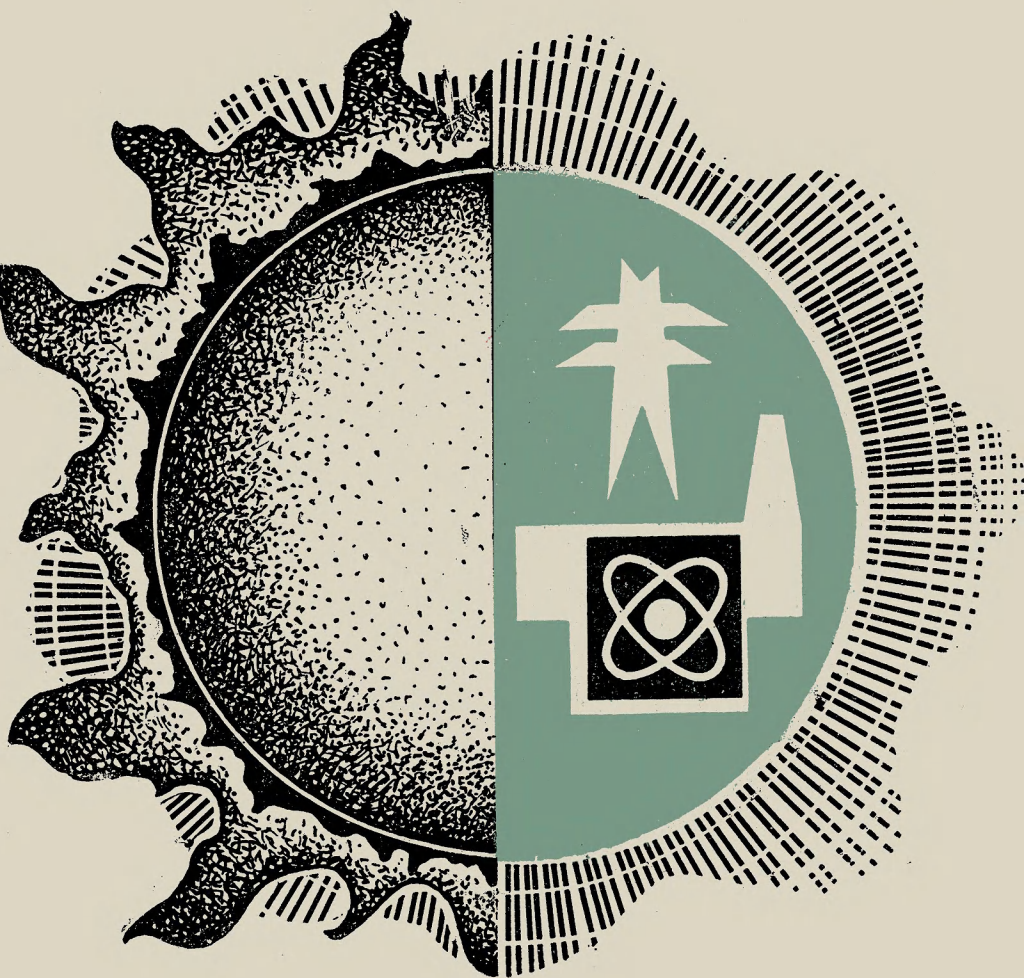


М. Я. ФИОШИН, В. Н. ПАВЛОВ



1969. СЕРИЯ



5

ТЕХНИКА

**НОВЫЕ
ИСТОЧНИКИ
ЭНЕРГИИ**

М. Я. ФИОШИН,
доктор технических наук, профессор
В. Н. ПАВЛОВ,
кандидат химических наук

НОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1969

К ЧИТАТЕЛЮ

Строго говоря, источники энергии, о которых идет речь в этой брошюре, далеко не новые. Идеи топливных элементов и МГД-генератора появились почти полтора века назад, ветер служит человеку уже тысячи лет; даже ядерная энергия была, по сути, основным видом энергии, которым пользовался еще пещерный человек — ведь солнце, прямо или косвенно, было для него практически единственным источником тепла.

Однако успехи современной науки и техники, развитие теории строения вещества, новые материалы с необычайными свойствами — все это позволило поставить вопрос об использовании ранее известных явлений для создания новых источников электроэнергии. О каждой из этих проблем можно сказать словами академика А. Н. Фрумкина (он говорил о проблеме топливных элементов): «Не будучи молодой, проблема... заново расцвела сравнительно недавно».

Описываемые нами источники энергии являются «новыми» прежде всего потому, что им принадлежит будущее.

**МИХАИЛ ЯКОВЛЕВИЧ ФИОШИН,
ВЛАДИМИР НИКИТОВИЧ ПАВЛОВ**

Новые источники энергии

Редактор Г. И. Флиорент
Художественный редактор Е. Е. Соколов
Художник Л. П. Ромасенко
Технический редактор Г. И. Качалова
Корректор И. И. Поршневa

А 01550. Сдано в набор 5.III—1969 г. Подписано к печати 21.IV.—1969 г.
Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0.
Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,79. Тираж 48.900 экз. Издательство «Знание».
Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 528. Типография изд-ва «Знание».
Цена 6 коп.

Энергия, виды энергии, запасы...

В средние века основной производимой человеком энергией была тепловая, т. е., попросту говоря, человек заботился лишь о тепле своего жилища. В XIX веке инженеры думали главным образом о получении механической энергии (энергия пара, падающей воды, ветра). В наше время самым важным видом энергии стала электрическая, потому что она имеет ряд преимуществ перед тепловой, механической и другими видами энергий.

Прежде всего электроэнергию легче передавать на большие расстояния. Далее, электроэнергия удобнее в «эксплуатации», ее проще распределить среди огромного числа потребителей, от мощной электрической реки легко отделить ручеек, точно так же, как собрать из отдельных ручейков один мощный поток.

И едва ли не самое главное достоинство электроэнергии: при помощи довольно несложных устройств и с высоким коэффициентом полезного действия ее можно превратить в тепловую, механическую и другие формы энергии.

Хорошо известны способы этих превращений. В механическую энергию ее превращает обычный электрический мотор. В электрическом чайнике, плитке, утюге и т. д. электричество трансформируется в тепло. Вот почему электрическая энергия стала главной формой энергии нашего XX века.

Производство электроэнергии во всем мире непрерывно увеличивается, шире и разнообразнее становятся области ее применения как в технике, так и в быту. Производством электроэнергии занята большая армия инженеров и рабочих на заводах, в шахтах и на транспорте. Топливные грузы, например, составляют около 37% общего грузооборота железнодорожного транспорта. В доменном производстве затраты на топливо и электроэнергию составляют от 40 до 65%, в производстве цемента — 36, на железнодорожном транспорте — 22%. На изготовление тонны синтетического волокна расходуется 25 т угля, а на производство грузового автомобиля — до 10 т. На долю основных производственных фондов топливной и энергетической промышленности приходится 29% от общих производственных фондов нашей страны.

Академик В. А. Кириллин привел однажды интересные цифры. Он напомнил, что выработка электроэнергии и мощность электростанций в нашей стране растут в среднем на 11,5% в год. Это означает, что каждые десять лет мощность наших электростанций утраивается. А через двадцать лет сегодняшнее энергетическое хозяйство будет составлять только 9% всей энергетики.

Кстати, интересно отметить, что экономия, полученная в последние годы в топливной промышленности, равна увеличению капитальных вложений на развитие химии. Один из крупнейших потребителей электроэнергии — химическая промышленность. Многие процессы получения химических продуктов требуют высоких температур и давлений. Очень много электрической энергии расходуется на электролиз. Алюминий, хлор, магний и водород, цинк и перманганат калия и многие другие продукты получают электрохимическим методом. Около 20% всей производимой человечеством электроэнергии потребляется в процессах электролиза. Для получения тонны металлического алюминия необходимо затратить около 16 тыс. *квт-ч* электроэнергии, а ведь мировое производство этого ценнейшего металла, на котором базируются многие отрасли машиностроения, превышает в настоящее время 5 млн. *т* в год. И весь этот металл получают электролизом расплавленного криолита, в котором растворен глинозем — окись алюминия. Помножьте 5 млн. на 16 тыс. — и вы получите огромную цифру расхода электроэнергии постоянного тока.

Или взять такой ценный продукт, как хлор, в основном получаемый электролизом растворов поваренной соли. Мировое производство этого продукта приближается к 15 млн. *т* в год. Хлор — полупродукт в производстве пластмасс, с его помощью получают многие ядохимикаты, без которых не может развиваться современное сельское хозяйство. Таким образом, два таких электрохимических производства, как получение алюминия и хлора съедают громадное количество электроэнергии, десятки и даже сотни миллиардов киловатт-часов ежегодно, не говоря уже о многих других энергоемких процессах электролиза, использующихся в различных отраслях промышленности.

Уголь, нефть, газ составляют вместе почти все энергоресурсы (98,7%), потребляемые на земном шаре. Запасы же топлива хотя и велики, но все-таки ограничены.

Индийский ученый Хоми Баба за единицу энергии предложил принять тепло, получаемое при сжигании 33 млрд. *т* угля, т. е. принять за единицу энергию, вырабатываемую во всем мире за 20 лет. Тогда запасы различных видов топлива будут составлять:

каменный уголь	— 200 единиц;
торф	— 2 единицы;
нефть	— 1,5 »
газ	— 0,25 единиц

Это невозобновляемые источники энергии. Кроме того, ежегодно возобновляется энергия следующих источников:

вода	— 0,005 единицы;
ветер	— 150 единиц;
лес	— 0,006 единицы;
Солнце	— 7500 единиц.

Однако мы до сих пор не умели как следует использовать даже энергию воды и ветра, хотя пользуемся этими источниками сотни и даже тысячи лет. Тем более еще не научились аккумулировать энергию Солнца. Что же касается наиболее освоенных источников энергии — угля, нефти и газа, то их при современном уровне добычи хватит на 640 лет. Очевидно, поэтому нужно искать новые источники энергии.

Кроме того, превращение химической энергии в электрическую на тепловых электростанциях длительно и в общем-то малоэффективно. Чтобы выработать электрическую энергию, нужно сжечь в топке тепловой электростанции топливо, получить с помощью выделяющейся тепловой энергии пар, направить его на лопасти турбины, от которой вращается ротор генератора электрического тока. Лишь незначительная часть энергии, выделяющейся при сгорании топлива, может быть превращена в электрическую (в среднем 20—30%). Остальная энергия выделяется в окружающее пространство в виде тепла. Ясно, что такой способ крайне расточителен. Чтобы избежать больших потерь, необходимо искать возможности для прямого превращения химической и других видов энергии в электрическую. Такие возможности существуют, и о них также пойдет речь в нашей брошюре.

Атомная энергия

Хотя наша страна имеет огромные запасы ископаемого топлива, их распределение на территории СССР недостаточно благоприятно, оно приблизительно обратно пропорционально плотности населения. Реальный путь исправления этой «несправедливости» — постройка атомных электростанций в местах, где невелики запасы топлива. Более того, долгосрочное решение топливной проблемы кроется, без сомнения, в использовании ядерной энергии.

Всего тридцать лет назад уран считался почти бесполез-

ным металлом. Теперь это ценнейший элемент. Его энергетическая емкость чрезвычайно велика. Например, современная тепловая электростанция мощностью в 600 тыс. *квт* сжигает в сутки пять эшелонов каменного угля. А электростанция такой же мощности, работающая на атомном горючем, потребует в год всего тонну урана.

Летом 1954 г. в г. Обнинске вступила в строй первая в мире атомная электростанция Академии наук СССР. Затем стали строиться Белоярская АЭС на Урале, Нововоронежская АЭС. Через два-три года после пуска первой в мире атомной электростанции в СССР заработали атомные электростанции в Англии, США, Франции. И уже на первом этапе развития атомной энергетики предпочтение отдавалось мощным блокам и системам.

Советские ученые разрабатывают и другое перспективное направление атомной энергетики — небольшие, транспортные атомные электростанции. Едва ли не главное преимущество атомных электростанций, работающих на уране и плутонии, — небольшое количество потребляемого топлива. Это преимущество становится решающим, когда встает вопрос о снабжении электроэнергией отдаленных, труднодоступных районов.

Советские ученые уже создали и испытали такие электростанции. Одна из них — атомная электростанция небольших размеров «Арбус», использующая органический теплоноситель. Перенос тепла из атомного реактора вместо воды осуществляет здесь чистый газойль, который в отличие от других теплоносителей не приобретает радиоактивности при облучении в атомном реакторе. По этой причине уменьшается вес биологической защиты. Бетонные стены биозащиты остаются только у самого реактора. И весит такая электростанция мощностью в 750 *квт* лишь 360 т.

Другая атомная электростанция — ТЭС-3 еще удобнее в эксплуатации. Она смонтирована на четырех транспортерах. Ее мощность 1500 *квт*, расход топлива в сутки всего 14 г!

Особенно велики преимущества ядерного горючего на транспорте. Так, например, первый в мире атомный ледокол «Ленин» совсем не имеет помещений для горючего. Того, что находится в его атомном реакторе, хватает ему на целый год плавания.

Сегодня во многих странах работают атомные электростанции, большие и малые. Резко возросла за последние годы и добыча урана, который, к сожалению, расходуется в первую очередь на военные цели. Уран, закованный ныне в стальные корпуса атомных бомб и ракет, мог бы «питать» все машины земного шара на протяжении нескольких лет, если бы его можно было использовать в качестве топлива. Ядерные боеголовки, хранящиеся в арсеналах одной только страны —

США, энергетически эквивалентны миллиардам тонн нефти или угля.

И все-таки, как заметил американский писатель Артур Кларк, «маловероятно, что реакции деления ядер таких тяжелых элементов, как торий, уран, плутоний, будут играть сколько-нибудь длительную роль в наших земных делах. Надо надеяться, что этого не произойдет, ибо деление ядер — это самый грязный и самый неприятный способ высвобождения энергии из всех когда-либо открытых человеком».

Но известна и другая ядерная реакция — реакция синтеза, слияния ядер легких элементов, в первую очередь водорода (точнее говоря, тяжелого водорода — дейтерия). Именно эта реакция происходит на Солнце, и она-то дает в конечном счете жизнь нашей планете. Мы уже воспроизвели эту реакцию в земных условиях, но пока еще не укротили ее. Когда мы этого добьемся, проблема получения энергии будет решена навсегда, притом без ядовитых радиоактивных отходов.

Тем более, что, как сказал Артур Кларк, «океанских запасов тяжелого водорода хватит на неисчислимые века, чтобы приводить в движение все наши машины и обогревать все наши города. И если спустя два поколения мы будем испытывать энергетический голод (что вполне возможно), то только благодаря нашему собственному невежеству. Мы уподобимся жителю каменного века, погибающему от холода на пласте угля».

А если обратиться к цифрам, то окажется, что энергия дейтерия, содержащаяся даже в 1 г воды, равноценна 400 л нефти. При образовании гелия из дейтерия на 1 г последнего выделяется 100 тыс. *квт-ч* энергии. Если же учесть все запасы дейтерия в Мировом океане, а они составляют $2,5 \cdot 10^{13}$ т, то это составит 3 млрд. единиц Хоми Баба.

Этим количеством энергии при потреблении на душу населения в год 1 млн. *квт-ч* (сейчас в США 64 000 *квт-ч* в год) можно обеспечить 100 млрд. человек в течение 25 млн. лет.

Управляемый ядерный синтез, по мнению специалистов, — первейшая задача прикладной ядерной физики. Можно с уверенностью сказать, что энергия ядерного синтеза будет освоена прежде, чем иссякнут запасы нефти, газа и угля.

МГД-генераторы

В апреле 1967 г. газеты под крупными заголовками «Электростанция 2000 года», «МГД-генератор — новое направление энергетики», «На пороге электростанции будущего» и т. д. сообщили о пуске первой в нашей стране электростанции, работающей по принципиально новому способу. Это была модельная экспериментальная установка с МГД-генератором,

названная условно У-02, которая должна была позволить ученым и инженерам исследовать основные элементы будущей электростанции полупромышленного масштаба.

Более ста лет назад открыт закон электромагнитной индукции, суть которого в том, что при пересечении проводником магнитного поля в проводнике возникает электрический ток. По тому же принципу работает и МГД-генератор, только роль якоря с проволоочной обмоткой, вращающегося между полюсами магнита, играет струя плазмы — газа, нагретого до высокой температуры, или же струя жидкости.

Первооткрывателем принципа МГД-генератора считают Фарадея, который, как известно, открыл и закон электромагнитной индукции, став, по сути дела, изобретателем электромотора. С тех пор уже более сотни лет электродвигатели трудятся буквально повсюду, в то время как МГД-генератор появился лишь во второй половине нашего века. Почему — это мы рассмотрим ниже.

Схема МГД-генератора проста (рис. 1). Поток жидкости или газа, проводящих электричество, омывает электроды, которые соединяются цепью через полезную нагрузку. При взаимодействии потока с магнитным полем в потоке наводится электродвижущая сила, под действием которой через замкнутую внешнюю цепь пойдет электрический ток. Электроды в данном случае играют роль щеток генератора постоянного тока. Преимущества МГД-генератора перед обычной тепловой машиной налицо — отсутствие трущихся частей, гораздо более короткий путь превращения энергии горения в электрическую энергию, а значит, и более высокий к.п.д. Даже самые первые экспериментальные образцы МГД-генераторов развивали мощность в несколько десятков киловатт. А в перспективе десятки и сотни тысяч!

При практическом осуществлении такого генератора инженеры столкнулись с огромными трудностями, преодолеть которые позволили лишь наука и техника сегодняшнего дня. Прежде всего — плазма имеет температуру до 2500°C . При этой температуре начинают плавиться самые тугоплавкие металлы, не говоря уже о железе, меди, алюминии. Бурное развитие ракетостроения помогло найти материалы, работающие при температуре 2500° . Далее, нужны изоляторы. А ведь обычные высокотемпературные изоляторы становятся проводниками при таких температурах.

Кроме того (а может быть, и в первую очередь), стал вопрос о повышении электропроводности газа. Собственно, именно по этой причине и вынуждены работать при температуре около 2500° , ведь обычное пламя дает температуру порядка 1500°C . Но вся беда в том, что при такой температуре газ не проводит электричества, поэтому принимают все меры для повышения температуры плазмы. Для этого обогащают воздух

кислородом и предварительно подогревают газ перед камерой сгорания. Проводимость газа повышают также добавками специальных солей, которые ионизируются при высокой температуре. Удовлетворительной проводимостью газ будет обладать уже при наличии 1% ионизированных атомов.

К сожалению, не всю энергию, содержащуюся в газах горения, удастся снять этими электродами. Отдавая энергию, струя охлаждается и перестает проводить ток. Но температура

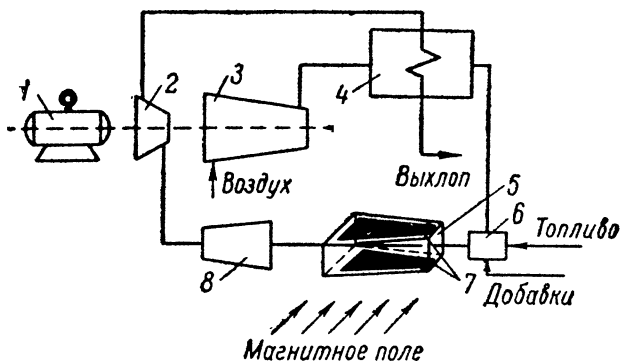


Рис. 1. Схема энергетической установки с МГД-генератором.

1 — двигатель-генератор для запуска компрессора; 2 — газовая турбина; 3 — компрессор; 4 — подогреватель воздуха; 5 — МГД-генератор; 6 — камера сгорания; 7 — электроды МГД-генератора; 8 — диффузор.

при этом еще остается очень высокой, поэтому тепло газа утилизируют. Часть его расходуют на подогрев воздуха, который направляют в камеру сгорания, а другую используют в обычном паровом котле для получения пара. Этот пар приводит в движение паротурбинную установку, повышая тем самым к. п. д. всей установки.

Расчеты показывают, что таким путем в электрический ток можно превратить 55—60% энергии топлива, т. е. в полтора раза больше, чем в лучших тепловых электростанциях, работающих по обычному циклу. А это значит, что даже одна электростанция мощностью в 1 млн. кВт, переведенная на работу по МГД-методу, сэкономит в год более 500 000 т топлива.

Существует еще одна очень серьезная проблема: параметры генерируемого тока пропорциональны напряженности магнитного поля, в котором движется проводящее тело генератора. Но повышение напряженности магнитного поля обычно влечет за собой резкое увеличение веса магнитов, который мог бы достигнуть сотен и тысяч тонн. Это неприемлемо.

Выход опять же найден благодаря открытию последних лет — сверхпроводимости. Дело в том, что при низких температурах — ниже минус 250°C (примерно 20°K) — некоторые проводники практически полностью теряют сопротивление, т. е. в таких проводниках нет потерь тока, а значит, при небольшом сечении можно пропускать большие токи. Например, при температуре ниже $7,26^{\circ}\text{K}$ удельное сопротивление свинца уменьшается в 10^{12} раз по сравнению с удельным сопротивлением при 273°K .

Естественно, что если взять такой сверхпроводник, то обмотка из него для электромагнита может быть во много раз легче и компактней, чем обмотка из обычного провода. Но в сильном магнитном поле проводники теряют сверхпроводимость. Однако в последние годы открыли, что проводник, изготовленный из соединения ниобия с оловом, будет сохранять сверхпроводимость и в сильных магнитных полях. Затем был изготовлен проводник с такими же свойствами из сплава ниобия с цирконием.

Таким образом, получается интересная ситуация: чтобы МГД-генератор работал наиболее эффективно, нужно добиться, чтобы один из двух его основных элементов работал при сверхнизких, а другой при сверхвысоких температурах. Вот почему идея МГД-генератора оказалась под силу лишь технике второй половины XX века.

Рассмотрим подробнее конструкцию первой советской МГД-электростанции. Эта установка включает все основные элементы будущей опытной электростанции; она построена Министерством энергетики и электрификации СССР под научным руководством Института высоких температур Академии наук СССР.

За время немногим более пяти лет были выполнены различные исследования, в результате которых получено достаточно ясное представление об основных физических процессах работы самого МГД-генератора, доказана принципиальная возможность осуществления такого рода установок.

Установка работает по открытому циклу на продуктах сгорания природного газа, в которые для ионизации добавляется карбонат калия (поташ). Камера сгорания, в которую природный газ подается из городской сети, рассчитана на максимальную температуру продуктов горения 2600°C . К ней также подведены турбопроводы для ввода кислорода и ионизирующей присадки. Выходящий из камеры поток плазмы разгоняется в сопле до заданной скорости и поступает в канал генератора, снабженный секционированными электродами. Воздух предварительно подогревается в высокотемпературном воздухоподогревателе до 1500°C .

Новая высокотемпературная камера сгорания хорошо по-

казала себя. От существующих она отличается тем, что процесс сжигания природного газа в ней протекает более эффективно. Камера успешно проработала более 1000 ч при большом числе ее включений и остановов.

В качестве щеток для отвода электрического тока использованы кирпичи из двуокиси циркония. На первый взгляд странно, ведь двуокись циркония — изолятор, но в том и состоит новизна конструктивного оформления, что здесь находчиво использованы изменения физических свойств материалов при нагреве. При высокой температуре изоляторы становятся проводниками, превращаются в хорошие электроды. А в качестве изолятора, работающего в условиях высоких температур, были применены блоки из окиси магния.

Магнитогидродинамический канал модельной установки состоит из входного участка, рабочей части и диффузора и расположен в герметичном металлическом корпусе между полюсами магнита. В соответствии с конкретными задачами исследований были созданы каналы двух типов с различной длиной рабочей части: малый — длиной порядка 700 мм и большой — 3000 мм. Малый канал предназначен в основном для исследования свойств плазмы, изучения характеристик электрического разряда, испытания материалов и отдельных конструкций, разрабатываемых для промышленности МГД-генераторов. Большой — позволяет детально изучать взаимодействие плазмы с магнитным полем в каналах и генерирование электрической мощности в крупных масштабах.

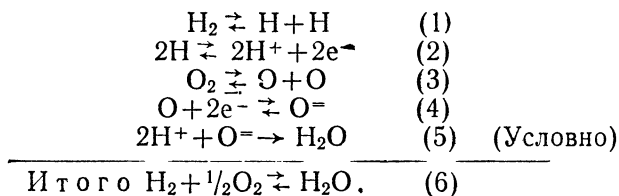
В проведенных экспериментах испытывались главным образом конструкции так называемого фарадеевского секционированного генератора с горячими и холодными электродами. Полученная мощность МГД-генератора достигала около 30 кВт. Скорость газов в канале, как правило, 600—650 м/сек. В экспериментах с горячими электродами удельная мощность была достаточно высокой — около 2000 кВт с кубического метра рабочего объема генератора.

Эффективность работы МГД-генератора существенно зависит от количества и способа ввода в поток плазмы легкоионизирующейся добавки поташа. В первых экспериментах генератор испытывался при вводе поташа в виде порошка. Опыт показал, однако, что при таком способе ввода поташ распределялся неравномерно и проводимость плазмы была ниже ожидаемой. Поэтому в последующем использовался другой способ подачи — в виде 50%-ного раствора в воде. Тем не менее работа по совершенствованию сухого ввода присадки продолжалась. В последних экспериментах была успешно испытана новая система ввода сухой присадки. Так впервые была осуществлена надежная работа МГД-генератора на промышленную сеть переменного тока, ибо ток, вырабатываемый этой установкой, вливался в электрическое море Москвы.

Опыты дали возможность спроектировать и приступить к строительству крупной энергетической установки полупромышленного типа с МГД-генератором мощностью 25 000 квт.

Топливные элементы

Рассмотрим детально процесс сгорания топлива на простейшем примере — водород в атмосфере кислорода. Для этого напишем последовательность реакций, из которых состоит этот кажущийся таким простым процесс



Чтобы получить тепло, надо сначала затратить некоторое количество энергии для возбуждения реакции, т. е. попросту нагреть газы, чтобы разорвать молекулы водорода и кислорода на отдельные атомы (реакции 1 и 3) и, далее, разорвать атом водорода снова на две части — на положительно заряженный протон и электрон (реакция 2). Зато реакции 4 и 5 протекают настолько энергично, что выделяют тепла гораздо больше, чем было затрачено на реакции 1—3. В конечном счете весь процесс можно описать очень простой на вид суммарной реакцией 6.

Аналогично протекает горение метана, пропана, бензина и любого другого органического топлива, только реакций в этих случаях будет гораздо больше.

Идея топливного элемента в том, чтобы «внедриться» в последовательность реакций, а именно — между реакциями 2 и 4 и заставить электроны от атома водорода перетекать не непосредственно на атом кислорода, а через какой-то проводник, например, медную проволоку, в середине которой находится, скажем для простоты, электрическая лампочка. Электроны, переходя от атома водорода к атому кислорода через волосок электрической лампочки, накаляют его и совершают полезную работу. Другими словами, надо разделить реакцию горения на два процесса, в одном из которых будет участвовать только водород, а в другом только кислород (рис. 2).

В топливном элементе каждая из двух групп реакций, в результате которых электроны высвобождаются из молекул топлива (реакция окисления 2 и реакция 1) и присоединяются к окислителю (реакция восстановления 4 и реакция 3), про-

текают в одной из двух частей сосуда, разделенного полупроницаемой перегородкой.

Конкретно — молекула водорода распадается на атомы на поверхности металла (анода), причем атомы водорода адсорбируются на поверхности металлического электрода и далее разрываются на электрон (который уходит в металл) и на положительно заряженное ядро — протон (переходит в раствор). Вся реакция в целом идет на границе трех фаз:

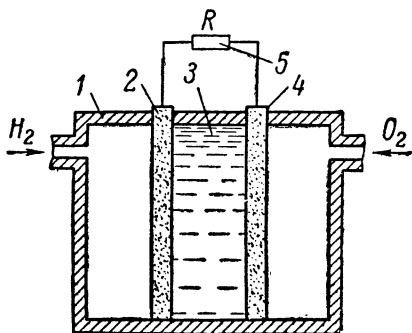
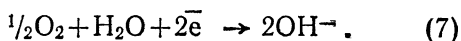


Рис. 2. Схема топливного элемента.

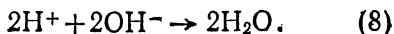
1 — корпус; 2 — анод; 3 — электролит; 4 — катод; 5 — нагреватель.

между газообразным водородом, металлом и раствором. В результате появляются свободные электроны на металле и ионы водорода в растворе.

Аналогично и с молекулой кислорода. Правда, в этом случае реакция несколько сложнее. Она отличается от той простой реакции, которая протекает при горении водорода в кислороде в отсутствие молекул воды. В топливном элементе в катодном пространстве в реакции между кислородом и электронами, как правило, участвует также вода:



Из кислорода, молекул воды и электронов, которые отрываются от металла, образуются отрицательно заряженные частицы — ионы гидроксидов OH^- , они переходят в раствор, а на металле появляются положительные заряды. Ионы гидроксидов, поступающие в раствор, соединяются с ионами водорода и дают воду по реакции:



Идея создания топливного элемента появилась в середине прошлого века. И уже в конце того же века (в 1890 г.) она была названа известным ученым физико-химиком В. Оствальдом «центральной проблемой электрохимии».

В постскрипуме к статье, включенной в январский номер «Философского журнала» за 1839 г., английский ученый Грове описал опыт, в котором стрелка гальванометра «постоянно отклонялась», когда гальванометр соединяли с двумя платиновыми полосками, находящимися в контакте с разбавленной серной кислотой. Одна из платиновых полосок омывалась водородом, а другая кислородом.

На основе только этого опыта едва ли можно считать Грове изобретателем топливных элементов, так как его первоначальной целью было «произвести разложение воды путем соединения». Однако, если учесть также статью, опубликованную в 1842 г., в которой Грове завершил поставленную перед собой задачу, его можно считать основоположником топливных элементов.

В дальнейшем Грове описал разложение воды электролизом с источником электрической энергии из 26 подобных топливных элементов, соединенных последовательно. Он доказал, что четыре последовательно соединенных элемента разлагают водный раствор йодистого калия. Эти два опыта по электролизу можно рассматривать как начало практического применения топливных элементов для получения э.д.с.

Однако Грове же и высказал предположение, что трудно получить высокие плотности тока в топливном элементе с газами в качестве топлива. Он писал: «Что касается химического или каталитического воздействия, то можно предположить, что при использовании обычной платиновой фольги оно имеет место на линии уровня воды, где соприкасаются жидкость, газ и платина; поэтому основная трудность состоит в получении более или менее значительной активной поверхности». Такая же трудность существует и в настоящее время.

В течение ста лет после открытия этого источника энергии внимание к изучению топливного элемента то ослабевало, то вновь усиливалось. Несколько вариантов такого элемента предложил выдающийся русский ученый П. Н. Яблочков в 1876 г. Один из первых вариантов он называл «гальваническим элементом горения». В нем пластинка пористого угля была тесно прижата к поверхности металлического натрия, между ними проложена бумажка. Влага, необходимая для образования водорода (при разложении воды натрием), поступала из воздуха.

Другой вариант топливного элемента П. Н. Яблочков назвал «автоаккумулятором». Он представлял собой трехэлектродный элемент. Первый электрод этого элемента был сделан из натрия, второй из свинца, способного накапливать водород, третий — из угля, адсорбирующего кислород. В последующих опытах Яблочков применял цинк вместо опасного натрия. Цинк он помещал в непосредственной близости от пористого

угля. В некоторых случаях предусматривалось также нагнетание воздуха внутрь полых углей.

Как и элементы горения, автоаккумулятор Яблочкова нашел подражателей. В конце восьмидесятых годов в Париже (в котором работал долгие годы П. Н. Яблочков) какие-то ловкие дельцы даже основали акционерное общество для эксплуатации такого источника тока, выдавая его за элемент некоего де-Меритана. Чтобы Яблочков не возбуждал против них судебного процесса на основании полученного им ранее французского патента, они откупились от него, дав ему на сравнительно небольшую сумму акций своей компании. Яблочков согласился. Совершенно неопытный в делах житейских, он надеялся хотя бы немного поправить свое материальное положение, пока его автоаккумуляторы не будут признаны и не начнут приносить деньги, которые так были нужны ему для продолжения активных научных исследований. Однако и тут он обманулся в своих ожиданиях: предприятие оказалось несolidным, скоро лопнуло и прибыли не принесло. Да оно и не могло принести прибыли, ибо время топливных элементов еще не пришло. Лишь в самые последние годы наметилась возможность практического применения топливных элементов. Несколько лет назад в газетах появились интересные фотографии. На первый взгляд ничего необычного — человек за рулем трактора. Но трактор двигался под действием электричества, которое вырабатывал компактный топливный элемент. Однако, как выяснилось, двигался он всего 15 мин, а топливом для него служил водород. Сейчас этот трактор стоит в музее. Очевидно, что эта рекламная машина показала лишь возможности и перспективы применения топливных элементов, но не успехи сегодняшнего дня.

Конечно, масштабы работ, которые велись во времена Яблочкова и даже в период до второй мировой войны, несравнимы с нынешними. Сейчас во всех странах вкладываются огромные средства для реализации программы исследований топливных элементов. Поэтому и наибольшие успехи были получены лишь за последние десять-пятнадцать лет.

Ни Грове, ни Яблочков, ни другие исследователи того времени не могли реализовать практически идею топливного элемента, так как не умели изготавливать электроды требуемого качества. Поэтому долгое время проблема представляла чисто научный интерес. То, что в последние 10—15 лет ее удалось превратить в задачу практическую, — заслуга электродов с высокоактивной поверхностью.

Реакция разложения водорода на отдельные атомы проходит с достаточной скоростью лишь на металлах переходных групп таблицы Менделеева, например, на никеле, на металлах группы платины или на их сплавах. Поэтому для электродов используют никель или угли с сильно развитой поверх-

ностью, на которую наносят катализаторы — мелкораздробленные порошки платины, родия и т. д. Нужно не только правильно подобрать материал, но и сделать из него активный электрод с хорошо развитой поверхностью. Теория таких электродов довольно сложна, но успехи уже наличи.

Эффективность работы топливного элемента зависит также от правильного подбора электролита, в котором передвигаются образующиеся или распадающиеся на электродах ионы. Если реакция протекает при низких температурах, то в качестве электролита используют водные растворы. Но если берут такое топливо, которое при низких температурах не окисляется (иногда и нецелесообразно работать при низких температурах) и поэтому вынуждены вести процесс при высокой температуре, то электролит — расплавленные соли. Так, например, расплавленные карбонаты натрия или калия, впитанные в окись магния, позволяют работать при температуре до 800°C . Но если нужно повысить температуру до 1000°C , то применяют твердый электролит, например, двуокись циркония и другие специальные составы на его основе.

В принципе топливные элементы даже во времена Яблочкова не являлись новым словом в проблеме прямого преобразования энергии химических реакций в электрическую энергию. Топливные элементы являются одними из химических источников тока, но не первыми и не единственными.

Люди уже около 200 лет знакомы с прямым преобразованием энергии окислительно-восстановительных процессов в электрическую энергию. Этот процесс протекает при разряде любого гальванического элемента или аккумулятора. Однако «топливо» в этих химических источниках тока довольно дорого: цинк, свинец, магний. Само топливо для таких элементов да и окислители — двуокись марганца, окись ртути, окись меди — производят сложной и долгой переработкой природных руд, требующей больших затрат электрической энергии.

Например, на получение 1 т цинка, из которого изготавливают аноды («топливо») во многих химических источниках тока, нужно затратить до 3,5 тыс. *квт-ч* электроэнергии постоянного тока, а 1 т магния и того больше — 17—20 тыс. *квт-ч*. Следовательно, чтобы получить электрическую энергию с помощью обычного химического источника тока, нужно сначала затратить гораздо большее количество электрической энергии на изготовление самого топлива. Получение окислителя тоже требует значительных расходов.

Поэтому очевидно, что возможность непосредственного превращения химической энергии окислительно-восстановительных процессов на основе широко доступных и дешевых видов топлива в электрическую энергию с помощью топливных элементов представляет огромный практический интерес.

Причем в топливном элементе в отличие от обычного гальванического элемента топливо и окислитель непрерывно вводятся в генератор, отдельно в катодную и анодную камеры. Таким образом, топливные элементы в отличие от гальванических элементов могут работать непрерывно и не требуют зарядки.

Пока наибольшее распространение и практическое применение получили водородно-кислородные топливные элементы, так как реакция горения чистого водорода наиболее проста и достаточно хорошо изучена. Однако их существенным недостатком является высокая стоимость водорода, поскольку водород должен быть предварительно тщательно очищен. Наибольшую чистоту имеет водород, получаемый электролизом воды, однако на получение 1 м³ такого водорода нужно затратить 5,6 квт·ч электроэнергии постоянного тока.

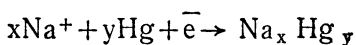
Значительно заманчивее использовать в качестве топлива такие дешевые и доступные продукты, как углеводороды, например, природный газ. Метан, являющийся главной составной частью природного газа, будет окисляться на аноде до окиси углерода или углекислого газа. Конечно, природный газ значительно дешевле, чем водород, но его использование связано с рядом трудностей, так как элементарных реакций гораздо больше, а значит и управлять ими труднее. Внешне это выражается в том, что анод, например, с течением времени теряет свою активность и окисление углеводорода замедляется, а следовательно, ухудшаются и некоторые электрические характеристики топливного элемента. Поэтому топливный элемент в настоящее время реализован лишь на основе водорода.

Может возникнуть и обратная задача. Нельзя ли, окисляя на аноде какое-либо органическое вещество, например, тот же углеводород, или неорганические соединения, получить не только продукт, представляющий определенную ценность, но и электроэнергию во внешней цепи? Ведь тогда можно будет получать различные органические и неорганические вещества не только без затрат электрической энергии, а даже с выработкой ее. Что ж, в принципе это возможно, и опыты дали положительные результаты. О принципиальной возможности решения этой проблемы свидетельствует хотя бы простейший пример работы топливного элемента на основе водорода и кислорода. При работе такого элемента, как мы видели выше, водород отдает на аноде электроны, превращаясь в ион водорода, а на катоде восстанавливается кислород с образованием воды, т. е. продуктом реакций, в результате которых во внешней цепи топливного элемента образуется электрический ток, является вода. Хотя вода — продукт в общем-то не очень дорогой, но в некоторых случаях, например, в условиях космических полетов, этот процесс может оказаться весьма полезным, потому что наряду с электрической энергией, необхо-

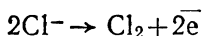
димой для питания различных систем корабля, можно получить вполне пригодную для питья воду. Исследования топливных элементов системы «Джеминай» в США, предназначенных для космических кораблей аналогичного названия, показали, что при мощности элемента в 2 кВт будет образовываться 0,453 кг воды на 1 кВт-ч выработанной электроэнергии. Или другой пример. Всем известно значение тяжелой воды, которая используется в атомных реакторах в качестве замедлителя нейтронов. Тяжелая вода содержится в незначительных количествах в обычной воде. При электролизе разлагается с образованием водорода и кислорода преимущественно обычная вода. Однако водород и кислород, уходящие из электролизера, увлекают за собой водяные пары, обогащенные парами тяжелой воды. После конденсации вода, обогащенная тяжелой водой, подается на вторую стадию электролиза. Так постепенно происходит увеличение концентрации тяжелой воды в обычной воде. Однако расход электроэнергии в этом процессе весьма значителен и колеблется от 60 до 100 тыс. кВт-ч на 1 т тяжелой воды. Для снижения расхода электроэнергии и большей степени разделения обычной и тяжелой воды предполагается прибегнуть к следующему приему. Водород и кислород, образующиеся при электролизе, направляют в топливный элемент, где на их основе вырабатывается электроэнергия, компенсирующая большую часть электроэнергии, затраченной на электролиз. Вода, образующаяся в топливном элементе, может быть снова возвращена на питание электролизера. Таким образом, получают одновременно тяжелую воду и электроэнергию.

Поскольку вопрос о получении электроэнергии в процессе химического синтеза в научно-популярной литературе практически не освещался, остановимся на этом подробнее.

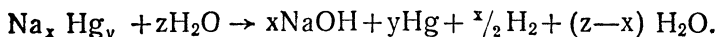
Один из промышленных способов получения хлора, щелочи и водорода — электролиз раствора поваренной соли с ртутным катодом. При этом в электролизере на катоде образуется сплав натрия с ртутью — амальгама



и на аноде — хлор



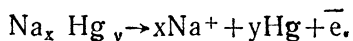
Чтобы получить щелочь и водород, амальгаму натрия направляют в другой аппарат, где она вступает в реакцию с водой:



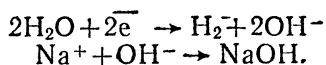
Ртуть возвращается обратно в электролизер.

Для ускорения разложения амальгамы аппарат заполнен графитовой насадкой, которая служит проводником электри-

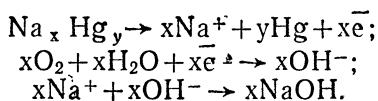
чества. При этом образуется короткозамкнутый гальванический элемент, где амальгама является анодом:



На катоде одновременно образуется щелочь:



Напрашивается вопрос: нельзя ли использовать энергию реакции разложения амальгамы для получения электрической энергии и компенсации части затрат на электролиз поваренной соли? Для этого необходимо осуществить процесс восстановления кислорода на катоде одновременно с разложением амальгамы натрия, т. е. реакция будет протекать по следующей схеме:



Следовательно, электроны, образующиеся на аноде при разложении амальгамы, перетекают по внешней цепи на катод, где восстанавливают кислород.

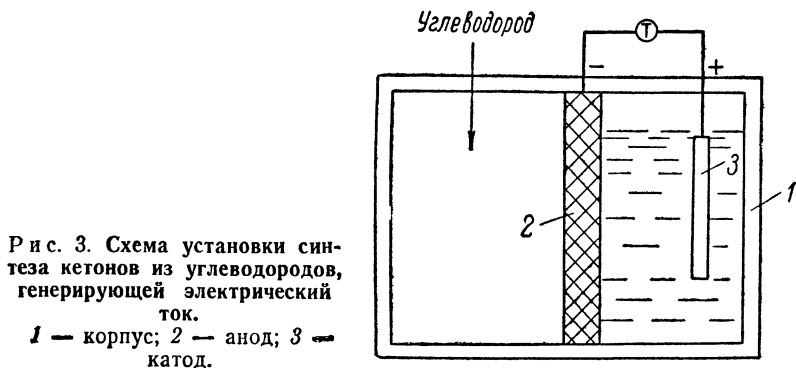
Амальгама натрия может быть получена и не в электролизере, а в результате взаимодействия (в отдельном аппарате — амальгаматоре) ртути и металлического натрия, образующегося путем электролиза расплавленного хлористого натрия или едкого натра. Этот принцип использован в топливном элементе Егера, предложенном в США фирмой «Келлог». На 1 квт-ч получаемой энергии здесь расходуется 0,5 кг металлического натрия. Если использовать для получения электроэнергии амальгаму натрия, образующуюся при электролизе поваренной соли с ртутным катодом, то напряжение на электролизере, а следовательно, и расход электроэнергии на единицу продукции можно снизить примерно на 20—25%.

В топливном элементе можно получать одновременно с электроэнергией и ряд ценных органических соединений. Например, если взять два пористых угольных стакана и погрузить их в крепкий раствор щелочи, а затем через поры одного из этих стаканов пропускать воздух, а через второй — изопропиловый спирт, то последний будет окисляться до ацетона, когда угольные стаканы замкнуты через провод небольшого сопротивления. Чтобы окисление спирта на аноде этого топливного элемента протекало с большей скоростью, на пористый угольный стакан предварительно наносят катализатор (пропитывают хлористыми солями родия и платины и затем восстанавливают в атмосфере водорода при 150°C для получения тонкого порошка металла), а температуру раствора поддерживают 70°C. В данном топливном элементе спирт

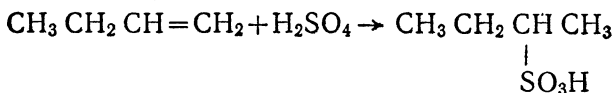
«сгорает» до ацетона с выходом около 100%, а во внешней цепи элемента возникает ток силой 0,35—0,5 а.

Чтобы получать в топливном элементе кетоны, не обязательно, как в случае с ацетоном, исходить из спиртов; можно для этой цели использовать более простое и дешевое сырье — углеводороды.

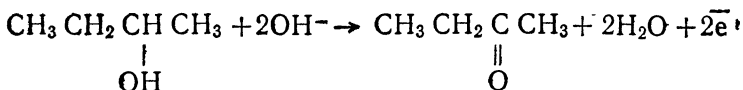
Принцип устройства такого генератора электрической энергии, который одновременно является химическим реактором синтеза кетона, можно уяснить из рис. 3.



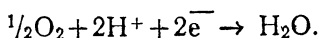
Герметичная ячейка 1 разделяется на две части пористой угольной перегородкой 2. В правое пространство помещается катод 3 и заливается концентрированная серная кислота. В левое пространство под давлением подается ненасыщенный углеводород, например, бутен-1. Этот углеводород продавливается через поры перегородки 2 и на поверхности ее, а также частично в порах, встречается с серной кислотой, вступая с ней в химическую реакцию:



Образующаяся бутилсерная кислота взаимодействует с водой (гидролизуется), давая вторичный изобутиловый спирт. Если теперь замкнуть пористую перегородку и катод медным проводом и подавать к катоду кислород, то по проводнику потечет электрический ток за счет того, что спирт будет окисляться, отдавая во внешнюю цепь электроны:



а на катоде происходит восстановление кислорода:



Продукт реакции — метилэтилкетон (с выходом около 90%) непрерывно отводится из электролизера, а бутен-1 непрерывно поступает в электролизер. Следовательно, и выработка электроэнергии и получение продукта протекают непрерывно. Вырабатываемая электроэнергия может быть использована, например, для электролиза с целью получения других продуктов. Таким образом, расход электроэнергии для получения химических продуктов в масштабах завода будет снижаться.

А теперь представьте себе электролизер, разделенный на две части перегородкой, способной пропускать только ионы одного знака, например, катионы. Для этого используют катионитовые мембраны. Электроды изготовлены из полых пористых угольных блоков. Если в анодное пространство залить раствор поваренной соли, а в катодное — раствор едкого натра, то при электролизе ионы натрия за счет переноса тока проходят через катионообменную мембрану в катодное пространство, следовательно, в катодном пространстве накапливается щелочь, на катоде выделяется водород (побочный продукт), а на аноде — хлор (товарный продукт). Такой цикл принят на всех заводах, производящих хлор и щелочь. Напряжение при этом 3,3 в, а расход электроэнергии на 1 т хлора — 2700 квт-ч. Если же через поры катода продувать воздух или кислород, то наименее ценный продукт — водород — образовываться не будет, на катоде происходит восстановление кислорода, но напряжение при этом падает до 2,3 в, а следовательно, и расход электроэнергии на 1 т хлора уменьшается примерно на одну треть. А если одновременно через анод продавливать и водород, то будет происходить такая же реакция, как и при работе водородно-кислородного топливного элемента (см. реакцию 6), т. е. ни хлора, ни водорода при этом не образуется, а в катодном пространстве электролизера накапливается щелочь. Причем напряжение будет составлять всего лишь 1,5 в. Здесь как бы топливный элемент находится внутри электролизера, снижая напряжение на нем. Следовательно, продувая водород или кислород соответственно через поры анода либо катода, можно существенно снижать напряжение, а следовательно, и расход электроэнергии во многих процессах электролиза.

Посмотрим теперь, каково будущее топливного элемента.

Академик А. А. Фрумкин отмечает, что хотя основную задачу при разработке топливных элементов электрохимии формулировали как отыскание способа использования химической энергии топлива с наиболее высоким коэффициентом полезного действия, реальное решение ее пошло в значительной мере по другому пути.

Когда начали серьезно заниматься топливными элементами

ми, то убедились, что применительно к требованиям большой энергетики эту задачу решить трудно. Одновременно стало очевидным, что можно построить весьма эффективные, хотя и не очень мощные, источники тока — такие, которые имеют высокие удельные характеристики. Это значит, что количество вырабатываемой энергии и мощность элемента, отнесенные к единице веса и объема, достаточно велики.

Преимущество топливного элемента перед другими хорошо известными электрохимическими источниками энергии, например, свинцовым аккумулятором или батареей для карманного фонаря, заключается в том, что запас электрохимически активного вещества (электрохимического горючего) в нем не ограничен размерами самого устройства, его можно непрерывно возобновлять по мере использования. Это позволяет увеличивать удельную энергию системы. С другой стороны, использование активных электродов обеспечивает высокие значения удельной мощности. Такие электрохимические источники энергии могут найти применение в различных областях, например, на транспорте, и в первую очередь для освоения космоса и в оборонной технике.

В последние годы ученые и инженеры многих стран ищут возможности замены автомобильного бензинового двигателя. Электрический двигатель — наиболее «стерильный» из всех известных в настоящее время, но для него нужны компактные и достаточно энергоемкие источники питания. В связи с этим, учитывая высокую концентрацию транспорта в городах (в США, например), делаются попытки создать электрический двигатель для грузовых и легковых автомобилей на основе топливных элементов.

Однако на сегодняшний день удельная мощность топливных элементов примерно в три раза меньше, чем у существующего бензинового двигателя. Но зато топливный элемент обладает другими преимуществами: он бесшумен и не выделяет продуктов сгорания. Когда будет повышена удельная мощность топливного элемента и снижена его стоимость, он сможет конкурировать с бензиновыми двигателями. Вторая проблема, которая стоит на пути широкого применения топливных элементов на транспорте — дешевое топливо. Пока наиболее освоены низкотемпературные топливные элементы. Однако в качестве топлива для них применяется водород, который очень дорог и к тому же пожароопасен гораздо больше, чем другие виды топлива. Поэтому ученые многих стран работают над созданием низкотемпературных топливных элементов, работающих на более дешевом топливе, особенно на углеводородах (например, на пропан-бутановой смеси, которую применяют у нас в качестве горючего газа).

Так как достаточно дешевых и удобных в применении топливных элементов пока не создано, то их в настоящее время

пытаются использовать лишь при освоении космоса. Американцы предполагают установить водородно-кислородные топливные элементы с жидкими водородом и кислородом в ракетной системе «Аполлон», предназначенной для полета на Луну. Вес горючего и окислителя на производство 1 квт-ч энергии в этом случае составляет всего полкилограмма. Но обеспечение нормальной работы водородно-кислородного элемента в условиях невесомости представляет значительные технические трудности.

Что касается применения топливных элементов в большой энергетике, то оно возможно лишь при условии освоения самого дешевого электрохимического горючего — окиси углерода и водорода в смеси, которая получается при обработке каменного угля (точнее, кокса) в виде генераторного газа или же в результате конверсии природного газа (метана). Во всяком случае предполагается, что в 1970 г. будут построены опытные установки мощностью в сотни и тысячи киловатт, которые приблизят день окончательного освоения топливных элементов.

Термоэлектрические генераторы

Физические явления, положенные в основу конструкции электрогенераторов (как и в случае МГД-генератора и топливных элементов), стали известны человечеству давно. Немецкий ученый Т. Зеебек в 1823 г. установил, что если спаять концы двух проволок из разных металлов и затем один из спаев нагреть, а другой охладить, то по проволочкам пойдет ток.

В течение многих лет это интересное явление природы не находило применения. Сейчас его широко используют для измерения высоких температур, так как сила тока, протекающего по цепи, состоящей из двух спаянных проволок (из разных сплавов) и милливольтметра, зависит от температуры. Однако потенциал такого источника тока слишком мал, чтобы его использовать для питания даже микроэлектродвигателя. Для получения достаточно больших количеств электроэнергии, пригодных для промышленных целей, это явление стали использовать совсем недавно. Исследования термоэлектрического эффекта показали, что возникающая при нагреве электродвижущая сила зависит от разности температур $T_1 - T_2$ (где T_1 — температура нагрева спая, а T_2 — температура «холодных» концов проводников), кроме того э. д. с. зависит от свойств самих металлов.

Термоэлектрический эффект объясняется тем, что зависящие от температуры энергия и скорость электронов на горячем конце выше, чем на холодном. Электроны с большой

скоростью перетекают с горячего на холодный конец, в результате чего между горячим и холодным концами возникает разность потенциалов. Если не отводить тепло от холодного конца термоэлемента, то он постепенно нагреется до температуры горячего конца, скорости электронов по всей цепи станут одинаковыми и термоэлектрический эффект наблюдаться не будет.

Возникает задача: как использовать термопары в качестве источников электроэнергии?

Было немало попыток создать достаточно мощный термоэлектрогенератор. Долгое время они кончались безуспешно. Сравнительно недавно даже не было надежд создать достаточно мощные термоэлектрогенераторы. Так, в «Технической энциклопедии» от 1934 г. в статье «Термоэлемент, термопара» можно было прочесть: «...сделано много попыток использовать Т. (термопары) в технических целях для непосредственного превращения тепловой энергии в электрическую без применения промежуточного тела, каким являются вода и водяные пары. Однако к.п.д. таких термобатарей настолько низок (порядка 1—3%), что применение их для технических целей по экономическим соображениям в настоящее время совершенно исключается».

Почему же 35 лет назад создание термоэлектрогенераторов считалось делом безнадежным, а сейчас мы уже применяем их в практике (хотя и в опытном порядке)?

Чтобы получить представление о действительной величине к.п.д. термоэлектрогенератора, возьмем термопару, одна ветвь которой изготовлена из свинца, а другую ветвь будем поочередно делать из других металлов и сплавов. Величины коэффициентов термо-э.д.с. для термопар в интервале температур от 25° до 100°C приведены в табл. 1 (положительный

Таблица 1

Металл или сплав	Коэффициент термо-э.д.с., мкв/град
Сурьма	43
Железо	15
Медь	3,2
Цинк	3,1
Ртуть	—4,4
Константан	—38
Висмут	—68

знак показывает, что к данному веществу ток течет через горячий спай),

Мы видим, что если для второй ветви термопары возьмем сурьму, то коэффициент термо-э.д.с. будет равен 43. Если же возьмем висмут, то —68 (ток потечет в обратном направлении). Если же изготовить первую ветвь не из свинца, а из другого металла, то величина коэффициента термо-э.д.с. термопары определится как разность коэффициентов термо-э.д.с. тех металлов, из которых изготовлены ветви термопары. Предположим, первая ветвь изготовлена из сурьмы, а вторая — из висмута. Тогда коэффициент термо-э.д.с. $\alpha = 43 - (-68) = 111$ мкв/град. Как видим, даже в лучшем случае (сурьма и висмут) термо-э.д.с. такого генератора невелика. При $T_1 - T_2 = 100^\circ\text{C}$ она будет равна лишь одной сотой вольта. Вот почему термоэлектрогенераторы, составленные из металлических термопар, дают лишь очень слабый электрический ток. Значит, надо искать новые материалы. Как оказалось, термоэлектрические свойства проявляются в полупроводниках гораздо сильнее, чем в проводниках-металлах. Сравните, например, табл. 1 с аналогичной табл. 2 для полупроводников.

Таблица 2

Полупроводник	Коэффициент термо-э.д.с., мкв/град.	Полупроводник	Коэффициент термо-э.д.с., мкв/град.
MoS	— 770	NiO	+ 240
ZnO	— 714	Mn ₂ O ₃	+ 385
FeO	— 500	Cu ₂ O	+ 1000

Таким образом, если изготовить термопару не из металлов, а из полупроводников MoS и Cu₂O, то коэффициент термо-э.д.с. достигнет 1770 мкв/град., т. е. станет в 400 раз больше, чем у термопары из чистых металлов. Из таких материалов уже можно создавать термоэлектрогенераторы, которые найдут практическое применение в технике.

В Институте полупроводников АН СССР под руководством академика А. Ф. Иоффе был разработан термоэлектрогенератор (ТГК-1) с термоэлементами из сурьмяно-цинкового сплава и медно-никелевого сплава типа константан. Источником тепла для ТГК-1 служила обыкновенная керосиновая лампа. Мощность термоэлектрогенератора составляла 1,6 вт. Такой генератор мог питать электроэнергией батарейные радиоприемники «Воронеж» и «Тула». Затем был разработан более совершенный генератор ТГК-3, который имел мощность уже 3 вт. Полупроводниковые элементы, соединенные последовательно, находятся в металлическом абажуре керосиновых ламп. Спаи, обращенные к стеклу лампы, нагреваются

ее пламенем; обращенные наружу — охлаждаются воздухом. Можно сказать, в этих лампах столкнулись век нынешний и век минувший.

От керосиновой лампы к ядерному реактору — таков путь термоэлектрогенераторов. Несколько лет назад у нас в стране был запущен термоэлектрогенератор с ядерным реактором, названный «Ромашка». Тепло в нем получается за счет деления урана-235 в активной зоне реактора. Цилиндрическая активная зона реактора состоит из пластинчатых тепловыделяющих элементов и графитовых конструкций. Она окружена бериллиевым отражателем, который возвращает быстрые нейтроны в активную зону и позволяет обеспечить начало цепной реакции с меньшим количеством урана. Температура в центре зоны около 2000° . С наружной стороны отражателя установлены термоэлементы, горячие спаи которых нагреваются за счет выделяющегося в реакторе тепла. Элементы соединены между собой и в сумме позволяют получить электрический ток силой до 88 а. Мощность «Ромашки» составляет 500 вт.

Специалисты считают, что если удастся объединить все положительные свойства в одном полупроводнике, то разработанный на его основе термоэлектрогенератор сделал бы бессмысленным применение двигателей внутреннего сгорания и паровых турбин.

Термоэлектронные преобразователи

Известно, что сильно нагретый металл испускает с поверхности электроны; причем кинетическая энергия электрона прямо пропорциональна величине абсолютной температуры поверхности. Это явление реализуется в термоэлектронном, или, как иногда его называют, термоионном преобразователе энергии.

Схематически (рис. 4) он представляет собой камеру, стенки которой — две пластинки (проводники первого рода), разделенные герметичной прокладкой из изоляционного материала. Одна стенка (катод) нагревается до температуры T_1 , обеспечивающей процесс термоэлектронной эмиссии. Электроны вылетают с поверхности катода и достигают анода (между анодом и катодом создан вакуум), от которого отводится тепло, и он охлаждается до температуры T_2 .

Так как на одной из поверхностей накапливаются электроны, то между ними (анодом и катодом) появляется разность потенциалов, а во внешней цепи — электрический ток.

Для возбуждения эмиссии электронов необходимо затратить энергию, нагревая металл. При попадании же электрона в металл будет, наоборот, выделяться энергия, т. е. в резуль-

тате столкновения электрона с анодом последний в конце концов нагреется до температуры, почти равной температуре катода, и электрический ток течь не будет. Поэтому анод необходимо охлаждать.

Явление термоэлектронной эмиссии также не ново — ее наблюдал еще Эдисон. Практическое применение этого явления, однако, стало принципиально возможным лишь совсем недавно. Более того, можно сказать, что термоэлектронный

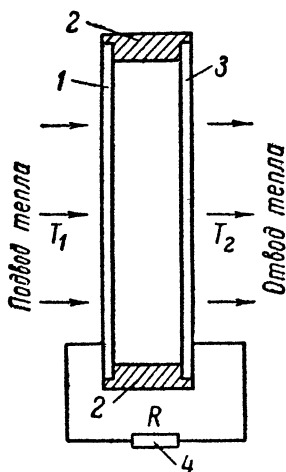


Рис. 4. Схема термоэлектронного преобразователя тепловой энергии в электрическую.

1 — катод; 2 — изоляторы; 3 — анод; 4 — нагрузка,

метод преобразования тепловой энергии в электрическую — самый молодой из всех способов прямого преобразования энергии, о которых говорится в этой брошюре. Пока еще не созданы промышленные образцы таких преобразователей, но полученные данные позволяют предположить некоторые пути практического применения этого способа.

Так, например, с помощью термоэлектрогенератора можно повысить коэффициент полезного действия обычной котлотурбинной установки, если в стенки топки котла вмонтировать батарею термоэлектронных преобразователей. Катод при этом нагреется до температуры около 1250°C . Анод можно охлаждать паром с температурой около 550°C . Коэффициент полезного действия установки, построенной по такой схеме, может быть доведен почти до 50% при к.п.д. самого термоэлектронного преобразователя около 16%.

Примерно так же можно использовать термоэлектронные преобразователи в атомных энергетических установках, работающих по схеме обычного парогенератора. Такой комплексный агрегат позволит увеличить к.п.д. всей установки также до 50%. По мнению некоторых специалистов, первое

промышленное применение термоэлектронные преобразователи найдут именно в качестве таких «надстроек» на атомных электростанциях.

Кроме того, использование термоэлектронных преобразователей позволит значительно упростить схему атомных генераторов электроэнергии. Дело в том, что в современных атомных установках всегда используется какой-то теплоноситель для передачи тепла активной зоны реактора парогенератору. Как правило, теплоносителями являются вода под давлением или жидкий металл. Кроме того, в таких установках имеется паротурбинный цикл, необходимый для преобразования тепла в механическую работу. Термоэлектронный преобразователь позволяет избавиться от теплоносителя и связанного с ним оборудования.

Подобный преобразователь, находящийся в активной зоне атомного реактора, был запущен в 1959 г. в Лос-Аламосе. При температуре катода около 2200°C этот генератор развивал мощность до 90 *вт* при к.п.д. 10%. Для увеличения экономичности преобразователя необходимо повысить температуру катода, для чего потребны более жаростойкие материалы. Повышение рабочей температуры катода еще на $200\text{—}300^{\circ}\text{C}$ позволит довести к.п.д. преобразователя до 35%.

В 1962 г. два подобных элемента, установленные в ядерном реакторе, были испытаны в Англии (Харуэлл). Каждый из них имел цилиндрический катод, изготовленный из смеси карбида урана с карбидом циркония.

Следует отметить, что по экономичности термоэлектронные преобразователи со временем займут одно из первых мест среди тепловых машин. Отсутствие движущихся частей и другие особенности их устройства позволяют получить очень высокую разность температур T_1 и T_2 . Важна также малая чувствительность таких преобразователей к радиации, что в ряде случаев заставляет отдавать им предпочтение перед другими источниками электроэнергии для космических кораблей.

Энергия Солнца

Если говорить о перспективах развития энергетики, основанной не на использовании ископаемых горючих материалов, то нужно в первую очередь сказать об использовании солнечной энергии. Солнце — гигантский водородный реактор, в котором за счет термоядерных процессов каждую секунду 564 млн. *т* водорода превращается в 564 млн. *т* гелия, и при этом выделяется 40 триллионов *ккал* тепла. Мощность самого реактора составляет $5 \cdot 10^{23}$ *л. с.*, несмотря на то, что он работает уже 5 млрд. лет. Всем человечеством за время су-

ществования цивилизации использовано меньше энергии, что излучает Солнце за 1 сек. Этот резервуар неисчерпаем; в течение $1,1 \cdot 10^9$ лет Солнце израсходует лишь $< 2\%$ своей энергии.

Много ли из этого гигантского количества попадает на Землю? Всего лишь одна двухмиллиардная часть! Казалось бы, мало. Однако, если прикинуть с карандашом в руках, то окажется, что всего одна десятая часть солнечной энергии, падающей на Землю, могла бы дать в несколько тысяч раз больше электроэнергии, чем вырабатывается в настоящее время во всех странах мира. Если бы мы захотели вскипятить стакан воды, то потребовалось бы собрать тепло, посылаемое Солнцем лишь на квадратный метр поверхности Земли в минуту. Академик А. Ф. Иоффе как-то заметил, что если собрать солнечную энергию, падающую на участок, расположенный в Каракумах и имеющий площадь в $50\text{—}100 \text{ км}^2$, и превратить эту солнечную энергию в электрическую, то последней хватило бы для обеспечения потребностей всего мира.

Но весь вопрос заключается в том, как собрать рассеянную солнечную энергию. Для этого сооружаются специальные параболические зеркальные концентраторы, собирающие солнечные лучи в фокус. Получается, таким образом, солнечная печь, тепло которой можно использовать для опреснения соленой воды, получения холода, сварки металлов и других целей; температура в этих солнечных печах может достигать $300\text{—}400^\circ\text{C}$. Они уже сейчас сооружаются и действуют в различных районах земного шара и особенно эффективно в тех местах, где много солнечных дней — в Средней Азии, Закавказье, в странах Африки. Одна гелиостанция, рабочая поверхность которой 2400 м^2 , может дать в сутки $7\text{—}8 \text{ м}^3$ пресной воды, а ее мощность оценивается в 1 тыс. квт.

Особенно привлекательны те способы использования солнечной энергии, при которых она непосредственно превращается в электрическую (без предварительного преобразования в тепловую и механическую). Известны три способа такого преобразования: термоэлектрический (см. выше), фотогальванический и фотоэлектрический.

В точку, где концентрируют солнечные лучи, падающие на поверхность параболического зеркала, может быть помещено устройство, имеющее спай двух различных полупроводниковых материалов. Этот слой нагревается солнечными лучами, в результате чего в цепи возникает электрический ток. В данном случае солнечная энергия превращается в электроэнергию, т. е. система работает как термоэлектродвигатель. Термоэлектрический метод представляет большой интерес, так как в связи с последними успехами в теории и практике

использования полупроводников удалось создать термогенераторы, имеющие к.п.д. более 8%.

Особое внимание сейчас привлекают работы по солнечным фотоэлементам (фотоэлектрический способ преобразования энергии). Еще в 1953 г. считалось, что максимальный к.п.д. солнечных фотоэлементов может составлять не более 0,6%. Но уже в 1955 г. была изготовлена солнечная батарея, к.п.д. отдельных элементов которой достигал 10%. В настоящее же время имеются работы, в которых указывается, что к.п.д. кремниевых фотоэлементов теоретически с учетом потерь может быть $>15\%$. Это значит, что при солнечной интенсивности 1000 вт/м^2 можно будет получить 150 вт электроэнергии с 1 м^2 освещенной солнцем поверхности. Изготавливаемые в настоящее время фотопреобразователи имеют к.п.д. 6—10%.

В последние годы проблема использования солнечной энергии привлекает все большее внимание ученых и инженеров. Интерес к этой проблеме вызван ее перспективностью. Есть основания надеяться, что энергетика, по крайней мере в солнечных областях земного шара, в значительной мере может развиваться за счет прямого преобразования солнечной энергии в другие виды энергии.

Однако, хотя использование энергии Солнца очень заманчиво, этот способ увеличения топливных ресурсов человечества еще далек от совершенства. Гелиоустановки обходятся довольно дорого. По подсчетам А. Кларка, капитальные затраты на 1 л. с., полученную в солнечной батарее, достигают 100 тыс. долл. Несомненно, однако, что в проблеме использования солнечной энергии еще не поставлена последняя точка и в будущем будут найдены более удачные решения конструкций систем, позволяющих эффективно использовать энергию этого неисчерпаемого ядерного реактора.

Геотермальные источники энергии

Все рассмотренные источники энергии основаны, как правило, на сжигании или переработке природного сырья, будь то уголь, нефть или уран и дейтерий.

Вместе с тем в природе имеются большие запасы энергии, которая потенциально может быть использована более простым путем. Речь идет прежде всего о так называемых геотермальных ресурсах, т. е. горячих и теплых подземных водах. Подземная разведка, произведенная в различных районах земного шара, выявила наличие огромных подземных морей, температура воды которых достигает в некоторых странах $70\text{—}90^\circ\text{C}$.

Естественно, что попытки использовать тепловой запас земли предпринимались в первую очередь в тех странах, которые бедны ископаемым топливом и гидроресурсами, но богаты вулканами. К числу этих стран принадлежит Италия, Исландия, Новая Зеландия. В Италии, например, вот уже несколько лет эксплуатируется электростанция на горячих водах в районе Лардарелло. Столица Исландии, страны гейзеров, уже давно полностью теплофицирована за счет термальных вод. В Новой Зеландии на протяжении почти десяти лет действует геотермическая электростанция, мощность которой 69 тыс. кВт. Предполагается в дальнейшем построить электростанцию мощностью 400 тыс. кВт и удовлетворить, таким образом, полностью потребность страны в электроэнергии за счет геотермических ресурсов. С точки зрения возможности использования горячих подземных вод чрезвычайно удобное географическое положение занимает Венгрия.

Две трети территории этой страны расположены над подземным морем, находящимся на глубине от 1 до 3 км и содержащим 5000 км³ вод с температурой около 100°C. Условия использования горячих вод в этом районе благоприятны еще и по следующей причине. Установлено, что в среднем температура земной коры повышается на 1°C через каждые 35 м. В Венгрии же эта цифра составляет 18 м. Если использовать всего лишь 10% энергии горячих вод, то это превысит всю энергию ископаемого топлива, находящегося в недрах Венгрии.

Японские геологи, проводя буровые работы в горном районе Мацукава, получили из скважин глубиной 945 м фонтан пара с температурой 300°C и давлением 60,5 кг/см². В этом районе на базе природного парового котла уже сейчас работает генератор мощностью в 9,5 тыс. кВт и проектируется электростанция мощностью в 60 тыс. кВт.

Чрезвычайно богата термальными водами и наша страна. Прежде всего это районы вулканической деятельности, такие, как Камчатка, где создана экспериментальная геотермическая электростанция на 5 тыс. вт. Большие запасы горячих вод обнаружены на Кавказе и в Западной Сибири (особенно на территории Тюменской области). Всего в СССР выявлено около 50 термальных бассейнов, которые могут обеспечить 15 млн. м³ горячей воды в сутки, что позволит сэкономить в год около 100 млн. т горючих материалов в условных единицах. Однако извлечение горячих вод из недр земли не всегда легко осуществить, и на этот счет существуют различные проекты. Например, советский инженер А. Муханов предлагает с помощью атомного бурового снаряда достигнуть слоя магмы, находящегося на глубине около 40 км и имеющего температуру 1200°C. Расплавленная магма через пробуренное отверстие устремится в подземное море, нагреет его до тем-

пературы около 700°C. При этом давление достигает 10 тыс. ат. Горячая вода по специально пробуренным скважинам устремится на поверхность Земли. Конечно, широкое использование термальных вод дело хотя и недалекого, но все же будущего. Но о том, что это действительно перспективно, говорят и некоторые факты. Например, стоимость электроэнергии, вырабатываемой японской геотермической электростанцией, уже сейчас на 10—20% ниже средней цены на электроэнергию. Если выработка электроэнергии на обычной гидроэлектростанции подвержена колебаниям, связанным с временами года, уменьшением и увеличением стока воды, то геотермальные станции таким колебаниям не подвержены. Поэтому можно ожидать, что эффективность геотермальных станций будет превышать эффективность ГЭС.

Заключение

Энергия вокруг нас. Мы буквально купаемся в море энергии. Как сказал Артур Кларк: «В этой невообразимо огромной Вселенной мы никогда не будем страдать от нехватки энергии... Надо только не забывать другой опасности — что нам может не хватить ума». Чтобы этого не случилось, надо настойчиво и целеустремленно работать. В конце концов, и в этом нет сомнения, человек научится полной мерой черпать из океана энергии, осуществляя самые дерзновенные замыслы.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ СЕРИИ «ТЕХНИКА»!

Нам кажется, что вас может заинтересовать серия научно-популярных книг о проблемах семейного воспитания детей «Педагогический факультет». Книги этой серии можно получать прямо на дом по подписке, так же, как газеты и журналы. Те, кто еще не успел выписать серию «Педагогический факультет», может подписаться на нее, начиная со второго полугодия 1969 года. Стоимость подписки — 45 коп. в квартал.

Книги «Педагогического факультета» расскажут вам о воспитании детей, об их возрастных и индивидуальных особенностях, об идейном и нравственном формировании, о том, как помочь детям учиться, об обязанностях семьи, в которой появился ученик, и о психологии молодежи.

СЛОВОМ, КНИГИ «ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА» — ЭТО ШКОЛА ДЛЯ РОДИТЕЛЕЙ. ПОДПИСАВШИСЬ НА СЕРИЮ, ВЫ БУДЕТЕ ПОЛУЧАТЬ ОДНУ КНИГУ В МЕСЯЦ.

СРЕДИ КНИГ, КОТОРЫЕ ВЫ ПОЛУЧИТЕ
ВО II ПОЛУГОДИИ:

Т. Илатовская. Кем ты хочешь быть?

И. Г. Овчинникова. Раздумья матери.

Популярная физиология для родителей.

В КАТАЛОГЕ «СОЮЗПЕЧАТИ» СЕРИЯ «ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ» РАСПОЛОЖЕНА В РАЗДЕЛЕ «НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ ЖУРНАЛЫ» ПОД РУБРИКОЙ «БРОШЮРЫ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЗНАНИЕ». ИНДЕКС 70062.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»