает на твердую поверхность материков и островов	14,5%
в том числе преобразуется растениями в химическую энергию	0,12%
излучается в космическое пространство	≈ 97%

Не удивительно, что уже давно прилагаются усилия к тому, чтобы дополнительно задержать и использовать еще хотя бы часть солнечной энергии, в частности, для ее преобразования в электроэнергию. Гелиотехника (техника использования солнечного излучения, от греческого «гелиос» — Солнце) выдвинула в этом направлении ряд предложений.

Легче всего происходит преобразование лучистой энергии в теплоту. Энергия волн всех частей спектра (видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой) при попадании на тело, поглощающее эти волны, может, в конечном итоге, полностью превратиться в тепловую энергию. Поэтому сравнительно просто использовать солнечную радиацию как нагреватель в теплоэлектрической установке одного из типов, разобранных выше, — паросиловой, термоэлектрической, термоэлектронной. При этом нужно иметь в виду основные недостатки солнечной энергии — ее сравнительно слабую концентрацию и непостоянство в каждой точке земной поверхности. Она составляет на поверхности Земли¹ в среднем около 130 вт/м^2 . Поэтому для получения даже небольшой средней мощности в 1 квт нужно (учитывая неизбежные потери энергии) использовать солнечную радиацию, приходящуюся на участок земной поверхности порядка 10 м^2 . Обычные ТЭС обладают, конечно, гораздо большей мощностью на единицу площади. Концентрация излучения в гелиоустановках производится обычно большими отражателями (зеркалами) различной формы. Последние в течение дня поворачиваются так, чтобы отраженные ими солнечные лучи все время сходились на нагреваемом

¹ На площадку, установленную перпендикулярно солнечным лучам и расположенную за пределами атмосферы, этот поток примерно в 10 раз выше. Ослабление средней мощности солнечной радиации на поверхности Земли и ее непостоянство обусловлены поглощением и рассеянием ее в атмосфере, отражением от облаков и прежде всего сферической формой Земли и ее вращением вокруг оси.

объекте. Можно в фокусе такого отражателя или системы отражателей поместить котел с жидкостью (например, водой). При сильной концентрации солнечных лучей в котле получают пар достаточно высокой температуры и давления, чтобы привести во вращение турбогенератор. Такие экспериментальные паросиловые установки с солнечным нагревом построены в ряде стран.

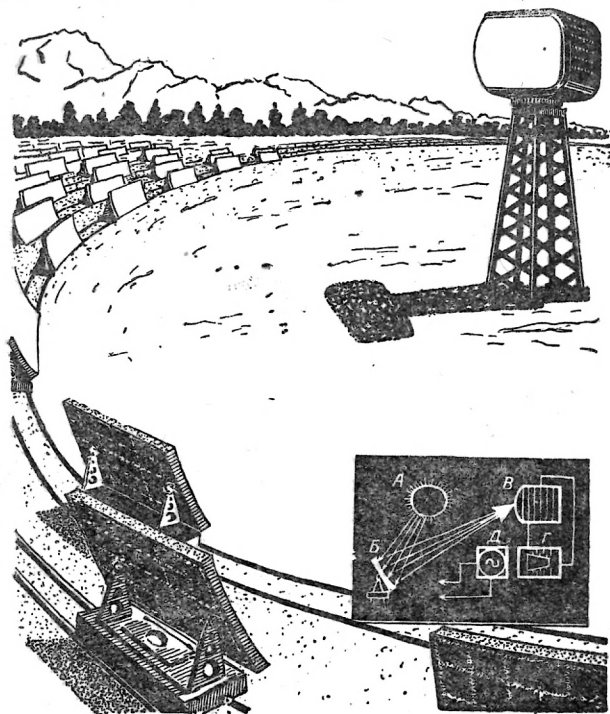


Рис. 14. Проект солнечной ТЭС возле Еревана. Проектная мощность 1200 кВт; выработка электроэнергии — 2,5 млн. кВт-ч в год.

Крупнейшая гелиостанция такого рода спроектирована для постройки в Армении, вблизи Еревана (рис. 14). Солнечные лучи, отраженные системой вогнутых зеркал (движущихся по рельсам и постоянно ориентируемых на Солнце), направляются на установленный в центре паровой котел и нагревают в нем пар до высокой температуры. Расчетная мощность этой станции 1200 кВт; годовая выработка электроэнергии может составить 2,5 млн. кВт-ч.

Вместо котла можно в фокус отражающей системы поставить термобатарею. В опытном термоэлектрическом солнеч-

ном генераторе в качестве отражателя использовано полутораметровое вогнутое параболическое зеркало старого прожектора. Поворотная система прожектора позволяет легко направлять в течение всего дня ось зеркала на Солнце. Термобатарея, укрепленная спереди на оптической оси зеркала, нагревается солнечным излучением и преобразует его в постоянный электрический ток. Вместо термоэлектрической батареи в фокусе отражателя также может быть установлен термоэлектронный вакуумный или газонаполненный преобразователь.

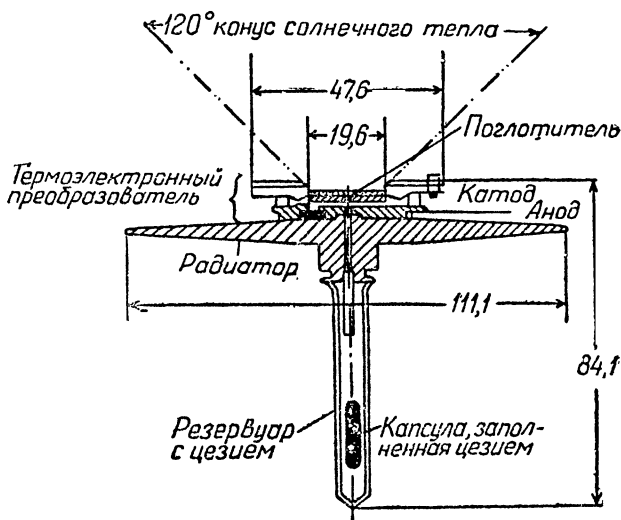


Рис 15. Термоэлектронный генератор с наполнением парами цезия для солнечного электрогенератора.

На рис. 15 показано (в разрезе) устройство термоэлектронного преобразователя с наполнением парами цезия, предназначенного для работы в гелиоустановке. При концентрации на нем 439 *вт* солнечной энергии, что требует площади отражателя в 3,3 м^2 , его катод площадью в 3 см^2 должен нагреваться до 3330°C. При этом вырабатывается электрическая мощность в 24 *вт* при напряжении в 1 *в*. Очевидно, экономичность таких установок еще невысока. К тому же мощность, вырабатываемая гелиоустановками, меняется на протяжении дня, зависит от времени года и состояния погоды, а ночью они вообще не работают. Это требует либо присоединения к гелиостанции аккумуляторов электроэнергии (любого типа), либо ограничивает ее работу обслуживанием потребителей только в дневное время,

Однако существуют специальные условия, при которых использование солнечных генераторов все же целесообразно. К ним относятся пустынные районы в тропических и субтропических широтах Земли, где солнечное излучение днем очень сильное и не подвержено капризам погоды, а экономия площади под установкой не имеет значения. Еще более целесообразно применение солнечных генераторов на космических кораблях. Здесь никаких других источников энергии, кроме солнечного излучения, на месте нет, ресурсы энергии надо «везти с собой» с Земли. Кроме того, если направлять гелиоустановку все время на Солнце, то ее работа может происходить бесперебойно, так как смены дня и ночи в этом случае не будет.

Разработке солнечных электрогенераторов для космических аппаратов и кораблей сейчас уделяется много внимания. В частности, и здесь стоит задача прямого непосредственного преобразования исходного вида энергии (солнечного излучения) в электроэнергию, минуя промежуточную стадию превращения в теплоту. Если энергию углеродистого топлива целесообразно преобразовывать в гальванических элементах, то энергию излучения можно превращать прямо в электроэнергию с помощью **фотоэлементов**.

Существуют фотоэлементы разных видов, основанные на различных фотоэлектрических явлениях. Фотоэлектронная эмиссия, т. е. испускание электронов освещенным металлом в вакуум или в какой-либо газ, обычно служит не для получения электроэнергии, а для светового управления электрическим током от какого-либо постороннего источника. Той же цели служат фотосопротивления — тонкие слои полупроводников, сопротивление которых уменьшается при освещении. Однако существуют фотоэлементы, в которых под действием света возникает э. д. с., и в присоединенной к ним цепи (без какого-либо другого источника тока) при освещении появляется ток. Такие фотоэлементы, к которым сейчас все чаще применяется название «солнечных фотоэлементов»¹, являются действительно преобразователями лучистой энергии в электроэнергию. Фотолюбители, например, хорошо знают фотоэлементы из селена, применяемые в экспонометрах.

Наиболее перспективный вид таких фотоэлементов представляет собой пластину из двух сложенных вместе полупроводников различного типа проводимости (рис. 16). В одном из них ток осуществляется движением свободных электронов, это случай электронной проводимости (иначе *n*-тип). В другом носителями являются так называемые «электронные дырки», это «дырочная проводимость» (или *p*-тип). При соприкосновении таких полупроводников (на рис. 16 — по

¹ Раньше их называли вентильными фотоэлементами; встречался также термин «фотогальванический эффект».

плоскости AA') на границе между ними возникает « p — n -переход»¹. Вследствие теплового движения некоторое количество свободных электронов переходит из n -вещества в p -вещество, где образуется в пограничном слое BA некоторый избыток отрицательного заряда. Наоборот, из p -вещества в n -вещество переходит некоторое число «дырок», вследствие чего в слое AC преобладает положительный заряд. В результате в пограничном слое p — n -перехода возникает электрическое поле², направленное от C к A . Оно препятствует дальнейшему переходу электронов и «дырок» в тех же направлениях; устанавливается электрическое равновесие. Если к обоим полупроводникам приложить металлические контакты (на рис. 16 отмечены штриховкой) и замкнуть их внешней цепью, то в этой цепи тока не будет. Пусть теперь в область p — n -перехода проникает свет (на рис. 16 — слева). Для этого по крайней мере один контакт и один полупроводящий слой должны быть достаточно тонкими, прозрачными для света (на рис. 16 слой p). Часть световых квантов (фотонов), достигая области p — n -перехода, может здесь поглощаться атомами полупроводника и отдавать свою энергию электронам, движущимся внутри атомов. В результате поглощения одного фотона атомный электрон, получив добавочную энергию, становится свободным и может уйти из своего атома. В этом атоме теперь будет не хватать электрона, т. е. возникает «дырка».

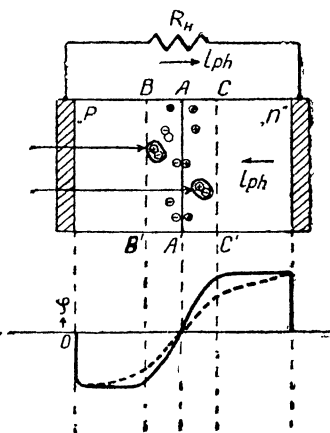


Рис. 16. Схема действия фотозлемента с p — n -переходом.

¹ В n -полупроводниках есть свободные электроны, не связанные с определенными атомами, которые могут перемещаться на большие расстояния. Их общее движение в какую-нибудь одну сторону создает ток в полупроводнике. При этом движутся отрицательные («негативные») заряды; отсюда название « n -проводимость». В p -полупроводниках свободных электронов нет; наоборот, есть места, где не хватает электронов («дырки»). При перескоке электрона из соседнего участка в эту дырку она заполняется, но зато проявляется нехватка электрона («дырки») в соседнем участке, как будто бы «дырка» сместилась навстречу фактическому перескоку электрона. Нехватка электрона («дырки») означает избыток в данном месте положительного электричества. Поэтому поток электронных «дырок» эквивалентен движению положительных («позитивных») зарядов; отсюда название « p -проводимость». При некоторых обстоятельствах в полупроводнике могут одновременно возникать и свободные электроны и «дырки». Подробнее об этом см., например, в книге А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников, 1957.

² Сплошная кривая на рис. 16 внизу изображает устанавливающееся при этом распределение потенциала φ . Он отрицателен со стороны p -вещества и положителен со стороны n -вещества.

Пара носителей — электрон и «дырка» — возникают одновременно в одном месте при поглощении здесь фотона. Электрическое поле в p — n -переходе разводит их: электроны — в слой AC , «дырки» — в слой BA . В результате двойной слой зарядов в p — n -переходе частично нейтрализуется зарядами обратных знаков, электрическое поле перехода ослабевает и равновесие нарушается¹. В фотоэлементе и в замыкающей его цепи возникает ток, направление которого показано на рис. 16 стрелками. На этом принципе построены солнечные фотоэлементы. Хорошие результаты дают фотоэлементы из кремния, который при добавлении к нему в ничтожных количествах разных примесок обладает либо n -, либо p -проводимостью. Такие фотоэлементы, соединенные группами в батареи, устанавливаются на космических аппаратах и искусственных спутниках Земли (у нас начиная со 2-го спутника). Они питают электроэнергией радиоаппаратуру, установленную на этих аппаратах. На Выставке достижений народного хозяйства в Москве можно увидеть солнечные фотоэлементы для питания радиоаппаратуры. Данные фотоэлементов типа «ВНИИТ» таковы: площадь одного элемента 2—15 $см^2$; напряжение, вырабатываемое при максимальном солнечном освещении (лучи падают перпендикулярно на фотоэлемент), 0,5—0,56 $в$; максимальный ток с единицы поверхности 20—30 $ма/см^2$. Такие фотоэлементы позволяют получить с 1 $м^2$ поверхности батареи, установленной перпендикулярно солнечным лучам, мощность порядка 100 $вт$.

Солнечные фотоэлементы, построенные за рубежом, имеют примерно такие же данные; указываются к. п. д. до 13—15%. Такой к. п. д. не является пределом. Теоретический анализ показывает, что он может дойти до 30—40%. Тогда с 1 $м^2$ солнечной батареи можно будет получать до 400—500 $вт$ электроэнергии. Для питания более мощной аппаратуры нужно улавливать солнечное излучение на большей площади. Поэтому в опубликованных проектах фотоэлектрических гелиоустановок для космических кораблей эти установки имеют громадные размеры.

В заключение укажем еще на одну группу физических явлений, которые пока гелиотехника не использует, но которые играют громадную роль в природе и создали, в частности, запасы углеродистого топлива на Земле. Это — фотохимические действия света. Одним из них является так называемый «фотосинтез» углеводов в зеленых листьях растений, в резуль-

¹ Распределение потенциала при освещении p — n -перехода показано на рис. 16 внизу пунктирной линией. Если на границах металла с полупроводниками контактные разности потенциалов не меняются, то появляется падение потенциала (электрическое поле) в каждом из полупроводников. Под действием этого поля основная масса носителей зарядов начинает двигаться в каждом из полупроводников, удаляясь от перехода AA ¹.

тате которого растение на свету усваивает углерод из атмосферной углекислоты. При этом энергия поглощенного света преобразуется в химическую энергию веществ, образующихся при фотосинтезе. Используемые нами запасы углеродистых топлив — это результаты фотосинтеза на Земле в далеком прошлом. Некоторые ученые предлагают использовать этот путь в настоящее время для получения электроэнергии за счет солнечной радиации. Среди разнообразных растений существуют некоторые виды, в том числе зеленая микроскопическая водоросль хлорелла, в которых при благоприятных условиях (специальный водоем, сильное освещение) фотосинтез идет необычайно быстро по сравнению с другими растениями. Этим путем из углекислоты атмосферы можно сравнительно быстро получать углеродистые вещества, являющиеся горючим. Сжигая его, можно, в частности, получать электроэнергию. По некоторым оценкам, опыты такого рода в тропических странах (например, Индии) могут представлять интерес.

ЯДЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Использование внутриядерной энергии может идти по двум направлениям. Первый путь — это освобождение части энергии, заключенной внутри ядер атомов при их расщеплении¹. Второй путь — это освобождение энергии при слиянии легких атомных ядер и образовании из них более сложных и тяжелых ядер. До настоящего времени практическое значение для мирного использования имеет только первый путь.

Расщепление атомных ядер может происходить естественно (самопроизвольно) и искусственно (при сильном воздействии на данное ядро какой-либо сторонней частицы с большой энергией). Второй случай может представлять интерес для энергетики, если на создание потока частиц, вызывающих расщепление, расходуется меньше энергии, чем освобождается в результате процесса. Так может происходить, если эти частицы сами возникают в результате расщепления ядер.

Два типа расщепления атомных ядер используются для получения электроэнергии: радиоактивный распад и деление. Из трех основных видов излучения, испускаемых радиоактивными веществами, α -лучей (ядра гелия), β -лучей (электроны) и γ -лучей (кванты жестких рентгеновых лучей), в ядерных источниках тока применяются главным образом β -лучи. Так как β -лучи — это поток электронов, то уже прямое их использование как отрицательных зарядов представляет собой способ получения электрического тока. Для этого нужно (рис. 17),

¹ Подробнее см. С. Ю. Лукьянов. Основные представления экспериментальной ядерной физики. М., Изд-во «Знание», 1955; Э. В. Шпольский. Атомная физика, т. II. М., Гостехиздат.

β -излучатель поместить в тонкостенную металлическую ампулу C , проникаемую для β -лучей¹; ампула находится в вакууме внутри второй металлической камеры K . Камера K , изолированная от окружающих предметов изоляционным

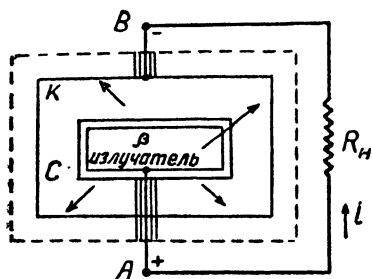


Рис. 17. Радиоактивный элемент (источник высокого напряжения) с непосредственным использованием зарядов.

слоем, принимает поток β -лучей из ампулы и заряжается отрицательно. Напротив, в ампуле C первоначально нейтральное вещество все время теряет отрицательный заряд и потому заряжается положительно. Между выводами A (от ампулы) и B (от внешней камеры) будет поддерживаться напряжение, при котором ток β -лучей будет как раз компенсировать утечку зарядов с B . Если между B и A присоединить нагрузку R_n , то в нагрузке возникнет ток i . В качестве

β -излучателей в настоящее время берут искусственно приготовленные радиоактивные изотопы, получающиеся в больших количествах в ядерных реакторах. Среди них можно отметить изотопы стронций-90 с периодом полураспада 25 лет и образующийся из него иттрий-90 (период полураспада 60 часов), испускающие β -лучи. Препарат стронция-90 активностью в 1 кюри², весящий 5 мг, может поддерживать напряжение в 500 кВ при токе $6 \cdot 10^{-9}$ а и мощности 0,003 Вт. В литературе описаны батареи, содержащие всего 0,01 кюри стронция-90 и развивающие напряжение в 14 кВ при токе в 10^{-12} а; следовательно, мощность 10^{-8} Вт. Советские исследователи П. В. Тимофеев и Ю. А. Симченко описали батарею со Sr^{90} другой конструкции, дающую 24 кВ при $1,5 \cdot 10^{-9}$ а. Как видим, ток и мощность от этих батарей ничтожны, но напряжение довольно высоко; поэтому они используются как источники питания разноточной (например, электроннооптической) аппаратуры высоким напряжением.

Для питания более мощной аппаратуры нужны гораздо большие количества радиоактивных веществ.

Ток, вырабатываемый радиоактивной батареей, может быть усилен различными способами. Один из них состоит в использовании p - n -перехода между двумя полупроводниками (рис. 18). По существу он аналогичен принципу работы солнечной батареи (см. выше), только вместо солнечных лу-

¹ α -лучи задерживаются даже самыми тонкими стенками; поэтому, если они и имеются, то из замкнутого сосуда не выйдут.

² 1 кюри — единица активности препарата, служащая мерой количества находящегося в нем радиоактивного вещества.

чей образование пар электрон — «дырка» вызывается в p — n -переходе потоком β -лучей.

На образование одной пары электрон—«дырка» нужна работа в 1—2 эв. А кинетическая энергия электронов в потоке β -лучей нередко достигает миллионов электронов-вольт. Поэтому каждая β -частица (быстрый электрон) может вызвать в p — n -переходе движение сотен тысяч и миллионов электронов. Подобное устройство с препаратом Sr^{90} активностью в 0,05 кюри и кремниевым полупроводниковым усилителем дает напряжение всего до 0,25 в, но ток короткого замыкания до $\sim 10^{-5}$ а и мощность до $\sim 0,8 \cdot 10^{-6}$ вт. Ток здесь в миллионы раз, а мощность в десятки раз больше, чем при прямом использовании β -лучей от источника той же активности.

Можно иначе усилить ток от радиоактивного источника, если превратить его излучение в тепло, а последнее одним из известных способов преобразовать в электроэнергию. Например, можно заставить радиоактивное излучение поглощаться в металлическом блоке, сообщаемся с горячими спаями термоэлектрической батареи. Так, в генераторе СНЭП-3 (SNAP-3), предназначенном для электропитания американских спутников Земли, 0,57 г изотопа полония-210 (α -излучение, активность 3000 кюри) нагревает внутренние (горячие) спаи 10 термопар из теллуристого свинца с присадками висмута и марганца до температуры 380°C. Наружные (холодные) спаи укреплены на внешней оболочке прибора и должны работать при -38° . В начале работы, непосредственно после зарядки полонием, генератор развивает мощность 5 вт при к. п. д. 8—10%; его вес 2,5 кг. Через 138 дней его мощность становится меньше 3 вт вследствие распада за это время полония-210 наполовину. Другой генератор СНЭП-1А содержит ампулу с большим количеством изотопа цезия-144. Его диаметр 61 см, длина 86 см, вес ~ 86 кг. Он дает при напряжении 28 в мощность 125 вт, вырабатываемую 277 термопарами, холодные спаи которых расположены на внешней оболочке прибора и имеют вид головок винтов. Построены и такие генераторы, в которых энергия излучения радиоактивных изотопов нагревает катоды термоэлектронных генераторов с цезиевыми наполнениями. Мощность их также пока измеряется ваттами. Ясно, что для промышленной энергетики они еще никакого значения не имеют.

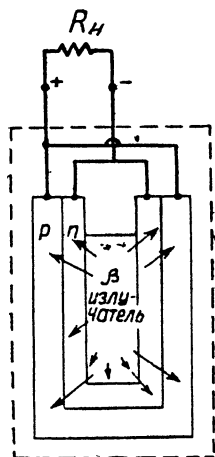


Рис 18. Радиоактивный элемент с усилением тока в полупроводниковом p — n -переходе.

Совершенно иначе обстоит дело с использованием другого типа расщепления атомных ядер — с делением ядер на два примерно равных осколка. Прежде всего при делении каждого ядра выделяется энергия, в несколько десятков раз большая, чем при радиоактивном излучении, — до 200 млн. эв. Но, что еще важнее, этот процесс привел к осуществлению цеп-

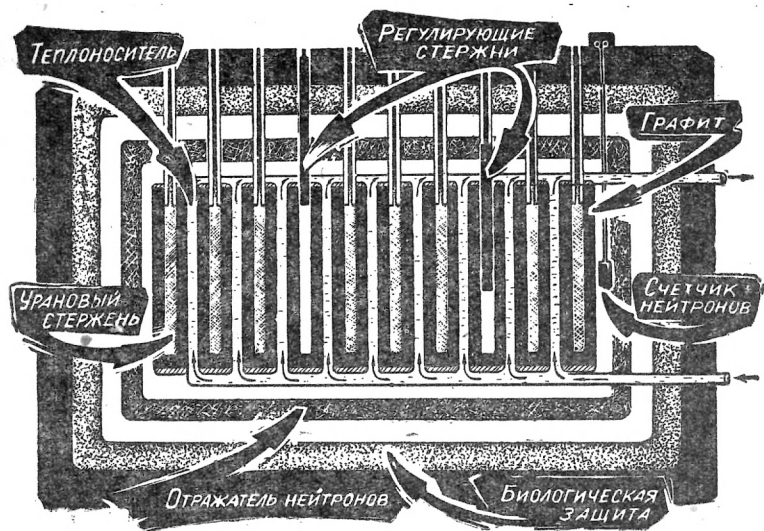


Рис. 19. Устройство ядерного реактора (схематический разрез).

ной реакции деления ядер. Благодаря ей стало возможным осуществлять выделение внутриядерной энергии в громадных дозах. Построенный для этого в 1942 году под руководством Энрико Ферми первый ядерный реактор положил начало новому направлению энергетики — ядерной энергетике¹. Отсылая читателя за подробным описанием ядерных реакторов к обширной специальной литературе, укажем здесь только вкратце на основные факты.

В основе работы ядерного реактора (или котла, рис. 19) лежит реакция деления ядер некоторых наиболее тяжелых элементов, главным образом некоторых изотопов урана, тория, а также искусственно получаемого плутония. Ядра этих элементов при некотором воздействии на них становятся неустойчивыми и разлетаются на два осколка, массы которых

¹ Получению ядерной, или, как ее иначе называют, атомной энергии (это менее точное название распространилось широчайшим образом) посвящена также обширная литература. Из популярной литературы укажем здесь: «Применение ядерной энергии в мирных целях». Изд-во АН СССР, 1956. Из более специальных книг — А. И. Китайгородский. Физические основы ядерной энергетики, 1956.

обычно близки друг к другу. Это происходит, в частности, при попадании в них нейтрона (ядерной элементарной частицы, имеющей массу, приблизительно равную массе атома водорода, и не имеющей заряда) с подходящей скоростью. Разлетающиеся осколки имеют громадную кинетическую энергию — до 200 млн. эв на каждый акт деления. Кроме того, при делении ядра вылетает также несколько (2—3) мелких осколков — нейтроны, имеющие большие скорости. Эти вторичные нейтроны при благоприятных условиях могут, попадая в другие ядра делящегося вещества, вызывать их деление с вылетом новых нейтронов и т. д. Таким образом, при правильно подобранных условиях реакция деления ядер становится «цепной» и может идти безостановочно вплоть до израсходования делящегося вещества. Необходимым для хода цепной реакции условием является то, чтобы в каждый следующий промежуток времени деление ядер вызывалось не меньшим числом нейтронов, чем в предыдущий промежуток. Это означает, во-первых, что нельзя допускать вылета нейтронов из зоны реакции. Для этого ее окружают «отражателем» нейтронов, т. е. толстым слоем вещества, ядра которого больше отражают нейтроны, чем захватывают их. Во-вторых, нужно, чтобы нейтроны в зоне реакции имели скорости, вызывающие новые акты деления. Изотоп уран-235, хорошо делящийся в цепной реакции, делится под ударами медленных нейтронов; вылетают же при делении быстрые нейтроны. Они могут быть замедлены путем многих столкновений с ядрами атомов, которые должны отражать их, а не захватывать. Для этого в зону реакции приходится вводить специальное вещество — замедлитель нейтронов, не участвующее в самой реакции.

Но если оба эти условия (недопущение вылета нейтронов и их замедление без потерь) хорошо выполнены, то может случиться, что количество образующихся нейтронов начнет возрастать и реакция будет ускоряться. Так как при этом выделяется громадное количество тепла, то ничем не ограниченная реакция может привести к взрыву всего устройства. Нужно, чтобы «коэффициент размножения» нейтронов поддерживался на уровне, близком к единице. Для этого в зону реакции вводят сознательно на большую или меньшую глубину стержни из материалов, поглощающих нейтроны. Глубиной погружения этих стержней регулируют поглощение нейтронов, а следовательно, ход реакции в котле.

Энергия, которую несут с собой осколки деления ядер, путем столкновений передается ими другим атомным ядрам и таким образом переходит в кинетическую энергию беспорядочного теплового движения вещества. Таким образом, практически в ядерных реакторах внутриядерная энергия, выделяемая в процессе деления «ядерного горючего» — урана, тория, плутония, превращается в тепло. Это тепло, выделяемое

в стержнях из делящегося элемента (рис. 19), может нагреть их до очень высокой температуры. Чтобы использовать это тепло (а также, чтобы не допустить расплавления стержней), они омываются жидкостью или (реже) обдуваются газом-теплоносителем. Тепло, унесенное теплоносителем, и используется для дальнейшего преобразования. Обычно дальнейшее преобразование в «атомных электростанциях» идет по схеме паротурбинной ТЭС. Горячий теплоноситель поступает в теплообменник, играющий роль котла в обычной ТЭС. Теплоноситель реактора нагревает здесь, в теплообменнике, рабочее вещество турбины (такая же или другая жидкость, текущая по другому контуру), превращая ее в пар и доводя до нужной температуры и давления. Выходящий отсюда пар рабочего вещества поступает в турбину, спаренную с генератором, как в обычной ТЭС.

На рис. 20 изображена схема первой в мире атомной электростанции, пущенной в СССР в 1954 году. На ней был уста-

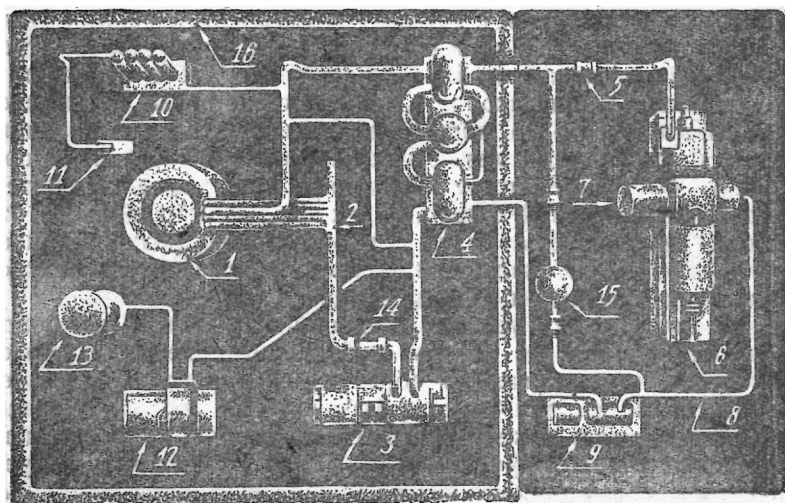


Рис. 20. Схема ядерной (атомной) электростанции:

- 1 — реактор; 2 — трубопровод теплоносителя; 3 — насос теплоносителя;
- 4 — парогенератор (теплообменник); 5 — паропровод 2-го контура;
- 6 — паровая турбина; 7 — конденсатор; 8 — трубопровод конденсатора;
- 9 — насос 2-го контура; 10 — компенсаторы объема; 11 — газовые баллоны;
- 12 — подпиточный насос; 13 — запасной бак с водой; 14 — фильтр; 15 — расширитель; 16 — защита от излучений.

новлен ядерный реактор, содержащий 128 урановых стержней. Замедлителем нейтронов служит графит, теплоносителем — вода. Поступая в реактор под давлением в 100 атм при температуре 190°C, она нагревается здесь до 270°C и затем переход

дит в теплообменник. Вода турбинного контура здесь испаряется, и пар перегревается до 260°C при давлении $12,5 \text{ атм}$; этот пар и приводит в движение турбогенератор. Тепловая мощность реактора 30 тыс. кВт; электрическая мощность генератора 5 тыс. кВт; следовательно, к. п. д. порядка 17%.

В настоящее время в Советском Союзе строятся (в Воронежской области и на Урале) атомные электростанции. Воронежская — мощностью примерно 400 тыс. кВт.

Уже в текущей семилетке намечается осуществление крупных мер по использованию ядерной энергии в мирных целях. К 1980 году ожидается, что электроэнергия, полученная на основе ядерной энергии, составит заметную долю от общей продукции электроэнергетики в Советском Союзе. В других странах — Англии, США, в Скандинавских странах — также построены и строятся атомные электростанции различных мощностей.

Таким образом, из всех новых способов получения электрической энергии пока только ядерная энергетика начала занимать заметное место в промышленном производстве электроэнергии. Ее преимуществом по сравнению с ТЭС является малый вес топлива, т. е. высокая концентрация энергии в топливе. Благодаря этому трудности перевозки топлива в плохо обеспеченные районы здесь практически снимаются. Это же делает возможным и применение ядерных реакторов как источников энергии в кораблях — надводных, подводных и даже космических. Недостатком их является радиоактивное излучение, требующее массивных экранов (у больших реакторов — толстых стен) для защиты обслуживающего персонала. Еще большую трудность представляет проблема отходов радиоактивных продуктов деления при работе реакторов, требующих их помещения в такие места, чтобы излучение не могло оказывать своего губительного действия.

В заключение остается упомянуть, что ученые разных стран работают над поисками еще одного пути освобождения ядерной энергии, а именно управляемой реакции слияния легких атомных ядер, иначе управляемой термоядерной реакции. Это задача исключительной важности, несмотря на то, что энергии при слиянии легких ядер выделяется гораздо меньше, чем при делении тяжелых ядер. Но все дело в том, что делящихся веществ в природе мало, тогда как легкие элементы, пригодные для реакции слияния, весьма распространены. Так, дейтерий составляет 0,015% от водорода на Земле; следовательно, в каждой тонне воды его содержится 16 г, от слияния ядер в которых можно теоретически получить 380 тыс. кВт-ч энергии. Возможно также использование изотопов лития и других легких элементов.

Чтобы эта реакция происходила, нужно заставить ядра атомов сближаться между собой с энергиями, достаточными, чтобы преодолеть их взаимное электростатическое отталкива-

ние и дать им сойтись на близкие расстояния. Подсчеты показывают, что для этого нужно реагирующие вещества нагреть до температур порядка нескольких десятков и даже сотен миллионов градусов! Такие температуры, по-видимому, имеются внутри звезд и, в частности, нашего Солнца. Поэтому там происходят реакции слияния ядер (термоядерные реакции), которые поддерживают высокую температуру и излучение этих светил. Чтобы термоядерные реакции осуществить на Земле, также нужно научиться нагревать вещества до высоких температур. В этом трудность задачи. Как подвести к веществу энергию, чтобы нагреть его до такой температуры? И что еще труднее: в чем держать вещество с такой температурой? Очевидно, что сосудов, которые могли бы удерживать вещества, нагретые до миллионов градусов, нет. Однако в принципе найдено решение, основанное на том, что еще задолго до достижения этих температур всякое вещество превращается в полностью ионизованный газ — плазму¹. Такое вещество можно пытаться удерживать в ограниченном объеме, воздействуя на образующие его частицы — ионы, электроны и атомные ядра с помощью магнитного поля. Идея «магнитной термоизоляции» плазмы и составляет основу поисков в этой области². Над решением этой задачи бьются крупные коллективы ученых у нас и за рубежом. Предложено много методов нагревания газа: пропусканием через него сильных токов, впускание в газ потоков быстрых частиц, ускорение взрывной волной с последующим торможением и т. д. Термоизоляцию газа также пытаются осуществить разными способами: собственным магнитным полем тока, пропускаемого через газ, или внешним полем от специальных электромагнитов, или электромагнитными полями высокой частоты. Если бы эта задача была решена, человечество получило бы источник энергии, который совершенно затмил бы все остальные.

* *

*

Вот краткий обзор тех путей, над которыми современная физика рекомендует работать для того, чтобы решить по-новому проблему массового, дешевого и беспредельно возрастающего в будущем производства электроэнергии, которая все больше и больше нужна нашей Родине, строящей коммунизм.

¹ См. В. Л. Грановский. Вещество в состоянии плазмы. Изд-во «Знание», 1959.

² Подробнее об этом см. популярную брошюру Е. М. Балабанова и В. И. Гольданского. Термоядерные реакции. Изд-во «Знание», 1956; или научную монографию Л. А. Арцимовича. Управляемые термоядерные реакции. Физматгиз, 1961.

9 коп.