ДЖ. ГАРДНЕР

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО БЕЗ ДИНАМОМАШИН



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ КНИГА
ИЗДАТЕЛЬСТВА «МИР»
в 1965 году

АЗИМОВ И.

Вид с высоты.

Перевод с английского, Лондон, 1963, 15 изд. л., III квартал.

И. Азимов — известный писатель-фантаст, десятки книг которого переведены на многие языки мира. Но советский читатель меньше знаком с Азимовым — ученым, профессором биохимии. Его широкая эрудиция позволила ему написать незаурядную научно-популярную книгу о проблемах биологии, химии, физики, астрономии. «Вид с высоты» пользуется огромным успехом у читателей. В Англии в 1964 г. вышло шестое, дополненное и переработанное издание книги.

В наш век узкой специализации Азимову удалось увидеть состояние всей науки, как бы бросив на нее взгляд с высоты. Каждая страница говорит о «взаимопроникновении» наук. Недаром в его рассказе о клетках мозга много внимания уделяется кибернетике и электронике, а в разделе, посвященном астрономии, мы встречаемся с определением жизни.

Книга написана талантливым мастером литературы, человеком темпераментным и остроумным. Это сказалось в умении Азимова захватывающе излагать историю и проблемы науки. Он часто перебивает повествование шуткой, которая как бы помогает читателю лучше осмыслить прочитанное и в то же время учит логике научного мышления. «Вид с высоты» прочтут с большим интересом все: и ученик средней школы, который совершит увлекательное путешествие в неведомый мир, и маститый ученый, который отметит оригинальный и любопытный подход к знакомым фактам, необыкновенную легкость и простоту слога.

ГРЯДУЩАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

30 октября 1965 г.
п. Чутово
Стадник
VI-2-38



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»

John W. Gardner

Electricity without Dynamos

The Coming Revolution in Power Generation

Penguin Books, 1963
Harmondsworth, Middlesex

ДЖ. ГАРДНЕР

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО БЕЗ ДИНАМОМАШИН

ИЛИ

ГРЯДУЩАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Перевод с английского
Б. И. Колтового

Под редакцией и с предисловием
академика М. А. Стыриковича

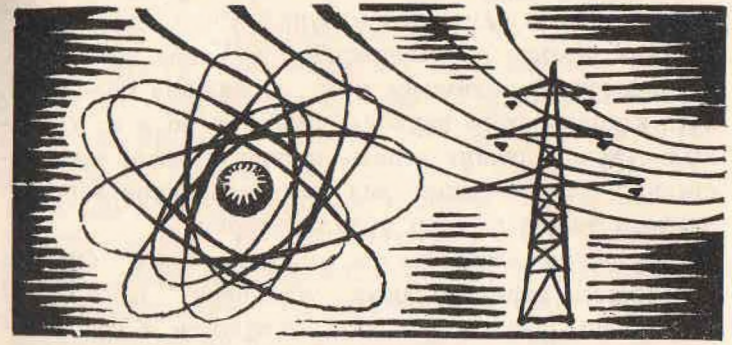
ИЗДАТЕЛЬСТВО «М И Р»
Москва, 1965

В настоящее время ученые и инженеры многих стран усиленно трудятся над разработкой устройств, позволяющих преобразовывать тепловую, химическую, атомную, термоядерную энергию непосредственно в электрическую (самую удобную для передачи и использования форму энергии). За последние годы, например, проведено много разработок, доказавших принципиальную возможность промышленной выработки электроэнергии новыми методами с к. п. д. до 50—65%. Ряд таких методов уже находит применение в специальных областях, в частности при изготовлении вспомогательного оборудования для космических аппаратов. Особое внимание сейчас уделяется использованию безмашинной выработки энергии (магнитогидродинамическая генерация) на мощных электростанциях.

Обо всем этом в увлекательной и популярной форме рассказывает английский физик Дж. Гарднер. Конкретные примеры и иллюстрации способствуют уяснению физической сущности проблемы.

Актуальность тематики, свежесть содержания, простой и образный язык делают эту книгу весьма полезной и доступной для самых широких кругов читателей, знакомых с электричеством в объеме школьного курса физики. Как отмечает академик М. А. Стырикович в предисловии к русскому изданию, «реализация новых методов потребует проведения громадного объема научно-исследовательских работ, зачастую в новых отраслях знания. Поэтому понятно то внимание, которое уделяется... *привлечению к проведению научно-конструкторских работ в этой области широких кругов исследователей, и прежде всего талантливой молодежи*».

Редакция литературы по вопросам новой техники



Предисловие к русскому изданию

Повышение жизненного уровня населения, развитие всех отраслей народного хозяйства любой страны во многом определяются непрерывным ростом потребления энергии во всех ее видах. Особенно быстро возрастает потребление электроэнергии — этой самой удобной для передачи и использования формы энергии.

Если за последние десятилетия мировое потребление всех видов энергии возрастало ежегодно на 3—4%, то потребление электроэнергии увеличивалось приблизительно вдвое быстрее. Это делает проблему промышленной выработки электроэнергии в достаточных масштабах одной из важнейших задач развития экономики всех стран.

В настоящее время как в СССР, так и в большей части остальных промышленноразвитых стран основную часть электроэнергии (около 80%) вырабатывают паротурбинные электростанции, на которых для производства пара сжигают органическое ископае-

мое топливо — каменный и бурый уголь, природный газ или отходы нефтепереработки. Такое положение сохранится, по-видимому, и на ближайшие 10—20 лет, хотя к концу этого периода заметную роль в отдельных странах начнут играть паротурбинные электростанции, использующие для выработки пара энергию распада тяжелых ядер урана и тория.

Последние десятилетия ознаменовались бурным прогрессом паротурбинных установок, особенно в отношении роста единичной мощности блоков котел — турбина — генератор, уже доведенной до полумиллиона киловатт. Связанное с этим снижение капиталовложений тоже имеет очень большое значение, так как в общих затратах на выработку электроэнергии свыше одной трети (а в районах дешевого топлива даже свыше двух третей) составляют затраты, пропорциональные величине капиталовложений в строительство электростанций. В ближайшее время эта тенденция должна сохраниться и даже усилиться, а мощность энергетических паротурбинных блоков будет доведена до миллиона с лишним киловатт.

Очень быстро возрастал и коэффициент полезного действия (к. п. д.) крупных паротурбинных электростанций, уже доведенный на лучших электростанциях до уровня почти 40% — выше чем у всех прочих теплосиловых установок. И хотя в ближайшие годы средний к. п. д. действующих электростанций еще будет быстро возрастать в связи с сооружением более совершенных энергетических блоков, ожидать значительного роста к. п. д. самих блоков уже нельзя.

Последнее обусловлено трудностями, создаваемыми при более сильном нагреве пара неизбежным резким снижением длительной прочности существующих материалов. Практически невозможно значительно понизить и напряжения в трубах котлоагрегата высокого давления или быстро вращающихся ло-

патках паровых турбин. Даже небольшое повышение температуры требует перехода на столь дорогие материалы, что оно уже не окупается экономией топлива. И хотя температуры 620—650°С технически вполне достижимы, в действительности же практикуется лишь нагрев пара до 540—560° С, причем тенденции к переходу на более высокие температуры за последние годы вообще не наблюдается. Конечно, ряд отдельных усовершенствований и систематическая оптимизация всех элементов установки все же приведут к незначительному повышению эффективности паротурбинных агрегатов, но едва ли их к. п. д. превысит 41—42%.

Газовые турбины, завоевавшие прочное место в авиации и внедряющиеся на другом транспорте, работают лишь на топливах весьма ограниченного ассортимента и намного уступают паротурбинным установкам по единичной мощности и величине своего к. п. д. В ближайшие годы их станут внедрять в большую энергетику в виде простейших дешевых установок с небольшим к. п. д. только для покрытия пиковых нагрузок. Попытки резко повысить их к. п. д. приводят к созданию сложных агрегатов, снабженных множеством компрессоров, газовых турбин и камер сгорания. Но даже и при подобном усложнении такие агрегаты, по-видимому, все еще будут уступать по величине своего к. п. д. паротурбинным установкам. Более перспективны, бесспорно, комбинированные парогазовые установки, позволяющие добиться некоторого повышения к. п. д. без чрезмерного роста температуры. Однако их преимущества, очень значительные по сравнению с паросиловыми установками в области умеренных мощностей и невысоких параметров пара, убывают с переходом к сверхмощным агрегатам.

Вообще говоря, и от таких установок трудно ожидать в ближайшей перспективе повышения к. п. д. до

уровня свыше 42—43% (при сохранении температуры пара или газа на уровне, допускающем использование экономически приемлемых материалов). Таким образом, на турбинных установках вообще нельзя добиться резкого повышения к. п. д., что делает весьма актуальной проблему перехода к установкам новых типов для выработки электроэнергии. Особенно важно это обстоятельство в районах дорогого топлива, где на долю его стоимости приходится до 60—70% всех расходов по выработке электроэнергии.

За последние годы проведено очень много разработок, доказавших принципиальную возможность генерации электроэнергии в больших масштабах новыми методами с к. п. д. до 50—65%. На каком пути достижимы подобные громадные сдвиги? Как известно, основным средством повышения к. п. д. теплосиловых электростанций является повышение начальной температуры рабочего тела, реализуемое в турбинных установках с большими затруднениями. Новые методы промышленной выработки электроэнергии предполагают в большинстве случаев достижение резкого повышения рабочей температуры благодаря отказу от турбин и движущихся деталей вообще в зоне высокого нагрева. Естественно, что неподвижные части установки, не испытывающие больших механических нагрузок, способны выдержать гораздо более высокие температуры, ограничиваемые только постепенным разрушением материала под действием потока горячих газов. Именно допустимостью резкого повышения температуры и объясняется главным образом возможность значительного повышения к. п. д., создаваемая новыми (их часто называют безмашинными или прямыми) методами генерации электроэнергии.

Гораздо меньшую роль играет устранение ряда промежуточных ступеней преобразования энергии, потому что они обычно привносят очень небольшие

потери. К. п. д. мощной динамомашины имеет, например, величину порядка 98—99%, так что отказ от нее способен повысить общий к. п. д. максимально до 42—42,5%.

Но, как известно, увеличение к. п. д. путем повышения начальной температуры требует сохранения на низком уровне конечной температуры цикла, из-за чего новые методы по большей части утрачивают свою эффективность в области низких температур. Поэтому их приходится сочетать либо с регенерацией отходящего тепла (например, путем подогрева используемого для сжигания воздуха), либо же путем объединения с турбинными установками, образующими вторую ступень цикла (в случае органического топлива чаще всего используют обе эти возможности).

Исключением являются только установки с топливными элементами, позволяющие достигать очень высокого к. п. д. даже при умеренных температурах. Это объясняется тем, что в топливных элементах энергия электрохимического окисления топлива дает электрический ток непосредственно, без предварительного преобразования ее в теплоту.

Ряд новых методов уже находит практическое претворение в специальных областях, особенно при изготовлении вспомогательного оборудования для космических аппаратов. Однако предстоит еще выполнить в громадном объеме исследовательские и опытно-конструкторские работы, прежде чем удастся создать установки нового типа, пригодные для массового внедрения в большую энергетику. Технико-экономические показатели, определяющие целесообразность такого внедрения, требуют наряду с высоким к. п. д., т. е. умеренными затратами на топливо, еще и сокращения расходов на сооружение, ремонт и обслуживание подобных установок.

Для этого потребуются большая единичная мощность, использование дешевых и широко доступных топлив, ограничение расхода дорогих материалов, большая длительность бесперебойной работы (тысячи часов без остановки и десятки тысяч часов без замены основных узлов).

При первоначальном ознакомлении со всеми такими вопросами и полезна настоящая книга. Ее автор Дж. Гарднер, по образованию и профессии физик, много лет трудится в области разработки прямых методов генерации электроэнергии, особенно на базе энергии распада ядер тяжелых элементов. Он в популярной и очень наглядной форме излагает основы способов безмашинной выработки электроэнергии, ведет речь о перспективах их использования главным образом в большой энергетике, но отчасти касается и специальных областей применения. Особое внимание автор уделяет использованию этих способов на атомных электростанциях как в ближайшем будущем, так и главным образом в более отдаленной перспективе. Слабее освещены им пути использования прямых методов для выработки электроэнергии на базе органических ископаемых топлив, которые, по-видимому, на ближайшие 10—20 лет останутся главным источником получения энергии всех видов, особенно в СССР, а также в других странах, богатых запасами сравнительно дешевого ископаемого топлива. (Правда, к числу таких стран нельзя отнести родину автора — Англию.)

Автор уделяет незаслуженно мало внимания проблеме достижения очень высоких температур, необходимых для самого перспективного в ближайшем будущем магнитогидродинамического способа промышленной выработки электроэнергии. Как известно, доведение температур до уровня не ниже 2500°С путем сжигания органического топлива требует сверх-

высокого подогрева воздуха (приблизительно до 2000° С). Создание не очень дорогого воздухоподогревателя, способного длительно работать при столь высоком нагреве и большом перепаде давления между нагреваемым воздухом и греющими продуктами сгорания, является само по себе очень трудной задачей. Конечно, воздух можно частично заменить кислородом и ослабить подогрев, но это сопряжено со значительным ростом капиталовложений и снижением к. п. д. из-за расхода средств и электроэнергии на кислородные установки.

Гарднер недоучитывает вместе с тем и возможности использования отходящих газов высокотемпературной части установки, что делает его высказывания о малой пригодности ряда методов для работы на органическом ископаемом топливе недостаточно обоснованными.

Слабо подчеркнуты в его книге и дополнительные трудности использования высокотемпературных материалов в установках с ядерными реакторами, хотя, как известно, они очень сильно осложняют решение и без того чрезвычайно трудной задачи, связанной с обеспечением достаточной долговечности материалов при сверхвысоких температурах.

Главное в книге Гарднера — это популярное изложение научных основ новых методов прямого получения электроэнергии, хотя автор и уделяет внимание (особенно в начале книги) общим перспективам развития мировой энергетики. И в этой части ряд положений автора нельзя признать правильным с современной точки зрения. Принятый автором очень быстрый рост мирового потребления энергоресурсов (к 2000 году в 10—30 раз) можно считать вероятным лишь применительно к выработке электроэнергии, тогда как общее потребление мировых энергоресурсов вырастает гораздо медленнее (по большинству оце-

нок как советских, так и американских специалистов за период до 2000 года оно повысится всего в 4—5 раз). Но даже считая эту цифру роста потребления постоянной на длительную перспективу (т. е. не принимая в расчет, как это делает автор, неоправданного предположения о стабилизации на определенном уровне численности народонаселения земного шара), мы получим угрожающе высокие цифры далеко за рубежом XX века (к 2080 году приблизительно в 50 раз выше существующих). Более того, запасы ископаемого органического топлива на такой период времени должны измеряться не в масштабах достоверных (разведанных) ресурсов, которые из года в год непрерывно растут, а в масштабах общегеологических прогнозов. Такие запасы органического ископаемого топлива оцениваются сейчас громадной цифрой 20—25 тыс. млрд. тонн, в том числе по СССР 9 тыс. млрд. тонн [1].

Правда, перспективные запасы ядерного горючего в виде тяжелых элементов (урана и тория) даже с учетом их использования в реакторах-размножителях считаются многими авторами имеющими гораздо более скромные размеры, чем это предполагалось раньше, — того же масштаба, что и органическое топливо или даже на порядок ниже [2].

В этих условиях за ближайшее столетие (до 2065 года) можно ожидать израсходования только 15% общих мировых невозобновляющихся энергоресурсов.

Вместе с тем без излишнего оптимизма надо надеяться и на то, что проблему овладения энергией управляемой термоядерной реакции разрешить удастся гораздо раньше. Тогда в распоряжении человечества окажутся практически неисчерпаемые энергетические ресурсы в виде гигантских запасов дейтерия (тяжелого водорода) в мировом океане.

[1] *Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт*, № 3, 1964.
[2] Там же.

Таким образом, вопрос об абсолютной экономии топлива отступает, по крайней мере на ближайшие 50 лет, на второй план перед вопросом об обеспечении человечества нужным количеством *дешевой* энергии.

Разумеется, это отнюдь не умаляет роли новых методов генерации электроэнергии, обещающих в перспективе значительное ее удешевление. Однако оценка этих методов должна исходить именно из технико-экономических показателей их применения и, таким образом, быть иной для районов дорогого топлива, в которых рост к. п. д. и, значит, экономия топлива могут окупаться даже ценой заметного увеличения капиталовложений, по сравнению с районами дешевого топлива, где основной задачей остается всяческое удешевление строительства электростанций.

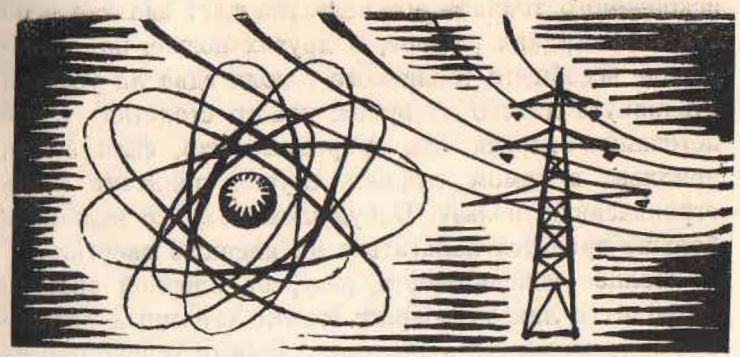
Вероятнее всего, для разных районов СССР и различных стран мира, резко различающихся по стоимости энергоресурсов, наиболее подходящими в конце концов окажутся электростанции неодинаковых типов и даже совершенно разные методы генерирования электроэнергии. Большую роль при выборе того или иного метода генерации электроэнергии сыграет и характер ископаемых энергоресурсов. Ядерное горючее, которое найдет применение в первую очередь в районах дорогого органического топлива, по условиям своего использования сильно отличается, например, от угля. Даже для отдельных групп ископаемых видов органического топлива разница значительна, а перспективы, связанные с внедрением того или иного метода выработки электроэнергии, скажем, на природном газе или каменном угле, могут быть далеко неодинаковыми.

С другой стороны, громадное влияние окажут и успехи в разработке различных установок нового типа.

Конечно, реализация новых методов потребует проведения громадного объема научно-исследовательских работ, зачастую в новых отраслях знания. Однако резкое повышение к. п. д. установок для выработки электроэнергии и соответственно снижение расходов на топливо, составляющих основную статью затрат в районах дорогого топлива (кстати сказать, к ним относится самая населенная и промышленноразвитая европейская часть СССР), обещает в масштабах народного хозяйства нашего государства громадную экономию средств. Весьма велика важность этого вопроса и в ряде других районов мира, где энергоресурсы относительно дороги. Поэтому понятно то внимание, которое уделяется разработке новых методов получения электроэнергии и привлечению к проведению научно-конструкторских работ в этой области широких кругов исследователей, и прежде всего талантливой молодежи. Этим диктуется, как справедливо отмечает Дж. Гарднер, вся важность задачи по подготовке новых научно-технических кадров. Можно надеяться, что выпуск издательством «Мир» ярко и доходчиво написанной книги Дж. Гарднера сыграет свою роль в этом важном вопросе.

Академик М. А. Стырикович

Москва, октябрь 1964 года



Предисловие

Прошло уже почти две трети двадцатого столетия, и «лихорадка прогнозов» на XXI век стала общераспространенной. Из великого множества разных предположений бесспорно по меньшей мере одно: мировое потребление энергии во всех ее формах, особенно электрической, должно все время стремительно возрастать. По различным оценкам, с учетом роста населения, развития промышленности и т. д. мировое потребление энергии к 2000 году в 10—30 раз превысит современный уровень [1].

В свете подобной перспективы нынешнее изобилие ископаемых топлив (уголь, нефть, природный газ) надо признать лишь как благоприятную, но временную отсрочку наступления того дня, когда запасы всех подобных видов топлива иссякнут. Из-за чрезвычайно неравномерного распределения запасов

[1] Это относится лишь к потреблению электроэнергии; общее же потребление всех энергоресурсов растет гораздо медленнее и должно превысить существующий уровень в 4—5 раз. — *Прим. ред.*

ископаемого топлива его нехватка даст знать о себе в одних странах раньше, в других позже, но наступление всеобщего топливного голода едва ли удастся отодвинуть далеко за рубеж нового столетия. Такие источники энергии, как природный пар, сила ветра, приливы, в самом лучшем случае принесут лишь ограниченную пользу. В будущем нам все больше и больше придется полагаться на ядерную энергию.

Полное использование ресурсов ядерной энергии позволит с лихвой покрыть самые огромные потребности человечества в энергии, с какими только оно ни столкнется в будущем[1]. Задача, разумеется, состоит в том, чтобы отыскать пути использования этих ресурсов, причем пути экономически целесообразные.

Строившиеся до сих пор промышленные атомные электростанции критикуют как мало эффективные и неэкономичные. Здесь надо подчеркнуть одно обстоятельство, которое не все еще оценивают в должной мере: и на обычных теплоцентралях, и на современных атомных электростанциях преобразование тепловой энергии в электрическую представляет собой очень сложную цепь процессов — производство пара, его использование в турбинах и т. д. Этот как бы «внутренний потолок» ограничивает повышение общего к. п. д., не говоря уже о больших капитальных затратах и дополнительных расходах на сооружение основного и вспомогательного оборудования.

Среди ученых и инженеров все более зреет убежденность в том, что сами по себе новые топлива не позволят преодолеть эту преграду. Нужно смело искать новые способы выработки электрической энергии. И в научно-технической литературе последних лет появилось немало интересных оригинальных

[1] Здесь автор под ядерной энергией понимает, по-видимому, как энергию распада тяжелых ядер, так и энергию синтеза (термоядерную). — *Прим. ред.*

предложений, направленных на достижение этой цели. Суть этих предложений состоит в полном отказе от звеньев парогенератор — турбина, в изыскании того или иного способа преобразования исходной формы энергии (химической, тепловой, ядерной и т. д.) *непосредственно* в электрическую.

Хотя в основе таких предложений по большей части лежат давно известные принципы, их практическое воплощение требует достижения столь высоких температур и сопряжено с разработкой материалов с такими свойствами, о каких лет десять назад нельзя было даже и думать. И только сейчас, в связи с быстрым развитием атомной промышленности и ракетной техники, такие температуры и такие материалы стали воплощаться в действительность. Задача настоящей книги — рассказать доступным языком об этих волнующих новых идеях выработки электричества, описать их истоки и основы, обрисовать современное состояние их разработки и перспективы на будущее. Не преуменьшая колоссальных технических трудностей, автор старался подчеркнуть решающие в конечном счете преимущества способов прямого преобразования по сравнению с турбинными установками. После вступительного обозрения состояния энергетики в масштабах всего мира и рассказа об известных формах энергии и энергетических ресурсах в основных разделах книги говорится о тех способах прямого преобразования, которые в настоящее время представляются наиболее перспективными в свете их возможного использования в широких масштабах. Наряду с этим обрисованы и некоторые другие возможности непосредственного преобразования, хотя ими, вероятно, не удастся воспользоваться для создания крупных экономически рентабельных электростанций, несмотря на то что доказана их потенциальная ценность там, где нужны небольшие и весьма

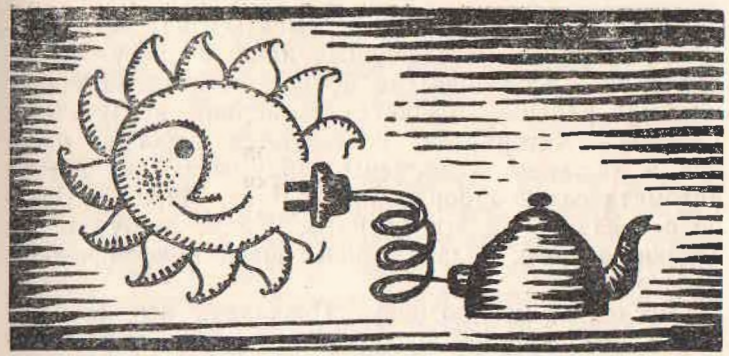
надежные установки, требующиеся, скажем, для космических кораблей.

Поскольку главное внимание здесь уделяется принципиальной стороне вопроса, количественные характеристики новых генераторов излагаются в самых общих чертах. Там, где такие сведения приводятся, это делается с тем, чтобы показать общее состояние разработок к моменту написания настоящей книги. Разумно предположить, что в столь быстро развивающейся области характеристики генераторов удастся значительно улучшить уже ко времени выхода книги в свет. Так, например, есть основания полагать, что менее чем через год начнет действовать экспериментальный магнитогидродинамический (МГД) генератор, способный развивать на непродолжительное время мощность в несколько тысяч киловатт. Судя по некоторым данным, начальную температуру, при которой такой генератор еще сохраняет свою эффективность, вероятно, удастся снизить от 2760 приблизительно до 2200° С. Это намного поможет преодолению ряда трудностей, о которых говорится в гл. 8. Термоионные генераторы, подобные тем, о которых рассказывается в гл. 6, показали в ходе испытаний долговечность свыше 5000 *час.*

В книге много моих сносок, которые один острослов называл «словесной икотой». Я все же надеюсь, что они полезны, ибо предназначены углублять познания, не мешая чтению основного текста. Если книга заслужит того, чтобы ее перечитать, то при первом чтении сноски можно опускать.

Дж. Гарднер

Март 1963 года



1. ЭНЕРГИЯ ДЛЯ ЗОЛОТОГО ВЕКА?

«Наш мир накануне еще более великих свершений. Не за горами день, один из нескончаемой вереницы, когда разумные существа, существа еще не рожденные и живущие ныне только в наших мыслях, с радостной улыбкой протянут руки к звездам»[1].

Эти слова провидец Герберт Дж. Уэллс изрек еще в начале двадцатого столетия. С тех пор прошло 60 лет, но мы еще и сейчас слышим отголосок его духа, исполненного дерзновенной веры. В наши дни человечество под двойной тенью — угрозы ядерной войны и угрозы стремительного роста перенаселенности[2] — продолжает стремиться к «золотому веку».

Человек был бы ничем, если бы не был исследователем. И на самом деле только его способность к исследованиям, к опытам, совершенствованию уже

[1] 24 января 1902 г. на лекции в Королевском обществе; процитированы 13 мая 1961 г. в редакционной статье журнала «Нейчер», посвященной первому космическому полету человека.

[2] Здесь автор скатывается на человеконенавистнические позиции мальтузианцев, утверждающих, что якобы население размножается быстрее, чем увеличиваются средства, необходимые для существования людей. Единственное средство борьбы с нищетой они видят в сокращении численности населения. — *Прим. ред.*

сделанного позволила ему возвыситься над остальными существами, населяющими нашу планету. А сегодня он — исследователь больше, чем когда бы то ни было раньше. Познается последний неизученный материк — Антарктида, исследуются глубины океанов и окраины атмосферы, обдумываются полеты автоматических лабораторий к Луне, Марсу и Венере с посадкой на эти планеты. Когда пишутся эти строки, человек делает первые шаги в космическом пространстве.

Исследуя, мы познаем. Познавая, мы находим много возможностей поставить новые знания на службу благоденствию человека. Ту же мысль можно выразить еще убедительнее: только тогда, когда человек использует эти знания в своей практической деятельности со всей той энергией, той дальновидностью, той мудростью, на которые способны сообща наши ученые и инженеры, наши социологи и государственные мужи, только тогда можно без глубочайшей тревоги размышлять о будущем человечества.

Прошедшие годы были наполнены размышлениями о будущем человечества. Они показали, что есть только три возможных исхода. Во-первых, как нам всем известно, страшная возможность самоубийства человечества в третьей мировой войне. Второй исход, предсказывавшийся сэром Чарлзом Дарвином в его мрачном предвидении «Грядущее миллионолетие»[1], это — густо населенный мир, обитатели которого постоянно пребывают на грани голодной смерти. Третья возможность, обрисованная профессором Дж. Берналом в его книге «Мир без войны» (1958 г.), это — мир, численность населения которого установилась на уровне в два-три раза выше существующего и в котором все человечество пользуется благами небывало высокого уровня жизни. Вот эту-то третью возможность я и называю «золотым веком». Я принимаю за аксиому, что именно эту возможность выбрало бы подавляющее большинство людей в мире, хотя они могли бы резко, и даже очень резко, расходиться друг с другом в выборе путей и средств достижения этой цели.

[1] Юбилейное издание, 1952 г. — *Прим. ред.*

Как распорядится человек отпущенным ему жизненным сроком? Совершит ли он самоубийство, в результате которого погибнет весь человеческий род, будет ли он на протяжении этого миллиона лет влачить жалкое существование или же обретет блага «золотого века»?

(Отдельные читатели подумают, что я упустил четвертую возможность, над которой человек не властен, а именно катастрофическое столкновение Земли с какой-нибудь иной планетой или звездой. Во Вселенной подобные события порой случаются, но вероятность того, что это может произойти с нами в ближайший миллион лет, слишком ничтожна. Ведь миллион лет в масштабах астрономии — всего лишь мгновение. Куда вероятнее, что наша планета лет так через пять миллиардов будет поглощена Солнцем, когда оно взорвется, как взрываются в конце концов все подобные Солнцу звезды.)

Какие бы споры о *вероятном* будущем человечества ни вели между собой пророки, все они сходятся на том, что необходимой предпосылкой любого подобия «золотого века» является громадное расширение масштабов использования мировых ресурсов, материалов и энергии. Эти ресурсы неотделимы друг от друга, поскольку рост потребления материалов неизбежно сопряжен с ростом потребления энергии. Разумеется, это не единственная предпосылка. Нам нужно еще найти путь к стабилизации численности мирового населения[1] и научиться вести свои дела без войн — ограничусь лишь этими очевидными условиями. Любое из трех этих основных требований уже освещалось во многих книгах и, несомненно, явится темой множества новых книг в будущем. В настоящей же книге я попытаюсь рассказать общедоступным языком о некоторых оригинальных и волнующих воображение идеях, связанных с перспективами использования энергетических ресурсов.

Идеи, о которых идет речь, — а в настоящее время это уже несколько больше, нежели просто идеи и пробные эксперименты, — уже широко обсуждались в

[1] См. предыдущую сноску о мальтузианских взглядах автора. — *Прим. ред.*

научно-технической литературе. Если перелистать наугад любой из последних комплектов ведущих научно-технических журналов, то нельзя не заметить, что многие статьи имеют такие заголовки, как «Прямое преобразование энергии», «Прямое получение энергии», «Прямое получение электроэнергии».

Когда инженер говорит о «прямом преобразовании», он имеет в виду преобразования энергии некоторой первичной формы, такой, как тепловая или химическая, *непосредственно* в электричество, которое является наиболее гибкой и самой удобной из известных нам форм энергии. Ныне основной промышленный способ выработки электричества из первозданных форм энергии, запасенных в земной коре, состоит в сжигании ископаемых топлив в топках котельных установок и расширении в турбинах пара, вырабатываемого в котлах. Турбины вращают мощный магнит внутри неподвижной обмотки, благодаря чему в витках обмотки возникает электрический ток, который идет далее в провода линий распределительных энергосистем. Отсюда ток в конце концов приходит в наши дома, приводит в действие наши телевизоры, стиральные машины, холодильники и десятки других электроприборов, которые стали неотъемлемой частью современного быта.

Не нужно быть специалистом в области энергетики, чтобы, не мудрствуя лукаво, прийти к выводу о том, что подобный окольный способ выработки электроэнергии из таких исходных топлив, как уголь или нефть, малоэффективен. Насколько проще, удобнее, эффективнее и просто экономичнее было бы, скажем, подключить линию энергосистемы к угольным пластам и с помощью некой магии превращать запасенную в них энергию *непосредственно* в электроэнергию, избавившись от докучливых хлопот, связанных с добычей угля, который затем надо еще сжигать, чтобы превратить воду в пар, способный вращать турбину, и т. д. и т. п.

В последующих главах показывается, что это отнюдь не такая уж фантастическая перспектива. Прямое преобразование первичной энергии в электрический ток — не новая научная идея: основы тех методов, которые выдвигаются ныне, были открыты еще

до XX века. С прямым преобразованием мы встречаемся и в повседневной жизни. Именно так превращается механическая энергия в звукоснимателе патефона, именно так превращается световая энергия в селеновом элементе экспонометра, именно так превращается тепловая энергия в радиолампе.

Однако очень малый к. п. д. и дороговизна прямого преобразования в перечисленных выше приборах, казалось, исключали всякую возможность использования прямого преобразования для выработки электроэнергии в больших масштабах. Разразилась вторая мировая война, а следом наступил век атомной энергии и космонавтики, далеко двинувший технику, особенно технику новых материалов и высоких температур, необходимых для ядерных реакторов и ракет. Этот прогресс позволил инженерам вновь обратиться к прямому получению электрической энергии.

Немало «прямых» генераторов уже сконструировано и с успехом работает. Но пока что все они представляют собой маломощные экспериментальные модели, дорогие и не очень эффективные. (Как правило, в случае преобразования тепловой энергии менее 20% этой энергии превращается в электрическую, тогда как на современных тепловых электростанциях эта цифра достигает 40%.) Тем не менее они убедительно показали, на каких принципах основано прямое преобразование, а отдельные модели уже получили реальное воплощение в виде источников питания радиопередатчиков на искусственных спутниках Земли.

Чтобы перейти от подобного показа возможностей непосредственного преобразования к экономически выгодному надежному и высокоэффективному промышленному способу выработки электроэнергии, потребуются время и большой прогресс техники. Длительность времени, которое понадобится для усовершенствования этих новых революционизирующих производство энергии генераторов, самым прямым образом будет зависеть от того, сколько внимания общество станет уделять развитию техники и какие средства оно выделит на это дело.

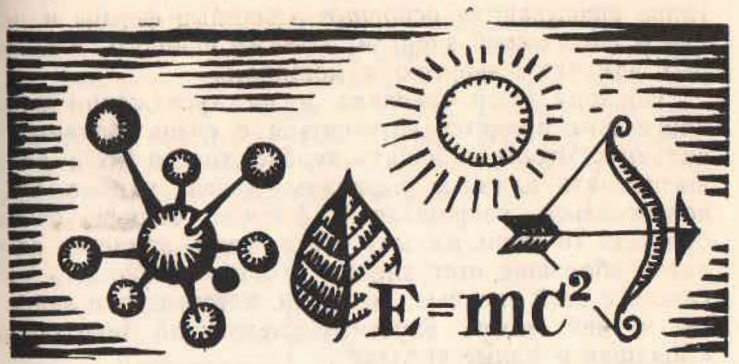
Каким временем мы располагаем? Ископаемых топлив, которые ныне дают нам около 85% потреб-

ляемой энергии, уже к началу следующего столетия [1] либо останется крайне мало, либо же они иссякнут совсем. Этот прогноз исходит из предположения, что использовать топливо более эффективно, нежели сейчас, не удастся. Но генераторы прямого преобразования открывают перед нами возможность такого повышения эффективности, позволяя, стало быть, ликвидировать разрыв между ресурсами и потребностями еще до наступления того времени, когда освоение новых источников первичной энергии (т. е. солнечной и ядерной) позволит в основном удовлетворить наши потребности. Разумеется, эти новые источники первичной энергии нужно будет использовать по принципу «прямого преобразования»: мы никогда, даже в «золотом веке», не будем настолько богаты энергетическими ресурсами, чтобы позволить себе возвратиться к сегодняшним расточительным способам выработки электроэнергии.

Бóльшая часть настоящей книги посвящена изложению различных идей и устройств, предложенных для прямого преобразования первичной энергии в электричество. Но прежде чем приступить к этой задаче, пожалуй, полезно разобраться в том, что мы понимаем под такими часто (и иногда неправильно) употребляемыми понятиями, как «энергия», «мощность», «мировые энергетические ресурсы» и т. д. Об этом и говорится в очередной главе.

---

[1] Как уже отмечалось, в свете современных данных этого правильнее было бы ожидать лишь к концу XXI века. — *Прим. ред.*



2. ВСЕВОЗМОЖНЫЕ ВИДЫ ЭНЕРГИИ (и мощности)

Хотя мы достаточно хорошо понимаем такие утверждения, как «этот художник обладает мощным дарованием» или «этот государственный деятель полон энергии», нам, пожалуй, было бы затруднительно выразить энергию государственного деятеля в калориях, а мощность дарования художника в киловаттах. Ясно, что энергия и мощность, о которых речь идет в вышеприведенных утверждениях, имеют совершенно иной смысл, нежели тот, когда мы говорим о десятисильном автомобильном двигателе или о стоваттной лампочке.

В настоящей книге речь идет о физической энергии, которая нужна для того, чтобы приводить в движение машины, являющиеся материальной основой нашей цивилизации, обогревать и освещать наши дома, поддерживать действие средств связи и т. д.; в частности, здесь рассматривается преобразование некоторых форм энергии в самую гибкую из всех ее форм, а именно в электрическую.

Еще не все формы физической энергии изучены нами полностью; о некоторых из них мы выработали четкое представление лишь в текущем столетии, причем отнюдь не исключено, что здесь нас в будущем не ожидают какие-то сюрпризы. В настоящей

главе описываются основные известные формы и ресурсы физической энергии, а также единицы, в которых измеряют энергию и мощность.

По ходу этого описания и на протяжении всей книги нам придется встречаться с очень большими числами. Чтобы избежать необходимости то и дело выписывать длинные вереницы нулей, удобно воспользоваться сокращенной формой записи очень больших (и очень малых) чисел. Здесь придется сделать небольшое отступление, чтобы познакомить читателя с этой записью; читатели, которые уже знакомы с ней, могут опустить следующий подраздел «Большие и малые числа».

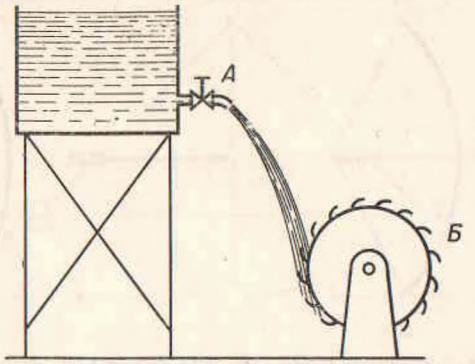
Большие и малые числа. На земном шаре живет около 2 900 000 000 человек[1], ближайшая звезда удалена от нас на 40 000 000 000 000 *км;* в 1 *г* урана содержится приблизительно 88 000 000 000 000 000 000 атомов.

Подобные числа-гиганты очень неудобно записывать и печатать в такой развернутой форме; кроме того, по рассеянности очень легко потерять или приписать лишний нуль! Поэтому желательна сокращенная запись. Число 100 можно записать в виде 10^2. Здесь маленькая цифра 2 означает, что друг на друга умножены две десятки; точно так же число 1000 можно сокращенно записать в виде 10^3 (т. е. $10\times10\times10$), а 1 000 000 — как 10^6. В такой форме численность населения земного шара запишется в виде $2{,}9\cdot10^9$, расстояние до ближайшей звезды равно $4\cdot10^{13}$ *км,* а число атомов в 1 *г* урана выразится как $8{,}8\cdot10^{19}$. В записи числа $2{,}9\cdot10^9$ выражение 10^9 означает, что запятую нужно передвинуть на девять разрядов *вправо.*

А как поступать с очень маленькими числами? Диаметр атома водорода равен приблизительно 0,000000025 *см;* диаметр *ядра* этого атома равен приближенно всего лишь 0,00000000000025 *см.* Нашу сокращенную запись легко распространить ради удобства и на весьма малые числа. Если мы условимся, что 10^{-1} должно означать 1 : 10, или 0,1, то, очевидно,

[1] Данные относятся ко времени, когда писалась книга. В настоящее время численность населения Земли уже превышает 3 млрд. человек. — *Прим. ред.*

10^{-2} означает 1 : 100, или 0,01. Точно так же 10^{-3} означает 0,001 и т. д. В такой форме диаметры атома водорода и ядра этого атома запишутся соответственно как $2{,}5\cdot10^{-8}$ и $2{,}5\cdot10^{-13}$ *см.* Такое число, как 0,000000354, можно записать в виде $3{,}54\cdot10^{-7}$. Здесь выражение 10^{-7} просто означает, что запятую нужно передвинуть на семь разрядов *влево.*



Фиг. 1. Вода в баке на верху башни обладает потенциальной энергией в силу своего положения в пространстве. Если открыть кран *А,* то вода под действием силы тяжести польется вниз, так что ее потенциальная энергия станет превращаться в кинетическую энергию, приводящую во вращение турбину *Б.*

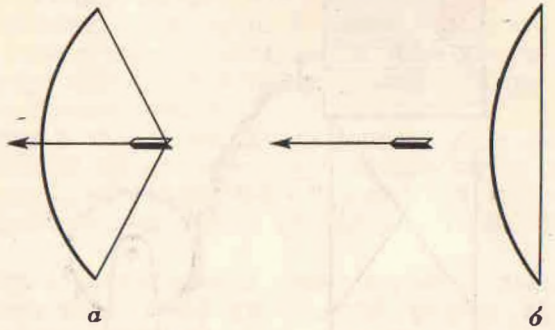
Этой сокращенной формой записи мы пользуемся ради удобства на протяжении всей книги для обозначения слишком больших или слишком малых чисел.

Вооружившись этой полезной формой записи, возвратимся теперь к обсуждению нашей основной темы о формах энергии и ее ресурсах.

Потенциальная энергия. Это — энергия, которой предмет обладает в силу своего положения или конфигурации. Вода в баке, находящемся над уровнем земли, обладает потенциальной энергией в силу положения, которое она занимает: если открыть кран в нижней части бака, то вытекающая из него струя воды способна заставить вращаться колесо турбины и выполнять тем самым полезную работу (фиг. 1).

Примером потенциальной энергии, связанной с конфигурацией тела, может служить натянутая тети-

ва лука (фиг. 2,*а*) [1]. Если тетиву опустить, то она быстро выпрямится (фиг. 2,*б*), а освободившаяся при этом потенциальная энергия метнет стрелу вперед. Потенциальная энергия, которой обладает сжатый газ, также связана с конфигурацией газового тела. Эту энергию можно высвободить, предоставив газу возможность расширяться до нормального объема; на данном принципе основано действие духового



Фиг. 2. *а* — потенциальная энергия запасена в тетиве лука, оттянутой для того, чтобы пустить стрелу; *б* — тетива возвращается в исходное положение, высвобождая свою потенциальную энергию и выбрасывая стрелу (потенциальная энергия тетивы переходит в кинетическую энергию стрелы).

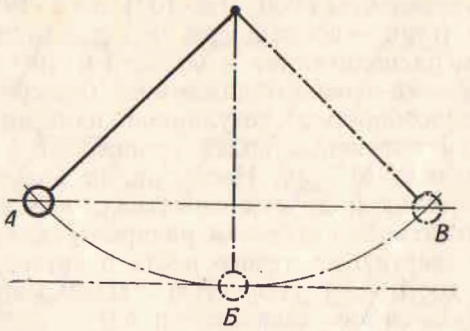
ружья. Читатель, несомненно, и сам сможет придумать другие примеры с пружинами.

Кинетическая энергия. Это — энергия движения; по всей вероятности, кинетическая энергия наиболее знакомая нам всем в наш век высокоскоростного транспорта форма энергии. Очень легко понять, что такое «энергия движения» на основе собственных наблюдений за ударом, возникающим при внезапной остановке движущегося тела — автомобиля, летящего мяча, камня, пули или упоминавшейся выше стрелы.

Пример со стрелой наглядно иллюстрирует превращение потенциальной энергии в кинетическую, так как стрела приобретает кинетическую энергию

[1] Строго говоря, потенциальная энергия накоплена не в оттянутой тетиве, а в согнутом луке; накопление энергии в растянутой тетиве — принцип действия обычной «рогатки» с резиновой тетивой. — *Прим. ред.*

движения за счет высвобождения потенциальной энергии, запасенной в тетиве. Это взаимное превращение кинетической энергии в потенциальную и обратно постоянно происходит в природе. Рассмотрим, например, маятник, показанный на фиг. 3. В положении *Б* груз маятника движется с максимальной скоростью и, следовательно, обладает максимальной кинетической энергией; но в это время груз находится в самой



Фиг. 3. Простой маятник.

Кинетическая энергия груза максимальна, когда он проходит среднюю точку *Б* (в этот момент он движется с наибольшей скоростью), тогда как потенциальная энергия груза достигает наибольшей величины в точках наивысшего подъема — *А* и *В*.

нижней точке своей траектории и, следовательно, обладает наименьшей потенциальной энергией. Положения *А* и *В*, с другой стороны, являются точками, в которых груз маятника достигает наибольшей высоты, раскачиваясь из стороны в сторону; следовательно, в этих положениях потенциальная энергия максимальна, а поскольку груз на мгновение останавливается в конце каждого качания, его кинетическая энергия в этих крайних положениях равна нулю.

Излучение. Все формы волнового движения являются воплощением попеременного перехода одной формы энергии в другую. Очевидно, например, что гигантские волны в океане представляют собой попеременное поднятие и опускание воды, кинетическая энергия которой таким образом превращается в потенциальную и обратно.

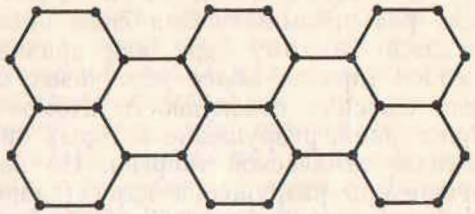
Менее наглядный, но очень важный пример волнового движения представляет собой электромагнит-

ное излучение — гамма-лучи, рентгеновское излучение, ультрафиолетовый и видимый свет, инфракрасные лучи и радиоволны. Во всех этих видах излучения при распространении волн электрическое поле переходит в магнитное и обратно: энергия волны при этом переходит из электрической формы в магнитную и обратно. Частота этих колебаний (переходов) изменяется в очень широких пределах: для радиоволн — приблизительно от 15 000 ($1{,}5 \cdot 10^4$) до $3 \cdot 10^{10}$ циклов в секунду (герц — сокращенно *гц*); для видимого света частоты располагаются в области $6 \cdot 10^{14}$ *гц*, тогда как для гамма-лучей, обладающих большой проникающей способностью, регулярное изменение электрических и магнитных полей происходит с частотой приблизительно 10^{20} *гц*. Несмотря на большую разницу в частотах и других свойствах, все эти виды электромагнитного излучения распространяются, т. е. переносят энергию из одного места в другое, с одной и той же постоянной скоростью 300 000 *км/сек*.

Пожалуй, самое знакомое проявление переноса энергии электромагнитными волнами представляет собой солнечное излучение: мы все видели, как лучи Солнца, сконцентрированные соответствующей линзой или зеркалом, быстро нагревают предметы даже до точки воспламенения, делая таким образом прибавку энергии весьма очевидной. Энергию видимой части солнечного излучения используют растения для создания различных сложных органических веществ из таких простых молекул, как молекулы воды (H_2O) и углекислого газа (CO_2). Этот процесс, называемый фотосинтезом, играет важнейшую роль в накоплении солнечной энергии.

Химическая энергия. Это — форма потенциальной энергии: вещество обладает химической энергией в силу *конфигурации* атомов, составляющих молекулы, и наличия энергетического взаимодействия между ними.

Как мы только что отметили, растения поглощают солнечную энергию для построения сложных молекул из простых. Иногда «молекула» представляет собой гигантскую совокупность атомов одного элемента, прочно связанных друг с другом в виде правильной решетки, которую мы называем тогда кристаллом. Уголь[1], например, представляет собой кристаллическую форму углерода, где каждый атом прочно соединен химическими связями со своими соседями (фиг. 4). Если эти сложные совокупности (молекулы или кристаллы) вновь разбить на простые молекулы или атомы, то запасенная энергия высвободится (обычно в форме тепла). Так, при сгорании каменного угля выделяется тепло по мере того, как атомы углерода, «отрываясь» от своих мест в кристаллах, образуют



Фиг. 4. Часть «кристалла угля».

Точками отмечены атомы углерода, а линиями изображены химические связи, удерживающие атомы вместе. Здесь показана лишь часть одного «слоя»; соседние параллельные слои тоже соединены с ним химическими связями.

с кислородом атмосферы простые молекулы углекислого газа. При определенных условиях химическую энергию можно превратить непосредственно в электрическую энергию; подобное превращение происходит в топливном элементе — рассматриваемой в гл. 3 разновидности генератора, работающего по принципу прямого преобразования.

Ядерная энергия. Пока еще не все аспекты ядерной энергии ясны нам, но если исходить из современных представлений, то можно провести определенную параллель между этой формой энергии и химической энергией. Как химическая энергия высвобождается или поглощается при перестройке групп атомов, так и ядерная энергия высвобождается или поглощается при перегруппировке элементарных частиц в ядрах атомов.

---

[1] Природные формы угля — каменный, бурый и древесный — фактически являются гораздо более сложными соединениями, включающими атомы не только углерода, но и водорода, кислорода и др. — *Прим. ред.*

Все ядра состоят из совокупностей протонов и нейтронов — этих двух основных разновидностей «кирпича», из которого построено вещество. Протоны несут положительный электрический заряд, тогда как нейтроны, как это видно из их названия, электрически нейтральны. Диаметры той и другой частиц одинаковы и равны приблизительно $2{,}5 \cdot 10^{-13}$ *см*, т. е. в сто тысяч раз меньше диаметра атома водорода ($2{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см*).

В атомных ядрах протоны и нейтроны прочно удерживаются вместе силами, по своей величине во много тысяч раз превышающими силы обычных химических связей. Поэтому ядра, как правило, представляют собой гораздо более устойчивые образования, нежели сложные совокупности атомов в молекулах и кристаллах, разрушение которых приводит к высвобождению химической энергии. Но по той же самой причине при разрушении ядра (ядерный распад) высвобождается соответственно большее количество энергии. Так, энергия, высвобождаемая при распаде всех ядер, содержащихся в 1 *кг* изотопа урана U^{235}, эквивалентна химической энергии, высвобождающейся при сгорании около 3000 *т* угля.

При определенных условиях ядерная энергия может также высвобождаться, когда одинаковые легкие ядра соединяются, образуя более тяжелое ядро (ядерный синтез). Предполагают, что такое превращение ядер водорода в ядра гелия служит источником энергии, испускаемой Солнцем и некоторыми звездами. Ядерная энергия, высвобождающаяся при синтезе 1 *кг* гелия из водорода, эквивалентна химической энергии, высвобождающейся при сгорании около 23 000 *т* угля.

Пока еще мы не научились управлять ядерным синтезом, чтобы использовать его в качестве источника энергии. Но процесс ядерного распада уже используется в Англии и других странах для выработки электрической энергии.

Другие формы энергии. Большую часть видов энергии можно отнести к той или иной из описанных выше категорий. Так, электричество является формой потенциальной энергии, если оно проявляется в виде электрического тока, текущего по проводнику. Звуковые и ударные волны переносят энергию посредством попеременного сжатия и разрежения среды, в которой они распространяются: по мере того как состояние среды изменяется от сжатия к разрежению, потенциальная энергия переходит в кинетическую, а затем обратно в потенциальную, как это наблюдается, к примеру, в случае колеблющейся пружины. Ветряные мельницы и водяные турбины приводятся в движение кинетической энергией движущегося воздуха или движущейся воды.

На теплоте стоит остановиться особо. В младенческие времена науки считалось, что теплота связана с всепроникающей, невидимой и невесомой жидкостью, называемой «теплородом»: чем больше теплорода содержит тело, тем горячее оно становится; переход тепла от горячих тел к холодным истолковывался как перетекание теплорода. Довольно маловероятные свойства невесомости и т. д., которые приписывались теплороду, делали эту концепцию малоубедительной. Смертельный удар ей был нанесен, когда было показано, что эта теория совершенно не способна объяснить превращение механической работы в теплоту, например при трении двух палочек друг о друга.

В современной физике на смену теории теплорода пришла кинетическая теория теплоты. По этой теории атомы или молекулы, из которых состоит любое тело, находятся в непрерывном быстром хаотическом движении. Кинетическая энергия этих ультрамикроскопических движений и проявляет себя как теплота тела. Таким образом, теплота в действительности является не особой формой энергии, а представляет собой кинетическую энергию, хаотически распределенную между бесчисленными миллионами частиц.

Превращение механической работы в теплоту можно легко понять, исходя из кинетической теории. Рассмотрим пример с трением двух палочек. Палочкам при их попеременном движении назад и вперед сообщается кинетическая энергия. Это возвратно-поступательное движение накладывается на микроскопическое хаотическое движение молекул, которое продолжается непрерывно даже тогда, когда палочка как целое неподвижна. Таким образом, кинетическая энергия каждой молекулы увеличивается за счет это-

го возвратно-поступательного движения. В процессе хаотического движения молекулы беспрерывно сталкиваются друг с другом. Скорость и направление движения любой отдельной молекулы претерпевают изменение при столкновении с другими молекулами. В конечном итоге возвратно-поступательная составляющая молекулярного движения вскоре также преобразуется в хаотическое движение. Очевидно, что в итоге совершается превращение кинетической энергии возвратно-поступательного движения палочки в кинетическую энергию хаотического движения молекул этой палочки, т. е. в теплоту.

Кинетическая теория теплоты позволяет по-новому определить сущность понятия температуры. Повышение температуры тела соответствует нарастанию кинетической энергии хаотического движения составляющих его молекул. Таким образом, температуру можно представить как непосредственную меру средней кинетической энергии молекул. Слово «средней» очень существенно, потому что энергии отдельных молекул очень разнятся: энергия части одних молекул намного выше, а части других намного ниже среднего уровня. Следовательно, температура — это по сути дела статистическое понятие, описывающее общее усредненное свойство гигантской совокупности отдельных частиц. Говорить о «температуре» какой-либо отдельной молекулы нет смысла, поскольку ее кинетическая энергия все время колеблется в широких пределах в результате столкновения с другими молекулами. Эти флуктуации взаимоуничтожаются при усреднении по всей совокупности частиц, благодаря чему температура тела в целом приобретает вполне определенный смысл.

Изложенные понятия о теплоте и температуре приложимы и к лучистой энергии. Как мы уже видели, электромагнитному излучению всякого вида присущ определенный интервал (область) частот. Справедливо и то, что чем выше частота излучения, тем больше его энергия. Этим, в частности, объясняется, почему гамма-лучи, обладающие наибольшей частотой колебаний из всех видов излучения, обладают и наибольшей проникающей способностью. Как же мы должны представлять себе понятия «теплота» и «температура» в связи с излучением? По-видимому, если излучения, обладающие многими различными частотами, т. е., иначе говоря, энергиями, накладываются друг на друга, то их совокупность образует лучистое тепло. А температура, соответствующая этому лучистому теплу, характеризует среднюю величину лучистой энергии, или частоту.

Взаимопереход энергии и массы. Мы уже говорили о взаимном переходе одних форм энергии в другие, например кинетической энергии в потенциальную и обратно. В примере с маятником дело обстояло так, как если бы *вся* кинетическая энергия, которой обладает груз маятника, движущийся с максимальной скоростью в среднем положении, превращалась в потенциальную энергию в конце качания, затем вновь полностью превращалась в кинетическую энергию при движении в обратную сторону и т. д. Но на практике, как всем известно, предоставленный самому себе маятник, если его не подталкивать регулярно, в конце концов неизбежно остановится. Что же в таком случае происходит с энергией?

Внимательное наблюдение за свободно качающимся маятником показывает, что в конце каждого последующего качания груз поднимается не до той высоты, которая достигалась им в предыдущем качании. Следовательно, может показаться, что при каждом размахе часть энергии теряется. В действительности же «потерянная» энергия расходуется на перемешивание воздуха, в котором движется маятник. Таким образом, энергия маятника переходит в кинетическую энергию молекул воздуха, т. е. в конечном счете — поскольку движение этих молекул становится беспорядочным — в тепло: земная атмосфера немного нагреется за счет энергии, сообщенной воздуху качающимся маятником.

Химическая энергия, заключенная в куске каменного угля, представляет собой лучистую энергию Солнца, запасенную миллионы лет назад растениями, которые, постепенно окаменевая, превратились в уголь. Сгорание угля высвобождает запасенную энергию в виде тепла, и если бы сгорание было полным, то оказалось бы, что выделившаяся энергия в точности равна энергии солнечного излучения, запасенной в

давние времена. В данном случае мы имеем дело с другим примером превращения энергии (лучистая энергия → химическая энергия → тепловая энергия) без потерь.

Нетрудно придумать множество других примеров. Подобные соображения и позволили физикам прошлого столетия сформулировать закон сохранения энергии [первый закон (начало) термодинамики], который гласит, что энергия не создается и не уничтожается, а лишь переходит из одной формы в другую. Однако тогда еще не осознавали, что сама масса является формой энергии. Поэтому и представлялось, что сохранение массы подчиняется отдельному закону. Ныне эти два закона объединены в закон сохранения массы-энергии, который гласит, что если некоторое количество массы «исчезает», то возникает эквивалентное количество энергии (в иной форме), и наоборот[1].

Такое взаимное превращение массы в энергию и энергии в массу непрерывно происходит в космических «лучах», которые представляют собой смесь атомных частиц, обладающих высокой энергией, и излучений, проникающих в верхние слои земной атмосферы из космоса. Некоторые из этих частиц обладают энергией, намного превосходящей ту энергию, которая удерживает атомы и ядра вместе, и даже ту энергию, которая сообщается частицам в самых крупных ускорителях, созданных человеком. Однако число частиц, обладающих высокой энергией, которые достигают земной поверхности, сравнительно мало, поскольку они в большинстве случаев делятся своей энергией с колоссальным множеством атомов кислорода и азота, с которыми они сталкиваются, пролетая сквозь атмосферу. И это к нашему счастью, ибо бомбардировка человеческого тела частицами столь большой энергии влекла бы за собой ужасные последствия; космонавтов, которых уже не укрывает атмосфера, приходится обеспечивать надлежащей защитой от космических лучей, встроенной в скафандры или кабины космических кораблей.

[1] Математически это выражается известным уравнением Эйнштейна: $E = mc^2$, где E — энергия, m — масса, а c — скорость света.

Переход массы в энергию происходит и при ядерном распаде. Как показано, общая масса всех частиц, образующихся в результате распада уранового ядра, меньше массы исходного ядра; «исчезнувшая» масса проявляется в виде энергии ядерного распада. Если бы можно было превратить в энергию *всю* массу урана, то выход энергии возрос бы более чем в тысячу раз, так что 1 *кг* урана был бы эквивалентен приблизительно $3 \cdot 10^6$ *т* угля, если образующееся при его сгорании тепло использовать с наилучшим достигнутым к. п. д.[1] Отсюда выясняется, что вещество представляет собой энергию в поистине чрезвычайно концентрированном виде.

Закону сохранения массы-энергии подчиняется, как мы уже видели, всякое превращение энергии одной формы в другую. Теплота же, будучи энергией особой формы (энергией неупорядоченного движения), при своем превращении подчиняется еще одному ограничению, известному под названием второго закона (начала) термодинамики. Этот закон гласит, что тепло не может самопроизвольно переходить от холодного тела к нагретому. Подобно тому, как вода, предоставленная самой себе, всегда течет вниз, так и тепло, естественно, стремится перетекать в сторону понижения температуры, т. е. из горячей области в холодную.

Исходя из соображений общего порядка, можно заключить (это строго доказуемо), что подобное поведение теплоты целиком согласуется с общеизвестным из повседневного опыта наблюдением: в природе не существует такого явления, как самопроизвольное упорядочение. Так, если не предпринимать сознательных попыток поддерживать порядок в доме, в нем постепенно начнет устанавливаться и воцарится беспорядок. По той же причине хаотическое распределение энергии по молекулам самопроизвольно никогда не упорядочится.

Под действием внешних факторов тепло можно заставить перетекать от холодного тела к более нагретому, как это делается, например, в домашнем хо-

[1] Этот эквивалент получается при практически полном сгорании хорошего угля. — *Прим. ред.*

лодильнике. Однако тщательный анализ неизменно показывает, что в подобных случаях всегда возрастает неупорядоченность энергии где-то в ином месте. Так, электроэнергия, расходуемая в холодильнике, в конечном счете вся рассеивается в виде тепла, а поскольку ни один холодильник не обладает к. п. д., равным 100%, количество производимого таким образом тепла должно превышать количество тепла, отводимого от охлаждаемой камеры.

Единицы энергии и мощности. На предыдущих страницах мы уже пользовались некоторыми знакомыми всем нам единицами энергии и мощности, не дав им никакого определения. В наши дни бурного промышленного развития практически все хорошо представляют, что означают такие словосочетания, как «десять лошадиных сил» или «сто ватт», благодаря тому, что автомобили и бытовое электричество стали вездесущими в обиходе. Такой термин, как «калория», вероятно, менее известен, хотя большинство людей заявило бы, что слышали о нем. Тот, кто помнит школьный курс наук, знает, что существует какой-то «джоуль», эквивалентный приблизительно 0,24 калории. С другой стороны, мало кто из не связанных с техникой людей узнает в выражении «1 *кал*» единицу энергии, а если и узнает, то не сможет выразить ее, скажем, через эквивалентное количество битуминозного угля.

В практике существует, к сожалению, слишком много разных единиц энергии, распространенных не только в различных странах мира, но и используемых различными группами специалистов в одной и той же стране. При этом та или иная группа часто считает, что система единиц, которой она пользуется, имеет неоспоримое превосходство над всеми остальными системами. В связи с этим, естественно, нужно пояснить те единицы, которые употребляются в настоящей книге. Я отдаю предпочтение единицам, которые в Англии являются общеупотребительными в быту и промышленности. Там, где подобные единицы слишком велики или малы для того, чтобы выразить рассматриваемое количество энергии, употребляются иные единицы, связанные с общеупотребительными простым соотношением. Там же, где это целесообразно, количество энергии выражается несколькими различными способами.

Исторически сложилось так, что еще до полного раскрытия эквивалентности различных форм энергии бок о бок существовали системы единиц, в которых энергия выражалась, с одной стороны, как механическая работа, а с другой стороны, как количество теплоты. Так, килограммометр определяли как энергию, необходимую для подъема груза весом 1 *кг* на высоту 1 *м* по вертикали; калорию же определяли как количество теплоты, необходимой для того, чтобы нагреть 1 *г* воды от температуры 14,5 до 15,5° С. Соотношения между этими и некоторыми другими единицами энергии указаны в табл. 1.

Таблица 1

Единицы энергии

Единица	Сокращенное обозначение	Определение и связь с другими единицами
Килограммометр	*кгм*	Энергия, затрачиваемая на подъем груза весом 1 *кг* по вертикали на высоту 1 *м*
Джоуль	*дж*	0,102 *кгм*
Эрг	*эрг*	10^{-7} *дж*
Калория	*кал*	Энергия, затрачиваемая на нагрев 1 *г* дистиллированной воды от 14,5 до 15,5°С; равна 4,19 *дж*, или (приближенно) 0,427 *кгм*
Килограммкалория, или килокалория	*ккал*	1000 *кал*, или энергия, затрачиваемая на нагрев 1 *кг* дистиллированной воды от 14,5 до 15,5°С; равна 4190 *дж*, или 427 *кгм*
Киловатт-час	*квт-ч*	Энергия, вырабатываемая за 1 *час* мощностью, равной 1 киловатту (определение дано в табл. 2); равна $3{,}6 \cdot 10^6$ *дж*

Мощность, по определению,— это скорость расходования энергии. Так, одна лошадиная сила характеризует расходование энергии со скоростью 75 *кгм* в 1 *сек*. «Лошадь» в термине «лошадиная сила» —

конечно, чисто умозрительное животное: это вовсе не та единица, о которой один школьник сказал: «Мощность стандартной лошади, которую держат в Национальном бюро стандартов!» Тем не менее эта единица в первом приближении соответствует мощности, которую способна развить хорошая тягловая лошадь в надлежащей упряжке. Некоторые другие распространенные единицы измерения мощности перечислены в табл. 2. Ни ту ни другую таблицу нельзя считать исчерпывающей.

Единицы электричества. Здесь уместно ввести понятия о силе электрического тока, напряжении и сопротивлении, а также определить единицы, в которых измеряются эти величины. Как и в случае с энергией и мощностью, множественность единиц, которые употребляются для измерения электрических величин, год от года возрастает. Мы дадим определение только так называемым практическим единицам: амперу, вольту и ому (т. е. единицам измерения соответственно силы электрического тока, напряжения и сопротивления) [1].

Легче всего понимается, пожалуй, сила тока: нетрудно представить себе ток электронов, движущихся по проводнику подобно тому, как вода течет в трубе. Силу потока воды обычно характеризуют ее ежесекундным расходом; силу тока электронов измеряют числом электронов, деленным на число секунд. Но в практических целях это неудобно, так как электрон — слишком крохотное количество электричества. Практическая единица силы электрического тока — ампер—приблизительно соответствует ежесекундному расходу $6{,}25 \cdot 10^{18}$ электронов.

Электрический ток бывает либо постоянным, либо переменным. Постоянный ток — это такой ток, когда электроны движутся все время в одном направлении; в случае же переменного тока направление его движения все время меняется, обычно с определенной

[1] Эти единицы получили свои названия по имени трех выдающихся ученых — основоположников в области электричества: Анри Ампера (1775—1836), Алессандро Вольта (1745—1827) и Георга Ома (1787—1854). Единица мощности «ватт» названа по имени Джеймса Уатта (1736—1819) — изобретателя паровой машины повышенного давления.

Таблица 2

Единицы мощности

Единица	Сокращенное обозначение	Определение и взаимосвязь с другими единицами
Лошадиная сила	*л. с.*	75 *кгм/сек*
Ватт	*вт*	1 *дж/сек* = 0,1 *кгм/сек*
Киловатт	*квт*	1000 *вт* = 1,34 *л. с.* = = 100,5 *кгм/сек*
Мегаватт	*Мвт*	1000 *квт* = 10^6 *вт* = 1340 *л. с.*
Милливатт	*мвт*	0,001 *вт* = 10^4 *эрг/сек*
Микроватт	*мквт*	10^{-6} *вт*=10 *эрг/сек*

Примечание: Очень удобно на практике пользоваться энергетическим «угольным эквивалентом», равным тому количеству тонн битуминозного угля, которое требуется для выработки данного количества энергии электростанцией при современной ее к.п.д. Разумеется, что эту величину нельзя считать постоянной, поскольку к.п.д. электростанций непрерывно повышается. В настоящее время принято считать, что одна короткая тонна (2000 фунтов) угля эквивалентна приблизительно 2,64 британской тепловой единицы [1] (Б. Т. Е.).

частотой. Примером постоянного тока служит ток от батарейки карманного фонарика или аккумулятора. В Англии самым распространенным видом электричества является переменный ток с частотой 50 *гц*. Существуют устройства для преобразования постоянного тока в переменный (обратные преобразователи, или инверторы) и переменного тока в постоянный (выпрямители). Подробнее об этих устройствах и сравнительных достоинствах переменного и постоянного тока говорится в начале гл. 8.

Подобно тому как вода не станет перемещаться по трубе, если в ней нет напора (у одного конца трубы давление воды должно быть больше, чем у другого), так и электрический ток не потечет по проводнику, если нет разности электрического «давления»,

[1] Здесь у автора, по-видимому, вкралась неточность: при полном сгорании одной короткой тонны (~906 *кг*) хорошего битуминозного угля выделяется около $2{,}64 \cdot 10^7$ Б. Т. Е.; соответственно одна метрическая тонна (1000 *кг*) дает около $7 \cdot 10^6$ *ккал*. Эту величину в Советском Союзе называют *тонной условного топлива*, употребляя в качестве единицы энергии. В электроэнергию на современной электростанции превращается около 40% этой величины. — *Прим. ред.*

или, как говорят, разности потенциалов, которая перемещает электроны (ток) по проводнику. Эту разность потенциалов измеряют в вольтах (*в*). Электрическая мощность, рассеивающаяся (в форме тепла) в проводнике, равна произведению силы тока в проводнике на разность потенциалов на концах проводника; таким образом, если мощность равна 1 *вт*, а сила тока равна 1 амперу (*а*), то разность потенциалов на концах проводника будет равна 1 *в*. В обычном электрическом фонарике лампочка потребляет мощность 1 *вт* и питается от батарейки, создающей ток напряжением 4 *в*. Сила тока, протекающего в таком случае по нити накаливания подобной лампочки, равняется 0,25 *а*, так как 0,25 *а* $\times$ 4 *в* = 1 *вт*. В дома англичан подается, как правило, электрический ток напряжением около 200 *в*. В этом случае для 100-ваттной лампочки нужна сила тока 0,5 *а*, так как 0,5 *а* $\times$ 200 *в* = 100 *вт*.

Подобно тому как при движении по трубе малого внутреннего диаметра поток воды преодолевает сопротивление, так и проводник оказывает сопротивление электрическому току. Чем больше сопротивление, тем больше должно быть напряжение, чтобы создать в проводнике ток данной силы. Сопротивление измеряют в омах: если для того, чтобы создать в проводнике электрический ток силой 1 *а*, необходимо напряжение 1 *в*, то сопротивление проводника составляет 1 *ом*. Если бы сопротивление проводника было 2 *ом*, то при напряжении 1 *в* сила тока в проводнике равнялась бы 0,5 *а*; для того же, чтобы пропустить через проводник с сопротивлением 2 *ом* ток силой 1 *а* понадобилось бы напряжение 2 *в*. Таким образом, между сопротивлением в омах, силой тока в амперах и напряжением в вольтах существует зависимость, известная под названием закона Ома; ее можно выразить так: число ом $= \frac{\text{число вольт}}{\text{число ампер}}$. Как мы уже видели, 100-ваттная лампочка потребляет силу тока 0,5 *а* при напряжении в сети 200 *в*. Сопротивление нити накаливания такой лампочки должно быть равно 400 *ом*, так как 200:0,5 = 400.

Для полноты изложения в заключение этого раздела приведем принятые в международном обиходе

определения ампера, ома и вольта. (В первом из этих определений, забегая вперед, придется затронуть электролиз — прохождение электрического тока через растворы, о чем речь пойдет в следующей главе.)

Ампер (международный) — это сила неизменяющегося электрического тока, который при прохождении через водный раствор азотно-кислого серебра отлагает на катоде серебро со скоростью 0,00 111 800 *г/сек*.

Ом (международный) — сопротивление при неизменяющемся токе и при температуре тающего льда ртутного столба равномерного сечения длиной 106,300 *см* и массой 14,4521 *г*.

Вольт — электродвижущая сила, которая в проводнике сопротивлением 1 (международный) ом создает ток силой 1 (международный) ампер.

Типичные примеры. Приводимые ниже примеры помогут читателю составить представление о некоторых упоминавшихся единицах энергии и мощности.

Мощность, потребляемая «лампочкой» светлячка, составляет около 50 *мквт*. Карманный радиоприемник (на полупроводниках) потребляет приблизительно 130 *мвт;* телевизор в среднем расходует около 120 *вт;* большой же домашний холодильник — около 180 *вт*.

Человек способен кратковременно развивать мощность, значительно превышающую 1 *л. с.*, когда он, например, имея вес 80 *кг*, быстро взбегает по лестнице.

Мощность крупных электростанций (в том числе гидростанций и атомных станций) обычно составляет от 500 до 1 000 *Мвт*. Общая мощность электростанций в Англии достигает приблизительно 30 000 *Мвт*, а общая мощность электростанций мира составляет около 500 000 *Мвт*. В процессе ядерного синтеза, непрерывно протекающего на Солнце, высвобождается около $3 \cdot 10^{20}$ *Мвт*.

Если говорить о продуктах питания, служащих топливом для организма человека, то энергетическое содержание углеводов, жиров и белков характеризуется соответственно 4, 9 и 4 *ккал/г*.

Взрослый человек в среднем потребляет ежесуточно от 2000 до 3000 *ккал* в зависимости от рода дея-

тельности. Кусочек белого хлеба размером 1,2×10,0×× 12,5 *см* равноценен 100 *ккал;* приблизительно столько же калорий содержится в большом яблоке.

Количество энергии, выделившейся при взрыве атомной бомбы над Хиросимой, равнялось приблизительно $2{,}3 \cdot 10^6$ *квт·ч*. Это эквивалентно энергии, которая выделяется при сжигании около 3000 *т* угля. При взрыве самой крупной водородной бомбы энергии выделится, вероятно, в несколько тысяч раз больше — около $1{,}4 \cdot 10^{10}$ *квт·ч*.



Фиг. 5. Существующее положение с использованием природных энергетических ресурсов.

Энергетические ресурсы. На фиг. 5 показана примерная картина использования человеком природных энергетических ресурсов. Около 50% мировой потребности в энергии удовлетворяется путем сжигания угля. Большую часть остальной потребности мы покрываем за счет нефти и природного газа. Некоторые читатели удивятся, узнав, что в наши дни дрова и отходы сельского хозяйства (растительные и животные) обеспечивают приблизительно 14% нужд человечества в энергии, тогда как вклад ядерного горючего далеко не достигает и 1%. Это сопоставление подчеркивает сравнительную медлительность, с которой изменяется картина использования энергии в мировом масштабе. Несмотря на широкое рекламирование атомной энергии и ее бесспорно широкие энергетические перспективы, в наше время в Азии и Африке еще живут миллионы людей, которые не знают

иного способа приготовления пищи, кроме как на огне кизяка.

Энергетические ресурсы можно разделить на две основные группы: основной энергетический капитал и оборотные энергетические ресурсы. Примером основного энергетического капитала могут служить ископаемые топлива: нефть и уголь, которые являются наследством, доставшимся нам от далекого прошлого. Они представляют собой солнечную энергию, запасенную живыми организмами в форме химической энергии миллионы лет назад. Возобновления подобных энергетических ресурсов уже не происходит, во всяком случае в таком масштабе и с такой скоростью, чтобы представить интерес для человечества до того, как оно вымрет. Следовательно, раньше или позже, но все ископаемое топливо в мире будет израсходовано. «Оборотные» энергетические ресурсы — это ресурсы, которые непрерывно пополняются и обновляются. Сюда относятся ветер и реки, природный пар, отходы растительного и животного происхождения. В конечном счете, разумеется, эти «оборотные» ресурсы берут свое начало от Солнца не в меньшей степени, нежели основной энергетический капитал, запасенный в ископаемом топливе. Солнечная энергия создает в атмосфере Земли местные температурные градиенты, вызывающие конвективное турбулентное перемещение воздушных масс, которое мы воспринимаем как ветер; солнечное тепло испаряет воду, которая затем выпадает в виде дождя, питая реки — источники гидроэнергии. Солнечная энергия поддерживает жизнь растений (а, следовательно, и жизнь животных, которая в решающей степени зависит от растительной жизни).

Такое ядерное горючее, как уран и торий, обычно относят к основному энергетическому капиталу, потому что со временем и оно будет израсходовано. Однако в некоторых усовершенствованных реакторах, называемых размножителями, уран[1] частично превращается в плутоний, который сам является ядерным горючим. Но значит ли это, что такое топливо,

[1] Точнее говоря, основной (99,3%) изотоп природного урана U^{238}, не способный к цепной реакции деления. — *Прим. ред.*

образовавшееся как бы в виде своеобразной премии, можно отнести к оборотным ресурсам? Нет, так считать было бы неправомерно, так как его запасы можно пополнять, только пока мы сжигаем уран; израсходование урана будет означать, что мы не сможем производить дальше и плутоний.

Возвращаясь снова к фиг. 5, мы можем отметить, что по меньшей мере 85% потребности в энергии покрывается сейчас за счет основного энергетического капитала. Сколько времени еще нам удастся жить за счет этого капитала? При современных темпах потребления существующих запасов ископаемого топлива (включая и запасы ядерного горючего) хватило бы еще на тысячу лет. Но темпы потребления быстро возрастают, причем эти темпы должны нарастать и впредь, если мы хотим достичь «золотого века». Для того чтобы поддерживать очень высокий жизненный уровень мирового населения, численность которого, скажем, втрое превысит существующую, понадобится в 30 раз повысить потребление энергии. При столь высоких темпах расходования разведанных запасов угля, нефти и природного газа хватило бы не больше чем на 35 лет [1].

Из-за крайне неравномерного распределения запасов ископаемого топлива по земному шару их нехватка ощутится в одних странах раньше, а в других позднее. Но едва ли можно усомниться в том, что недостаток топлива приобретет всемирные масштабы на протяжении жизни одного поколения. Такие формы энергии, как природный пар, ветер, приливы, могут найти в лучшем случае ограниченное применение. Следовательно, если и заглядывать далеко в будущее, то придется все больше и больше полагаться на использование непосредственной энергии Солнца и ядра.

Солнце излучает огромное количество энергии. Только одна двухмиллиардная часть лучистой энергии Солнца достигает земной атмосферы, причем

[1] Фактически с учетом непрерывного возрастания потребления общегеологических запасов должно хватить приблизительно на 150 лет, причем по данной оценке к концу этого срока темпы потребления энергии в 100 с лишним раз превысят теперешние (подробнее об этом см. в предисловии). — *Прим. ред.*

очень большая ее доля отражается обратно в космос. Все же солнечная энергия, падающая ежегодно на поверхность Земли, в несколько тысяч раз превышает количество энергии, потребляемой всем человечеством за год. Если бы нам удалось использовать только частичку столь щедрого дара, то с нашими энергетическими затруднениями было бы покончено. Главное здесь — научиться накапливать и концентрировать излучение в крупной установке, выполняющей роль источника энергии. Эту задачу пытались решать, используя громадные фокусирующие зеркала. Некоторые тропические страны уже в какой-то мере используют таким образом солнечную энергию для бытовых целей. В странах с умеренным климатом, где облачность ограничивает поток излучения, перспективы использования солнечной энергии более сомнительны [1].

А как обстоит дело с ядерной энергией? Известно, что запасы урана и тория, которые находятся в нашем распоряжении, ограничены. Тем не менее общий запас энергии, заключенный в подобном горючем, даже если его использовать на современных, довольно-таки малоэкономичных атомных электростанциях, намного превосходит запасы энергии, содержащейся во всех запасах угля, нефти и природного газа. Кроме того, плутоний, который можно получать в усовершенствованных реакторах-размножителях, еще больше умножит наши запасы ядерного топлива [2].

Уран и торий выделяют энергию в процессе ядерного деления. Как уже отмечалось, другой тип высвобождения ядерной энергии — реакция слияния двух водородных ядер [3], сопровождающаяся образо-

[1] Использование концентрации солнечной энергии зеркалами для сколь-нибудь крупных энергетических установок экономически нецелесообразно даже в самых солнечных районах. — *Прим. ред.*

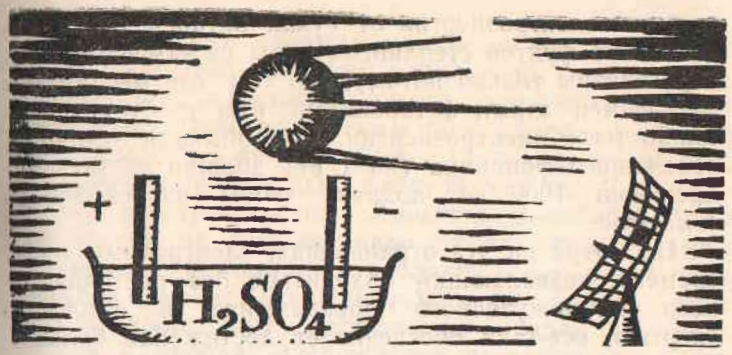
[2] По другим оценкам, доля доступного урана и тория в мировых запасах топлива даже с учетом использования их в реакторах-размножителях значительно меньше, чем доля угля см., например, Н. В. Мельников, *Известия АН СССР, Энергетика и транспорт*, № 3 (1964). — *Прим. ред.*

[3] Речь идет, видимо, о тяжелом изотопе водорода — дейтерии, содержание которого в природном водороде составляет приблизительно 0,02%. — *Прим. ред.*

ванием гелия, — еще более мощный потенциальный источник энергии. Возможно, что эффективное использование ядерного синтеза — дело далекого будущего, но это — реальная возможность, к осуществлению которой энергично стремятся ученые и инженеры во всем мире. Если технические проблемы, связанные с осуществлением управляемого ядерного синтеза, удастся решить, то водород, содержащийся в мировом океане, явится практически неиссякаемым источником энергии.

Из вышеизложенного краткого обзора энергетических резервов следует, что самые большие реально мыслимые в будущем потребности человека в энергии можно в принципе удовлетворить за счет использования уже известных ресурсов. Основная проблема состоит в том, чтобы суметь использовать эти ресурсы, причем использовать экономично.

Устройства для прямого преобразования, описываемые в последующих главах, сулят в перспективе тройную экономию. Во-первых (это наиболее очевидное обстоятельство), если мы получаем электричество непосредственно из топлива, без котлов, турбин и т. д., мы экономим капитальные затраты на установку. Во-вторых, отсутствие движущихся механических частей в генераторе позволяет снизить эксплуатационные расходы и повысить срок службы установки. В-третьих, прямое получение электроэнергии из-за присущей этому процессу простоты должно было бы позволить достичь более высокой эффективности преобразования первичной энергии в электричество, нежели это удается осуществить современными косвенными способами. Это соображение существеннее всего с точки зрения наиболее эффективного использования наших наличных запасов топлива, пока ядерная и солнечная энергии не будут полностью поставлены на службу человеку.



3. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В электрохимическом элементе энергия химической реакции превращается в электричество *непосредственно,* т. е. без предварительного превращения в тепло. Подобные элементы используются в «сухих» батареях карманных фонариков, переносных радиоприемников и т. д. Основная химическая реакция, происходящая в таких элементах, — соединение атмосферного кислорода с цинком и хлористым аммонием, в результате чего образуются вода и двойной хлорид цинка и аммония.

Сухой элемент — удобный переносный источник энергии. Он удобен в тех случаях, когда потребляется мало электрической энергии, причем не непрерывно, а время от времени. Но ни один инженер даже и не подумает о большой электростанции, работающей от батарей из таких элементов. Во-первых, срок службы элементов очень мал. И действительно, батарейки карманных фонариков обыкновенно «садятся» как раз тогда, когда фонарик нужен больше всего. Столь же серьезен, хотя менее известен, другой недостаток таких батарей. Это — очень большая дороговизна электроэнергии: электроэнергия из обычных распределительных сетей обходится потребителю около 1 пенса за киловатт-час, а кило-

ватт-час электроэнергии от сухих батарей стоил бы несколько фунтов стерлингов[1]! Мы не замечаем этой дороговизны только потому, что там, где мы обычно пользуемся этими батарейками, нам требуется ничтожно мало электроэнергии. Так, обычная лампочка карманного фонарика (на 1 *вт*) должна светить непрерывно 1000 *час* подряд, чтобы израсходовать 1 *квт·час*.

Несмотря на эти ограничения, электрохимический элемент, позволяющий обходиться без расточительного промежуточного превращения в тепловую энергию, все-таки обеспечивает достижение большого присущего этому способу к.п.д. при превращении химической энергии в электрическую[2].

Практическое использование этого высокоэффективного пути получения электричества на протяжении многих лет занимало умы и воображение ученых. Еще в 1802 г. Хэмфри Дэви, изобретатель безопасной шахтерской лампы, выдвинул предложение о том, чтобы химическую энергию, высвобождающуюся при окислении угля, непосредственно преобразовывать в электрохимическом элементе. Но Дэви не удалось создать элемент, действующий на угольном топливе. В 1839 г. Уильям Грове с успехом продемонстрировал устройство, которое он назвал «газовой батареей». В ней энергия реакции окисления водорода преобразовывалась непосредственно в электрический ток. Поэтому и принято считать, что Грове изобрел топливный элемент, представляющий собой электрохимический элемент, в который непрерывно подаются химические вещества, вступающие в реакцию (продукты реакции непрерывно удаляются). Таким путем удалось преодолеть ограниченность срока службы сухого элемента и других видов электрохимических элементов.

Второй недостаток сухого элемента — высокая стоимость электроэнергии — обусловлен, в частности, тем, что в нем в качестве «топлива» используется цинк, т. е. довольно дорогой металл. Для выработки электроэнергии в больших масштабах такое «топливо» не годится; надо думать лишь о таких элементах, которые потребляют более распространенные топлива: уголь, нефть[1] и их наиболее дешевые газообразные производные — окись углерода, метан и пропан. Заслуживает рассмотрения также и водород, но только в том случае, если его удастся использовать в сравнительно неочищенном виде; топливный элемент, потребляющий газ с содержанием 99,5% чистого водорода (по крайней мере, такой топливный элемент демонстрировался), использовать для выработки электроэнергии в больших масштабах невыгодно из-за больших расходов на очистку водорода.

По ряду причин, которые рассмотрены к концу настоящей главы, практически проще изготовить топливный элемент на газообразном топливе, нежели элемент, расходующий жидкое или твердое топливо. Однако газообразное топливо сложно хранить. Практические преимущества, которые сулит непосредственное преобразование угля или нефти в электричество, — большой стимул в деле разработки топливных элементов, в которых использовались бы уголь и нефть.

Таким образом, топливный элемент представляет собой электрохимическое устройство, которое непрерывно преобразует доступное и дешевое топливо в электричество. Такому устройству присуща высокая эффективность электрохимического элемента. В то же время использование непрерывно расходуемого дешевого топлива устраняет такие недостатки, свойственные обычному электрохимическому элементу, как высокая стоимость вырабатываемой электроэнергии и ограниченность срока службы.

---

[1] Фунт стерлингов = 240 пенсов (пенс приблизительно эквивалентен копейке). — *Прим. ред.*

[2] В последующих главах мы рассмотрим прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Хотя этот путь тоже является многообещающим для практики, но на к. п. д. в данном случае накладывается очень существенное ограничение, которое, как вы видели в гл. 2, присуще всем тепловым машинам в силу второго закона термодинамики. Это ограничение не распространяется на электрохимический способ выработки электроэнергии.

[1] Или природный газ, обычно почти целиком состоящий из метана. — *Прим. ред.*

Может показаться странным, что вопрос о промышленном использовании устройства, изобретенного свыше ста лет назад, стал серьезно рассматриваться только сейчас. Частично такая затяжка объясняется, несомненно, недостаточностью разработки теоретических основ данного процесса. Хотя эксперимент Грове успешно продемонстрировал принцип действия топливного элемента, полностью осознать его теоретические возможности нельзя было без крупных открытий в термодинамике и электрохимии, сделанных во второй половине XIX века. К началу XX столетия наука уже накопила достаточно знаний об основных процессах, идущих в топливных элементах, чтобы реализовать в промышленных масштабах заложенные в них возможности. Эти возможности видели многие ученые: за время с 1900 по 1930 г. в научной литературе было опубликовано несколько сотен статей, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям топливных элементов. Однако этот же период ознаменовался замечательными достижениями в деле конструирования двигателей внутреннего сгорания. Именно поэтому интерес промышленных предприятий к исследованиям топливных элементов почти полностью угас. Интересно поразмыслить над тем, как выглядела бы сегодня энергетика[1], если бы двигатель внутреннего сгорания развивался не столь стремительно, как это было в действительности.

Обстоятельства сложились так, что до второй мировой войны потенциальные возможности, заложенные в топливных элементах, осознавались только учеными-специалистами. И только с началом войны заинтересованность правительственных и промышленных кругов в топливных элементах создала условия для энергичных научных исследований. Главной ближайшей целью было (и, вероятно, остается поныне) создание небольших источников тока для специальных (иначе говоря, военных) нужд, когда бесшумность работы и безотказность куда важнее,

[1] Преимущественно транспортная энергетика, так как в крупной стационарной энергетике двигатели внутреннего сгорания не нашли широкого применения. — *Прим. ред.*

нежели расходы по выработке электроэнергии. Однако большая часть этих исследований сыграла определенную роль и в решении другой несравненно более важной задачи — создания экономически конкурентоспособных элементов, пригодных к использованию на больших электростанциях, электровозах и т. п.

Чтобы легче было подробно разобраться в том, как работают различные топливные элементы, полезно сначала рассмотреть один важный электрохимический процесс, тесно связанный с интересующим нас вопросом. Мы имеем в виду электролиз.

Электролиз. Совершенно чистая вода плохо проводит электрический ток. Она почти абсолютный изолятор. Однако ее можно превратить в достаточно хороший проводник, растворив в ней очень небольшое количество некоторых веществ, преимущественно неорганических кислот и солей. Более того, для этого совсем не обязательно, чтобы само растворяемое вещество было хорошим проводником. Так, хлористый калий — вещество, химически родственное обыкновенной поваренной соли, — сам по себе очень плохо проводит электрический ток[1], но растворение 1 *г* хлористого калия в 15 *л* чистой воды повышает ее электропроводность в 5000 раз.

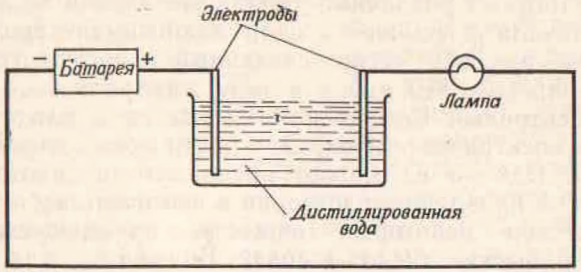
Вода из водопровода всегда содержит в растворенном состоянии ничтожно малые количества примесей солей, благодаря чему она хорошо проводит электрический ток. Вот почему иногда «дергает» человека, прикоснувшегося мокрой рукой к выключателю, особенно если тот имеет металлический корпус устаревшей конструкции.

Опыт, иллюстрируемый на фиг. 6, очень наглядно демонстрирует действие растворения небольшого количества вещества на электропроводность воды. В сосуд с дистиллированной водой опущены электроды, подсоединенные к цепи, в которую последовательно включена лампа. Лампа не горит, потому что дистиллированная вода не пропускает электрический ток, идущий от батареи. Но достаточно бросить в

[1] Если не рассматривать его проводимость в расплавленном состоянии.

воду маленькую щепотку хлористого калия, как лампа немедленно вспыхнет. Отсюда можно сделать вывод, что по цепи пошел ток. Это произошло только потому, что растворение хлористого калия в дистиллированной воде сделало ее проводником электрического тока.

Опыт удастся и в том случае, если вместо хлористого калия в воду бросить несколько кристалликов



Ф и г. 6. Опыт, демонстрирующий электролитическую проводимость.

Через чистую дистиллированную воду электрический ток не проходит. Достаточно, однако, растворить в ней щепотку соли, чтобы через нее пошел ток. В результате этого лампа загорится.

сульфата меди, добавить к ней две-три капли концентрированной серной кислоты или растворить небольшое количество какой-либо другой неорганической кислоты или соли. Подобные водные растворы, проводящие электрический ток, называются электролитами. Этим же названием пользуются и применительно к расплавам солей, проводящим электрический ток.

Если пропускать ток через раствор на протяжении некоторого времени, то можно наблюдать различные интересные явления, зависящие от природы электролита и электродов.

Когда электроды медные, а электролитом служит раствор сульфата меди, то через некоторое время на катоде (так называют отрицательный электрод) появится свежий слой меди. В то же время анод (положительный электрод) постепенно растворяется. В растворе же медного купороса никаких видимых изменений не произойдет. Таким образом, в конечном счете действие проходящего через раствор электрического тока сводится к переносу меди с анода на катод.

Если же электроды изготовлены из платины, то медь по-прежнему будет осаждаться на катоде, но на аноде появятся пузырьки газа (кислорода). Кроме того, в данном случае концентрация медного купороса в растворе постепенно уменьшается, благодаря чему синий раствор постепенно обесцвечивается. Таким образом, в этом случае медь, осаждающаяся на катоде, извлекается проходящим током из раствора медного купороса.

В другом варианте того же опыта электролитом служит раствор азотнокислого серебра, анод изготовляют из серебра, а катод может быть из серебра или из какого-нибудь другого металла. В этом случае анод постепенно растворяется, а на катоде осаждается свежий слой серебра. Концентрация же раствора азотнокислого серебра остается неизменной. Здесь мы снова встречаемся с переносом металла от анода к катоду под действием электрического тока.

Всякий процесс, в котором такой металл, как серебро или медь, осаждается на катоде, можно использовать для нанесения гальванопокрытия. Для этого достаточно заменить катод предметом, на который надо нанести покрытие.

Явление прохождения электрического тока через электролит вместе с сопутствующими ему электрохимическими процессами на электродах, о которых говорилось выше, называется вообще *электролизом*.

Мы уже упоминали о процессе электролиза, который идет в электролите, образовавшемся благодаря растворению небольшого количества серной кислоты в дистиллированной воде. В этом случае (если электроды сделаны из платины) газы образуются у обоих электродов. По мере течения процесса уровень жидкости в сосуде понижается, а концентрация серной кислоты в растворе непрерывно возрастает. В конце концов вся вода исчезнет и на дне сосуда останется немного чистой серной кислоты.

Куда же делась вода? Единственно возможное объяснение состоит в следующем: в процессе электро-

лиза вода разложилась на составные элементы (водород и кислород), которые выделились в газообразной форме на электродах. Химические исследования подтверждают, что выделяющиеся у электродов газы действительно представляют собой водород (у катода) и кислород (у анода).

Ионы — электрические странники. Казавшиеся загадочными многообразные явления электролиза были с изумительной простотой объяснены в 1887 г. шведским химиком Аррениусом, выдвинувшим теорию электролитической диссоциации. Впоследствии Аррениус был удостоен за эту работу нобелевской премии. В теории Аррениуса рассматриваются *ионы* — атомы или группы атомов, несущие избыточный положительный или отрицательный заряд (в отличие от обычных атомов, которые содержат положительные и отрицательные заряды в равных количествах и поэтому электрически нейтральны).

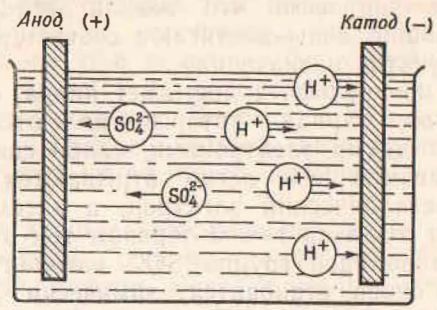
Ионы вещества, которое не растворено в воде, прочно связаны воедино в молекулах, нейтральных в электрическом отношении, поскольку противоположные по знаку заряды ионов взаимно уравновешивают друг друга. Но при растворении вещества ионы разъединяются (диссоциируют). Присутствие этих свободных, странствующих носителей заряда и придает электролиту способность проводить электрический ток. (Само название «ион» происходит от греческого слова, означающего в переводе «странствующий»).

Теперь давайте рассмотрим электролиз раствора серной кислоты с учетом диссоциации ионов. Воспользуемся удобными сокращенными обозначениями, которые приняты химиками, и запишем молекулу серной кислоты в виде H_2SO_4. Эта запись означает, что два атома водорода (H_2), один атом серы (S) и четыре атома кислорода (O_4) образуют одну молекулу серной кислоты. Подобным же образом молекулу воды можно записать в виде формулы H_2O, которая показывает, что молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Такое обозначение принято не только ради экономии слов: формула сразу же показывает, из каких атомов состоит молекула данного вещества.

Когда молекула H_2SO_4 растворяется, она диссоциирует на два иона водорода, каждый из которых несет положительный заряд (H^+), и один ион сульфата, несущий двойной отрицательный заряд (SO_4^{2-}). Эту диссоциацию можно изобразить и так:

$$H_2SO_4 \longrightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}.$$

В электрохимическом элементе ионы водорода перемещаются к катоду, а ионы сульфата — к аноду (фиг. 7).



Фиг. 7. Электрохимический элемент с разбавленной серной кислотой.
Ионы водорода перемещаются к катоду, а ионы сульфата — к аноду.

Разумеется, даже в одной капле разбавленной серной кислоты беспорядочно «толкутся» бесчисленные миллионы ионов. Поэтому происходит частичная рекомбинация, т. е. воссоединение ионов в молекулы. Этот процесс можно записать так:

$$2H^+ + SO_4^{2-} \longrightarrow H_2SO_4.$$

Воссоединившиеся таким образом молекулы снова будут диссоциировать и т. д. В результате ионы непрерывно меняются партнерами в повторяющемся процессе диссоциации и рекомбинации, так что во всякий момент времени некоторые из них бывают свободными, а некоторые — связанными в молекулы. Индивидуальный ион, по-видимому, совершает многоступенчатое путешествие к соответствующему электроду, участвуя по пути во множестве актов диссоциации и рекомбинации. Но поскольку число

ионов огромно, в конечном итоге эффект перемещения ионов оказывается значительным. Количество зарядов, переносимых таким способом за каждую секунду в типичной электролитической батарее, может создавать ток силой в несколько ампер.

Таким образом, диссоциация на ионы объясняет, как электролиты проводят электрический ток, но мы еще не объяснили другого явления, сопутствующего прохождению тока через электролит. Продолжая разбор примера с серной кислотой, давайте зададимся вопросом, что же происходит, когда странствующие ионы достигают соответствующих конечных пунктов назначения.

Когда ион сульфата достигает анода, его два отрицательных заряда, которые являются не чем иным, как двумя электронами, слабо связанными с группой атомов SO_4, легко отрываются и переходят на металлический электрод, а затем во внешнюю цепь, создавая таким образом ток в этой цепи. Лишенная зарядов группа SO_4, которая остается в растворе, снова становится химически активной и немедленно вступает в реакцию с ближайшей молекулой воды, образуя серную кислоту и кислород по реакции

$$SO_4 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + O.$$

Кислород выделяется в газообразной форме на аноде, тогда как серная кислота остается в растворе, пополняя запас ионов в результате уже знакомой нам реакции диссоциации

$$H_2SO_4 \longrightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}.$$

Остается рассмотреть, что же происходит на катоде. Здесь всякий поступивший ион водорода немедленно приобретает один из свободных электронов, которые в изобилии присутствуют в катоде, как и в любом металлическом проводнике (и запас которых непрерывно пополняется за счет тока во внешней цепи). Отрицательно заряженный электрон уничтожает положительный заряд водородного иона, который становится обычным нейтральным атомом водорода. Газообразный водород, полученный таким образом, выделяется на катоде.

Заметим, что накопления зарядов нигде в цепи не происходит. Всякая пара электронов, отданных ионом сульфата, проходит по внешней цепи и в конце концов захватывается ионами водорода на катоде.

Явления, наблюдаемые при электролизе растворов медного купороса, азотнокислого серебра и т. д., можно объяснить аналогичным образом, рассматривая диссоциацию этих солей на ионы и соответствующие химические реакции, идущие у электродов.

Водородно-кислородные топливные элементы. Конечным результатом электролиза раствора серной кислоты, как мы уже видели, является разложение растворителя (воды) на составляющие ее элементы — водород и кислород. Энергия, необходимая для расщепления молекулы воды в электролитическом элементе, берется от внешнего источника тока, т. е. от батареи.

Обратный процесс — образование воды из водорода и кислорода — сопровождается высвобождением химической энергии. Если поджечь смесь газов, состоящую из водорода и кислорода, раздастся взрыв, являющийся следствием весьма энергичного течения реакции горения. В данном случае химическая энергия выделяется главным образом в виде теплоты и звука. Но если сделать так, чтобы этот же процесс окисления протекал в соответствующем электрохимическом элементе, то химическая энергия станет превращаться непосредственно в электрическую.

В этом и состоит принцип действия водородно-кислородного топливного элемента, в котором происходит окисление водорода.

Первым действующим образцом водородно-кислородного элемента была газовая батарея Грове. По наружному виду она не очень отличалась от описанного выше электролитического элемента. Электролитом в ней служил раствор серной кислоты, а электроды были сделаны из платины. Подводя водород и кислород к электродам, Грове получил электрический ток от этого элемента, показав тем самым, что процесс электролиза протекает в обратном направлении: энергия, высвобождаемая в результате соединения кислорода

и водорода с образованием воды, выделяется в виде электрического тока.

Действие такого элемента можно проследить подробнее по несколько видоизмененной схеме, показанной на фиг. 8. Здесь кислород и водород нагнетаются под давлением через пористые платиновые электроды *А* и *Б;* электролитом служит все тот же



Фиг. 8. Простейший водородно-кислородный элемент (видоизмененный вариант «газовой батареи» Грове).

раствор серной кислоты. Через электрод *А* с одной стороны просачивается кислород, а с другой проникает электролит. Проходя сквозь электрод, нейтральные атомы кислорода захватывают электроны с поверхности пор в металле, превращаются в отрицательно заряженные ионы и переходят в раствор электролита, который также проникает в поры. Попав в электролит, ионы кислорода движутся к электроду *Б,* где они отдают свои электроны и, снова превращаясь в нейтральные атомы кислорода, получают возможность соединяться с молекулами водорода, образуя воду ($H_2 + O \longrightarrow H_2O$). Эта реакция, происходящая в порах электрода *Б,* идет с выделением энергии, которая расходуется на создание потока электронов во внешней цепи, иначе говоря, на создание электрического тока, который «зажигает» электрическую лампочку (см. фиг. 8).

В принципе этот ток можно использовать для вращения вала двигателя и т. д., однако мощность водородно-кислородного элемента, сконструированного Грове, была слишком мала, чтобы представлять практический интерес. Кроме того, этот элемент

может работать только на очень чистых (и, следовательно, дорогих) газах.

Как указывал сам Грове, рабочие реакции могут идти только «на линии уровня воды, где соприкасаются жидкость, газ и платина; поэтому главная трудность состоит в том, чтобы создать сколько-нибудь значительную активную поверхность». Увеличение площади истинной рабочей поверхности путем применения пористых электродов помогло преодолеть эту трудность. Величина пор играет решающую роль: они должны обеспечивать медленную диффузию газа в электрод без прорыва пузырьков газа в основной сосуд с электролитом. Атомы кислорода приносят с собой в раствор электроны, перемещение которых создает электрический ток элемента только в том случае, когда они вступают в соприкосновение с раствором *на поверхности электрода.*

Электрическая мощность элемента непосредственно определяется скоростями реакций, идущих на электродах. Пористые электроды позволяют увеличить скорость реакций за счет создания большой рабочей поверхности. Есть и другие возможности — повышение температуры электродов и давления газа, поскольку реакции, как это хорошо известно, обычно идут быстрее при высоких температурах и большом давлении.

Все эти три способа повышения скоростей реакций использованы в топливном элементе, который разрабатывался на протяжении последней четверти столетия Ф. Бэконом (Кембридж, Англия). Это — водородно-кислородный топливный элемент, в котором роль электролита выполняет концентрированный раствор едкого кали. Электроды изготовляют из пористого никеля, средний диаметр пор в котором составляет приблизительно 25 *мк,* причем в тонком поверхностном слое никеля, который омывается электролитом, поры еще меньше, что очень важно для предотвращения прорыва пузырьков газа в жидкость. Рабочие условия: температура 200°С и давление около 27 *ат.* Электролит просачивается в поры металла, а когда к другой стенке электрода подается под давлением газ, он вытесняет жидкость из более крупных пор, но оставляет ее в более мел-

ких. За счет пористости каждый из электродов обеспечивает большую поверхность соприкосновения смоченного металла с газом (около 42 $м^2$).

Тепло, которое необходимо для того, чтобы поддерживать рабочую температуру порядка 200°С, выделяется в самом топливном элементе, когда через него идет электрический ток. Это обстоятельство отнюдь не противоречит утверждению о том, что топливный элемент превращает химическую энергию в электрическую *непосредственно;* оно скорее отражает превращение в тепло части электрической энергии. Поддержание рабочей температуры за счет внутреннего тепла без дополнительных внешних тепловых источников — это триумф инженерной мысли.

Существенным условием нормальной работы элемента является тщательный контроль за давлением кислорода и водорода. Давление кислорода поддерживается постоянным, а давление водорода регулируют по отношению к давлению кислорода с помощью дифференциального манометра. Вода, образующаяся в результате реакции, идущей у того электрода, через который поступает водород, может закупорить поры, вывести их из строя, если ее не удалять непрерывно водородом, циркулирующим с надлежащей скоростью.

Во время испытаний в топливном элементе Бэкона химическая энергия преобразовывалась в электрическую с к. п. д., достигавшим 80%. Батарея из 40 таких элементов позволяла развивать мощность 6 *квт*. Этого достаточно для того, чтобы приводить в движение небольшой автомобиль. По своим размерам батарея была приблизительно такой же, как и автомобильный двигатель (76×38×30 *см*). Однако общий вес установки вместе с баллонами газа и вспомогательным оборудованием, необходимым для управления работой батареи, составлял около 300 *кг*, а для ее размещения потребовался бы грузовик. Таким образом, общее отношение мощности к весу у данной установки оказалось слишком низким, чтобы ее можно было использовать на транспорте.

На стационарные генераторы, предназначенные для электрических станций, не налагается жестких

требований в отношении веса и компактности. Но поскольку они должны вырабатывать много энергии, в них должно использоваться доступное дешевое топливо. Батарея, о которой мы только что говорили, эффективно работала только на водороде, степень чистоты которого равнялась 99,5%. А столь чистый водород и стоит дорого, и производство его ограничено.

Топливный элемент на углеродистых газах. На создание элементов, которые работали бы на более дешевом топливе, тратится много усилий, особенно в Соединенных Штатах. В октябре 1959 г. в Америке демонстрировался трактор, который приводился в движение от батареи топливных элементов, работавших на смеси пропана с другими газами. Впервые транспортная машина приводилась в движение от топливных элементов, установленных на ней самой. Это был значительный шаг вперед, хотя создатели элемента поспешили сообщить, что работа над трактором еще не завершена.

Батарея состояла из 1008 соединенных последовательно элементов и развивала мощность 15 *квт*. Подробности устройства элементов не были опубликованы, но, поскольку они работали при сравнительно низкой температуре, надо полагать, что высокие скорости реакций достигались каким-то иным путем. Этого можно было добиться, например, активированием электродов посредством подходящего катализатора [1].

Элементы, которые приводили в движение трактор, являлись разновидностью элементов, работающих на углеродистых газах; топливом для них служил пропан (газообразный углеводород). Однако эти элементы, как и элемент Бэкона, способны эффективно работать только тогда, когда в них подается сравнительно чистый кислород.

Заманчиво попытаться использовать в качестве окислителя атмосферный воздух: это позволило бы избежать расходов на выделение кислорода. Воз-

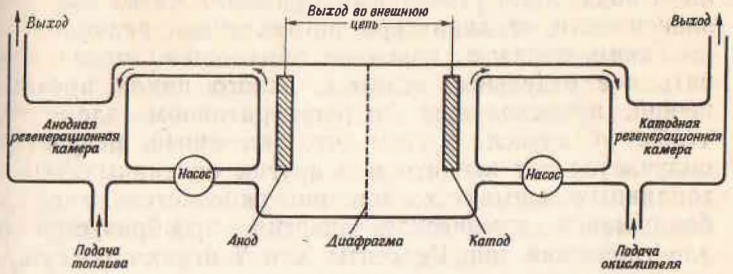
[1] Влияние катализатора на химическую реакцию можно сравнить с действием смазки в машине: она ускоряет движение, а сама не расходуется.

дух представляет собой смесь газов, в которой, если говорить приближенно, одна объемная часть кислорода смешана с четырьмя частями других газов, преимущественно азота. Хотя азот и не принимает непосредственного участия в реакциях, идущих в элементе, он значительно разбавляет кислород, снижая тем самым скорость реакций. Это влияние азота в некоторых случаях можно преодолеть путем повышения рабочей температуры.

Высокотемпературный топливный элемент, в котором используются дешевые газообразные топлива (например, природный газ), а окислителем служит воздух, и является, по-видимому, наиболее перспективным типом топливного элемента для выработки электроэнергии в больших масштабах. Электролитом в нем может служить расплав какой-нибудь дешевой соли. Такой элемент, работающий при температурах 500—900° С и атмосферном давлении, уже давал электроэнергию непрерывно на протяжении 6 месяцев. Главной причиной ограничения срока службы этого элемента была коррозия электродов; наблюдались и потери электролита от испарения, но их легко можно было бы восполнять без приостановки работы элемента. Шестимесячный срок службы — ободряющее достижение. Однако для промышленных нужд и этого недостаточно: дважды в год заменять генераторы на электростанции неэкономично, как бы дешево ни стоило используемое в них топливо.

Регенеративные элементы. Иной и, надо сказать, остроумный подход к решению задачи по повышению скорости реакции использован в регенеративном типе топливного элемента. Здесь топливо (например, водород или углеродсодержащий газ) и окислитель (например, воздух или кислород) поступают не в элемент, а в наружные регенерационные камеры (фиг. 9). А к электродам вместо них поступают другие более активные химические вещества. Здесь они участвуют в реакциях, которые поддерживают работу элемента. Продукты этих реакций поступают в регенерационные камеры, где начальные энергичные реагенты восстанавливаются в процессе взаимодействия либо с топливом, либо с окислителем.

Химические реакции, протекающие в типичном регенеративном элементе, по-видимому, очень сложны и изучены полностью не для всех его разновидностей. Однако упрощенная картина цикла реакций, происходящих на аноде, представляется в следующем виде. Энергичный реагент, скажем X[1], окисляется в ходе реакции на аноде и в окислившемся



Ф и г. 9. Регенеративный топливный элемент.

Продукты реакции, образующиеся у электродов, перекачиваются в регенерационные камеры, где происходит восстановление исходных реагентов; далее они снова поступают к электродам.

виде (XO) перекачивается в анодную камеру регенерации, где смешивается с поступающим в нее топливом. Если топливом является водород, то реакцию, происходящую в камере, можно записать так:

$$H_2 + XO \longrightarrow X + H_2O.$$

Следовательно, в данном случае происходит восстановление начального реагента с образованием воды как побочного продукта. Топливом может служить и какой-нибудь углеродсодержащий газ. Реагент X будет восстанавливаться и в этом случае, а побочным продуктом будет углекислый газ (CO_2). Схема

[1] Строго говоря, символ X относится к атому соответствующего вещества точно так же, как мы употребляли символ H, чтобы обозначить атом водорода, символ O, чтобы обозначить атом кислорода, и т. д. Но мы будем пользоваться общепринятым и удобным правилом, согласно которому символы могут относиться к единичным атомам (или молекулам) и к некоторому количеству вещества. Так, например, H_2O может означать либо воду, либо одну молекулу воды в зависимости от контекста.

реакции при этом выглядит следующим образом:

$$C+2XO \rightarrow 2X+CO_2.$$

Реагент, участвующий в идущих на катоде реакциях, скажем Y, восстанавливается в катодном отделении в результате взаимодействия с окислителем. Побочными продуктами в данном случае могут быть либо вода, либо углекислый газ, либо же их смесь в зависимости от характера протекающей реакции.

Таким образом, вовсе не обязательно прослеживать все отдельные этапы сложного цикла превращений, происходящих в регенеративном элементе, чтобы убедиться в том, что конечный результат получается тот же, что и в других описанных выше топливных элементах: топливо окисляется, а освободившаяся химическая энергия преобразуется в электрический ток. Реагенты X и Y играют по существу роль катализаторов: они ускоряют процесс в целом, но сами при этом не расходуются.

Коль скоро в регенеративном элементе можно для ускорения реакций воспользоваться весьма активными реагентами, чрезмерно высокие рабочие температуры не столь уж необходимы. Английскими и американскими учеными созданы экспериментальные образцы элементов, работающих при температурах ниже точки кипения воды.

Возможны регенеративные элементы и других типов. В рассмотренном нами элементе источником энергии, необходимой для непрерывного восстановления реагентов (X и Y), служит реакция окисления топлива. Возможны и иные источники энергии. Известно, например, предложение, согласно которому регенерацию предлагается осуществлять путем термической диссоциации продуктов реакции в ядерном реакторе. Тогда, если вести речь о вышеприведенном примере, конечный продукт анодной реакции XO перекачивался бы в реактор, где под действием тепла молекулы XO диссоциировали бы на атомы X и O, возвращаемые затем соответственно к аноду и катоду. Однако к. п. д. такой системы нельзя сделать достаточно большим, поскольку первичный источник энергии в данном случае имеет уже не химическую природу, а тепловую (нагрев в реакторе). Поэтому

на него распространяется ограничение, накладываемое вторым законом термодинамики (см. гл. 2).

Ядерный реактор можно (по крайней мере принципиально) использовать и для восстановления энергичных реагентов путем *радиолитической,* а не термической диссоциации. При радиолитической диссоциации энергия ядерных осколков, образующихся в процессе деления, используется непосредственно, без предварительного преобразования в тепло. (Устройство для непосредственного использования энергии образующихся в процессе деления ядерных осколков, называемое ядерным элементом, рассматривается в гл. 7.)

Есть еще одна разновидность регенеративного элемента, в которой для восстановления реагентов в процессе фотохимического разложения используется солнечная энергия. В подобном элементе электрическая энергия вырабатывается топливным элементом за счет соединения хлора с окисью азота. Образующийся в результате этой реакции хлористый нитрозил разлагается затем под действием света на хлор и окись азота, которые либо возвращаются в топливный элемент, либо же хранятся до дальнейшего использования.

Существующее положение и перспективы. Рассмотренные в настоящей главе типы топливных элементов уже были по большей части построены и более или менее успешно работали в лабораторных условиях. Длительность непрерывной работы некоторых из них составляла около недели, тогда как для других она превышала полгода. Топливные элементы — весьма плодотворная область изобретательства: в ней постоянно выдвигаются новые и обновляются старые идеи[1]. Но одно дело — создать остроумное устройство, действующее ограниченное время в лабораторных условиях, и совсем другое — построить генератор, приемлемый и с экономической, и с промышленной точек зрения.

[1] Недавно был предложен биохимический топливный элемент, в котором к аноду подаются бактерии и питательная среда, а к катоду — кислород. Бактерии разлагают (окисляют) питательные вещества, а высвобождаемая энергия преобразуется непосредственно в электричество, а не в тепло.

В специальных случаях, когда расходы не играют большой роли (в наши дни это обычно нужды военной и космической техники), водородно-кислородный элемент уже нашел применение, несмотря на дороговизну потребляемого им топлива. Предположим, например, что нам нужен генератор мощностью 1 *квт*, который мог бы работать 100 *час* (не обязательно непрерывно) без надзора и был бы достаточно легким. Пусть стоимость вырабатываемой энергии не играет большой роли. Батарея сухих элементов, удовлетворяющих этим требованиям, весила бы около 730 *кг*, тогда как водородно-кислородный топливный элемент вместе с необходимым запасом топлива весит всего около 120 *кг*. А при большей продолжительности работы генератора преимущества водородно-кислородного топливного элемента будут еще более разительными.

Если иметь в виду выработку электроэнергии в крупных промышленных масштабах, то мы должны думать уже не о киловаттах, а о сотнях и тысячах мегаватт. (Типичный большой промышленный город с населением в миллион человек потребляет энергии свыше 10^6 *квт*.) Здесь разработка всех видов топливных элементов упирается в решение главной проблемы: повышение скорости химических реакций до такого уровня, при котором можно было бы снимать достаточно большую удельную мощность. Одно из весьма существенных требований, как мы уже видели, состоит в том, чтобы максимально увеличить площадь общей поверхности раздела между топливом, электролитом и электродами, ибо практически только здесь могут развиваться рабочие реакции. В случае газообразного топлива это условие можно выполнить, взяв пористые электроды, через которые будет диффундировать газ. Для твердых и жидких топлив удовлетворительного решения пока не найдено. В частности, пока еще не удалось осуществить непосредственное использование угля в топливных элементах. Не исключено, что в конце концов удастся использовать уголь в распыленном виде, но сейчас никто еще не представляет отчетливо, как это практически сделать. Многие ученые считают, что наиболее перспективный путь к достижению результатов, которые могли бы заинтересовать промышленные предприятия, это сосредоточение усилий на разработке дешевых методов газификации и использования углеродсодержащих газов в качестве топлива.

Для повышения скоростей реакций ныне используются с переменным успехом и другие методы. Хотя об основных таких способах мы уже упоминали, их полезно перечислить еще раз:

1) повышение температуры и давления, при которых происходят реакции;

2) активирование поверхности электродов;

3) подвод более энергичных промежуточных реагентов к электродам и восстановление этих реагентов за пределами элемента.

Требования повышения температуры, давления и т. п., направленные на ускорение реакций, означают в то же время, что серьезной трудностью на пути к использованию топливных элементов для выработки электроэнергии в промышленных масштабах может оказаться коррозия электродов и сосудов для электролита. Чтобы решить эту проблему, по-видимому, понадобится создать специальные материалы, в том числе токопроводящую керамику.

Одиночный топливный элемент вырабатывает постоянный ток низкого напряжения (как правило, 1—2 *в*). Соединяя последовательно множество элементов, можно создать напряжение в несколько сотен вольт; постоянный ток можно преобразовывать в переменный с помощью соответствующих электронных приборов. Вообще говоря, переменный ток удобнее постоянного в использовании. В Великобритании на бытовые нужды потребляется переменный электрический ток напряжением 200—250 *в*. Для некоторых целей необходим постоянный ток, а в других случаях потребителя одинаково устраивает и переменный и постоянный ток. Электрохимическая промышленность, например,— крупный потребитель постоянного тока низкого напряжения. Создание генераторов прямого преобразования для использования в других областях сопряжено с решением задачи превращения постоянного тока низкого напряжения в переменный ток высокого напряжения. К этому вопросу мы еще вернемся в гл. 8.

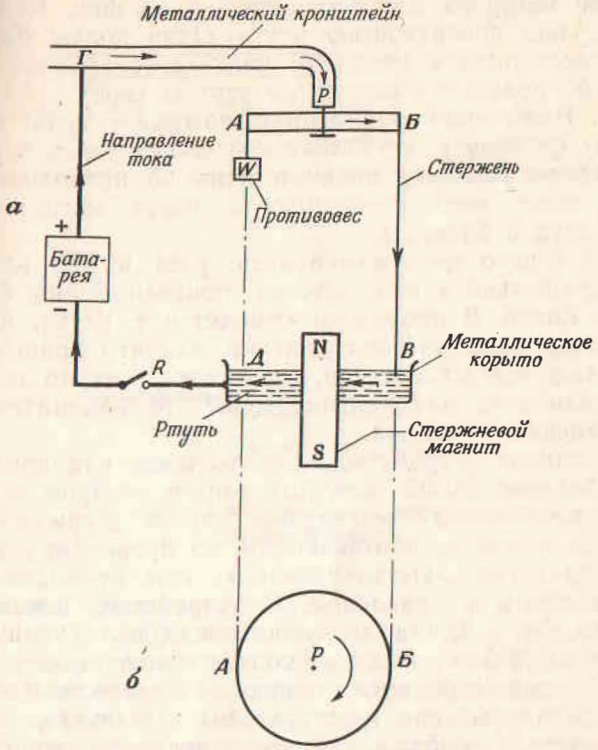


4. МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Законы Фарадея. В лаборатории Лондонского королевского института вместе с Хэмфри Дэви, который первым понял, что топливный элемент может стать источником электроэнергии, работал Майкл Фарадей. Этот паренек был сыном кузнеца, проучившимся всего несколько лет в начальной школе. С 12 лет он был отдан в подмастерья переплетчику, но это ремесло не привлекло Майкла. Пылкое воображение юноши пленяли победы, одержанные наукой в начале XIX века. Он мечтал принять участие, пусть самое скромное, в научной работе. Придя в Королевский институт, он начал с мытья лабораторной посуды, но уже вскоре получил возможность проявить свои способности блестящего экспериментатора и в конце концов в 1827 г., за два года до смерти Хэмфри Дэви, стал его преемником. Фарадей был превосходным лектором, положившим начало ныне всемирно известным рождественским чтениям для молодежи.

Трудно даже перечислить все открытия, сделанные Фарадеем, так как они относятся к самым разнообразным областям физики и химии. Работая под руководством Дэви, он, естественно, вскоре заинтересовался электрохимией, так что часть его важ-

нейших работ относится именно к этой области. Однако наибольшее значение имели его работы по электромагнитной индукции (взаимодействие между электрическим током и магнитным полем), которые лежат в основе современной электротехники.



Фиг. 10. Простейший электродвигатель, демонстрирующий первый закон Фарадея (*а*), и вид на диск *АБ* сверху (*б*).

Явление электромагнитной индукции, которую изучал Фарадей, можно продемонстрировать с помощью изящного опыта, схема которого изображена на фиг. 10. Металлический диск *АБ* свободно вращается на оси, закрепленной в металлической опоре в точке *Р*, как это показано на схеме. К краю диска припаян стержень *БВ* из жесткой проволоки, нижним концом погруженный в ртуть, которая налита

в металлический сосуд. Этот стержень уравновешивается небольшим грузом *W*, прикрепленным к диску с противоположной стороны. Таким образом, весь узел *WАБВ* уравновешен относительно *Р*. Через сосуд с ртутью проходит стержневой магнит, один из полюсов которого, как это показано на фиг. 10, выступает над поверхностью ртути. Один полюс батареи подсоединен к металлической опоре в точке *Д*, а другой полюс — к сосуду со ртутью через рубильник *R*. Включение рубильника замыкает цепь: ток идет от батареи к металлической опоре, затем через *Р* к металлическому диску и вниз по проволоке в ртуть, после чего возвращается через металлический сосуд в батарею.

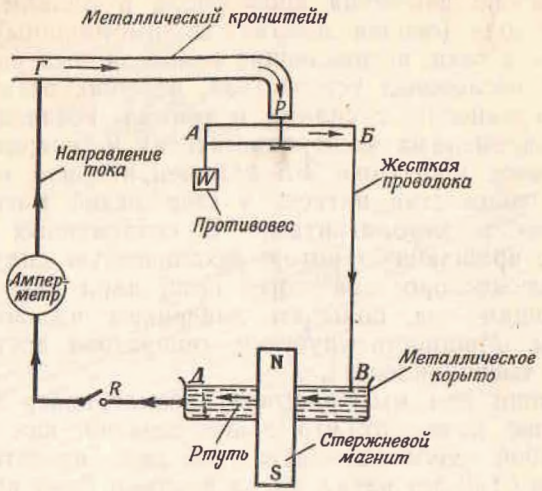
Как только цепь замкнулась, узел *WАБВ* начинает вращаться в направлении, показанном на фиг. 10, *б*. Конец *В* проволоки движется в ртути, поддерживая электрический контакт, так что вращение продолжается до тех пор, пока ток течет по цепи. Если изменить направление тока[1], то изменится и направление вращения.

Описанное устройство — не что иное, как примитивный реверсивный электромотор, в котором взаимодействие между магнитным полем стержневого магнита и током, протекающим по проводнику *БВ*, порождает силу, выталкивающую этот проводник в определенном направлении. В устройстве, показанном на фиг. 10, эта выталкивающая сила вращает весь узел *WАБВ*, который соответствует, таким образом, вращающемуся якорю электродвигателя. (В современных электродвигателях и генераторах из практических соображений часто делается наоборот: магнит вращается внутри неподвижной обмотки). Принцип взаимодействия между магнитным полем и током в обмотке остается, разумеется, неизменным.

Предположим теперь, что батарея заменена чувствительным амперметром (фиг. 11). Теперь в цепи нет источника электрического тока. Поэтому можно

[1] В случае несложной цепи, подобной показанной на схеме фиг. 10, это можно сделать, повернув батарею и поменяв местами полюса. В практике используются более сложные цепи с переключателями направления тока.

было бы думать, что тока в такой цепи не возникнет. В действительности так и будет, пока «якорь» *WАБВ* остается неподвижным. Но если только его начать вращать (от внешнего источника механической энергии, не показанного на схеме), амперметр



Фиг. 11. Простейшая динамомашина, демонстрирующая второй закон Фарадея.

покажет, что в цепи появился ток. Ток в цепи будет течь до тех пор, пока вращается якорь. Если изменить направление вращения якоря, изменится и направление тока. Очевидно, теперь наш примитивный электродвигатель действует как динамомашина, преобразующая механическую энергию вращения в электрический ток.

Подобные эксперименты и привели Фарадея к открытию знаменитых законов электромагнитной индукции, на которых основана вся современная электроэнергетика. Эти законы можно сформулировать следующим образом.

1. На проводник, по которому течет электрический ток, в магнитном поле действует сила, выталкивающая его в направлении, которое перпендикулярно как направлению тока, так и линиям магнитного поля. (Это основа действия электродвигателя; в рассмот-

ренном выше примере проводником служит стержень *БВ*.)

2. Если проводник движется в магнитном поле, то в проводнике возникает электрический ток, текущий в направлении, которое перпендикулярно и направлению движения проводника, и линиям магнитного поля (основа действия динамомашины).

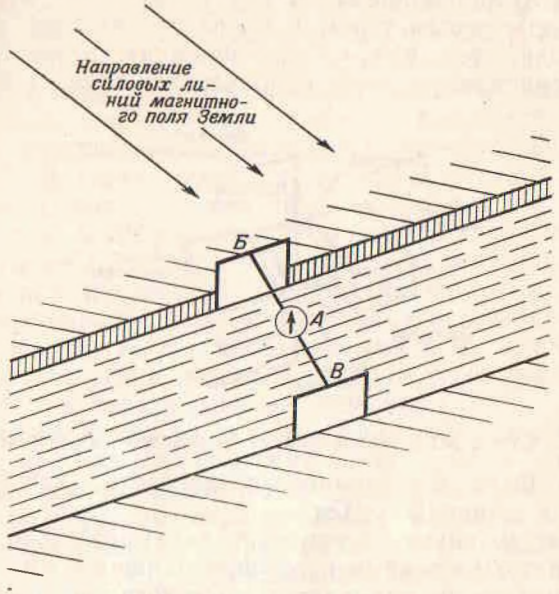
Силы и токи, возникающие в показанных на фиг. 10 и 11 несложных устройствах, конечно, очень малы по сравнению с силами и токами, возникающими в современных электродвигателях и генераторах, где отрезок проволоки *БВ* заменен якорной обмоткой из множества витков, а стержневой магнит — мощными электромагнитами. В современных генераторах вращающую ротор механическую силу создает высокоскоростная струя газа, пара или воды, истекающая под большим давлением на лопатки турбины. Мощность крупного генератора достигает многих тысяч киловатт.

В наши дни мы привыкли рассматривать электроэнергию и все то, что с ней связано, как нечто само собой разумеющееся; трудно даже представить, что около 130 лет назад, когда впервые были провозглашены миру законы Фарадея, считалось, что они представляют в основном академический интерес и малоперспективны в практических нуждах. Известен такой факт. Леди, присутствовавшая на одной из лекций Фарадея, спросила его: «А какая польза от всех этих экспериментов, господин Фарадей?» Великий экспериментатор в ответ задал встречный вопрос: «Скажите, мадам, какая польза от новорожденного ребенка?» С тех пор дитя Фарадея достаточно повзрослело.

Магнитогидродинамика. Заметим, что в законах Фарадея ничего не говорится о том, что проводник должен быть обязательно твердым. В существующих генераторах в качестве проводника по соображениям чисто практического характера используется твердая проволока. Но известны и такие генераторы, в которых движущимся проводником служит жидкость.

Мы видели в предыдущей главе, что соленая вода является проводником электричества. Много лет назад лорд Кельвин показал, что приливные воды

в устье реки способны в поле земного магнетизма действовать как простейший генератор. Он расположил два медных электрода в воде у разных берегов реки и соединил их изолированным кабелем, включив в цепь амперметр; кабель был расположен

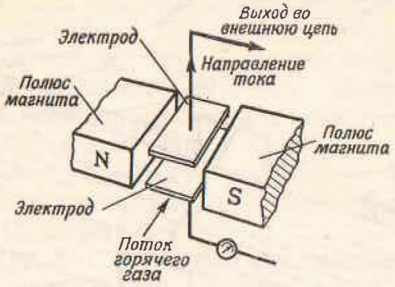


Фиг. 12. МГД-генератор Кельвина.

Соленая вода (движущийся проводник) течет в устье реки, пересекая силовые линии магнитного поля Земли, благодаря чему по кабелю, соединяющему электроды, идет электрический ток (регистрируется амперметром *А*).

под прямым углом и к направлению силовых линий магнитного поля Земли, и к направлению движения воды (фиг. 12). Оказалось, что по цепи, состоящей из кабеля, амперметра, электродов и воды между электродами, шел ток, как этого и надо было ожидать, исходя из второго закона Фарадея. Сила тока была прямо пропорциональна скорости, с которой вода текла между электродами. С окончанием прилива ток прекращался, а затем, когда вода начинала течь в обратном направлении, в цепи возникал ток, но уже с направлением, обратным первоначальному.

Другой пример движущегося жидкого проводника связан с электромагнитными насосами для перекачки жидких металлов, используемых в качестве охладителя в ядерных реакторах некоторых типов. Здесь электрический ток идет через жидкий металл, а силовые линии внешнего магнитного поля направлены под прямым углом к направлению тока. Жидкость движется, или «перекачивается», в направлении, перпендикулярном направлению тока, как это



Фиг. 13. Схема МГД-генератора, работающего на газовой струе.

можно было бы заранее предсказать, исходя из первого закона Фарадея.

Область науки, изучающая взаимодействие между магнитными полями и токопроводящими жидкостями или газами, называется магнитогидродинамикой. Принципиальная схема современного МГД-генератора, в котором используется такое взаимодействие, не отличается сколь-либо существенно от схемы генератора, устроенного Кельвином в устье реки: вода в них заменена электропроводящим газом, движущимся с большой скоростью мимо электродов, а слабое магнитное поле Земли заменено мощным электромагнитом (фиг. 13). Очевидная привлекательность МГД-метода генерирования электроэнергии, который позволяет получать электричество непосредственно от газового потока, состоит в том, что он делает ненужными турбины и вращающиеся динамомашины. Но практическая разработка МГД-генераторов, как мы увидим, сопряжена с преодолением различных трудностей (высокая температура и т. д.), порождаемых необходимостью поддерживать газ в таком состоянии, в котором он был бы достаточно хорошим проводником электрического тока.

Газы как проводники. В естественном состоянии газы плохо проводят электрический ток. Но их можно превратить в хорошие проводники, подвергнув ионизации. С этим процессом мы уже встречались в разделе, посвященном электролизу. Как мы уже знаем, чистую воду, которая не проводит электрического тока, можно превратить в хороший проводник, растворив в ней немного кислоты или соли. Молекулы растворимых веществ диссоциируют на ионы, несущие положительные и отрицательные заряды[1]. В газах механизм диссоциации иной. Здесь диссоциируют на ионы сами молекулы или атомы газа, а не молекулы какого-то вещества, добавленного к газу. Надо сказать, правда, что некоторые газы легче ионизируются в присутствии ничтожно малых добавок определенных веществ, но эти добавки не являются существенно необходимыми и их непосредственное участие в переносе зарядов через токопроводящий газ практически не ощутимо.

Атомы обычного, неионизованного газа электрически нейтральны. Положительные заряды протонов в ядре всякого атома точно уравновешиваются равным количеством отрицательных зарядов электронов, вращающихся вокруг ядра, как это наблюдается и для планет, обращающихся вокруг Солнца, но только в фантастически большем масштабе[2]. Газ начинает ионизоваться, когда содержание энергии в нем повышается в достаточной мере либо путем нагрева, либо же под действием рентгеновских лучей, гамма-лучей и т. п. Энергия, сообщенная атомам и молекулам газа, увеличивает скорость их хаотического движения. В результате столкновения между ними учащаются и становятся настолько сильными, что некоторые из орбитальных электронов начинают отры-

[1] Генератор, устроенный Кельвином в устье реки, кстати говоря, очень наглядно продемонстрировал электропроводность соленой воды: в чистой воде этот эксперимент не получился бы.

[2] Радиус орбиты электрона, вращающегося вокруг ядра атома водорода, приблизительно равен $0{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см*, а большая полуось орбиты Земли, вращающейся вокруг Солнца, достигает почти $1{,}5 \cdot 10^{8}$ *км*, т. е. $1{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*. — *Прим. ред.*

ваться от своих атомов, становясь свободными отрицательными ионами. Атомы или молекулы, потерявшие электрон, обладают избыточным положительным зарядом, иначе говоря, становятся положительными ионами. Так, ионизацию газообразного водорода можно представить следующим образом:

$$H_2 \longrightarrow H_2^+ + e^-.$$

Эта запись показывает, что нейтральная молекула водорода (H_2) диссоциирует на положительно ионизованную молекулу водорода (H_2^+) и свободный электрон или отрицательный ион (e^-).

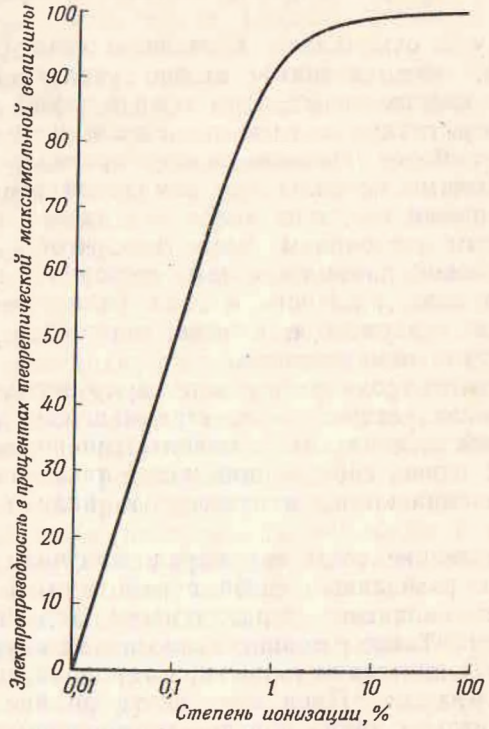
Масса электрона приблизительно в 2000 раз меньше массы атома водорода (т. е. в 4000 раз меньше массы молекулы водорода, состоящей из двух атомов). Водород — самый легкий из известных газов. Для более тяжелых газов неравенство масс электронов и положительных ионов еще больше. Так, когда ионизуется молекула кислорода ($O_2 \rightarrow O_2^+ + e^-$), масса иона O_2^+ примерно в 60 000 раз превышает массу электрона; в ионизованном углекислом газе ($CO_2 \rightarrow CO_2^+ + e^-$) масса иона CO_2^+ приблизительно в 70 000 раз больше массы электрона [1].

Исключительная легкость электронов по сравнению с положительными ионами означает, что электроны движутся куда быстрее, чем ионы. Таким образом, когда через ионизованный газ течет электрический ток, перенос заряда осуществляется почти исключительно электронами, движущимися с большой скоростью среди почти неподвижных положительных ионов. В этом состоит другое важное отличие ионизованных газов от электролитов. В электролитах разница между массами положительных и отрицательных ионов гораздо меньше, благодаря чему в переносе зарядов принимают участие ионы обоих зарядов.

Свободные электроны в газе — довольно эффективные переносчики зарядов. Поэтому для обеспечения высокой проводимости в газе нужно сравнительно мало таких электронов. Это обстоятельство иллюстрируется графически на фиг. 14 кривой за-

[1] В тексте неточность: масса CO_2^+ примерно в 80 000 раз больше массы электрона. — *Прим. ред.*

висимости между электропроводностью газа и степенью его ионизации. Чтобы достичь теоретически максимально возможной проводимости, естественно, необходимо обеспечить полную ионизацию, т. е. диссоциацию всех молекул на положительные ионы



Фиг. 14. График зависимости электропроводности газа от степени его ионизации.

и электроны. Однако, как видно по кривой, уже 1%-ной ионизации соответствует уровень проводимости, составляющий свыше 90% теоретического максимума. Даже если степень ионизации равна всего лишь 0,1%, иными словами, если из каждой тысячи молекул будет диссоциирована всего одна, то и в этом случае проводимость газа составит приблизительно половину максимальной. Следователь-

но, газ, в котором степень ионизации равна 1%, проводит электрический ток почти не хуже полностью ионизованного газа. Отсюда наглядно видно, что дальнейший рост числа свободных электронов уже очень слабо сказывается на увеличении проводимости, ибо электроны просто начинают мешать друг другу.

Как уже отмечалось, ионизацию газа (и, следовательно, проводимость) можно усилить нагревом газа. В недрах звезд, где температура достигает миллионов градусов, газы полностью ионизованы и обладают более высокой электропроводностью, нежели обычные металлы при комнатной температуре. Ионизованный газ, или «плазму», иногда называют «четвертым состоянием вещества», чтобы отличить его от более привычных нам состояний вещества: твердого тела, жидкости и газа (неионизованного). В звездах, разумеется, плазма является «естественным» состоянием вещества.

Магнитогидродинамику как науку первыми начали развивать астрофизики, стремившиеся объяснить взаимодействие плазмы с магнитными полями в звездах. (В нашей собственной звезде такие взаимодействия проявляются, например, в виде солнечных пятен.)

В последние годы эта наука получила мощный стимул к развитию в связи с работами, направленными на овладение управляемыми термоядерными реакциями. Такие реакции, аналогичные идущим в недрах звезд, протекают только при температурах в миллионы градусов. Пока еще никто не представляет себе отчетливо, каким образом термоядерные реакции можно было бы поставить на службу энергетике.

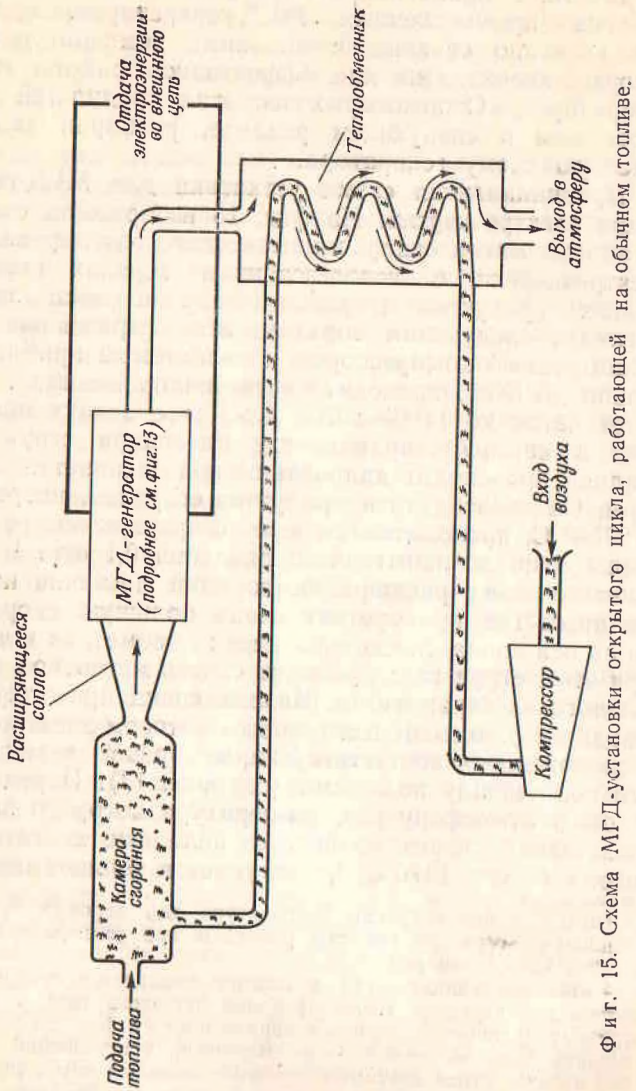
Рассматриваемые в настоящей книге МГД-генераторы должны будут работать при гораздо более низких температурах (порядка 2750°С). Это — почти предельная температура, при которой газ еще достаточно ионизован, чтобы удовлетворительно проводить электрический ток. (Ниже этой температуры уже трудно поддерживать ионизацию даже на таком низком уровне, как 0,1% максимально возможного.) Однако такие температуры намного превышают рабочую температуру в самых экономичных современных генераторах (650°С) [1]. Почти все технические трудности, с преодолением которых сопряжена разработка промышленных МГД-генераторов, прямо или косвенно связаны с высокими температурами, которые необходимы для эффективной работы этих генераторов. О некоторых из этих трудностей мы расскажем в следующем разделе, разбирая теоретическую схему генератора.

Принципиальная схема установки для МГД-генерации электроэнергии. На фиг. 15 изображена схема установки магнитогидродинамического генерирования электроэнергии с использованием горячих газообразных продуктов сгорания. Рабочий цикл здесь выглядит следующим образом: атмосферный воздух, засасываемый компрессором и сжимаемый приблизительно до 5 *ат*, проходит через теплообменник [2], где нагревается до 1100—1370° С. Далее воздух поступает в камеру сгорания, где благодаря сгоранию топлива происходит дальнейшее повышение температуры. Смесь воздуха и продуктов сгорания, нагретая до 2750° С, проходит затем через сверхзвуковое сопло, расширяясь до избыточного давления 0,1 *ати*. В результате этого расширения горячий частично ионизованный газ приобретает очень большую скорость вдоль оси сопла (несколько тысяч километров в час). При этом струя газа проходит сквозь магнитное поле мощного электромагнита. Возникающий при этом ток отводится от омываемых газовым потоком электродов, расположенных соответствующим образом в магнитном поле между полюсами (см. фиг. 13). Перед выходом в атмосферу газ, температура которого после прохождения через магнитное поле еще достаточно высока (около 1370°С) [3], поступает в теплообменник,

[1] 650° С — максимальная температура для паровых турбин; стационарные газовые турбины работают при температурах до 750—800° С. — *Прим. ред.*

[2] «Теплообменник» — так в технике называется любое устройство для передачи тепла от более нагретого тела к менее нагретому. В теплообменнике, изображенном на фиг. 15, горячие уходящие газы нагревают более холодный, поступающий в систему воздух; более знакомый пример — обычный котел системы центрального отопления, в котором горячие газообразные продукты сгорания нагревают воду.

[3] Практически значительно выше, а именно более 2000° С. — *Прим. ред.*



Фиг. 15. Схема МГД-установки открытого цикла, работающей на обычном топливе.

нагревая сжатый воздух, поступающий из компрессора.

Мы описали систему с открытым рабочим циклом, в которой газ уходит в атмосферу. Предлагались и системы с замкнутыми циклами, в которых одно и то же количество газа непрерывно циркулирует в замкнутом контуре, где газ вначале нагревается и сжимается, а затем расширяется и охлаждается так же, как и в предыдущем примере. При выборе между открытым и замкнутым циклами исходят не только из инженерных соображений. Газовый поток может содержать слишком ядовитые или слишком дорогие вещества, чтобы их можно было выбрасывать в атмосферу. Подобные соображения приходится учитывать, например, если речь идет о системе, в которой для нагрева газа вместо камеры сгорания используется ядерный реактор. В этом случае газ становится радиоактивным и выпускать его в больших количествах в атмосферу нельзя. Недавно сконструированные в Англии ядерные энергетические реакторы газового охлаждения работают при температуре газа ниже 540° С. Такая температура слишком мала для МГД-генераторов. Однако существуют некоторые заманчивые возможности объединить в будущем ядерную энергию с МГД-генераторами.

Очевидная практическая трудность, с которой связано создание любой МГД-системы для выработки электроэнергии в больших масштабах, сводится к разработке материалов, которые сохраняли бы необходимые механические, термические и электрические свойства при температурах не ниже приблизительно 2750° С. Другая трудность, сопряженная с первой, касается электрических свойств рабочих газов. Газообразные продукты сгорания (включая углекислый газ, который также используется в качестве охладителя в реакторах) плохо ионизуются даже при упоминавшихся температурах и сравнительно плохо проводят электрический ток. В результате этого внутреннее сопротивление генератора остается высоким, делая его неэкономичным. Так же дело обстояло бы, если в обмотке якоря современной динамомашины медь заменить каким-нибудь материалом с большим сопротивлением.

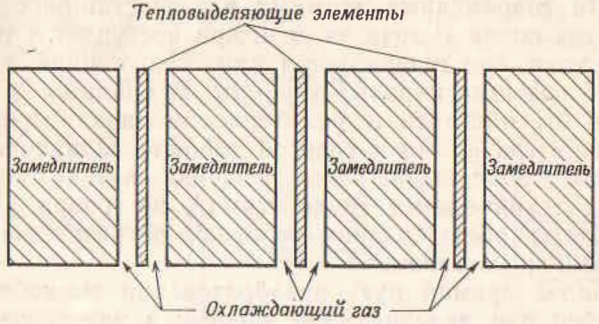
Степень ионизации можно повысить, уменьшив тем самым сопротивление, либо переходом к более высоким температурам, либо путем присадки к газовому потоку ничтожно малых добавок таких легко ионизирующихся веществ, как соли щелочных металлов. Однако эти пути повышения степени ионизации осложняют в обоих случаях решение задачи по созданию нужных материалов: присутствие солей щелочных металлов, например, даже в ничтожной концентрации серьезно угрожает «обычным» материалам коррозией.

Очень ответственным делом является профилирование сопла, в котором расширяется газ (см. фиг. 15). В идеале расширение должно осуществляться так, чтобы сообщить газу максимальную скорость истечения. Однако расширение сопровождается понижением температуры и давления газа, а это влечет за собой повышение электрического сопротивления. Поэтому практически приходится принимать компромиссное решение.

Кроме указанных трудностей, есть еще ряд трудностей чисто практического инженерного характера, с которыми приходится сталкиваться при создании любой новой установки. Так, например, теплообменник, показанный на фиг. 15, должен эффективно работать при таких температурах, давлении и прочих условиях, которые совершенно отличны от условий работы агрегатов современных теплоэлектроцентралей.

Использование МГД-генераторов в соединении с ядерными реакторами. Процессам ядерного деления, идущим в ядерных реакторах, присуща температура, измеряемая миллионами градусов. Именно такова температура огненного шара, возникающего при взрыве атомной бомбы. Однако на практике рабочая температура диктуется температурой плавления металла, из которого изготовлены тепловыделяющие элементы. На современных атомных электростанциях не используются непосредственно поистине уникальные свойства собственно атомной энергии. Эта энергия используется лишь как один из источников тепла для нагрева воды, выработки пара и приведения в действие обычных турбогенераторов.

На фиг. 16 схематически показана часть активной зоны энергетического ядерного реактора с газовым охлаждением, аналогичного реактору, который построен в Колдер-Холле. Этот реактор является прототипом атомных электростанций, сооружаемых сейчас в Англии. В таких реакторах ядерное топливо закладывается в виде стержней из природного



Фиг. 16. Схема части активной зоны ядерного энергетического реактора, охлаждаемого газом.

Топливо — природный уран, замедлитель — графит, охладитель — углекислый газ. В большом реакторе подобного рода мощностью 300 *Мвт* активная зона представляет собой графитовый цилиндр диаметром около 15 *м* и высотой приблизительно 7,5 *м*. Внутри активной зоны расположено до 4500 каналов для тепловыделяющих элементов, содержащих 300—400 *т* топлива.

урана[1], а замедлителем служат блоки чистого графита. (Нейтроны, высвобождающиеся при делении ядер урана, обладают очень большой скоростью; чтобы увеличить вероятность последующих актов деления ядер, быстрые нейтроны замедляют, пропуская через вещество, которое деления не претерпевает и нейтроны не поглощает.) Одними из лучших замедлителей являются чистый графит и тяжелая вода; иногда пользуются и обычной водой, но ей присущ тот недостаток, что она сравнительно сильно поглощает нейтроны[2].

[1] Такого урана, каким он извлекается из природных руд. Природный уран состоит в основном из изотопа U^{238} и содержит менее 1% расщепляющегося изотопа U^{235}. «Обогащенный» уран получают из природного, повышая в нем содержание U^{235}.

[2] Практически в большей части действующих энергетических реакторов в качестве замедлителя используют графит или обычную воду. — *Прим. ред.*

В английских энергетических реакторах охлаждающей средой служит углекислый газ; в этих целях было бы лучше пользоваться гелием, но Англия не располагает достаточным количеством этого инертного газа. В Соединенных Штатах, где запасы гелия богаче, разрабатываются реакторы с гелиевым охлаждением.

На современных атомных электростанциях горячий газ после выхода из реактора поступает в теплообменник, где генерируется пар, приводящий в действие обычные паровые турбины. В принципе можно было бы обойтись и без теплообменника, подводя горячий газ прямо к газовой турбине. Однако практическое воплощение такого решения связано с серьезными техническими трудностями[1], не говоря уже о проблеме обслуживания турбины, загрязненной радиоактивным газом.

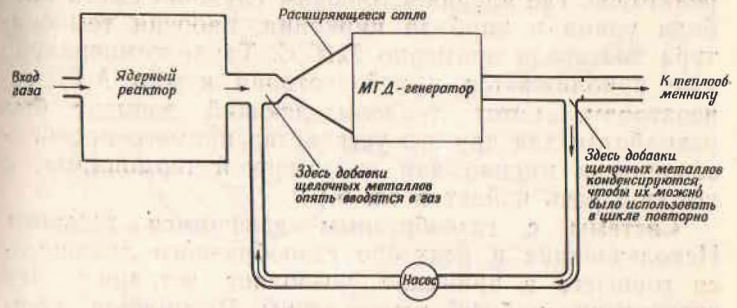
Более прямой путь преобразования высвобождающейся при делении ядер энергии в электрическую энергию — это использование охлаждающего реактор газа, как рабочего тела в МГД-генераторе. Углекислый газ, как и прочие продукты сгорания, при температурах ниже 2750° С почти не ионизуется (об этом мы уже говорили в предыдущем разделе). Следовательно, МГД-генератор на углекислом газе должен еще ко всему прочему работать при температуре газа выше 2750° С.

В случае, если в качестве охладителя используется гелий, ситуация меняется к лучшему, так как этот газ ионизуется при меньшей температуре. Это обстоятельство наряду с тем, что гелий не вызывает коррозии и в отличие от продуктов сгорания свободен от шлаков, означает, что соединение ядерного реактора с МГД-генератором, работающим на гелии, выглядит в конечном счете хотя бы столь же привлекательно, как и система с открытым циклом, работающая на химическом топливе. Конечно, здесь, как и в любом ядерном реакторе, нельзя сбрасывать со счетов проблему радиоактивного загрязнения, но

[1] Газовые турбины уступают паровым по единичной мощности и экономичности, особенно при умеренных температурах, характерных для действующих реакторов. — *Прим. ред.*

опасность такого загрязнения можно свести к минимуму в системе с замкнутым циклом, а понижение рабочих температур в системе с ядерным реактором в известной мере упростило бы решение задачи создания необходимых материалов.

Пока сомнительно, удастся ли воспользоваться присадкой солей щелочных металлов для повышения степени ионизации газа как в системе с ядерным реактором, так и в системе, работающей на химическом топливе. Но если бы этого удалось добиться,



Фиг. 17. Часть МГД-установки, в которой обычный котел заменен ядерным реактором.

На схеме показано, как щелочные добавки конденсируются, выделяются из потока газа и вновь подводятся к соплу. Пары щелочных добавок в реактор совершенно не попадают, потому что конденсация и выделение добавок происходят при охлаждении газа в теплообменнике.

не вызывая слишком интенсивной коррозии, то рабочую температуру газа в такой системе (ядерный реактор с гелиевым охлаждением + МГД-генератор) можно было бы понизить еще более. В связи с этим серьезно изучается предложение выводить из потока присадочное вещество, конденсируя его на низкотемпературном этапе цикла, и затем вновь вводить его в поток непосредственно перед входом газа в МГД-генератор (фиг. 17). Такое решение во всяком случае ограничило бы зону интенсивной коррозии пределами внереакторной части цикла.

Верхним пределом рабочей температуры любого ядерного реактора на твердом делящемся горючем является температура плавления тепловыделяющих элементов. В реакторах, подобных реактору в Колдер-Холле, этот предел еще ниже — он определяется

температурой плавления магноксовой[1] оболочки, в которую заключено ядерное горючее. Благодаря этому температура охлаждающего газа должна быть ниже 540°С, а такая температура для МГД-генератора, даже если он работает на гелии, слишком мала.

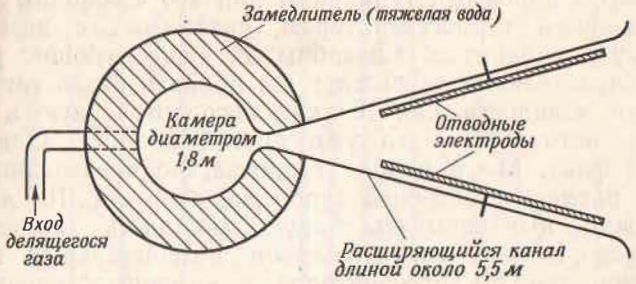
Экспериментальные реакторы с тугоплавким ядерным горючим без оболочек работали при гораздо более высоких температурах. В одном из таких реакторов, где ядерным горючим служила смесь карбида урана и карбида циркония, рабочая температура достигала примерно 2200°С. Такая температура уже приближается к той, которая нужна МГД-генераторам. (Этот тепловыделяющий элемент был разработан для другого устройства прямого преобразования, а именно для «плазменной термопары», о которой речь пойдет в гл. 6.)

Системы с газообразным делящимся горючим. Использование в реакторе газообразного делящегося горючего в принципе позволяет устранить это ограничение рабочей температуры. Разумеется, стенки сосуда, в котором содержится газ, необходимо поддерживать при температуре ниже некоторого предела, но, так же как и в камере сгорания ракетного двигателя, работающего на химическом топливе, температура самого газа должна быть гораздо выше. Использование делящегося газа открывает заманчивую возможность создания ядерной МГД-установки, в которой ее собственное ядерное горючее либо является рабочим телом, либо же входит в его состав. В литературе описаны два варианта реализации этой возможности; мы будем называть их «система с камерным реактором» и «система с плазменным реактором».

Камерным ядерным реактором называют такой реактор, в котором весь или почти весь замедлитель

[1] Магнокс — сплав, в состав которого входит примерно 99% магния и 1% алюминия. Горючее заключается в оболочку для того, чтобы наиболее активные продукты распада задерживались в ней. Таким образом достигается снижение радиоактивной загрязненности газа, циркулирующего в контурах установки. Сейчас разрабатываются экспериментальные тепловыделяющие элементы, которые задерживают продукты распада без помощи оболочек.

размещен в наружной оболочке. Эта оболочка окружает камеру, в которой находится ядерное горючее. Оно, вообще говоря, может быть твердым, жидким или газообразным. Поскольку топливо не рассредоточено в толще замедлителя, как это бывает в обычных реакторах, температура топлива может быть значительно выше, чем предельно допустимая температура замедлителя. Нас будет, разумеется, интересовать в данном разделе газообразное ядерное горючее.



Фиг. 18. Возможная схема МГД-установки с камерным реактором мощностью 10 000 *Мвт*.

Силовые линии магнитного поля пересекают канал перпендикулярно плоскости чертежа. Витки обмотки, генерирующей это поле, не изображены, чтобы избежать усложнения схемы.

На фиг. 18 схематически изображен МГД-генератор с камерным реактором такой конструкции, какую мыслит доктор Ричард Роса из Научно-исследовательской лаборатории фирмы «Авко-Эверет». Шаровая камера имеет в диаметре около 1,8 *м*. Камеру окружает замедлитель — около 7 *т* тяжелой воды. Канал генератора, в котором происходит расширение газа, имеет длину около 5,5 *м*. Он пересекается полем электромагнита, медная обмотка которого весит около 120 *т*. По предположению, рабочее тело, состоящее из гелия с добавкой 1 ат %[1] урана и 1 ат. % калия, должно подаваться в камеру под давлением 120 *ат*. Там она разогревается (благодаря делению ядер урана) примерно до 5500°С, а затем

[1] То есть один атом урана на 100 атомов гелия; поскольку атомные веса урана и гелия равны соответственно 235 и 4, весовая доля урана, выраженная в процентах, будет значительно больше.

расширяется, истекая через канал генератора. Доктор Роса считает, что удельная объемная мощность такой установки должна составлять в среднем около 10^6 *квт* на 1 $м^3$ ее объема, удельная весовая мощность, отнесенная к единице веса, — 110 *квт/кг*, а общая полезная мощность — около 10^7 *квт*.

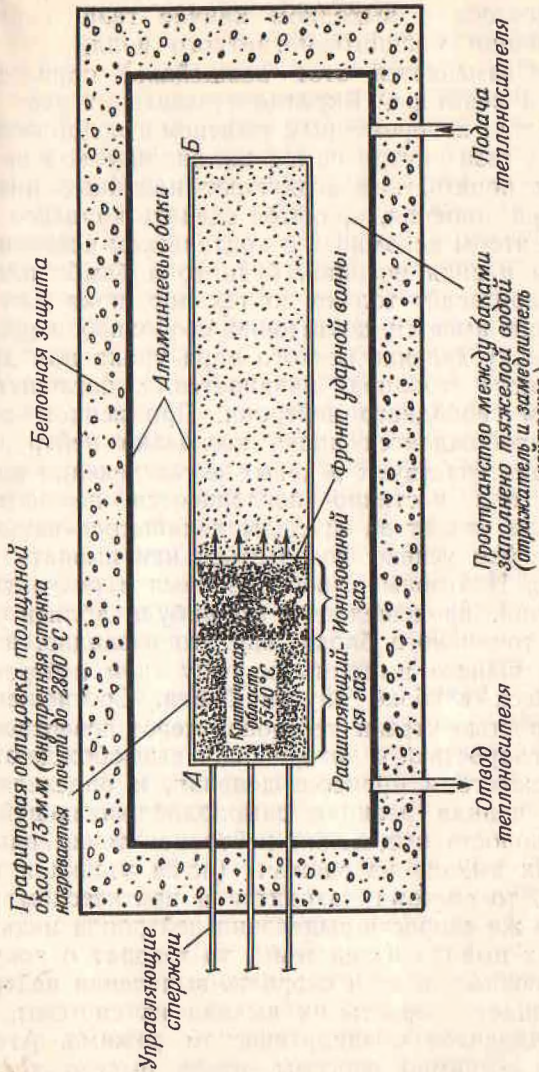
Этот последний показатель свидетельствует о том, что такой генератор по мощности равноценен 10 крупнейшим современным тепловым электростанциям с паровыми турбинами или 100 с лишним современным турбогенераторам, сравнимых с ним по весу и габаритам. Способны ли существующие распределительные энергосистемы принять столь гигантскую мощность, как 10^7 *квт*, сосредоточенную в одном источнике, — это уже другой вопрос[1]. Однако тот факт, что в одной установке, не превышающей по размерам обычный турбогенератор на 10^5 *квт*[2], можно вырабатывать такую мощность, является красноречивым свидетельством потенциальных возможностей МГД-генераторов с камерным ядерным реактором.

Плазменный реактор обычно изображают в виде длинного цилиндра из тугоплавкого материала, наполненного делящимся газом и закрытого с обоих концов отражателями и замедлителями нейтронов. В другом варианте (фиг. 19) замедлитель окружает газ со всех сторон. Здесь по существу мы имеем дело с камерным реактором, только не сферической, а цилиндрической формы.

Однако наряду с разницей в форме камеры есть другое более фундаментальное различие между системами, изображенными на фиг. 18 и 19. Камера показанного на фиг. 18 реактора сообщается с внешним контуром, по которому движется газ, тогда как камера, изображенная на фиг. 19, совершенно закрыта. В иллюстрируемой на фиг. 18 системе, рав-

[1] Существуют технические ограничения (распределительные устройства и т. д.) на величину мощности, сосредоточенной в одном блоке, которую можно включать в распределительную энергосистему.

[2] В настоящее время основное строительство крупных электростанций проводится блоками по $2 \cdot 10^5$—$3 \cdot 10^5$ *квт*; в ближайшие годы эта величина дойдет до $5 \cdot 10^5$—$1 \cdot 10^6$ *квт*. — *Прим. ред.*



Фиг. 19. Схема плазменного реактора.

Делящийся газ, сосредоточенный у конца *А*, переходит в сверхкритическое состояние, разогревается и создает ударную волну, которая движется к концу *Б*. Газ продолжает перемещаться к *Б* до тех пор, пока там не возникнет сверхкритическая его концентрация. Затем весь процесс повторяется.

но как и в других уже рассмотренных МГД-генераторах, вся «соль» процесса генерирования электроэнергии состоит в истечении с большой скоростью расширяющегося в выходном канале газа, пересекающего линии мощного магнитного поля.

Чем же заменяется этот важнейший процесс в плазменном реакторе? Вкратце ответить на этот вопрос надо так: попеременным сжатием и расширением делящегося газа внутри самой цилиндрической камеры. Чтобы понять, как возникают подобные циклы сжатия и расширения, придется сделать короткое отступление, чтобы вспомнить о критическом состоянии.

Ядерная цепная реакция, будь то в бомбе или в реакторе, протекает только до тех пор, пока для ее поддержания имеется достаточно свободных нейтронов, поскольку деление всякого ядра урана или другого ядерного топлива начинается с поглощения этим ядром свободного нейтрона. При всяком акте деления освобождается вновь несколько нейтронов, но не все они участвуют в новых актах деления ядер, поскольку они частично поглощаются, не вызвав деления, или уходят за пределы делящегося вещества, прежде чем успеют поглотиться или вызвать деление ядер. Нейтроны, освободившиеся в результате акта деления, происшедшего где-нибудь вблизи поверхности топливного блока, как это очевидно, имеют больше шансов вылететь наружу, чем нейтроны, выделившиеся глубоко внутри блока. Соотношение между скоростью утечки нейтронов через поверхность и общей[1] скоростью, с которой они высвобождаются внутри горючего в процессе деления, и определяет, станет ли цепная реакция самоподдерживающейся.

Если скорость выделения нейтронов точно равна скорости их выхода из системы (из-за утечки и поглощения), то система находится в критическом режиме, если же скорость выделения нейтронов меньше скорости их вывода из системы, то говорят о докритическом режиме, а если скорость выделения нейтронов превышает скорость их вывода из системы, то система находится в закритическом режиме. Атомная бомба — пример системы, очень быстро достигающей закритического режима, катастрофические последствия которого общеизвестны.

[1] То есть с учетом поглощения нейтронов в самом делящемся веществе.

В ядерном реакторе систему стремятся поддерживать точно в критическом режиме, регулируя количество вещества, поглощающего нейтроны, путем выведения из реактора и введения в него управляющих стержней, изготовленных из поглощающего нейтроны материала. Если реактор перевести в докритический режим, то цепная реакция угаснет и реактор остановится. В закритическом режиме реактор быстро перегревается, и если не принять срочных мер к переводу его на нужный режим с помощью управляющих стержней, тепловыделяющие элементы расплавятся. Последствия такого расплавления не столь разрушительны, как при атомном взрыве, но они достаточно неприятны, как это показал ряд случаев выхода реакторов на закритический режим.

Интенсивность, с которой идет процесс деления в куске твердого ядерного топлива, пропорциональна количеству топлива, иначе говоря, его объему, если принять, что плотность топлива постоянна. Скорость же утечки нейтронов, с другой стороны, зависит от площади поверхности. Таким образом, как мы видим, соотношение между выделением нейтронов и их утечкой зависит от соотношения между объемом и площадью поверхности куска топлива.

Поясним это на примере. Допустим, что кусок ядерного топлива имеет форму шара. Объем шара пропорционален кубу его радиуса; например, при удвоении радиуса объем шара возрастает восьмикратно. А площадь поверхности шара пропорциональна квадрату радиуса; если радиус увеличить вдвое, площадь поверхности возрастет всего вчетверо. Таким образом, чем больше шар, тем больше отношение его объема к площади поверхности.

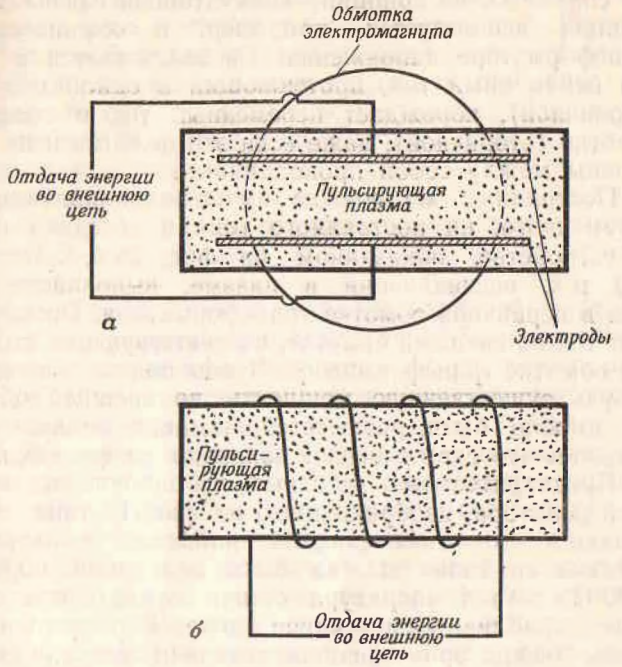
В достаточно маленьком шаре из ядерного горючего общее число свободных нейтронов не будет возрастать, поскольку утечка нейтронов через поверхность шара идет быстрее, нежели их образование в процессе деления ядер в массе шара. Добавив некоторое количество топлива к взятому нами куску (так, чтобы сохранить его сферическую форму), мы увеличим и его объем и площадь его поверхности.

Но объем увеличится пропорционально больше, чем площадь поверхности. Стало быть, скорость выделения нейтронов в массе топлива увеличится пропорционально больше, чем скорость утечки нейтронов через поверхность. Если мы будем продолжать добавлять топливо, то в конце концов кусок достигнет критического размера, при котором скорость выделения нейтронов в массе топлива в точности сравняется со скоростью их утечки через поверхность. Дальнейшее добавление топлива сделало бы кусок сверхкритическим по размеру. В результате произошел бы ядерный взрыв или в лучшем случае расплавление топлива. (Это, разумеется, только мысленный эксперимент.)

В случае газообразного ядерного топлива площадь поверхности, ограничивающей его объем, можно уменьшить, подвергнув газ сжатию. Для всякой данной массы газа существует критический объем. Если газ сжат так, что его объем становится меньше критической величины, то утечка нейтронов через поверхность не сможет скомпенсировать выделения нейтронов в объеме газа, благодаря чему наступит закритический режим.

В плазменном реакторе, изображенном на фиг. 19, количество делящегося газа подбирают так, чтобы в случае, когда он равномерно распределен по объему цилиндрической камеры, система находилась в докритическом состоянии. Теперь давайте предположим, что внезапное возмущение (например, воздействие ударной волны извне) вызвало сосредоточение большей части газа в одном конце камеры и что в результате газ оказался сжатым до закритического объема. В газе немедленно развивается цепная реакция — в результате мгновенно выделится большое количество тепла и возникнет ударная волна, которая со сверхзвуковой скоростью начнет распространяться вдоль цилиндра. (В целом этот эффект несколько напоминает ядерный взрыв в миниатюре.) За ударной волной движется слой очень горячего и, следовательно, ионизованного газа, или плазмы. Когда ударная волна достигает противоположного конца цилиндра, газ будет перемещаться до тех пор, пока не накопится достаточное количество делящегося материала, чтобы вновь возникло закритическое

состояние. Тогда цикл повторится, но уже в противоположном направлении, и так далее. Теоретически плазма могла бы колебаться возвратно-поступательно до тех пор, пока остается достаточное количество



Фиг. 20. Различные методы отвода тока от плазменного реактора: *а* — отвод введенными в плазму электродами и поперечным магнитным полем; *б* — отвод наружной внешней обмоткой.

ядерного топлива для создания закритического состояния в любой точке цикла.

Как видно отсюда, в плазменном реакторе, вместо потока плазмы, движущейся в одном направлении, как это наблюдается в других МГД-генераторах, возникает поток, перемещающийся возвратно-поступательно вдоль оси цилиндрической камеры. Приложив магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны оси цилиндра, и установив обычным образом электроды (фиг. 20,*а*), можно в принципе получать от плазмы переменный электрический ток.

Поскольку колеблющаяся плазма создает *переменный* ток сама, представляется осуществимым

иной способ отвода тока, не применимый в случае постоянного тока. При этом электроды становятся совершенно ненужными (что полностью снимает заботы по защите электродов от коррозии), так как ток снимается по принципу «индуктивной связи». Этот принцип используется, например, в обыкновенном трансформаторе напряжения. Он заключается в том, что переменный ток, протекающий в одной обмотке (первичной), порождает переменный ток в соседней обмотке (вторичной), даже если эти обмотки и не соединены между собой проводником [1].

Постоянный же ток не вызывает появления ни переменного, ни постоянного тока в соседней цепи. В устройстве, показанном на фиг. 20,*б*, переменный ток, возникающий в плазме, выполняет роль тока в первичной обмотке трансформатора. Он порождает ток во внешней обмотке, соответствующей вторичной обмотке трансформатора. Чтобы получить сколько-нибудь существенную мощность, во внешней обмотке должно быть, разумеется, намного больше витков, чем это схематически показано на фиг. 20,*б*.

Предварительные эскизные проработки плазменного реактора, изображенного на фиг. 19 типа, показывают, что максимальная рабочая температура делящегося газа должна быть величиной порядка 5500°С, хотя температура стенок камеры при этом будет приблизительно вдвое ниже. Выходная мощность генератора предположительно должна быть примерно равна 500 000 *квт* при преобразовании тепла ядерного деления в электроэнергию с общим к.п.д. установки 20%.

Надо, вероятно, подчеркнуть, что плазменные реакторы рассмотренного здесь типа очень далеки от будущих термоядерных плазменных реакторов, использующих тепло ядерного синтеза, а не деления. Как уже упоминалось, температура термоядерной плазмы измеряется не тысячами, а миллионами градусов. Для создания генераторов электроэнергии, использующих такую астрономическую (в буквальном смысле слова) температуру, понадобится совершенно новая техника. Создание таких генераторов — дело далекого будущего.

[1] Это внешне таинственное явление можно объяснить, приложив законы Фарадея к магнитным полям, возникающим под действием электрического тока.

Существующее положение и перспективы. Если не считать плазменного реактора, в котором генерируется переменный ток, все МГД-устройства, о которых шла речь, генерируют постоянный ток. Поэтому необходимой предпосылкой широкого использования этих генераторов для снабжения энергией распределительных сетей является эффективное преобразование постоянного тока в переменный. Техника преобразования постоянного тока в переменный (см. гл. 8) разработана достаточно хорошо. Это — одна из наименее трудных задач, с решением которых сопряжено МГД-генерирование электроэнергии в широких масштабах [1].

Несомненно, самой трудной задачей, которую предстоит решить при создании МГД-генераторов, является разработка достаточно жаростойких материалов. О необходимости иметь такие материалы мы уже упоминали в связи с высокотемпературными топливными элементами. Но, говоря тогда о высоких температурах, мы имели в виду температуры порядка лишь 800 — 1100°С. А говоря о МГД-генераторах, мы должны думать о температурах не ниже 2200—2750°С. Материалы должны выдерживать колоссальные температуры, резкие температурные скачки [2], воздействие химически агрессивных присадок типа солей щелочных металлов и, кроме того, быть дешевыми и достаточно доступными. Для генераторов, используемых в соединении с ядерными реакторами, нужны такие материалы, которые способны выдерживать бомбардировку гамма-излучением и нейтронами. Когда будут созданы эти новые материалы, может оказаться, что они будут существенно отличаться от металлов по своим механическим свой-

[1] Между прочим, существующим преобразователям присуща сравнительно небольшая единичная мощность, к тому же они довольно дороги. Поэтому их усовершенствование и удешевление очень важны для улучшения экономических показателей электростанций с МГД-генераторами. — *Прим. ред.*

[2] Для МГД-генераторов крупных электростанций можно обеспечить режим работы с постепенным изменением температуры без многократных резких скачков за весь срок «жизни» установки. — *Прим. ред.*

ствам (по твердости, прочности при растяжении и т. д.). В этом случае понадобится создать новую технологию обработки таких материалов, отыскать новые конструкторские решения. Наряду с этим материалы для электродов должны быть жаропрочными и коррозионностойкими, обладать хорошей электропроводностью. Желательно также, чтобы они обладали хорошей способностью испускать электроны[1]. Испускаемые с поверхности электродов электроны будут уноситься в газовый поток и, следовательно, повышать его электропроводность.

На развитие техники высоких температур сейчас ассигнуются большие средства, особенно в США, в связи с нуждами ракетной техники. Некоторые знания, полученные таким путем, уже нашли применение в области МГД-генерирования электроэнергии. (В этом смысле «соревнование за Луну», расцениваемое некоторыми людьми как преступное расточительство талантов и средств, может хотя бы косвенным образом принести благо миру, переживающему энергетический голод.) Но здесь важно помнить о том, что ракетный двигатель обычно должен работать непрерывно всего несколько минут, а МГД-генератор целесообразен для экономичной промышленной выработки электроэнергии только тогда, когда он способен работать безостановочно месяцы, если не годы. Непрерывная работа без перегрева на протяжении часа — это самое большое, чего пока удалось добиться с МГД-генератором. Этот результат был достигнут с небольшим экспериментальным МГД-генератором, выходная мощность которого составляла около 10 *квт;* модель мощностью 700 *квт* перегрелась за несколько секунд.

В этих экспериментальных генераторах магнитное поле пронизывает газовый канал длиной около 30 *см* и с поперечным сечением несколько квадратных сантиметров. Чтобы достичь мощности промышленного значения, нужно размеры генератора увеличить хотя бы раз в десять. Это объясняется тем, что к.п.д. МГД-преобразования должен быстро возрастать с

[1] Такие материалы, как вольфрам, из которых изготовляют катоды радиоламп, обладают хорошей эмиссионной способностью; именно от этого и зависит качество радиолампы.

увеличением генератора. Вероятнее всего, существующие устройства выработки электроэнергии и уступят свое место именно таким МГД-генераторам, единичная мощность которых превысит 10^5 *квт*[1].

Известны и такие схемы, в которых для достижения общего к.п.д. электростанции около 65% МГД-генератор предполагается использовать в соединении с обычным турбогенератором (к.п.д. самых экономичных современных установок равен примерно 40%). Подобная схема предполагает, что турбогенератор должен работать на выхлопных газах от МГД-системы с открытым циклом, подобной той, которая была изображена на фиг. 15. Эти выхлопные газы, тепло которых в иных условиях терялось бы бесполезно, обладают еще достаточно высокой температурой (гораздо выше 540°С), чтобы их можно было использовать в целях производства пара для турбогенератора.

Сколько же времени понадобится на то, чтобы МГД-генераторы широко вошли в практику и значительно улучшили существующее на сегодня положение с использованием энергетических ресурсов? По единодушному мнению компетентных специалистов, опытные установки мощностью, скажем, 10^4—10^5 *квт* удастся успешно продемонстрировать уже к концу текущего десятилетия. Остается только гадать, как скоро после этого они найдут широкое применение, вытеснят ли они ныне существующие установки или же всего-навсего дополнят их, будут ли они работать на ископаемом топливе или же на ядерном горючем и т. д. и т. п. Ясно одно: будущее МГД-генерирования электроэнергии, как и будущее ядерной энергетики, будет решаться на основе не только одних технических и экономических преимуществ. Так или иначе это будущее связано со всевозможными политическими, военными и социальными соображениями[2].

[1] Вероятно, понадобится мощность порядка $5 \cdot 10^5$—$1 \cdot 10^6$ *квт*. — *Прим. ред.*

[2] Это важно для темпов разработки самой проблемы, но возможности широкого применения МГД-генераторов на электростанциях будут в первую очередь определяться возможностью достижения расчетных затрат на производство электроэнергии ниже, чем на станциях обычного типа. — *Прим. ред.*

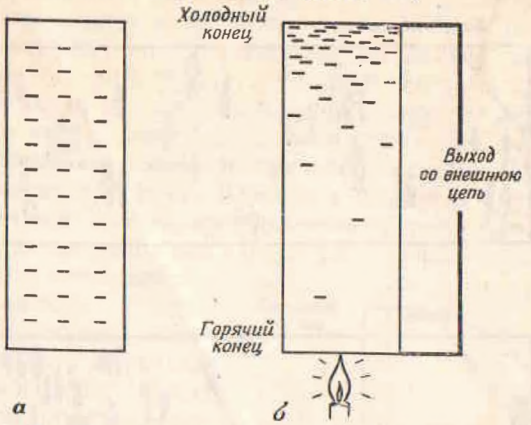


5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Электроны в металлах. Как хорошо известно, большая часть металлов представляет собой при комнатной температуре превосходные проводники электричества. Электрический ток — это движение свободных электронов, не связанных с атомами, как это бывает в ионизованном газе. Но как мы видели, чтобы оторвать электроны от атомов в газе, надо запасти энергию (например, тепловую). А в металлах существует много свободных электронов даже при комнатной температуре. Так, в 1 $см^3$ металла, хорошо проводящего электрический ток, число свободных электронов равно приблизительно $6 \cdot 10^{21}$, иными словами, почти по одному свободному электрону на всякий атом металла.

Эти свободные электроны движутся самым хаотическим образом. По мере повышения температуры их движение становится все более энергичным. Следовательно, если один конец металлического стержня нагреть, то электроны у этого конца будут двигаться энергичнее, чем до нагрева. В результате установится преобладающее перемещение электронов от нагретого конца стержня к холодному, как это показано на фиг. 21. В качестве весьма приближенного сравнения можно привести такой пример: представьте себе многолюдное сборище гостей, собравшихся теплым

вечером на коктейль в большом зале удлиненной формы. Чрезмерно внимательный хозяин решил очень жарко разжечь гигантский камин у одной стены зала. И вот результат — все гости начинают тесниться к противоположной стене зала (фиг. 22).

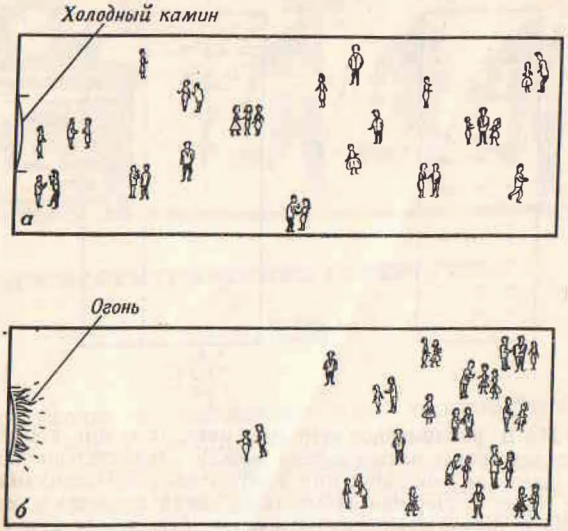


Фиг. 21. В равномерно нагретом металлическом стержне свободные электроны распределены между сравнительно неподвижными (здесь не показанными) положительными зарядами равномерно; нигде в стержне избыточный заряд накопиться не может и разность напряжения не возникает (*а*); когда стержень нагревается с одного конца, электроны перемещаются к другому концу, создавая там избыточный отрицательный электрический заряд, благодаря чему между двумя концами стержня возникает разность напряжений (*б*).

Такая разность, если ее использовать соответствующим образом, создает во внешней цепи электрический ток, который может совершать полезную работу.

Вследствие подобного регулярного перемещения электронов в стержне, естественно, возникает электрический ток, про который можно вполне законно сказать, что он вызван нагреванием одного конца стержня. Следовательно, перед нами простейшее устройство по прямому преобразованию теплоты в электрическую энергию: один конец стержня нагревается и по нему идет электрический ток. Все это выглядит слишком просто. Но простота эта, как мы увидим, обманчива, если проанализировать, что же произойдет, когда мы попытаемся использовать возникший ток для совершения полезной работы.

Эффект Зеебека. Давайте рассмотрим самую простейшую (из всех возможных) внешнюю цепь, состоящую из стержня и проволочки, соединяющей горячий конец стержня с холодным, как это показано на фиг. 23. (Эта проволока могла бы быть и обмоткой



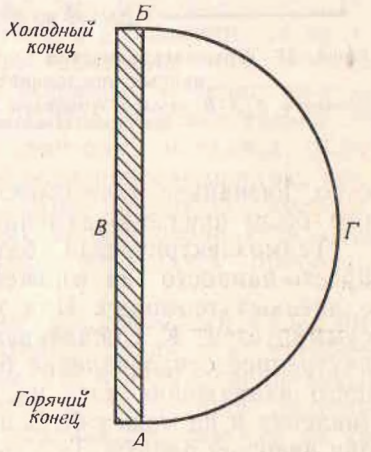
Фиг. 22. Условная иллюстрация по теме о термоэлектричестве.
а — температура постоянна и пришедшие на вечер гости более или менее равномерно распределены по залу; *б* — из-за сильного огня в камине гости начали переходить к противоположной (прохладной) стене зала.

якоря электромотора, но мы сейчас не будем вдаваться в такие подробности.) Проволока — тоже хороший проводник электрического тока, и, стало быть, в ней концентрация свободных электронов примерно такая же, что и в самом стержне. Более того, поскольку концы проволоки находятся в термическом контакте с концами стержня, то конец *А* проволоки нагреется. В результате свободные электроны в проволоке будут перемещаться от этого конца. Следовательно, в проволоке потечет ток, противодействующий тому току, который мы хотим отвести со стержня!

На практике, если стержень и проволока сделаны из разных металлов, то концентрация свободных электронов в них будет не совсем одинакова и по цепи

потечет слабый суммарный ток. Это и есть широко известный эффект, открытый в 1821 г. берлинским экспериментатором Томасом Иоганном Зеебеком и названный по его имени эффектом Зеебека. Достоинство Зеебека не умаляется тем, что он не сумел правильно объяснить свое важное открытие в свете современных ему представлений об атоме. Атомное строение материи, существование и природа электрона оставались непознанными еще свыше 60 лет после его смерти, т. е. почти до самого конца XIX века.

Термопары и термоэлектрические батареи. Ясно, что использование эффекта Зеебека в металлах — не очень экономичный способ преобразования теплоты в электрическую энергию, так как результирующий ток определяется незначительной разницей концентраций свободных электронов в двух металлах термопары, как называют устройство, подобное изображенному на фиг. 23[1].



Фиг. 23. Простейшая термопара.
Стержень *АВБ* и дуга *АГБ* сделаны из разных металлов. Если к *А* подвести тепло, то по цепи потечет ток (эффект Зеебека).

Нельзя забывать, однако, что во времена Зеебека открытия Фарадея еще не привели к созданию динамомашины и что единственным иным известным источником электроэнергии служила батарея электрохимических элементов. Термоэлектрический метод генерирования электричества, основанный на использовании эффекта Зеебека, казался в те времена возможным конкурентом батарей; в 1843 г. на имя некоего Мозеса Пула был выдан патент на устрой-

[1] Разумеется, не обязательно, чтобы один из металлов был в виде стержня; термопару можно сделать из двух проволок, тонких полосок или дисков различных металлов.



Фиг. 24. Термоэлектрическая батарея, состоящая из пяти соединенных последовательно термопар.

Элементы *А* и *Б* каждой термопары сделаны из разных металлов (или полупроводниковых материалов).

ство, названное *термоэлектрической батареей*, которое было призвано заменить вольтову батарею.

Термоэлектрическая батарея (фиг. 24) состоит просто-напросто из множества последовательно соединенных термопар. При этом э. д. с. всех термопар суммируется. К сожалению, при этом возрастает и внутреннее сопротивление батареи, так что часть общего напряжения идет на преодоления этого сопротивления и не может быть использована для совершения внешней работы. Тем не менее путем правильного подбора различных металлов с целью возможно большего повышения э. д. с. и сведения к минимуму внутреннего сопротивления к 1850 г. к. п. д. термоэлектрических батарей удалось повысить до 3%, т. е. превзойти к. п. д. существовавших тогда паровых машин. С тех пор минуло почти столетие, но несмотря на то, что термопары широко применяются для измерения температур [1], повысить их к. п. д. как генерато-

[1] Это применение термопар основано на том, что генерируемая ими э. д. с. пропорциональна разности температур между горячим и холодным спаями (речь об этом пойдет несколько дальше).

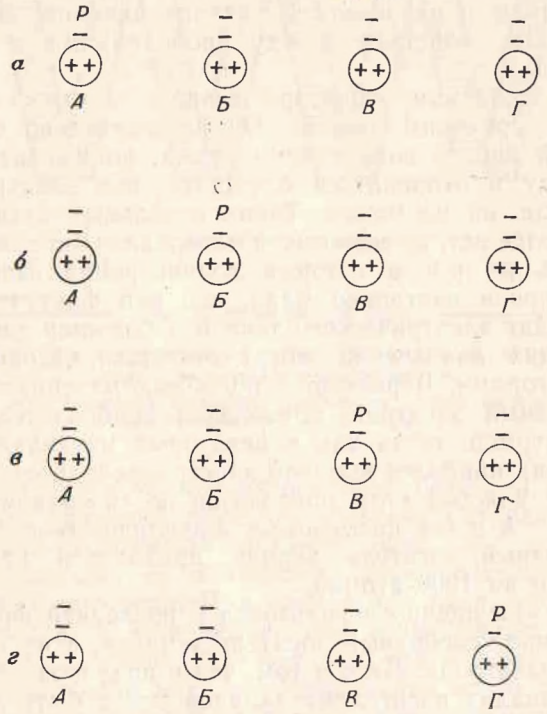
ров так и не удалось. По-видимому, здесь уже достигнут предел.

Полупроводники. За последнее примерно десятилетие положение существенно изменилось в связи с открытием и разработкой полупроводников, стоящих по своим свойствам между проводниками и изоляторами.

В идеальном изоляторе всякий электрон прочно связан со своим атомом. Он вращается по определенной орбите вокруг ядра атома, но вырваться на свободу и отправиться блуждать, как электроны в металле, он не может. Таких идеальных изоляторов в природе нет, но есть много материалов (стекло, воск, янтарь и др.), в которых концентрация свободных электронов настолько мала, что они фактически не проводят электрического тока и в большинстве практических назначений могут считаться абсолютными изоляторами. Вероятно, в подобных материалах один свободный электрон приходится приблизительно на 10^{12} атомов, тогда как в некоторых металлах, обладающих наиболее высокой электропроводностью, почти на каждый атом приходится по свободному электрону. А в так называемых «полупроводниках» один свободный носитель заряда приходится приблизительно на 1000 атомов.

Я умышленно использовал в последней фразе выражение «свободный носитель заряда», а не «свободный электрон». Дело в том, что в полупроводниковых материалах носителями зарядов могут быть не только электроны. Полупроводники в зависимости от характера проводимости делятся на три категории: полупроводники *n*-типа, полупроводники *p*-типа и собственно полупроводники. Полупроводникам *n*-типа свойственны носители отрицательных зарядов, полупроводникам *p*-типа — носители положительных зарядов, а в истинных полупроводниках существует поровну носителей зарядов обоих знаков. Носители отрицательных зарядов в полупроводниках, как и в металлах,— это, разумеется, электроны. Носители же положительных зарядов образуются вследствие нехватки электронов в определенных точках кристаллической решетки. Такая местная нехватка отрицательного заряда проявляет себя как положительный

заряд и достаточно метко называется «положительной дыркой». Эти дырки способны перемещаться подобно пузырькам в жидкости, благодаря чему возникает перенос положительных зарядов.



Фиг. 25. Перемещение «положительной дырки» P вдоль ряда атомов $А$, $Б$, $В$, $Г$.

На фиг. 25 изображено, конечно, очень схематично, как происходит подобное перемещение положительных дырок. Рассмотрим кристалл, в котором ядро каждого из образующих его атомов $А$, $Б$, $В$ и т. д. несет два положительных заряда. В этом случае каждому атому, чтобы быть электрически нейтральным, нужно иметь по два орбитальных электрона[1].

[1] Такое число зарядов присуще атомам гелия. Пример носит чисто иллюстративный характер. Из него еще нельзя делать вывод, что твердый кристаллический гелий обязательно должен быть полупроводником.

На фиг. 25,*а* все атомы, кроме $А$, имеют полный комплект орбитальных электронов, тогда как у атома $А$ одного электрона не хватает, благодаря чему его суммарный заряд положителен; иначе говоря, в точке $А$ существует положительная дырка. Переходя к следующему ряду *(б)*, мы увидим, что атом $А$ отобрал недостающий ему электрон у атома $Б$. Теперь одного электрона не хватает атому $Б$, атом $А$ стал электрически нейтрален, а положительная дырка переместилась из $А$ в $Б$. В следующем ряду *(в)* показано, что атом $Б$ захватил электрон у атома $В$, в результате чего атому $В$ стало не хватать одного электрона, а дырка переместилась еще на одну позицию вправо. Хотя в действительности от атома к атому перескакивают электроны, получается, что местонахождение неуравновешенного положительного заряда перемещается вдоль линии, что, иными словами, эквивалентно движению положительной дырки.

Рассмотренная схема полупроводников, будучи верной в основных чертах, все же по необходимости чересчур упрощена. В частности, проницательный читатель мог бы сказать, что из нашего рассказа о полупроводниковых материалах p-типа следует, что они несут большой суммарный положительный заряд, так как в 1 $см^3$ материала p-типа существует около $6 \cdot 10^{18}$ положительных дырок. Однако такого избыточного заряда в микроскопическом масштабе мы не наблюдаем, потому что местная нехватка электронов, ведущая себя подобно носителю положительного заряда, компенсируется избытком электронов где-то еще в кристалле, а сам кристалл остается в целом нейтральным.

Производство полупроводников стало крупной самостоятельной отраслью промышленности. Концентрацией и знаком носителей зарядов часто удается управлять, вводя соответствующие примеси в материал и тем самым изменяя его состав в нужном направлении[1]. Некоторые полупроводники, например,

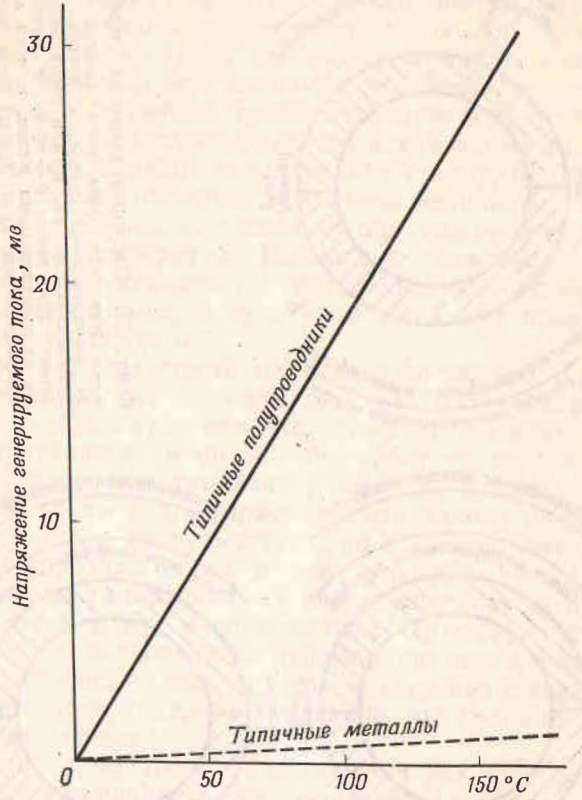
[1] Однако возможности изменения свойств металла, создаваемого добавкой примесей, ограничены. Мы это увидим, когда будем рассматривать попытки по созданию присадкой таких примесей термоэлектрических материалов, предназначающихся для работы при высоких температурах.

пропускают электрический ток преимущественно в одном направлении. Эта способность полупроводниковых материалов выпрямлять ток позволила использовать их в транзисторах портативных радиоприемников и т. д. Другие полупроводниковые материалы, особенно кремний, находят все более широкое применение в фотоэлектрических элементах для прямого преобразования солнечного света в электроэнергию. У нас будет случай остановиться на этом подробнее в гл. 7; в настоящей же главе мы рассмотрим только термоэлектрические свойства полупроводников.

Термоэлектрическое преобразование энергии в полупроводниках. Этот раздел мы начали с рассказа о металлическом стержне, нагреваемом с одного конца. Как мы видели (см. фиг. 21), такой нагрев вызывает перемещение электронов от горячего конца стержня к холодному, благодаря чему между концами стержня возникает разность напряжения. Как показали опыты Зеебека, эта разность всегда пропорциональна разности температур концов стержня независимо от того, из какого металла он изготовлен. Позднее, когда появились полупроводники, было установлено, что стержни, изготовленные из полупроводниковых материалов, обладают подобными же свойствами: если один конец такого стержня нагреть, то возникает разность напряжения (термо-э. д. с.), которая пропорциональна разности температур концов стержня. Есть, однако, одно важное отличие между термо-э. д. с. в полупроводниках и в металлах. При одной и той же разности температур в полупроводниках возникает термо-э. д. с., в 40 с лишним раз превышающая термо-э. д. с. в металлах. Так, если в типичном металле разности температур в 55° С соответствует термо-э. д. с. 0,2—0,3 *мв*, то в таком распространенном полупроводнике, каким является теллурид висмута, тому же перепаду температур соответствует термо-э. д. с. порядка 10 *мв*. С ростом разности температур термо-э. д. с. возрастает и в металлах, и в полупроводниках, но, как это видно из фиг. 26, при любой данной разности температур термо-э. д. с. в полупроводнике всегда в 40—50 раз больше, чем в металле.

Итак, в полупроводниках можно получить термо-э. д. с., намного большую, чем в металлах. Здесь мо-

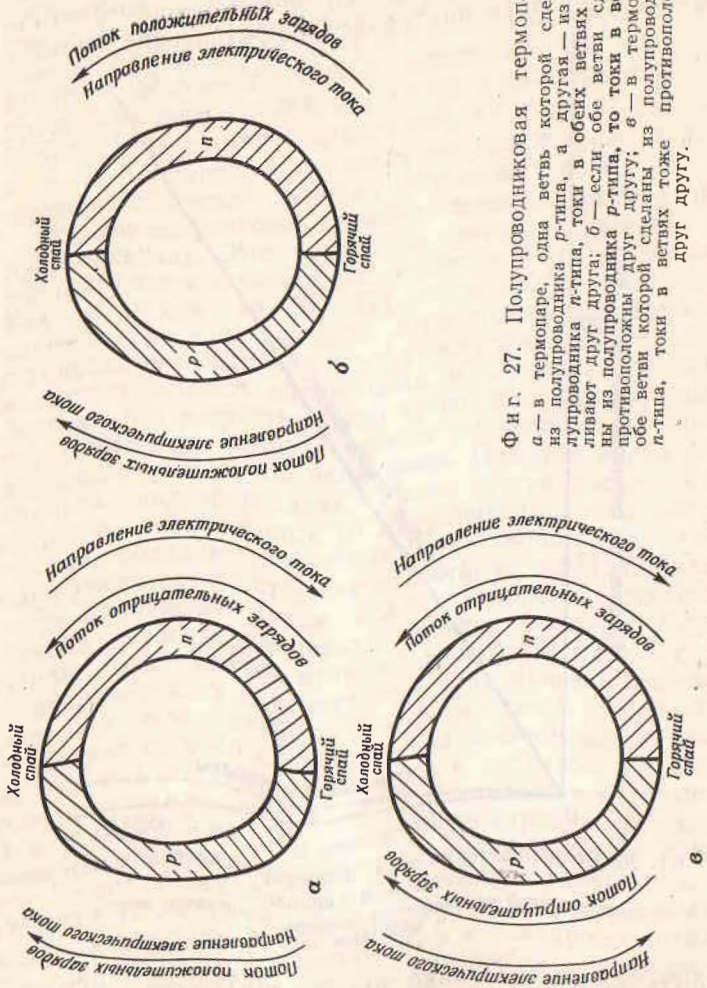
гут возразить, что это преимущество получено ценой использования материалов, обладающих более высоким электрическим сопротивлением, чем металлы. Следовательно, в полупроводниковом термоэлектрическом генераторе внутреннее сопротивление должно



Фиг. 26. Величина термо-э.д.с. в полупроводниковых материалах и в металлах.

По горизонтальной оси нанесена разность температур между горячим и холодным спаями.

быть больше. Однако путем тщательного регулирования процессов изготовления, присадки примесей и т. д. можно без ущерба для величины термо-э. д. с. полупроводника добиться, чтобы его электрическое сопротивление оставалось достаточно низким. Разу-



Фиг. 27. Полупроводниковая термопара. *а* — в термопаре, одна ветвь которой сделана из полупроводника *p*-типа, а другая — из полупроводника *n*-типа, токи в обеих ветвях усиливают друг друга; *б* — если обе ветви сделаны из полупроводника *p*-типа, то токи в ветвях противоположны друг другу; *в* — в термопаре, обе ветви которой сделаны из полупроводника *n*-типа, токи в ветвях тоже противоположны друг другу.

меется, приходится мириться с тем, что по сопротивлению полупроводники уступают металлам, но это с лихвой окупается резким возрастанием термо-э. д. с.

Еще одним ценным свойством полупроводников с точки зрения их использования в термоэлектрических генераторах является то, что они обладают достаточно хорошей теплоизоляционной способностью. Металлы проводят тепло так же превосходно, как и электрический ток. Это означает, что тепло, которое подводится к горячему спаю металлической термопары, без труда распространяется к холодному спаю. Это повлечет за собой выравнивание температур обоих спаев и, следовательно, снижение величины генерируемой термо-э. д. с., поскольку она пропорциональна разности температур. Идеальным был бы материал, который являлся бы идеальным проводником электрического тока, будучи в то же время идеальным теплоизолятором.

Генератор, созданный на основе подобного материала, был бы, как это очевидно, чрезвычайно экономичным, поскольку в нем отсутствовало бы внутреннее сопротивление и он мог бы работать при очень больших разностях температур горячего и холодного спаев. Вряд ли нужно говорить, что такого идеального материала не существует, но в целом полупроводники гораздо ближе к нему, нежели металлы. (Горячая плазма различных видов еще больше приближается к нему, и «плазменные термопары» уже созданы. Но, поскольку их действие связано с термоионной эмиссией — «испарением» электронов с поверхности твердого тела,— их описание мы отложим до следующей главы.)

В целях существенного повышения выходной мощности и экономичности термоэлектрических генераторов можно использовать еще одновременно полупроводники обоих типов (*n* и *p*). В обеих ветвях носители зарядов перемещаются от горячего спая к холодному. Поскольку направлением электрического тока принято считать направление движения положительного заряда (противоположное движению отрицательного заряда), это означает, что в ветви из *p*-полупроводника ток пойдет от горячего спая к холодному, а в ветви из *n*-полупроводника — наоборот,

от холодного спая к горячему. В результате, как это ясно из фиг. 27,*а*, токи в обеих ветвях складываются. Если же носители зарядов в обеих ветвях положительны или отрицательны, то тогда токи в них взаимно противоположны, как на фиг. 27,*б* и *в*. Ситуация, показанная на фиг. 27,*в*, создается и в том случае, когда обе ветви изготовлены из металла; об этом мы уже говорили ранее (см. фиг. 23).

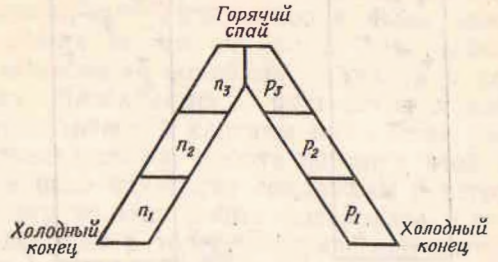
Договоренность о том, что направлением тока считается направление движения положительных зарядов, была нами принята только ради удобства. Результаты нисколько не изменятся — в этом читатель может удостовериться сам,— если мы поменяем на фиг. 27,*а, б* и *в*, направления всех токов на обратные. Как и прежде, в первом случае токи в обеих ветвях усиливают друг друга, а в остальных двух случаях остаются взаимно противоположными.

Высокие температуры и связанные с ними проблемы. Практически полупроводниковый термоэлектрический генератор должен состоять из множества термопар, соединенных последовательно, как это было показано на фиг. 24, только в данном случае в термобатарее поочередно ставятся ветви из полупроводников *n*- и *p*-типов, а не из двух различных металлов.

Дело осложняется тем, что свойства полупроводников изменяются с температурой, так что для любого данного материала наилучшее сочетание свойств существует лишь в небольшом интервале температур. С другой стороны, как мы уже знаем, чтобы получить высокое полезное напряжение на выходе из термопары, нужна большая разность температур между горячим и холодным спаями. Эту трудность можно принципиально преодолеть путем создания термоэлектрической батареи, в которой ветви поделены на ступени, изготовленные из двух различных материалов, каждый из которых наиболее эффективен в своем диапазоне температур (фиг. 28). Полупроводники для работы при температурах до 535°С уже созданы. Однако, по-видимому, понадобится температуру горячего спая довести до уровня выше 1100°С, приемлемого для промышленного термоэлектрического генератора.

При столь высоких температурах все известные нам полупроводники проявляют тенденцию к превра-

щению в собственно полупроводники, т. е. к переходу в такое состояние, в котором носители и положительных и отрицательных зарядов присутствуют поровну независимо от того, какой тип носителя преобладал при низких температурах. Посмотрим, что происходит в том случае, если вдоль полупроводника, который перешел в состояние собственно полупроводника, существует перепад температуры. Положительные и отрицательные заряды начнут перемещаться в равных



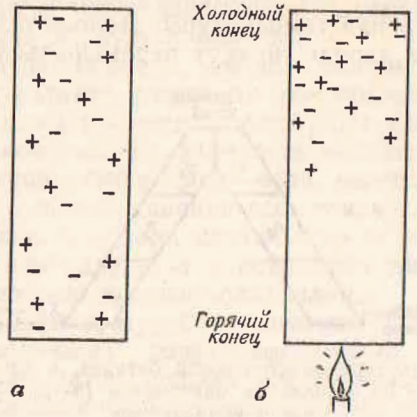
Фиг. 28. Часть термоэлектрической батареи, в которой каждый участок сделан из нескольких материалов (*n*- или *p*-типа) сообразно температуре.

Секции n_3 и p_3 изготовлены соответственно из материалов *n*- и *p*-типа, предназначающихся для работы при наиболее высоких температурах; секции n_2 и p_2 — из материалов, предназначающихся для работы при средних температурах, а n_1 и p_1 — для самых низких температур.

количествах от горячего конца к холодному, как это показано на фиг. 29. В результате суммарный заряд нигде накапливаться не станет, поскольку положительные и отрицательные заряды в точности уравновешивают друг друга. Таким образом, в полупроводнике, который стал собственно полупроводником, термо-э. д. с. не возникнет. Поэтому такое вещество совершенно бесполезно для целей термоэлектрического генерирования тока.

Но еще перед тем, как полупроводник станет собственно полупроводником, свойства, связанные с принадлежностью полупроводника к тому или иному типу, становятся все менее ярко выраженными в результате появления дополнительных носителей зарядов. Поэтому нельзя говорить о величине термо-э. д. с. вещества безотносительно к определенному интервалу температур. Таким образом, сделанное нами не-

сколько раньше заключение о свойствах теллурида висмута было неполным: если при обычных температурах это соединение обладает высокой термо-э. д. с., то при температурах выше 150° С оно это свойство утрачивает, так как материал становится собственно полупроводником.



Фиг. 29. Чистый полупроводник.

а — носители положительных и отрицательных зарядов присутствуют в равном количестве и равномерно распределены по одинаково нагретому стержню; *б* — нагревание чистого полупроводника с одного конца приводит к тому, что носители положительных и отрицательных зарядов перемещаются в одинаковом количестве к противоположному концу, благодаря чему ни тот, ни другой заряд не может накопиться в избытке, так что и термо-э.д.с. не возникает.

Понятно, что есть веские причины, побуждающие создать такие полупроводники, которые не превращались бы в собственно полупроводники при температуре около 1100° С. В настоящее время ведутся исследования многочисленных материалов; особенно усиленно этим занимается американская фирма «Вестингауз корпорейшн». Одним из наиболее перспективных способов, по-видимому, является присадка в малом количестве тщательно подобранных примесей к веществам, которые в естественном состоянии обладают свойствами изоляторов. Так, чистая окись никеля — изолятор, но если в нее ввести 3% лития, то она становится полупроводником. Очевидно, присутствие лития ведет к ослаблению сил, удерживающих электроны на орбитах вокруг ядер атомов никеля.

В результате под действием нагрева эти электроны легко отрываются и становятся носителями зарядов.

Пока еще поиски подобных новых полупроводников ведутся в известной мере наощупь. В одних случаях введение определенных примесей дает нужный эффект, а в других это ничего не дает. Кстати сказать, важно не только найти нужную примесь, ибо, по-видимому, здесь решающую роль играет пропорция, в которой эта примесь вводится. Элементарная теория полупроводников, которая была здесь изложена в общих чертах, не всегда дает удовлетворительное объяснение подобным капризам в поведении материала. Необходимость построения новой, более точной теоретической картины признается уже почти всеми специалистами, работающими в этой области.

Дальнейшие трудности сопряжены с изготовлением термопар из этих новых материалов и последующей их сборкой в термоэлектрические батареи. Эти операции нужно, разумеется, выполнять так, чтобы величина сопротивления в местах контакта различных материалов была как можно меньше, так как большое контактное сопротивление оказывало бы такое же действие, как и высокое внутреннее сопротивление вещества, т. е. снижало бы экономичность генератора.

При температурах 260—310° С термоэлектрические батареи нужно изолировать от воздуха, чтобы предотвратить коррозию, которая влечет за собой загрязнение спаев.

Хорошая конструкция предполагает вместе с тем выбор наивыгоднейшей формы термоэлектрической батареи, чтобы и тепловые, и электрические потери в ней не были чрезмерными. Так, для того чтобы тепловые потери были малы, каждый элемент должен иметь небольшое поперечное сечение. Это позволяет сократить утечку тепла от горячего спая к холодному. С другой стороны, площадь поперечного сечения нельзя сделать слишком малой, иначе она будет помехой электрическому току. Вообще говоря, для всякого материала надо искать свое наиболее эффективное решение по пути компромисса.

Использование ядерных реакторов для термоэлектрического генерирования тока. То, что говорилось до

сих пор, в равной мере приложимо и к термоэлектрическим генераторам, использующим тепло от атомного реактора. В последнем случае, однако, к осложнениям, вызываемым коррозией и высокими температурами, присовокупляется еще и опасность радиационного повреждения материалов.

Пока еще очень мало известно о том, как ведут себя термоэлектрические материалы под воздействием длительного интенсивного ядерного облучения, т. е. в условиях, которые существуют в крупном энергетическом реакторе. Одной из основных причин такого положения дел являлась нехватка реакторов, в которых можно было бы термоэлектрические материалы подвергнуть длительным испытаниям в условиях, воспроизводящих реальные условия эксплуатации. Правда, некоторые материалы, например окись никеля, обработанная литием, о которой мы уже упоминали, подвергались облучению в исследовательских реакторах и никакого заметного изменения своих термоэлектрических свойств при этом и впоследствии не претерпевали. Однако нельзя забывать, что многомесячное облучение в небольшом исследовательском реакторе может оказаться эквивалентным всего лишь нескольким суткам или даже часам облучения в крупном энергетическом реакторе, в котором поток излучений, могущих породить радиационное повреждение, куда интенсивнее [1]. В ближайшие год-два в Англии будут введены в действие несколько энергетических реакторов мощностью от $2 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^5$ *квт*. Следовательно, вскоре представится возможность испытывать термоэлектрические материалы в более строгих условиях, нежели это делалось до сих пор. Необходимой предпосылкой создания практически пригодного генератора являются материалы, срок службы которых измерялся бы многими месяцами. Вряд ли экономически целесообразно заменять термоэлементы чаще, нежели элементы с ядерным топливом.

Тем не менее если удастся найти такие термоэлектрические материалы, которые под действием продолжительного ядерного излучения при высоких температурах не будут чрезмерно загрязняться и сколько-нибудь существенно поглощать нейтроны [1], то атомный реактор как источник тепла должен обладать значительными преимуществами по сравнению с существующими способами сжигания топлива. Сжигание обычного топлива требует кислорода. Это означает, что к горелкам должна поступать непрерывная струя воздуха или кислорода, как это показано на фиг. 30,*а* и *б*. Горячие газообразные продукты сгорания уходят в дымовую трубу, так что уносимое ими тепло уже не используется для нагрева горячих спаев термоэлектрической батареи. Можно создать установку такой конструкции, в которой часть уходящего тепла газов расходовалась бы на обогрев вспомогательных котлов и т. д. Но, разумеется, еще экономичнее было бы вообще исключить утечку тепла в дымовую трубу [2].

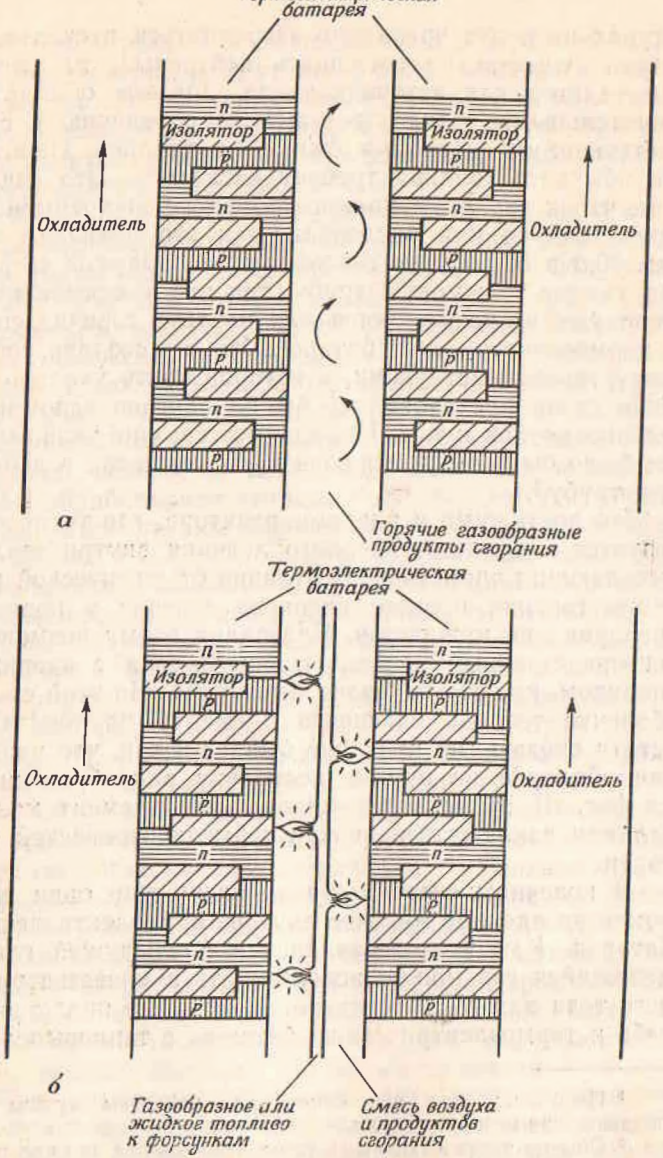
Это достижимо в ядерном реакторе, где тепло образуется в процессе ядерного деления внутри тепловыделяющих элементов. В отличие от химической реакции горения процесс ядерного деления в подводе кислорода не нуждается. Благодаря этому возможен непосредственный контакт горячего спая с ядерным топливом, как это показано на фиг. 31. На этой схеме оболочка тепловыделяющего элемента не показана; кстати сказать, на практике бывает и так, что подобная оболочка не нужна, поскольку в изображенной на фиг. 31 схеме тепловыделяющий элемент может целиком заключаться внутри термоэлектрической батареи.

В конечном счете можно сделать еще один шаг, поместив ядерное горючее внутрь термоэлектрической батареи. Как уже отмечалось в предыдущей главе, делящийся газ можно использовать в качестве рабочего тела для МГД-генератора; нетрудно представить себе и термоэлектрическую батарею с тепловыделяю-

[1] В специальных исследовательских реакторах достигается большая плотность потока излучений, чем в мощных энергетических. — *Прим. ред.*

[1] Поскольку, как уже отмечалось, нейтроны нужны для поддержания цепной реакции.

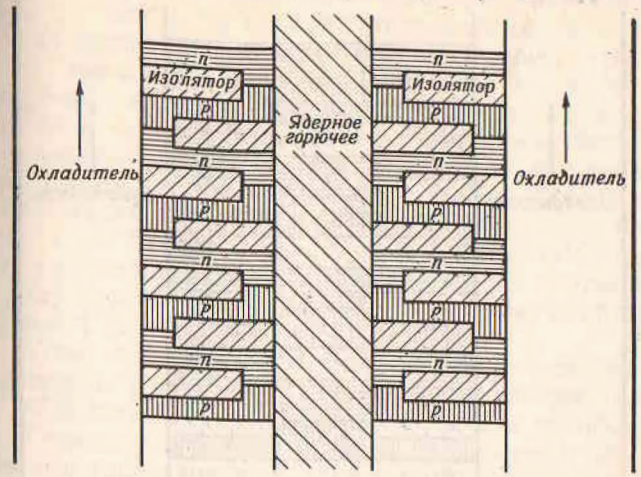
[2] Обычно тепло отходящих газов используется прежде всего для подогрева воздуха, тепло которого возвращается в топку. С другой стороны, и в ядерных реакторах малая глубина охлаждения газового теплоносителя нежелательна, так как при этом возрастает расход энергии на его перекачку. — *Прим. ред.*



Фиг. 30. Термоэлектрический генератор на обычном (химическом) топливе.

а — форсунка (не показана) расположена внизу, а газообразные продукты сгорания отдают тепло горячим спаям термоэлектрической батареи; *б* — форсунки размещены внутри установки на некотором расстоянии друг от друга. В обоих случаях бо́льшая часть тепла, выделяющегося при сгорании, уносится газами в дымовую трубу, т. е. практически тепло отходящих газов не используется.

щими (твердыми) термоэлементами. В данном случае годились бы такие материалы, как сульфиды урана и тория, поскольку они одновременно и являются делящимися веществами, и обладают полупроводниковыми свойствами. Правда, пока еще не известно,



Фиг. 31. Термоэлектрический генератор на ядерном горючем.

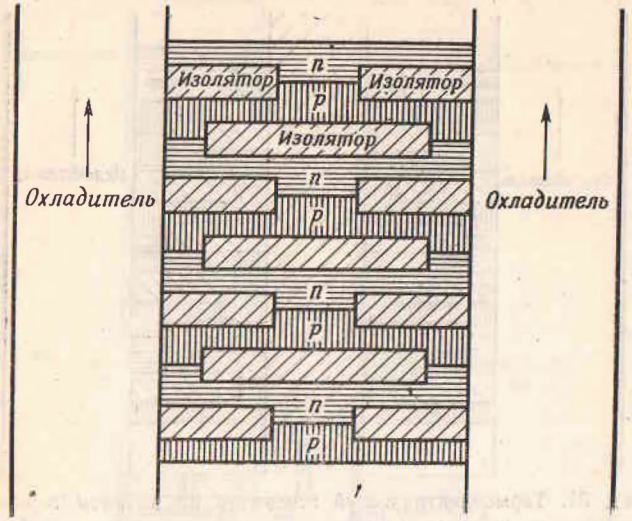
Термоэлементы расположены вокруг ядерного горючего; газообразных продуктов сгорания нет, следовательно, нет и потерь тепла с газами, уходящими в дымовую трубу.

сколь длительно они способны сохранять свои термоэлектрические свойства в условиях работающего ядерного реактора. На фиг. 32 показана схема «термоэлектрической батареи с тепловыделяющими термоэлементами». Заметим, что в ней нет отдельного элемента с ядерным топливом, поскольку тепло выделяется в процессе деления ядер в самих полупроводниках *n*- и *p*-типов, используемых в термоэлектрической батарее.

В термоэлектрических батареях, показанных на фиг. 31 и 32, внутренние спаи горячие, а омываемые охладителем внешние спаи холодные. Если поддерживать температуру горячих спаев на уровне, скажем, 1100° С, то для так называемых холодных спаев вполне достаточна температура порядка 540° С. В этом случае охладитель, омывающий спаи, нагрет достаточно для того, чтобы его можно было исполь-

зовать для производства пара, приводящего во вращение обычный турбогенератор.

Есть и другая схема, в которой термоэлектрический генератор сам использует отходы тепла от обычного турбогенератора. Эти отходы тепла есть не что



Фиг. 32. Термоэлектрический генератор без отдельного источника тепла, в котором сами термоэлементы сделаны из делящихся полупроводниковых материалов.

иное, как отработанный пар, температура которого составляет всего около 100° С [1]. При таком существенном ограничении температуры горячих спаев термоэлектрический генератор не может быть достаточно экономичным при работе в «последней ступени» установки. С другой стороны, такие низкие температуры и отсутствие радиационных воздействий [2] намного упрощают задачу создания требующихся материалов.

[1] В обычных конденсационных турбинах температура отработанного пара (при глубоком вакууме) имеет величину порядка 30—35° С. — *Прим. ред.*

[2] Даже если бы турбогенератор приводился в действие от ядерного источника тепла, термоэлектрическая «хвостовая» установка находилась бы за пределами реактора. «Головная» же установка, с другой стороны, должна находиться непременно внутри реактора. Она либо должна соприкасаться с ядерным горючим, либо должна сама состоять из ядерного горючего.

Существующее положение и перспективы. Как уже отмечалось, в стержне из материала с хорошими термоэлектрическими свойствами при разности температур на концах, равной 55° С, возникает термо-э. д. с. около 10 *мв*. Если разность температур довести, скажем, до 550° С, то термоэлектрические свойства материала исчезают. Но давайте предположим, что у нас есть термопара, в которой обе ветви составлены из коротких кусков различных материалов, каждый из которых эффективен в своем собственном интервале температур (см. фиг. 28). Предположим далее, что мы можем получить на выходе из такой термопары напряжение 100 *мв*, поддерживая между горячим и холодным спаями разность температур 550° С. Термоэлектрическая батарея, составленная из 10 таких термопар при последовательном соединении, дает напряжение 1 *в*.

Отсюда следует, что с термоэлектрическими генераторами, равно как и с топливными элементами или с МГД-генераторами, сопряжена задача преобразования постоянного тока низкого напряжения, получаемого в генераторах, в переменный ток высокого напряжения, который чаще всего нужен в практических нуждах. Эта общая задача рассматривается в гл. 8. Здесь же, однако, надо отметить, что если окажется возможным создать термоэлектрические генераторы, работающие внутри ядерных реакторов, то получение постоянного тока высокого напряжения, если таковой понадобится, уже не составит особого труда. В типичном ядерном энергетическом реакторе можно разместить 40—50 тыс. тепловыделяющих элементов; если в каждый такой элемент встроить термобатарею, вырабатывающую ток с напряжением 1—2 *в* и если эти термобатареи соединить последовательно, то на выходе можно получить напряжение, измеряемое многими тысячами вольт [1].

Для обрисовки существующего положения дел надо указать, что, когда писалась настоящая книга, уже демонстрировались с большим успехом лабораторные модели термоэлектрических генераторов, дававшие на

[1] Для этого потребуются изоляторы высокого напряжения, работающие внутри реактора. — *Прим. ред.*

выходе мощность от 1 *вт* до 10 *квт*. В этих моделях горячие спаи подогревались теплом от сжигания обычного топлива приблизительно так, как это было показано на фиг. 30. Проектные расчеты показывают, однако, что потери тепла с уходящими в трубу продуктами сгорания и другие практические недостатки должны снижать экономичность подобных генераторов, если их мощность сделать выше 10 *квт*. Для съема больших мощностей, по-видимому, потребуется прямой нагрев при условии, что тепловыделяющие элементы будут либо заключены, либо же встроены в термоэлементы.

Создание подобных генераторов должно зависеть, как мы видели, от исхода поисков материалов, которые сохраняли бы термоэлектрические свойства в условиях длительного ядерного облучения при высокой температуре. Было бы неверно, разумеется, исследовать экспериментально подряд все перспективные (и бесперспективные) материалы. Поэтому отбор материалов для испытаний должен исходить в большой мере из теоретических положений. Для этого, разумеется, от физиков-теоретиков потребуется расширить и уточнить представления о полупроводниках. Более детальное понимание того, что в них происходит, позволит нам исключить из работы по созданию новых термоэлектрических материалов поиски наощупь.

Между прочим, не упускается из вида и возможность использования жидких термоэлектрических материалов. В конечном счете они смогут найти себе применение при температурах, превышающих температуру плавления лучших твердых термоэлектрических материалов. Наиболее серьезными трудностями, которые придется преодолеть для того, чтобы можно было использовать жидкости при высоких температурах, являются коррозия и конвекция. Конвекция — это перенос тепла токами, циркулирующими в жидкости: жидкость, соприкасающаяся с горячим спаем, расширяется и становится менее плотной. Благодаря этому нагретая жидкость вытесняется более холодной и поднимается наверх. Более холодная жидкость в свою очередь начнет поглощать тепло и затем подниматься, уступая место у горячего спая менее нагретой жидкости. Таким образом установится постоянный отток жидкости от горячего спая к холодному. Разумеется, в жидкости, равно как и в твердом теле, перенос тепла происходит и благодаря обычной теплопроводности (перенос тепла вследствие колебаний атомов, а не вследствие переноса массы). Конвективный же перенос тепла возможен только в жидкостях и газах. Таким образом, в жидкости действуют два механизма переноса тепла от горячего спая к холодному — теплопроводность и конвекция. Это существенно осложняет задачу поддержания большой разности температур, необходимой для создания на выходе из батареи термо-э. д. с. достаточной величины.

Теоретический максимальный к. п. д. термоэлектрического генератора определяется характеристикой используемого в генераторе термоэлектрического материала. Эта характеристика складывается из таких свойств, как теплопроводность и электропроводность материала, а также величины термо-э. д. с., возникающей в нем при данной разности температур. При использовании находящихся сейчас в нашем распоряжении материалов максимальная теоретическая величина к. п. д. равна приблизительно 20%. Отдельные ученые считают, что, исходя из известных данных для существующих материалов, эту цифру можно довести до 30 и даже 35%.

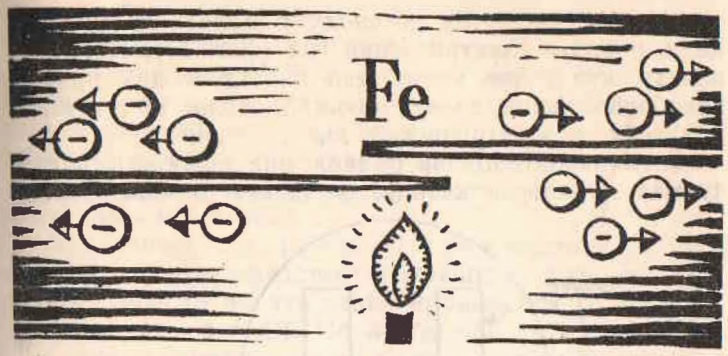
Важно, однако, не путать этот теоретически максимальный к. п. д. с к. п. д., который практически достижим в существующих устройствах (5—6%). В чем причина такой разницы?

Основная причина состоит в том, что, как мы уже видели, в генераторах, работающих на обычном химическом топливе, бóльшая часть тепла попросту уходит в трубу, не принимая участия в нагреве горячих спаев термоэлектрической батареи. Выработка энергии в промышленных масштабах требует того, чтобы реальный общий к. п. д. сделать как можно ближе к теоретическому максимуму. В связи с этим гораздо перспективнее в качестве источника нагрева выглядит ядерное, а не обычное химическое топливо.

Более низкий к. п. д. иногда приемлем для небольших установок, когда более важную роль играет не экономичность, а удобство, портативность и т. д. Это

относится, разумеется, к применению термоэлектрических генераторов в военной и ракетной технике. Наряду с тем существуют достаточно широкие возможности использования небольших термоэлектрических генераторов и в быту. Нетрудно представить себе все разнообразие применений таких установок, которые и работают бесшумно, и не нуждаются в присмотре, так как в них отсутствуют движущиеся детали. Общество борьбы с шумом будет наверняка довольно машинками для стрижки газонов с приводом от термоэлектрического генератора, которые восстановят в какой-то мере мир и тишину в пригородах во время уик-энда [1].

[1] Уик-энд — дословно «конец недели». Так называется вторая половина субботы вместе с воскресеньем. — *Прим. перев.*



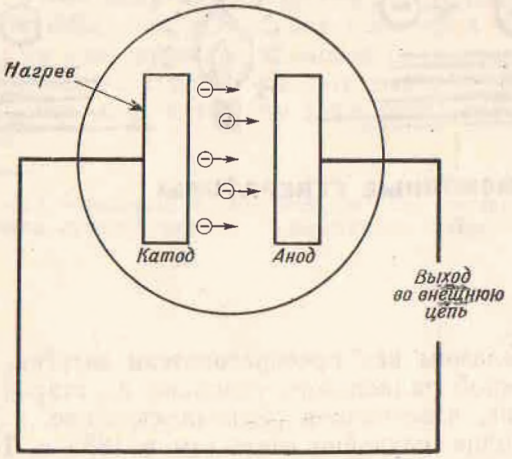
6. ТЕРМОИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Радиолампы как преобразователи энергии. Действие обычной радиолампы основано на старейшем из принципов, известных в радиоэлектронике, а именно на принципе, случайно открытом в 1883 г. Томасом Эдиссоном — известным изобретателем, который к моменту кончины в возрасте 84 лет в 1931 г. был обладателем 1300 с лишним патентов. Когда Эдиссон работал над созданием электрической лампы, он делал в каждой колбочке по две независимые нити накаливания, включая в цепь каждый раз по одной нити. Когда первая нить перегорала, изобретатель поворачивал лампу в патроне и таким образом включал в цепь вторую нить накаливания. Испытывая эти лампы, Эдиссон обнаружил, что и с той нити, которая не включена в цепь, можно снимать слабый электрический ток. Выяснилось, что через вакуум в колбе электрической лампы от нагретой нити к холодной проходит некоторое количество электричества. Колбочка электрической лампы действовала как радиолампа (диод [1]), в которой при нагреве катода с его поверхности как бы «испаряются» электроны. Эти

[1] Радиолампы различают по числу электродов: диод имеет два электрода (анод и катод); триод — три электрода, тетрод — четыре и т. д.

электроны движутся к аноду и далее по внешней цепи, образуя электрический ток (фиг. 33). Нетрудно видеть, что такое устройство действует как прямой преобразователь, превращающий тепло, подведенное к катоду, в электрический ток на аноде.

В типичной диодной радиолампе мощность, расходуемая на нагрев катода, достигает приблизительно



Фиг. 33. Основной принцип работы термоионного генератора. Электроны, «испаряющиеся» с поверхности катода, движутся к аноду, образуя электрический ток.

10 *вт*, тогда как снимаемая с анода выходная мощность составляет около 1 *мквт*. Таким образом, расходуемая на нагрев мощность превышает мощность на выходе из лампы приблизительно в 10^7 раз! Иначе говоря, к. п. д. такого диода, если рассматривать его как термоэлектрический преобразователь, равен 0,00001%!

Такая исключительно малая величина к. п. д. не играет существенной роли при использовании диода по его прямому назначению (в качестве выпрямителя) в радиоаппаратуре, где потребная сила тока не превышает нескольких микроампер. Но при промышленной выработке электроэнергии к. п. д. даже в миллион раз больше был бы слишком низок, чтобы подобное устройство можно было рассматривать

всерьез. Может показаться, что это слишком трудновыполнимый заказ — повысить величину к. п. д. в миллион с лишним раз. Тем не менее это было сделано. В последних экспериментах с диодными преобразователями энергии их к. п. д. удалось довести до 20%. Это уже начинает выглядеть достаточно перспективным в целях экономичной выработки электроэнергии в крупных масштабах.

Величина к. п. д., разумеется, не единственная проблема, которую предстоит разрешить. Мы еще вернемся к другим практическим трудностям (к высоким температурам и т. д.). Но, чтобы понять, каким образом можно достичь такого колоссального повышения величины к. п. д., нужно сначала ознакомиться несколько подробнее с тем, что же происходит внутри диодной лампы.

Электроны в диоде. Как уже отмечалось в предыдущей главе, электрический ток в металлах образуют свободные электроны, не связанные с атомами, а в 1 $см^3$ хорошего металлического проводника их насчитывается около $6 \cdot 10^{21}$. Даже когда макроскопический ток существует, эти электроны находятся в хаотическом движении, которое убыстряется с повышением температуры. При обычных температурах электроны не могут вылететь из металла: им мешает электрический потенциальный барьер на поверхности металла. Этот потенциальный барьер возникает в результате того, что на электрон вблизи поверхности действует сила притяжения неподвижных[1] положительных зарядов атомов металла. Электрон, находящийся в глубине металла, окружен со всех сторон положительными зарядами, как это показано на фиг. 34,*а*. Такой электрон не испытывает никакого результирующего притяжения, поскольку действие всякого положительного заряда, притягивающего электрон, скажем, справа, уравновешивается действием положительного заряда, притягивающего электрон слева; каждому положительному заряду, расположенному над электроном или перед ним, соответствует положительный

[1] Положительно заряженные атомы «неподвижны» в том смысле, что они не могут перемещаться так, как перемещаются электроны, но они быстро колеблются около своего среднего положения.

заряд, расположенный под электроном или за ним. А на электрон, который находится в непосредственной близости от поверхности (фиг. 34,*б*), приходится гораздо больше положительных зарядов, тянущих его назад в глубь металла, нежели зарядов, которые тянули бы его к поверхности. На электрон, который,



Фиг. 34. Для электрона, находящегося глубоко внутри металла, равнодействующая сил притяжения равна нулю, а индивидуальные силы притяжения окружающих положительных зарядов взаимно уравновешиваются (*а*); на электрон, находящийся в металле у самой поверхности, действует результирующая сила, которая загоняет его в глубь металла (*б*); на электрон же, находящийся у самой поверхности снаружи металла, действует сила, притягивающая его к поверхности: все положительные заряды, располагающиеся в металле, притягивают его в одном и том же направлении (*в*).

вылетев из металла, находится вблизи поверхности, действует совокупная сила всех положительных зарядов, которая затягивает его обратно в металл.

Таким образом, электрону, чтобы безвозвратно вылететь из металла, необходимо покинуть его поверхность со скоростью, достаточной для того, чтобы удалиться за пределы действия сил притяжения. Для этого недостаточно просто покинуть поверхность и остаться в состоянии покоя вблизи нее. В этом случае электрон будет немедленно притянут обратно в металл. Энергия, необходимая для того, чтобы безвозвратно оторвать электрон от поверхности, называется *работой выхода* рассматриваемой поверхности. Для материалов, из которых делаются катоды типичных диодов, работа выхода равна нескольким вольтам.

Как уже упоминалось, при комнатной температуре ни один электрон внутри катода диодной лампы не

может приобрести за счет хаотических соударений энергию, достаточную для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер и оторваться от поверхности металла. Когда же катод нагревается, хаотическое движение электронов ускоряется до такой степени, что некоторые электроны приобретают энергию, достаточную для «испарения» с поверхности катода и ухода в вакуумированное пространство между электродами. (Этот процесс фактически весьма напоминает испарение молекул воды с поверхности кипящей [1] воды.) Это «испарение» электронов на техническом языке называется *термоэлектронной эмиссией*. Иногда это явление в честь первооткрывателя называют еще и *эффектом Эдиссона*.

С термоэлектронной эмиссией тесно связано имя и покойного профессора Ричардсона. Его знаменитый закон связывает плотность эмиссионного тока [2] с температурой, работой выхода и т. д. При прочих равных условиях эмиссионный ток с повышением температуры катода резко возрастает.

Общее представление о судьбе электронов, вылетевших с катода диодной лампы, дает фиг. 35,*а*. Потенциал внутри материала катода принимается равным нулю, а величина потенциального барьера поверхности (работа выхода) обозначена через V. Когда катод нагревается, электроны, энергия которых превышает V, вылетают в пространство между катодом и анодом. Когда электрон долетает до анода, он проходит через потенциальный барьер, соответствующий *анодной* работе выхода U. Высвободившаяся при этом энергия вновь преобразуется в тепло, которое нагревает анод. Но если анодная работа выхода меньше работы выхода на катоде, остается некоторое количество энергии $V-U$ (в примере, приведенном на фиг. 35,*а*, эта разность равна 2 *в*), которую можно отвести во внешнюю цепь и использовать для совершения полезной работы.

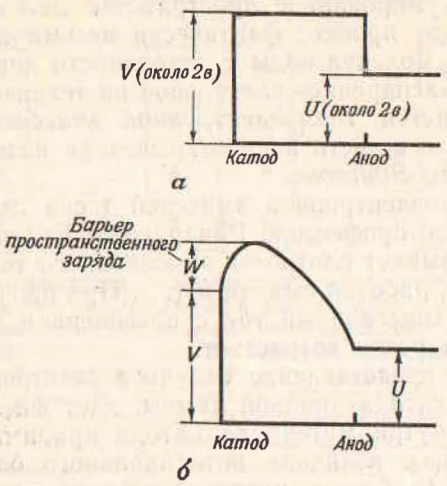
---

[1] Строго говоря, испарение с поверхности наблюдается и для некипящей воды; при кипении пузырьки возникают на поверхности нагрева, а основная часть жидкости испаряется внутрь этих пузырьков. — *Прим. ред.*

[2] Число электронов, испускаемых ежесекундно с каждого квадратного сантиметра поверхности катода.

Это описание чересчур упрощено, так как мы пренебрегли двумя явлениями — «обратной эмиссией» и действием «пространственного заряда».

Обратной эмиссией называется эмиссия электронов с поверхности анода. Этот эмиссионный ток противоположен основному току и, следовательно, снижает выходную мощность диода. Обратную эмиссию



Фиг. 35. График потенциальной энергии электронов в термоионном диоде.

а — без учета пространственного заряда; *б* — с учетом пространственного заряда.

можно уменьшить, поддерживая анод при как можно более низкой температуре. К этому обстоятельству мы еще вернемся в следующем разделе.

Пространственный заряд возникает в результате взаимного отталкивания электронов [1]: электрон, вылетевший из катода, оказывается в окружении целого роя других электронов, обладающих такими же по знаку зарядами. Эти электроны, естественно, отталкивают друг друга. В результате бо́льшая часть электронов возвращается обратно в катод, так и не достигнув анода.

[1] Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные заряды притягивают друг друга. Так, электрон, притягиваемый положительными зарядами, отталкивается другими электронами.

Более реальный график потенциальной энергии для диода с учетом действия пространственного заряда показан на фиг. 35,*б*, из которой видно, что преодолеть барьер пространственного заряда и добраться до анода могут только те электроны, энергия которых равна или больше $V + W$. Учитывая статистическое распределение уровней энергий электронов, вылетающих из катода, мы можем предполагать, что часть из них обладает достаточной энергией для того, чтобы достичь анода. Но, как правило, это — ничтожная доля всех испускаемых электронов. Отсюда следует, что величина анодного тока существенно ограничивается пространственным зарядом. В этом и заключается основная причина очень малой величины к. п. д. обычной диодной радиолампы.

Пути повышения коэффициента полезного действия. Теперь мы можем перечислить основные условия достижения большой величины к. п. д. и повышения мощности термоионного преобразователя: 1) высокая температура катода; 2) большая работа выхода с катода V (до определенного предела [1]); 3) низкая температура анода; 4) малая величина работы выхода с анода U; 5) нейтрализация или устранение пространственного заряда.

Естественно, что перечисленные выше критерии не являются взаимно независимыми. Поэтому при конструировании реальных преобразователей приходится искать компромиссные решения. Так, повышение температуры катода влечет за собой повышение температуры анода, поскольку анод нагревается тепловым излучением с катода, а уменьшение пространственного заряда влияет на величину работы выхода с электродов (подробнее об этом говорится несколькими страницами дальше).

Современные поиски материалов для катодов направлены на то, чтобы объединить большую величину работы выхода со способностью выдерживать

[1] Подробное исследование, выходящее за пределы этой книги, показывает, что к. п. д. по мере увеличения V растет не бесконечно, а достигает некоторого максимума при определенной (высокой) величине V. С другой стороны, работа выхода с анода всегда должна быть как можно меньше, чтобы предотвратить обратную эмиссию.

высокие температуры (до 2200°С) без существенного испарения, расплавления или других механических разрушений. За критическую скорость испарения катода обычно принимается скорость, соответствующая испарению слоя материала толщиной 0,127 *мм* за 1000 час при рабочей температуре; всякий материал, испаряющийся быстрее, считается непригодным.

От анодных материалов требуется сочетание малой величины работы выхода с хорошей отражательной способностью по отношению к инфракрасному (тепловому) излучению. Последнее свойство необходимо для того, чтобы предотвратить чрезмерный нагрев анода под действием теплового излучения катода и таким образом максимально ослабить обратную эмиссию. Как правило, рабочая температура анода должна быть на 550—1100° С ниже рабочей температуры катода.

Таблица 3

Характеристики катодных материалов

Катодный материал	Работа выхода V, *в*	Температурный диапазон, °С
Вольфрам, пропитанный барием	1,7	870—1200
Торий на вольфрамовой основе	2,55	1760—1980
Цезий на вольфрамовой основе	1,7	1370—1600

Таблица 4

Характеристики анодных материалов

Анодный материал	Работа выхода U, *в*
Окись бария или окись стронция на никелевой основе	1,0
Цезий на основе окиси серебра	0,75
Цезий на основе окиси вольфрама	0,71

В табл. 3 и 4 указаны свойства некоторых типичных материалов, из которых делаются электроды. Эти

цифры по необходимости носят приближенный характер, поскольку условия на поверхности электрода (а следовательно, и работа выхода из него) изменяются в зависимости от характера использования катода.

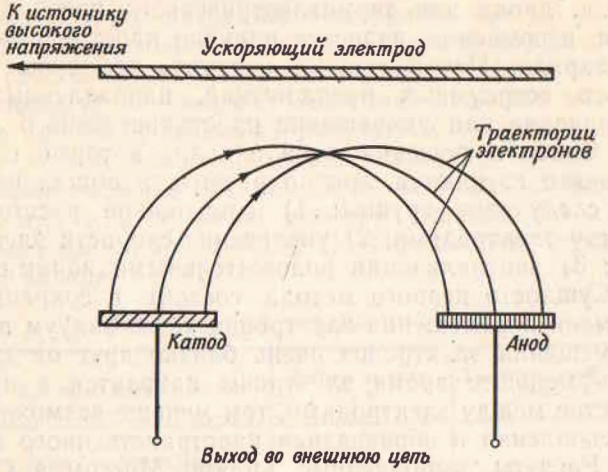
Устранение пространственного заряда. Самым важным обстоятельством, ограничивающим величину к. п. д. диода как термоэлектрического преобразователя, несомненно, является наличие пространственного заряда. Неудивительно поэтому, что существует много остроумных предложений, направленных на устранение или уменьшение пространственного заряда. Способы решения этой задачи, которые сейчас серьезно изучаются, можно разбить в общих чертах на следующие группы: 1) сокращение расстояния между электродами; 2) увеличение скорости электронов; 3) нейтрализация положительными ионами.

Сущность первого метода состоит в сокращении времени перемещения электронов через вакуум путем размещения электродов очень близко друг от друга: чем меньшее время электроны находятся в пространстве между электродами, тем меньше возможность их скопления и образования пространственного заряда. Расчеты, выполненные Хилари Моссом в США, показали, что для устранения пространственного заряда нужно, чтобы расстояние между электродами (если предположить, что они представляют собой параллельные плоскости) не превышало 0,0127 *мм*. Когда эти расчеты были опубликованы (1957 г.), повсеместно считалось, что точно выдержать такое расстояние без риска короткого замыкания из-за соприкосновения электродов нельзя. Даже если бы и можно было сделать электроды достаточно плоскими и установить их с достаточной точностью, то они, как считалось, неизбежно покоробились бы в результате длительной работы при высокой температуре.

Однако технический прогресс в этой области столь стремителен, что через год с небольшим появились анодные лампы с межэлектродным расстоянием даже меньшей величины. Они демонстрировались в лабораториях Массачусетского технологического института и фирмы «Термоэлектрон энжиниринг корпорейшн». К концу 1960 г. американская фирма «Дженерал

электрик» выпустила в продажу диодные преобразователи специального назначения мощностью 1 *вт* с межэлектродным расстоянием подобной же величины.

Теперь выясняется, что предел характеристики диода с малым межэлектродным расстоянием будет, видимо, определяться уже другим обстоятельством.



Фиг. 36. Магнитный триод-преобразователь.

Катод и анод располагаются рядом; ускоряющий электрод разгоняет электроны до большой скорости; их траектории отклоняются к аноду магнитным полем, перпендикулярным плоскости чертежа (витки создающей поле обмотки не показаны).

При столь малом зазоре между электродами большая часть вещества, испаряющегося с поверхности катода, будет конденсироваться на аноде. Это означает, что со временем работа выхода на аноде и работа выхода на катоде станут выравниваться. Это повлечет за собой снижение выходной мощности, поскольку, как показано на фиг. 35, выходное напряжение равно $V—U$, т. е. разности между работой выхода с анода и работой выхода с катода.

Второй способ устранения пространственного заряда основан на принципе, который первоначально был применен в магнетронах радиолокаторов. На фиг. 36 показано, как этот принцип используется в термоионном преобразователе, называемом магнитным триодом. Этот прибор получил название триод, а не диод потому, что в нем, как это показано на схеме, имеются три электрода. Катод и анод располагаются в данном случае рядом, а против них установлен ускоряющий электрод. Высокое напряжение, приложенное к ускоряющему электроду, сообщает электронам большую скорость. Однако действие магнитного поля, силовые линии которого направлены перпендикулярно к направлению движения электронов, отклоняет их к аноду. (Такой характер движения электронов в магнитном поле является одним из следствий законов электромагнитной индукции Фарадея, которые мы рассматривали в гл. 4.) Источник тока высокого напряжения и питание обмотки электромагнита (на фиг. 36 он не показан) представляют собой энергетические потери. В существующих установках эти потери слишком велики, так как для съема большой выходной мощности нужен ток высокой плотности.

Сущность первого и второго методов состоит в том, что мы *удаляем* пространственный заряд, не позволяя электронам скапливаться в межэлектродном пространстве. Суть третьего способа — *нейтрализация* пространственного заряда электронов путем ввода в зазор между электродами равного количества положительных ионов. Их можно вводить посредством вспомогательного заряда или генерировать в пространстве между электродами. Испытывались оба способа: последний, как это само собой очевидно, является более прямым и, по-видимому, окажется более эффективным.

Генерирование положительных ионов в межэлектродном пространстве можно осуществить путем ввода в это пространство соответствующего газа под низким давлением. Под «соответствующим» в данном случае понимается такой газ, который легко ионизуется. Потенциал ионизации газа — это энергия (в вольтах), потребная для того, чтобы оторвать внешний электрон от одного атома газа (в результате образуется положительный ион и свободный электрон). Если потенциал ионизации меньше, чем работы выхода с катода, т. е. меньше, чем энергия электронов, испускаемых катодом, то атомы газа будут

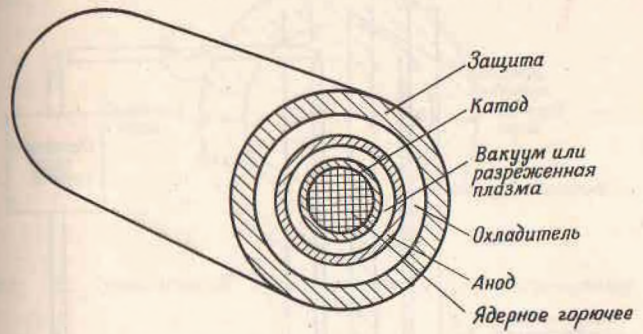
ионизоваться в результате соударений с такими электронами. При этом образуется плазменное облачко, простирающееся от катода до анода.

Чтобы обеспечить полную нейтрализацию, надо, чтобы ионная плотность равнялась средней электронной плотности с учетом того обстоятельства, что электроны, включая и те, которые образуются в результате ионизации газа, непрерывно движутся к аноду, тогда как гораздо более тяжелые положительные ионы остаются сравнительно неподвижными. Исходя из этого требования, можно рассчитать необходимое давление газа. Естественно, оно зависит и от рабочей температуры, и от плотности тока, но характерные величины давления газа укладываются в диапазон от одной тысячной до одной миллионной доли атмосферного давления. В подобном диоде в качестве газа обычно используют пары цезия, потенциал ионизации которого равен 3,89 *в*, а катод делают из вольфрама, работа выхода для которого равна 4,52 *в* (в настоящее время ведутся усиленные испытания и других катодных материалов).

Поверхность катода должна обладать большой работой выхода. Это требование влечет за собой необходимость использования очень высоких температур (выше 1650° С), чтобы обеспечить нужную интенсивность эмиссии электронов. Поскольку температура сгорания существующих топлив весьма ограничена и поскольку использование этих топлив сопряжено с потерями тепла от конвекции (с уходящими в трубу продуктами сгорания), о чем мы уже говорили в связи с термоэлектрическими генераторами, надо полагать, что наилучшие результаты цезиевый диод должен обеспечивать тогда, когда источником тепла служит ядерное горючее или, быть может, в конечном счете солнечное излучение.

Ядерные термоионные преобразователи. Впервые прямое преобразование тепла от деления ядер в электричество было осуществлено с помощью плазменного диода, установленного в экспериментальном реакторе Лос-Аламосской лаборатории в 1959 г. (фиг. 37). Центральный тепловыделяющий элемент представлял собой твердый раствор (т. е. однородную смесь молекул) карбида циркония и карбида урана. Его рабо-

чая температура поддерживалась на уровне 2200° С. (Собственно ядерным горючим служил уран, а остальные компоненты вводились постольку, поскольку они обладали высокой жаростойкостью и слабо поглощали нейтроны.) Во время первой публичной демонстрации, на которой присутствовало много представителей прессы, электрической энергии, выработанной в этом



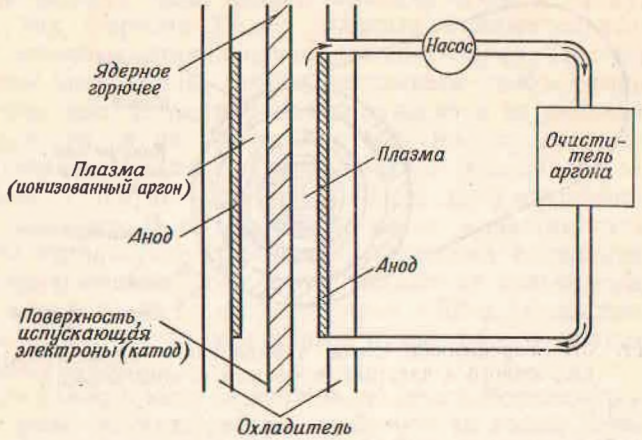
Фиг. 37. Упрощенная схема термоионного преобразователя, встроенного в ядерный тепловыделяющий элемент.

преобразователе, хватало лишь на то, чтобы зажечь 30-ваттную лампочку. Достигнутый тогда наивысший к. п. д. преобразования теплоты в электрическую энергию равнялся 15%. С тех пор его удалось повысить до 17%; расчеты показывают, что к. п. д. можно довести приблизительно до 40%.

Вслед за первой демонстрацией в Лос-Аламосе плазменный диод иной конструкции был создан в лаборатории фирмы «Дженерал атомикс». При нагреве катода до 1925° С диод давал на выходе мощность 90 *вт*. В этом случае к. п. д. преобразования тепла, выделяющегося в процессе ядерного деления, в электрическую энергию составлял 10%. Однако есть основания полагать, что его величину можно без особых затруднений существенно повысить, используя часть выделяющегося на аноде тепла.

В атомном реакторе всегда присутствуют такие ионизующие агенты, как гамма-излучение и осколки ядер. Их можно использовать для усиления ионизации разреженного газа в плазменном диоде. Основ-

ная причина, по которой в диоде используется газообразный цезий,— малый ионизационный потенциал (хотя, как оказалось, цезий обладает и другими полезными свойствами: он усиливает катодную эмиссию и несколько снижает работу выхода с анода). Но при том изобилии ионизующих агентов, которое существует в реакторе, уже нет необходимости выбирать

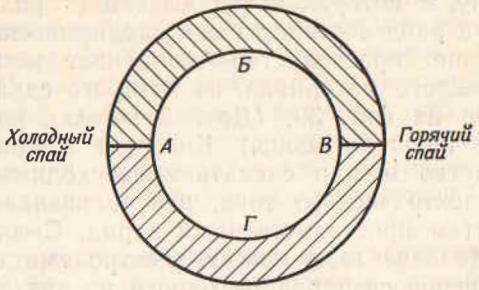


Фиг. 38. Ядерный термоионный преобразователь, в котором плазма непрерывно прокачивается через очиститель для удаления «ядовитых» продуктов деления.

для преобразователя, работающего на ядерном топливе, только такой газ, который легко ионизуется. В настоящее время с успехом проводятся эксперименты с газами, менее агрессивными по сравнению с цезием и в то же время довольно легко ионизирующимися. Например, аргон (инертный газ) обладает тем преимуществом, что он мог бы непрерывно циркулировать, как это показано на фиг. 38, между диодным преобразователем и блоком химической очистки, предназначенным для удаления из аргона газообразных продуктов деления, «отравляющих» реактор (т. е. сильно поглощающих нейтроны). Большая коррозионная активность цезия намного осложняет его использование в схеме с подобной циркуляцией.

Сравнение с термопарой. Сопоставление термоионных и термоэлектрических установок прямого пре-

образования энергии вскрывает некоторые причины большей экономичности установок первого рода. Рассмотрим изображенную на фиг. 39 термопару, в которой ветви *АБВ* и *АГВ* сделаны из разных термоэлектрических материалов. Если спаи *А* и *В* поддерживать при разных температурах, то по цепи *АБВГ*



Фиг. 39. Термоионный преобразователь, рассматриваемый как термопара.

потечет электрический ток. Напряжение этого тока будет прямо пропорционально разности температур горячего и холодного спаев. При некоторой заданной разности температур это напряжение будет гораздо ниже, если термопару изготовить не из самых лучших (полупроводниковых) материалов, а из металлов. Более того, поскольку металлы обладают хорошей теплопроводностью, они затрудняют поддержание большого температурного перепада. Поэтому напряжение, даваемое металлическими термопарами, всегда очень невелико.

Конечно, если бы ветви изображенной на фиг. 39 термопары сделать из теплоизолирующего материала, то между *А* и *В* можно было бы поддерживать большой перепад температуры. Но обычные теплоизолирующие материалы являются вместе с тем и электрическими изоляторами. Следовательно, в такой «термопаре» ток просто не мог бы возникнуть.

Идеальным был бы такой материал, который сочетал бы в себе свойства совершенного проводника электричества и совершенного теплоизолятора. Таких идеальных материалов в природе не существует, но полупроводники — это один шаг в нужном на-

правлении. Поэтому-то они и используются для создания термоэлектрических генераторов, как мы это видели в гл. 5. Но даже и в этом случае к. п. д. подобных генераторов в настоящее время не превышает 5—6%.

Термоионный диод можно рассматривать как термопару, в которой катод выполняет роль горячего спая, а анод соответствует холодному спаю. Межэлектродное пространство выполняет роль термоэлектрического материала, из которого сделана одна из ветвей на фиг. 39. (Другой ветвью, разумеется, является внешняя цепь.) Как мы убедились, это пространство можно сделать превосходным проводником электрического тока, нейтрализовав тем или иным путем пространственный заряд. С другой стороны, давление газа между электродами столь мало, что переноса тепла от одного из них к другому путем теплопроводности по сути дела не наблюдается. Таким образом, единственный механизм переноса тепла от катода к аноду (от горячего спая к холодному в термоэлектрической аналогии) — тепловое излучение. А его можно существенно ослабить посредством соответствующих экранов[1]. Иными словами, зазор между электродами очень сходен по свойствам с идеальным термоэлектрическим материалом. По этой причине и надо полагать, что к. п. д. термоионных генераторов можно сделать больше, чем у термопары, изготовленной из твердых термоэлектрических материалов. И, действительно, как мы уже видели, к. п. д. термоионной установки уже доведен до 17% с лишним.

Другое преимущество плазмы как термоэлектрического материала заключается в том, что она не снижает выходного напряжения при высоких температурах, как это свойственно полупроводникам, в которых количество носителей положительных и отрицательных зарядов, как мы уже говорили, с повышением температуры уравнивается. Положительно заряженные атомы, конечно, всегда присутствуют в плазме в том же количестве, что и электроны,

[1] В принципе некоторое количество тепла может передаваться и по внешней цепи, но практически оно пренебрежимо мало.

но они столь массивны по сравнению с электронами, что их перемещением можно пренебречь и считать, что электрический ток создается движением одних электронов.

Сходство термоионных преобразователей с термоэлектрическими позволяет иногда называть плазменный диод «плазменной термопарой». Нельзя забывать, однако, о том, что свободные электроны в диоде создаются благодаря термоионной эмиссии с катода. В настоящей термопаре никакого сходства с этим процессом не существует, так что об аналогии в данном случае говорить не приходится. По этой причине термоионное и термоэлектрическое преобразования обычно рассматриваются как разные методы.

Существующее положение и перспективы. Большая величина к. п. д. термоионных преобразователей по сравнению с термоэлектрическими преобразователями достигается, разумеется, ценой повышения рабочей температуры. Мы уже отмечали трудности поддержания в термоэлектрических генераторах температур выше 1100°С в случае использования обычного химического топлива. В самых экономичных термоионных генераторах необходимы температуры порядка 1650—2200°С. Здесь эти трудности соответственно возрастают. Отсюда следует, что источником тепла должно быть ядерное топливо, во всяком случае там, где речь идет о выработке электроэнергии в больших масштабах (маломощные генераторы специального назначения рассматриваются несколько дальше).

Существующее положение с плазменными диодами как прямыми преобразователями тепла, выделяющегося в процессе ядерного деления, характеризуется, как мы уже упоминали, следующими значениями мощностей и величины к. п. д.: мощность менее 100 *вт* при к. п. д. процесса преобразования от 15 до 20%. Кроме того, надо отметить, что такие характеристики поддерживались лишь на протяжении нескольких часов непрерывной работы экспериментальных установок. И все же эти опыты сыграли большую роль, ибо они показали, что подобный преобразователь способен вырабатывать электроэнергию при больших плотностях тока и соответству-

ющем напряжении в реальных условиях, существующих внутри реактора.

Выбор наивыгоднейших размеров установки и температур, создание материалов, способных длительное время служить при высоких температурах внутри реактора,— все эти проблемы еще предстоит решить, прежде чем плазменный диод можно будет рассматривать как промышленный генератор электроэнергии, способный конкурировать с генераторами других типов. И хотя в настоящее время общие размеры ядерного диодного преобразователя более или менее сопоставимы с размерами топливного элемента (длина около 30 *см* и диаметр около 2,5 *см*), тем не менее относительная площадь поверхностей катода и анода, а также величина зазора между ними способны решающим образом повлиять на величину плотности тока и, следовательно, на эффективность преобразователя.

Особенно остра проблема материалов, и не только потому, что температура на катоде должна быть высокой, но и потому, что газообразный цезий оказывает коррозионное воздействие. Поэтому сейчас усиленно ведется исследование иных методов использования плазмы в генераторах электричества. Как мы уже упоминали, перспективным направлением надо считать ионизацию под действием осколков ядер, образующихся в процессе ядерного деления. Надо сказать, что обычно эти осколки сильно поглощаются там же, где они и возникают, т. е. в массе ядерного горючего. Поэтому пока неясно, удастся ли «впрыскивать» их в межэлектродное пространство в достаточном количестве. Эта же проблема возникает и в связи с преобразователями энергии иного рода — ядерными элементами. Мы рассмотрим ее в следующей главе, когда перейдем к обсуждению этого устройства.

В поисках подходящих катодных материалов больше всего внимания до сих пор уделялось вольфраму и танталу. Теперь исследуются многие такие жаростойкие соединения, как карбиды и нитриды. Но даже и после создания долговечных катодов останутся еще нерешенными проблемы материалов для различных деталей конструкции установок, в

частности для коррозионностойких герметических уплотнений.

Впрочем, довольно говорить о трудностях — они существенны, но вовсе не непреодолимы; за их преодоление серьезно берутся многие лаборатории во всем мире.

Большим достоинством плазменного диода как преобразователя ядерного тепла является простота его устройства: тепловыделяющий стержень служит катодом, оболочка стержня — анодом, а зазор между ними заполняется плазмой (см. фиг. 37). Более того, поскольку температура анода сравнительно велика, тепло, отводимое в охлаждающую реактор жидкость, можно легко использовать для нагрева в термоэлектрическом или обычном турбогенераторе. В предшествующей главе мы уже упоминали о схеме, в которой за термоэлектрическим генератором ставится турбогенератор; подобным же образом термоионный генератор (плазменный диод) можно, хотя бы в принципе, объединить с термоэлектрическим генератором, создав «каскадную» схему, в которой термоионный ядерный преобразователь отдает со своего анода тепло при температуре около 1100°С горячим спаям термоэлектрического генератора, а его «холодные» спаи при температурах до 535°С питают теплом котельную установку обычного турбогенератора. Создание подобной системы — для этого потребуется, разумеется, эффективное сочетание всех достижений электроники, реакторостроения и современной энергетики — позволит довести общий к. п. д. установки до уровня не ниже 60% (по сравнению с 40% на самых экономичных современных электростанциях).

Подобно другим рассматривавшимся здесь устройствам прямого преобразования, если только не считать реактора с пульсирующей плазмой, термоионный генератор служит источником постоянного тока большой силы и низкого напряжения; мы можем, например, говорить об установке мощностью 1 *квт*, дающей ток 1000 *а* при напряжении 1 *в*. Обзор способов преобразования прямого тока в переменный дан в гл. 8. Но уже здесь уместно заметить, что в случае термоионных генераторов можно, ис-

пользуя их сходство с радиолампами, осуществлять преобразование прямого тока непосредственно в самой установке. И действительно, иногда в диодном преобразователе энергии возникают явно самопроизвольные колебания выходной мощности. Но, разумеется, данное явление нельзя положить в основу способа выработки переменного тока до тех пор, пока мы, раскрыв причину возникновения этих колебаний, не научимся управлять ими.

На протяжении всей главы мы основное внимание обращали на термоионные генераторы, предназначающиеся для выработки электроэнергии в крупных промышленных масштабах. Позвольте завершить ее несколькими замечаниями о более специализированных термоионных генераторах.

Мы уже упоминали о вакуумном диоде с очень малой величиной межэлектродного пространства, выпущенном в продажу американской фирмой «Дженерал электрик». Имея выходную мощность 1 *вт*, этот преобразователь по своим габаритам сравним с серебряным долларом[1] и весит всего около 85 *г*. Рабочие температуры катода и анода соответственно равны 1100 и 600°С. В данной модели в электричество превращается всего около 2,5% тепловой энергии; правда, по расчетам к. п. д. разновидности этого преобразователя с газообразным цезием должен быть гораздо выше. Но даже достигнутая величина к. п. д. вполне приемлема для ряда специализированных назначений. К их числу относятся теплочувствительные приборы, генерирующие под действием тепла электрический ток, который управляет контрольными и противопожарными устройствами, или легкие и компактные источники питания аппаратуры космических летательных аппаратов.

Во всяком генераторе, предназначающемся для космических кораблей, одинаково важны и компактность, и надежность; конечно, небезразлична и величина к. п. д. процесса преобразования, но она важна больше как средство уменьшения величины отношения веса к мощности, нежели как показатель

[1] Серебряный доллар имеет приблизительно такую же величину, как и наш серебряный рубль. — *Прим. ред.*

экономичности. В установку с плазменным диодом должен входить ядерный реактор; это обстоятельство явно препятствует снижению веса установки до приемлемого предела. Однако на космическом корабле ядерный реактор будет, вероятно, обслуживать не только плазменный диод, если он вообще будет устанавливаться, скажем, как часть двигательной установки. В этом случае плазменный диод явится удобным и экономичным средством отвода некоторой части тепла, выделяющегося в процессе ядерного деления, для электропитания приборов управления, наведения, связи и т. д.

Еще одна возможность заключается в использовании в плазменном диоде солнечного тепла. Этот путь серьезно изучается как для космических, так и наземных приложений. В космосе, как это вполне понятно, выгодно иметь такой источник тепла, который не нужно было бы запасать на борту летательного аппарата перед стартом. Наземные приложения найдут себе применение в тех тропических странах, где запасы ископаемого топлива очень скудны, средств для сооружения ядерных реакторов нет, но в изобилии есть солнечное тепло. Нужный для катода высокий нагрев можно создать, фокусируя соответствующим образом солнечные лучи. Разумеется, предназначающиеся для этой цели зеркала должны быть достаточно дешевыми и не слишком большими. Иной путь решения той же задачи заключается в изыскании катодных материалов, которые могли бы эффективно работать при более низких температурах.



7. НА ГРАНИ ФАНТАСТИКИ

Топливные элементы вместе с магнитогидродинамическими, термоэлектрическими и термоионными генераторами представляют собой нечто вроде «большой четверки» среди множества способов прямого преобразования первичной энергии в электричество, предлагавшихся за последние годы. И хотя о них много писалось и в научно-технической литературе, и в широкой прессе, многое еще предстоит сделать. Правда, генераторы этих четырех видов уже настолько разработаны, что сейчас можно достаточно уверенно говорить о их перспективах в энергетике будущего.

В задачу настоящей главы входит краткое обозрение «экзотических» принципов прямого преобразования, которые едва ли когда-нибудь будут использованы для выработки электроэнергии в промышленных масштабах, но которые тем не менее выглядят перспективными для специальных назначений там, где нужны малогабаритные и весьма надежные установки, предназначающиеся, например, для космических кораблей. И если упоминавшиеся четыре способа генерирования электричества необычны по сравнению с ныне существующими методами, то методы, которые мы собираемся рассмотреть, уже

наверняка стоят на грани фантастики. Однако всем им присуща одна важная особенность, общая с упоминавшимися выше способами: их успешное воплощение решающим образом должно зависеть от разработки новых специализированных материалов, особенно полупроводниковых.

Фотоэлектрические элементы. В 1837 г. французский физик А. Беккерель[1] заметил, что при освещении одного из опущенных в электролит электродов в цепи возникает напряжение. В то время на открытие Беккереля не обратили особого внимания, но лет через сорок другие исследователи заметили, что подобная же особенность присуща и твердому селену. Это открытие дало нам фотоэкспонометр, фотоэлектрический «глаз» для сторожевой сигнализации и т. д. Однако к. п. д. селенового элемента как преобразователя световой энергии в электрическую не достигает и 0,5%. Следовательно, использование селенового элемента в качестве практического генератора электроэнергии — явно безнадежное дело.

Но уже кремниевые солнечные элементы, сотнями выпускавшиеся лабораториями фирмы «Белл телефон» в 1954 г. в качестве побочной продукции исследований полупроводников, имели к. п. д., равный 6%. Дальнейшие исследования позволили более чем удвоить эту величину. Теория полупроводников дает нам теперь основания полагать, что в принципе возможно еще двухкратное повышение величины к. п. д. кремниевого элемента.

Чтобы уяснить, как же работает кремниевый элемент, нужно вспомнить то, что говорилось в гл. 5 о свойствах полупроводников. Напомним вкратце, что полупроводники занимают промежуточное положение между металлами и изоляторами, имея в 1 $см^3$ по $6 \cdot 10^{18}$ свободных носителей зарядов, тогда как для металлов соответствующая цифра равна $6 \cdot 10^{21}$. Этими носителями зарядов могут быть электроны (полупроводники n-типа), положительные дырки (полупроводники p-типа) или же как те, так и другие одновременно (собственно полупроводники).

[1] Не путать с А. А. Беккерелем, который в 1903 г. был вместе с Кюри удостоен нобелевской премии за открытие радия.

Если полупроводник *p*-типа соединить с полупроводником *n*-типа так, как это показано на фиг. 40, то на поверхности их стыка создается потенциальный барьер, подобный контактному потенциалу двух разнородных металлов в термопаре. Как и в термопаре, величина потенциального барьера зависит от разности концентраций носителей зарядов в этих



Фиг. 40. Поверхность раздела $p — n$.

Потенциальный барьер возникает на поверхности стыка полупроводников *p*- и *n*-типа; ток течет в направлении $n \rightarrow p$, когда на поверхность раздела падает свет.

двух полупроводниковых материалах. В равновесном состоянии общего перетекания носителей зарядов через барьер не наблюдается.

В термопаре, как мы видели, равновесное состояние можно нарушить неравномерным нагреванием, благодаря чему носители зарядов начнут перемещаться к барьеру или от барьера. В кремниевом элементе равновесное состояние можно нарушить, генерируя дополнительные электронные дырки столь близко к барьеру, что они успевают продиффундировать через барьер до рекомбинации, сопровождающейся образованием нейтральных атомов.

Такая электронно-дырочная пара создается всякий раз, когда внешний (валентный) электрон нейтрального атома кремния приобретает, например, благодаря поглощению фотона (кванта световой энергии) энергию, достаточную для отрыва от своего атома. В итоге мы получим свободный электрон

и лишенный электрона атом, т. е. дырку. Избыточные электроны потекут к *n*-стороне потенциального барьера, а избыточные дырки — к *p*-стороне. Движение отрицательных зарядов от *p*-стороны к *n*-стороне создает электрический ток в *обратном* направлении, т. е. от *n* к *p*. Движение положительных зарядов от *n* к *p* тоже образует электрический ток в направлении от *n* к *p*. Таким образом, токи, создаваемые носителями зарядов обоих типов при работе кремниевого элемента, складываются (сопоставьте это, между прочим, с рассматривавшимся ранее нагреванием собственно полупроводника, в случае которого электроны и дырки, как это было показано, движутся *в одном и том же* направлении, образуя противоположно направленные токи).

Сила возникающего в фотоэлементе тока пропорциональна числу ежесекундно поглощаемых фотонов (интенсивности света). Фотоэлемент дает ток до тех пор, пока свет падает на него; а напряжение фотоэлемента зависит от величины потенциального барьера.

Чтобы создать пару электрон — дырка, фотон, разумеется, должен обладать энергией, которая по меньшей мере равнялась бы энергии связи валентного электрона. Это — минимальная энергия, необходимая для преодоления силы притяжения атомного ядра и отрыва электрона от атома. Для кремния она приблизительно равна 1 электронвольту[1]. Однако наилучший эффект дают фотоны, обладающие несколько более высокой энергией, а именно энергией 1,4 *эв*, что соответствует частоте излучения около $4 \cdot 10^{14}$ *гц*. Частоты, соответствующие видимому свету, лежат, как уже отмечалось в гл. 1, в диапазоне около $6 \cdot 10^{24}$ *гц*. Частота $4 \cdot 10^{14}$ *гц* соответствует излучению, лежащему непосредственно за красным краем спектра видимого света, в так называемой «близкой инфракрасной области». Инфракрасное излучение иногда называют тепловым излучением. Домашние печи, электронагревательные приборы и т. д. — хорошие источники как инфракрасного,

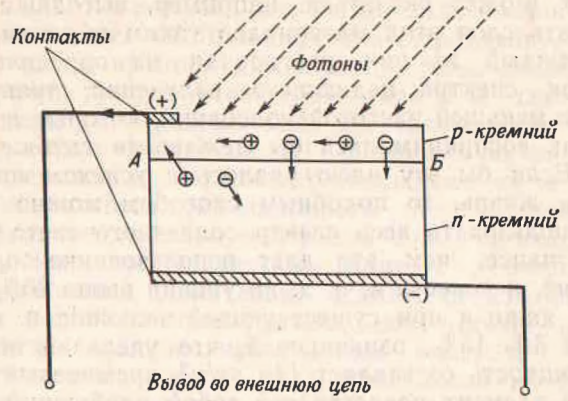
[1] Один электронвольт (*эв*) — это энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы он мог преодолеть потенциальный барьер в 1 *в*.

так и видимого красного излучения. Важно, однако, помнить, что в кремниевом элементе используются оптические, а не тепловые свойства этого излучения, поскольку наилучший эффект достигается при некоторой определенной частоте; чистое тепловое излучение, хаотически распределенное в таком элементе по всем частотам, эффективно использовать нельзя.

(Мимоходом уместно отметить, что существует немногочисленная категория материалов, которые обладают и фотоэлектрическими и термоэлектрическими свойствами одновременно. Излучение, вызывающее фотоэлектрический эффект, неизбежно приводит и к местному нагреву материала. Возникающий благодаря этому перепад температуры приводит к появлению термо-э. д. с., которая либо усиливает, либо же ослабляет фотоэлектрическое напряжение. Поскольку физика этих материалов разработана пока не до конца, сейчас еще слишком рано говорить, удастся ли их успешно использовать в практических устройствах.)

При изготовлении кремниевых элементов обычно вначале выращивают кристаллы полупроводника *n*-типа, а затем обрабатывают их поверхность примесями, чтобы создать слой *p*-типа. Чтобы можно было с выгодой использовать электронные свойства *n*-кремния, он должен быть монокристаллическим и исключительно чистым (на миллиард частей кремния должно приходиться меньше одной доли примеси). Из чистого кремния делаются «вафли», которые затем тщательно шлифуют, полируют, подвергают химическому травлению и обрабатывают в кварцевой трубчатой печи. Здесь при температуре около 1260°С газообразное соединение бора омывает несколько минут кремний, отлагая на его поверхности элементарный бор, который диффундирует через поверхность «вафель», образуя слой *p*-типа толщиной менее 0,0025 *мм*. После охлаждения «вафель» с их боков и тыльной стороны слой *p*-типа удаляют, чтобы обнажить исходный *n*-кремний. Затем к обеим сторонам стыка *p*- и *n*-полупроводников присоединяют пайкой металлические контакты (фиг. 41).

Под действием яркого солнечного света на кремниевом элементе возникает напряжение около 0,6 *в*. Мощность на выходе возрастает прямо пропорционально интенсивности света, но из-за ограниченности размеров элемента, который можно вырезать из одного кристалла[1], мощность одного элемента удается доводить приблизительно до 20 *мвт*. Эта мощность



Фиг. 41. Более подробная схема работы кремниевого элемента.
Под действием света носители положительных и отрицательных зарядов диффундируют в противоположных направлениях через поверхность раздела *АБ*, благодаря чему во внешней цепи возникает электрический ток.

убывает с повышением температуры. Поэтому современные элементы снабжают защитными фильтрами, которые отражают неиспользуемые излучения.

Сравнительно недавно ученые серьезно заинтересовались сернистым кадмием, выдерживающим более высокие температуры, нежели кремний. Преимущество этого соединения состоит в том, что его фотоэлектрическая характеристика с повышением температуры убывает гораздо медленнее, нежели у кремния, благодаря чему при температурах свыше

[1] В типичном случае монокристаллы имеют размер 25 × × 12 × 1 *мм*. Задача проводимых в настоящее время исследований заключается в том, чтобы увеличить площадь поверхности и уменьшить толщину, поскольку толщина активного слоя кристалла равна всего нескольким стотысячным долям миллиметра.

150°С к. п. д. процесса превращения световой энергии в электрическую у сернистого кадмия выше, чем у кремния.

К. п. д. фотоэлектрических устройств, видимо, удастся повысить еще путем усовершенствования их конструкции. Поскольку различные материалы обладают наилучшими характеристиками при разных частотах, может оказаться, например, выгодным располагать слои этих материалов таким образом, чтобы каждый из них реагировал на определенный участок спектра падающего излучения, пропуская лучи с меньшей частотой колебаний, которые в свою очередь воспринимались бы лежащими глубже слоями. Если бы эту идею удалось с успехом претворить в жизнь, то подобным способом можно было бы использовать весь спектр солнечного света куда эффективнее, чем это дает использование одного кремния, и довести к. п. д. до уровня выше 20%.

Но даже и при существующей величине к. п. д., равной 10—15%, означающей, что удельная выходная мощность составляет 140 *вт/м²*, кремниевый солнечный элемент представляет собой наилучший способ обеспечения питанием систем связи искусственных спутников Земли, где широкое использование полупроводниковых приборов позволило снизить потребные мощности источников питания до уровня ниже 1 *квт*. К тому же эти элементы обладают неопределенно долгим сроком службы. Первый выведенный на «постоянную» орбиту американский искусственный спутник Земли «Авангард-1» имел на борту четыре небольшие батареи кремниевых элементов. Он был запущен 17 марта 1958 г. Благодаря этим элементам он еще передавал результаты различных измерений на Землю и тогда, когда писалась настоящая книга.

Кроме очевидных преимуществ — большой долговечности и малого веса [1],— кремниевый элемент дает более дешевую энергию по сравнению с существующими электрохимическими батарейками, питающими карманные фонарики.

[1] Правда, его вес не так уж мал; сейчас ведутся серьезные исследования, направленные на то, чтобы снизить еще более нынешнюю цифру 22 — 45 *кг/квт*.

Тем не менее предстоит еще многое сделать, прежде чем кремниевые солнечные элементы станут экономически выгодной основой крупных генераторов стационарных электростанций. Их недостатком является, в частности, то, что они занимают очень большую площадь. Так, генератор на 10 *квт*, сооруженный, например, для обслуживания современного жилого дома, занимал бы площадь свыше 80 *м²* и стоил бы около 500 тыс. фунтов стерлингов [1].

Время от времени выдвигаются предложения использовать фотоэлектрические элементы для непосредственного превращения энергии гамма-излучения ядерных реакторов в электрическую энергию. Эти идеи всегда казались нереальными из-за большой вероятности радиационного повреждения элемента от воздействия нейтронов и гамма-излучения в крупном энергетическом реакторе. Теперь уже есть основания решительно исключить из рассмотрения подобные предложения, основываясь на результатах недавно проведенных измерений фотоэлектрической реакции ряда материалов на гамма-излучение. Результаты этих измерений показывают, что выходная электрическая мощность такого элемента при облучении потоком гамма-лучей в типичном энергетическом реакторе составит меньше одной миллионной доли мощности того же элемента, облучаемого ярким солнечным светом.

(Совсем недавно предлагалось создать «ядерную батарею», использующую взаимодействие гамма-излучения с электронами в изоляторах. Оно отличается от фотоэлектрического взаимодействия, так как не ограничивается взаимодействием с валентными электронами и так как гамма-фотон обычно отдает при этом не *всю* свою энергию электрону, как это наблюдается при фотоэлектрическом эффекте. Пока еще рано говорить, позволит ли это новое предложение достичь практически приемлемых значений к. п. д. процесса превращения энергии гамма-излучения в электрическую энергию.)

Механоэлектрические преобразователи. Некоторым кристаллам, например кристаллам сегнетовой

[1] Свыше 1 млн. рублей. — *Прим. ред.*

соли, присуща одна особенность, известная под названием пьезоэлектрического эффекта. Если такой кристалл подвергнуть сжатию или растяжению, то на его противоположных гранях образуются электрические заряды разных знаков. Кристалл становится, таким образом, электрическим диполем. Если сжатие заменить растяжением, то изменится и полярность диполя. Если частота колебаний кристаллов лежит в диапазоне от 10^4 до 10^5 *гц*, то от них можно отводить переменный ток с удельной мощностью до 8 *вт/см*^{2}. Всем известно, что на этом принципе устроены патефонные звукосниматели, слуховые аппараты и виброметры.

Кроме естественных пьезоэлектрических материалов, существует еще и целый ряд синтетических материалов (например, так называемые ферроэлектрические керамические материалы), способных выполнять роль преобразователей механической энергии в электрическую. Физика этого явления в деталях несколько отличается от физики пьезоэлектрического эффекта, но конечный наблюдающийся результат остается неизменным — приложенное механическое напряжение вызывает появление электрических зарядов.

Надо упомянуть и о других материалах, в которых электрическую энергию можно получить, разрушая механическими средствами наведенную поляризацию (электрическую или магнитную). В данном случае величина выходной электрической мощности определяется скорее запасенной в материале энергией, а не приложенными извне механическими усилиями. Используя такие материалы, можно создать устройства, в которых разовое механическое воздействие высвобождает запасенную энергию в виде резкого усиления тока или повышения напряжения и приводит в действие пусковое приспособление (триггер) или вызывает проскакивание искры.

Если не считать упоминавшихся маломощных устройств, механо-электрическому преобразованию энергии, по-видимому, уделяется сравнительно мало внимания. Надо полагать, это объясняется скорее общим недостатком мощных источников механической энергии достаточно высокой частоты, а не

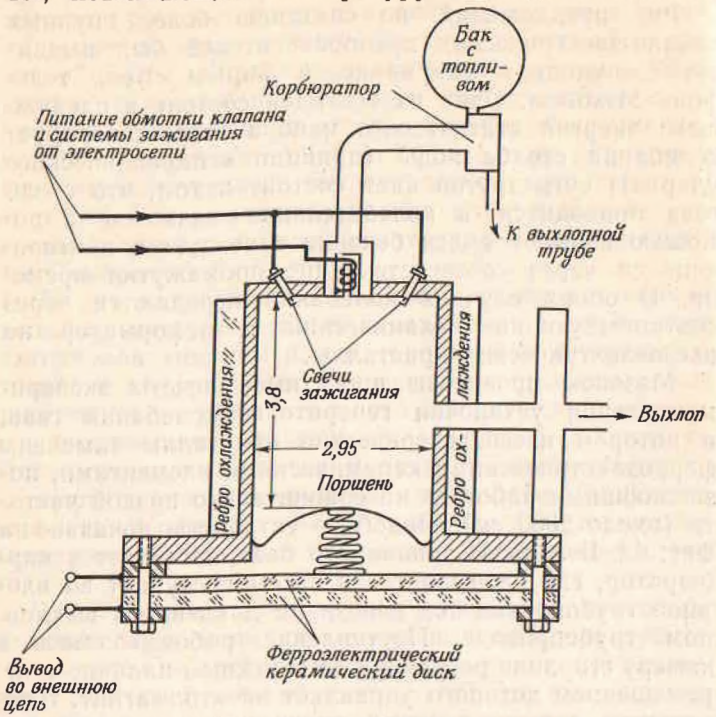
какими-либо присущими этому процессу трудностями или малой эффективностью самого процесса преобразования.

Ряд предложений по созданию более крупных механо-электрических преобразователей был выдвинут сотрудником американской фирмы «Белл телефон» Мэзоном. Одна из его идей состоит в следующем: энергия статического напора воды генерирует колебания столба воды (принцип «гидравлического удара»); суть другой идеи состоит в том, что столб газа приводится в колебательное движение с помощью взрывов смеси бензина с воздухом, повторяющихся через соответствующие промежутки времени. В обоих случаях колебания передаются через соответствующий механический трансформатор на пьезоэлектрические кристаллы.

Мэзоном проведены проектные расчеты экспериментальной установки генератора колебаний газа, в котором пьезоэлектрические кристаллы заменены ферроэлектрическими керамическими элементами, позволяющими работать на сравнительно низкой частоте (около 2000 *гц*). Подобное устройство показано на фиг. 42. Бензин из топливного бака поступает в карбюратор, где распыляется и затем поступает во входной трубопровод под действием давления в выхлопном трубопроводе. Поступление рабочей смеси в камеру сгорания регулируется впускным клапаном, перемещением которого управляет электромагнит. В результате взрыва горючей смеси в камере сгорания возникает волна давления, которая, действуя на поршень, давит на диск из ферроэлектрической керамики, как показано на схеме. В целях предотвращения утечки энергии колебательного движения, выхлопные газы отводят через специальный фильтр, который гасит вибрации, обеспечивая равномерное истечение выхлопных газов.

По расчетам Мэзона, модель генератора с показанными на фиг. 42 размерами должна обладать мощностью порядка 1 *квт*. Как предполагается, средняя рабочая температура газа должна достигать приблизительно 110°С. Оценку величины к. п. д. установки не производили, так что еще неизвестно, будет ли эта модель строиться вообще.

Другая идея прямого преобразования механической энергии в электрическую предусматривает взрывы, повышающие температуру газа до нескольких



Фиг. 42. Бензиновый двигатель-вибратор в соединении с ферроэлектрическим керамическим диском, который преобразует энергию механических вибраций в переменный электрический ток (размеры указаны в дюймах).

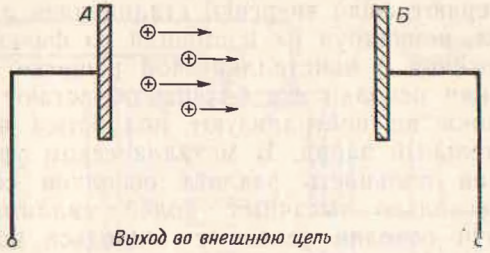
тысяч, а не сотен градусов. При столь высоких температурах газ ионизуется, а благодаря его взаимодействию с магнитным полем генерируется электрическая энергия. Таким образом, в данном случае мы сталкиваемся еще с одним приложением МГД-генерирования электроэнергии. О воплощении в жизнь этой разновидности МГД-генератора (плазменный реактор) уже говорилось в гл. 4.

Ядерные элементы. Ядерный элемент — это название устройства, предложенного для преобразования кинетической энергии образующихся при делении ядер заряженных осколков непосредственно в электрическую энергию. Всякий осколок в самом начале своей траектории сразу после деления ядра обладает положительным зарядом, абсолютная величина которого в 10—20 раз превосходит величину заряда электрона, движущегося со скоростью около одной десятой доли скорости света; в типичных случаях энергия таких осколков лежит в пределах $(5 \div 10) \cdot 10^7$ *эв*. Пролетая внутри вещества, эти осколки теряют свою энергию, сталкиваясь с атомами вещества, ионизируя их и смещая из фиксированного положения в кристаллической решетке. По мере замедления осколки все больше обрастают электронами, пока не нейтрализуют полностью весь свой положительный заряд. В металлическом уране максимальная дальность разлета осколков составляет всего несколько тысячных долей миллиметра. На этом пути осколки успевают лишиться всей своей кинетической энергии.

Кинетическая энергия осколков составляет около 84% всей энергии, высвобождающейся в процессе ядерного деления. Поэтому идея прямого ее использования для получения электроэнергии представлялась специалистам и инженерам по ядерной физике весьма заманчивой с тех самых пор, когда впервые около двух десятилетий назад была с успехом осуществлена цепная реакция.

Принцип действия ядерного элемента исключительно прост, как это можно видеть из схемы, изображенной на фиг. 43. Положительно заряженные осколки, испускаемые тепловыделяющим элементом *А*, движутся в вакууме к собирающему электроду *Б* (коллектор), где их кинетическая энергия используется для поддержания тока во внешней цепи. (Сами осколки, образующиеся при делении ядер, конечно, по внешней цепи не движутся, но их положительные заряды, собирающиеся на электроде *Б*, перемещают электроны по цепи в направлении к *Б*. Вот это-то движение электронов и образует электрический ток.) Большая практическая трудность, из-за которой все попытки создать действующий элемент до сих пор оканчивались неудачей, состоит в

том, что дальность разлета ядерных осколков в массе горючего, где они возникают, чрезвычайно мала. Поэтому большая часть осколков не может вылететь за пределы тепловыделяющего элемента, а энергия, которую они теряют в столкновениях с атомами ядерного горючего, выделяется в конечном счете в виде тепла[1]; практически ни один осколок не вылетает за пределы тепловыделяющего элемента с энергией, достаточной для совершения какой бы то ни было полезной внешней работы.

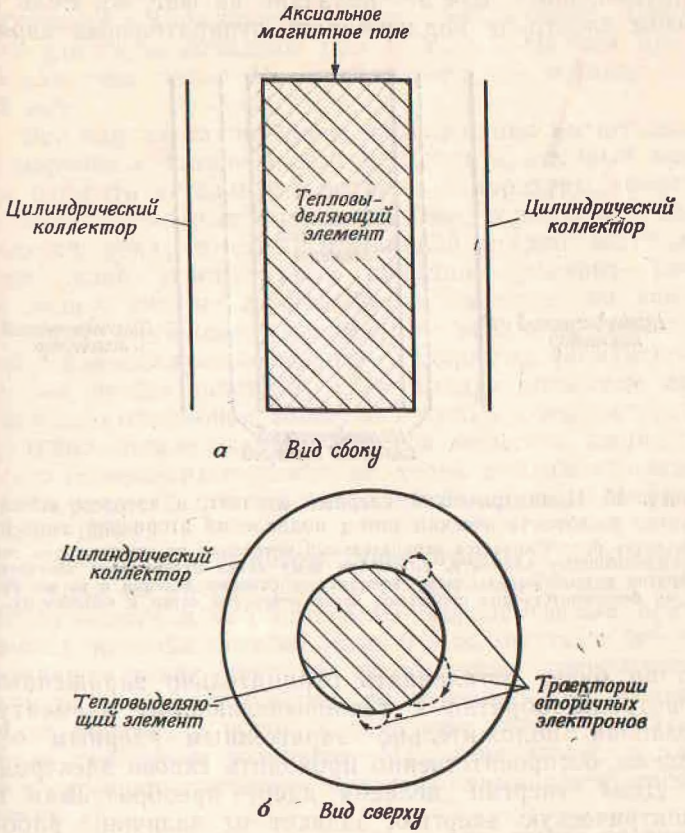


Фиг. 43. Принцип действия ядерного элемента.
Положительно заряженные осколки деления, вылетающие из делящегося вещества *А*, движутся через вакуум к коллектору *Б*, где отдают свою энергию во внешнюю цепь.

Судя по сообщениям о некоторых последних экспериментах, проведенных в США, эту трудность как будто бы удалось частично преодолеть, используя чрезвычайно тонкие слои делящегося изотопа U^{235}. На наружную поверхность цилиндрического тепловыделяющего элемента диаметром 37,5 *мм* и с длиной активного участка 75 *мм* было нанесено 0,25 *г* U^{235}, после чего этот элемент подвергали облучению потоком нейтронов в экспериментальном реакторе. Второй цилиндр большего диаметра, установленный концентрично по отношению к первому, выполнял роль коллектора осколков ядерного деления.

Когда осколки вылетают из тепловыделяющего элемента, им сопутствуют электроны низкой энергии, образующиеся благодаря ионизирующим столкновениям. Если не избавиться от этих электронов, они частично нейтрализуют положительные заряды, которыми наделены осколки ядер, снижая тем

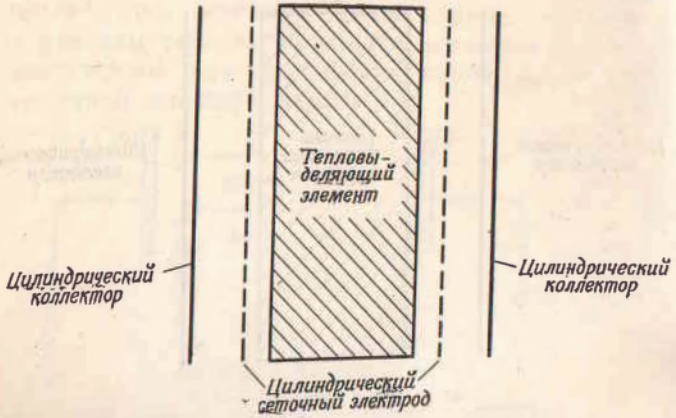
[1] Если бы дело обстояло иначе, генерирование тепла в тепловыделяющих элементах было бы исключительно неэкономичным процессом, а ядерные энергетические реакторы, какими мы видим их сегодня, нельзя было бы создать.



Фиг. 44. Цилиндрический ядерный элемент с использованием магнитного способа подавления вторичной эмиссии.
а — вид сбоку; *б* — вид сверху, показывающий, как траектории вторичных электронов под действием аксиального магнитного поля отклоняются обратно к излучающей поверхности.

самым выходную электрическую мощность. В описанных экспериментах траектории электронов изменяли магнитным полем так, чтобы отклонить их обратно к тепловыделяющему элементу, как это показано на фиг. 44. По сути дела это — простое видоизменение

размещенный, как это показано на фиг. 45. Если на этом электроде поддерживать отрицательный заряд,



Фиг. 45. Цилиндрический ядерный элемент, в котором используется электростатический метод подавления вторичной эмиссии. На сетке поддерживается отрицательный потенциал по отношению к тепловыделяющему элементу, благодаря чему сетка отталкивает электроны по отношению к тепловыделяющему элементу, а осколки деления в то же время беспрепятственно пролетают через отверстия сетки к коллектору.

электрон... позволяя ... колкам беспрепятствен... Доля энергии деления ... электрическую энергию, зависит от ... чего напряжения на электроде, толщины ... щегося вещества и отношения радиуса цилиндрического коллектора к радиусу тепловыделяющего стержня. Толщина слоя U^{235} составляла приблизительно 5 *мм*, что существенно меньше максимальной ...сти разлета продуктов деления, благодаря чему ...тельная их доля получает возможность ... пределы слоя.

... вылетающие осколки обладают энергией ... 10^6 *эв*, напряжение на выходе из ...

...ловыделяющим ...ным процессом ... видим их сего...

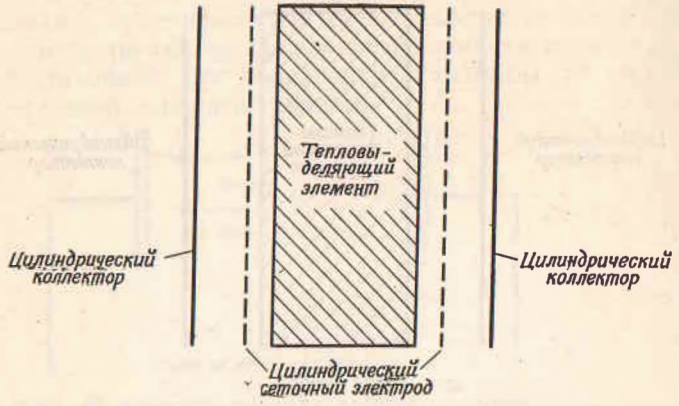
10^{-10} *а*), из-за чего выходная мощность остается небольшой. В типичном случае сегодняшние ядерные элементы обладают при к. п. д. процесса преобразования около 4% приблизительной мощностью 0,3 *мвт*.

Эти еще не законченные исследования имеют своей задачей создание ядерного элемента, который мог бы служить источником питания аппаратуры космических летательных аппаратов. Они, естественно, находятся пока на самой начальной стадии экспериментальной демонстрации принципа действия. Тем не менее, уже на данном этапе исследований ясно, что для достижения приемлемой величины отношения мощности к весу установки с ядерными элементами нужно, чтобы напряжение на выходе достигало нескольких миллионов вольт, для чего требуются чрезвычайно тонкие слои делящегося вещества (порядка всего нескольких стотысячных долей миллиметра, если вести речь о к. п. д. процесса преобразования энергии выше 10%).

Приложения и обзор существующего положения. Ни одна из рассмотренных в настоящей главе идей не относится к той категории перспективных принципов, которые можно было бы положить в основу создания таких крупных экономичных генераторов, как те четыре устройства по прямому преобразованию энергии, о которых речь уже шла в гл. 3—6, т. е. топливные элементы, МГД-генераторы, а также термоэлектрические и термоионные преобразователи.

Как малогабаритный и долговечный источник питания аппаратуры космических кораблей кремниевый солнечный элемент удовлетворяет специальным требованиям. Не исключено, правда, что в недалеком будущем в этой области применения у кремниевого элемента появится конкурент: легкий термоионный преобразователь, использующий солнечное тепло, о котором речь шла в заключительной части гл. 6. Большая часть современных исследований фотоэлектрических элементов преследует цель повы-

принципа, используемого в магнитном триоде (см. фиг. 36). В другом варианте того же элемента используется перфорированный (сеточный) электрод, размещенный, как это показано на фиг. 45. Если на этом электроде поддерживать отрицательный заряд,



Фиг. 45. Цилиндрический ядерный элемент, в котором используется электростатический метод подавления вторичной эмиссии.
На сетке поддерживается отрицательный потенциал по отношению к тепловыделяющему элементу, благодаря чему сетка отталкивает электроны обратно к тепловыделяющему элементу, а осколки деления в то же время беспрепятственно пролетают через отверстия сетки к коллектору.

то он будет отталкивать отрицательно заряженные электроны обратно к тепловыделяющему элементу, позволяя положительно заряженным ядерным осколкам беспрепятственно проходить сквозь электрод.

Доля энергии деления ядер, преобразуемая в электрическую энергию, зависит от величины рабочего напряжения на электроде, толщины слоя делящегося вещества и отношения радиуса цилиндрического коллектора к радиусу тепловыделяющего стержня. Толщина слоя U^{235} составляла приблизительно 0,0025 *мм*, что существенно меньше максимальной дальности разлета продуктов деления, благодаря чему значительная их доля получает возможность вылетать за пределы слоя.

Поскольку вылетающие осколки обладают энергией порядка 10^6 *эв*, напряжение на выходе из

ядерного элемента должно быть высоким, достигающим нескольких миллионов вольт; однако токи, образуемые осколками, исключительно слабы (около 10^{-10} *а*), из-за чего выходная мощность остается небольшой. В типичном случае сегодняшние ядерные элементы обладают при к. п. д. процесса преобразования около 4% приблизительной мощностью 0,3 *мвт*.

Эти еще не законченные исследования имеют своей задачей создание ядерного элемента, который мог бы служить источником питания аппаратуры космических летательных аппаратов. Они, естественно, находятся пока на самой начальной стадии экспериментальной демонстрации принципа действия. Тем не менее, уже на данном этапе исследований ясно, что для достижения приемлемой величины отношения мощности к весу установки с ядерными элементами нужно, чтобы напряжение на выходе достигало нескольких миллионов вольт, для чего требуются чрезвычайно тонкие слои делящегося вещества (порядка всего нескольких стотысячных долей миллиметра, если вести речь о к. п. д. процесса преобразования энергии выше 10%).

Приложения и обзор существующего положения. Ни одна из рассмотренных в настоящей главе идей не относится к той категории перспективных принципов, которые можно было бы положить в основу создания таких крупных экономичных генераторов, как те четыре устройства по прямому преобразованию энергии, о которых речь уже шла в гл. 3—6, т. е. топливные элементы, МГД-генераторы, а также термоэлектрические и термоионные преобразователи.

Как малогабаритный и долговечный источник питания аппаратуры космических кораблей кремниевый солнечный элемент удовлетворяет специальным требованиям. Не исключено, правда, что в недалеком будущем в этой области применения у кремниевого элемента появится конкурент: легкий термоионный преобразователь, использующий солнечное тепло, о котором речь шла в заключительной части гл. 6. Большая часть современных исследований фотоэлектрических элементов преследует цель повы-

шения их к. п. д. путем выращивания более совершенных кристаллов и экспериментального изучения различных материалов. Мы уже упоминали о сернистом кадмии, который при повышенных температурах превосходит кремний по своим свойствам. Сейчас внимание исследователей привлекает другой перспективный материал — арсенид галлия. Надо полагать, что указанными путями удастся добиться некоторого повышения величины к. п. д., но, вероятно, не больше, чем вдвое. Если ставить целью доведение величины отношения мощности к весу установки до уровня намного выше 100 *вт/кг*, то, помимо применения новых материалов, о которых шла речь, понадобится значительное усовершенствование конструкции самой установки. По-видимому, большие возможности совершенствования установок кроются в использовании очень тонких пленочных кристаллов, поскольку толщина активной зоны кристалла составляет всего несколько стотысячных долей миллиметра — ничтожную долю общей толщины применяющихся сейчас кремниевых «вафель».

Прямое превращение механической энергии в электрическую пока что исследовано слабо из-за отсутствия общедоступных источников мощных высокочастотных генераторов механической энергии. Таким образом, изучение возможности создания подобных источников и усовершенствование ферро- и пьезоэлектрических материалов было бы существенным условием сколько-нибудь значительного успеха в создании механо-электрических преобразователей. Этот способ преобразования энергии обладает тем преимуществом, что он позволяет непосредственно генерировать переменный ток. Другие потенциальные достоинства механо-электрического преобразователя — сравнительно низкая рабочая температура и высокая величина отношения мощности к весу. По расчетам для изображенного на фиг. 42 преобразователя, величина этого отношения должна равняться 460 *вт/кг*. Надо сказать, правда, что здесь не учитывается вес запаса топлива, потребность в котором ставит подобные преобразователи в невыгодное положение по сравнению с солнечными преобразователями, если говорить об их применении на

космических летательных аппаратах. Из-за возникновения в процессе сжигания топлива механических вибраций механо-электрический способ генерирования энергии нельзя считать прямым методом преобразования в отличие от других способов, в случае которых электроэнергия генерируется непосредственно из тепловой или химической энергии топлива. И хотя в механо-электрическом преобразователе вращающиеся детали отсутствуют, все же то обстоятельство, что без вибраций рабочий процесс неосуществим, заставляет предполагать, что для преобразователей подобного типа понадобится больше присмотра, нежели в случае установок без движущихся частей [1].

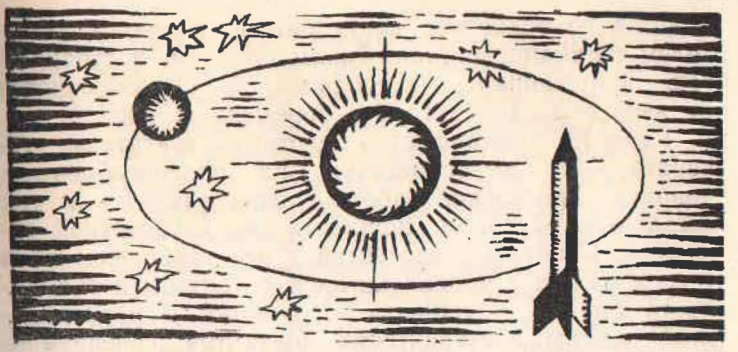
Принцип механо-электрического преобразования может, вероятнее всего, привести к революционным переменам в деле конструирования систем электрического зажигания в транспортных двигателях. Уже сейчас имеются керамические материалы, в очень небольших кусочках которых под действием давления непосредственно генерируется ток напряжением до 20 000 *в* без всяких промежуточных обмоток и прерывателей цепи. Напряжение подобной величины вполне достаточно для систем зажигания бензиновых двигателей внутреннего сгорания.

Разработка ядерных элементов еще находится на самой ранней экспериментальной стадии, и очень трудно представить себе, что генератор этого типа получит в перспективе применение где-нибудь еще, кроме как на космических кораблях. Можно назвать еще один путь практического использования осколков ядерного деления — ядернохимические реакторы, где воздействие облучения ядерными осколками вызывает химическое изменение, которого нельзя достичь иным путем или без слишком больших расходов. Таким путем, по-видимому, можно осуществить превращение аммиака в гидразин (ракетное топливо). Но это применение осколков ядерного деления,

[1] Как правило, установки с равномерно вращающимися деталями бывают гораздо долговечнее установок с периодическим изменением направления движения или знакопеременными напряжениями. — *Прим. ред.*

однако, не имеет отношения к вопросу о прямом генерировании электроэнергии.

Процессами прямого преобразования, описанными здесь и в четырех предыдущих главах, не исчерпываются все возможности. Всякий процесс, при котором непрерывное разделение положительных и отрицательных зарядов осуществляется за счет тепловой или любой другой первичной энергии, можно в принципе положить в основу устройства прямого преобразования. Недавно сообщалось о нескольких новых явлениях подобного рода. Правда, они еще не получили полного объяснения, и сейчас еще слишком рано говорить о том, удастся ли их использовать практически. Ясно, однако, что поиски новых процессов будут вестись и впредь, а будущее еще может принести нам неожиданные открытия.



8. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Как правило, все рассмотренные в настоящей книге методы генерирования электроэнергии приводят к выработке постоянного тока низкого напряжения. Напряжение на выходе можно повысить, соединяя последовательно несколько установок, генерирующих постоянный ток. Для передачи электроэнергии на большое расстояние под высоким напряжением постоянный ток обладает рядом преимуществ перед переменным. Но когда энергия поступает к потребителю, то в большинстве случаев, и особенно там, где нужна большая мощность, без переменного тока не обойтись. Следовательно, успешное экономичное использование новых способов выработки электроэнергии не мыслимо без эффективно действующего оборудования по преобразованию постоянного тока в переменный.

Хорошо проверенный и достаточно эффективный способ преобразования — это система двигатель — генератор, состоящая из генератора переменного тока, приводимого во вращение электродвигателем постоянного тока. Современный турбогенератор, в котором мощный магнит вращается внутри неподвижной обмотки, генерирует переменный ток, тогда как в блоке двигатель — генератор магнит при-

водится во вращение не турбиной, а электродвигателем постоянного тока. Таким образом, постоянный ток, вращающий электродвигатель, преобразуется на выходе из генератора в переменный ток.

Главное преимущество системы двигатель — генератор — ее выносливость: она приспособлена к довольно длительной работе с перегрузками — т. е. с внезапным расходом мощности сверх расчетной величины. Основные недостатки у нее такие же, что и у всех машин с вращающимися деталями: необходимость смазки подшипников, очистки и периодической замены электрических контактов, своевременного устранения последствий механического износа деталей. Отличительной чертой, присущей системам прямого преобразования энергии, является отсутствие вращающихся частей в основном генераторе; это преимущество во многом было бы, очевидно, утрачено, если бы в установке для обратного преобразования тока остались вращающиеся части [1].

Кроме того, компоновка даже одного блока, состоящего из генератора и электродвигателя, сравнительно трудно поддается изменениям. Иначе говоря, элементы этой системы нельзя переставлять в целях более эффективного использования пространства в тех случаях, когда это представляется весьма целесообразным.

Системе двигатель — генератор свойственно общее для всех механических реле, выключателей и т. п. ограничение, а именно инерция ее движущихся частей. Из-за инерции системе требуется определенное время (5—10 *сек*), чтобы выйти на рабочий режим после остановки. На протяжении этого периода разгона система дает на выходе неполную мощность. Это обстоятельство не играет особой роли в случае, когда система работает беспрерывно, но для режима работы с перерывами такое инерционное запаздывание может стать помехой или даже серьезной опасностью, скажем в предохранительных устройствах, где счет ведется на секунды.

[1] Основным недостатком системы двигатель — генератор является высокая стоимость, практически исключающая возможность его использования в качестве преобразователя на крупных электростанциях. — *Прим. ред.*

Для современной энергетики характерно стремление заменить везде, где это возможно, механические устройства электронными приборами, в которых единственным движущимся элементом являются электроны, обладающие фантастически малой массой [1] и скоростью, близкой к скорости света. Поэтому для большей части практических назначений электронные приборы реагируют на входной электрический сигнал практически мгновенно [2]. Кроме того, замена движущихся механических деталей движущимися электронами позволяет сделать электронные приборы очень компактными и потребляющими очень мало мощности.

Всякий электронный преобразователь тока состоит по существу из двух выпрямителей [3], включенных в цепь таким образом, что через каждый из них проходит ток на протяжении полупериода — один пропускает ток в «прямом» направлении (на протяжении положительного полупериода), а другой — в «обратном» направлении (на протяжении отрицательного полупериода). Выпрямителями могут служить термоионные лампы или такие полупроводниковые приборы, как транзисторы. Будущее здесь принадлежит, по-видимому, полупроводникам по тем же самым причинам (компактность, долговечность, малый расход энергии), по которым полупроводники все больше и больше вытесняют лампы из радиоприемников, электронных вычислительных машин и т. д.

В своем современном виде транзистор не пригоден для управления токами большой мощности; но сейчас для этой цели разрабатывается усовер-

[1] Масса электрона равна приблизительно $9 \cdot 10^{-28}$ *г*, или приближенно одной двухтысячной части массы атома водорода.

[2] Исключением могут явиться вычислительные машины с очень большим быстродействием; в таких машинах время запаздывания, в течение которого электрон перемещается по цепи, не является пренебрежимо малым по сравнению со временем (10^{-6} *сек*), затрачиваемым на основную вычислительную операцию в машине.

[3] Выпрямитель — это односторонний клапан для электрического тока; как ниппель автомобильной или велосипедной шины пропускает воздух только внутрь камеры и не выпускает его наружу, так и выпрямитель пропускает электрический ток только в одном направлении.

шенствованный транзистор, который получил название «тринистор». Основной функциональный элемент тринистора — специальным образом приготовленная кремниевая «вафля». Уже сейчас есть «вафли» размером с монетку, способные управлять токами силой до 100 *а* при напряжении 200 *в*. Исследователи, работающие в этой области, уверены в том, что удастся создать приборы немного больших размеров, способные работать в цепях с токами до 1000 *а* при напряжении 1000 *в* (это эквивалентно мощности 1 *Мвт*). Использование многотринисторных систем позволит соответственно расширить и диапазон мощностей, в котором смогут работать такие приборы. Стоимость тринисторных приборов пока еще слишком высока по сравнению со стоимостью преобразователей других видов, но есть основания полагать, что она быстро понизится, когда новые полупроводниковые материалы будут выпускаться в достаточном количестве.

Ценное качество полупроводниковых преобразователей тока — большая величина их к. п. д. К. п. д. системы электродвигатель — генератор к настоящему времени уже доведена до предела. При наиболее благоприятных условиях она преобразует 88% энергии постоянного тока в переменный ток, но, как правило, ее к. п. д. ближе к 80%. К. п. д. полупроводниковых преобразователей обратного действия уже сейчас доведен до 90%, причем вполне вероятно, что эту цифру со временем удастся довести до 95%. Кроме того, в отличие от систем электродвигатель — генератор к. п. д. полупроводниковых обратных преобразователей не зависит от величины мощности (в интервале выше приблизительно 10 *квт*) и частоты переменного тока. Поэтому указанные высокие значения к. п. д. относятся практически к любому режиму работы преобразователя.

У полупроводникового обратного преобразователя есть один недостаток, который проистекает из тех же самых особенностей (компактность и отсутствие вращающихся деталей), которые столь выгодно отличают его от системы электродвигатель — генератор. Полупроводниковый прибор не обладает инерционностью, и его теплоемкость весьма мала.

Следовательно, он лишен защитного «буфера», смягчающего воздействие внезапных перегрузок сверх расчетных значений. Чтобы защититься от воздействий перегрузки, может понадобиться введение предохранительных цепей, усложняющих оборудование.

С этой же особенностью связана и другая проблема, являющаяся следствием того, что в обратном преобразователе данного типа используется совершенно новый принцип построения электрических цепей, требующий специального обучения обслуживающего персонала обращению с полупроводниковыми приборами. Однако решение этой задачи не представит особых затруднений, поскольку потребность в обслуживающем персонале для этих приборов должна быть, по-видимому, очень невелика.

Допустимая мощность тока для новейших полупроводниковых обратных преобразователей равняется нескольким сотням киловатт. Это гораздо больше той мощности, которую способны выдержать все демонстрировавшиеся до сих пор приборы по прямому преобразованию. Кроме того, нет никаких принципиальных препятствий к достижению в обозримом будущем высокоэффективного обратного преобразования тока любой мощности. Эта проблема носит чисто технический характер, причем техника преобразования постоянного тока в переменный шагнула вперед гораздо дальше по сравнению с техникой основных генераторов [1].

Конечно, и после разрешения проблемы обратного преобразования, когда постоянный ток низкого напряжения легко будет трансформировать в переменный ток высокого напряжения, могут возникнуть трудности, например, по обеспечению электроизоляции при высоких температурах, с которыми сопряжены новые способы выработки электроэнергии.

Высокие температуры и связанные с ними проблемы. Потребность в материалах, которые длительное время сохраняли бы удовлетворительные электрические и механические свойства при очень высо-

[1] В основном это проблема технико-экономическая, так как на долю не только полупроводниковых, но и пока более дешевых ртутных инверторов приходится заметная часть всех расходов по сооружению электростанции. — *Прим. ред.*

ких температурах,— общая черта всех систем прямого преобразования, предлагаемых для экономичной выработки электроэнергии в промышленных масштабах. Это гораздо более трудная техническая проблема, нежели преобразование тока, особенно в тех случаях, когда материал подвергается совокупному воздействию химической коррозии, ядерного излучения и температур, указанных в табл. 5.

Таблица 5

Сопоставление рабочих температур крупных генераторов с температурами некоторых пламен и жаростойкостью материалов

Генератор	Температура, °С	Пламя	Материал
	4700	Кислородно-атомное	
	4300	Водородно-фторное	Плавится карбид гафния
	3870		Испаряется графит
	3315	Кислородно-ацетиленовое	
Магнитогидродинамический	2760	Кислородно-водородное	Плавится окись алюминия
Термоионный	2200	В доменной печи	
	1650	В кухонной плите	Плавится железо
Термоэлектрический	1100		
Топливные элементы	~800—1000		
Паровая турбина	650		

В самом низу этой таблицы находится современная паровая турбина, рабочая температура пара в которой равна 650°С [1]. Стальная кочерга, нагретая до такой температуры, должна тускло светиться красноватым светом. Понадобилось почти полвека исследовательских и конструкторских исканий для того, чтобы создать энергетические установки, способные непрерывно работать при столь высоком нагреве.

[1] Использование пара такого нагрева технически вполне возможно, но экономически нецелесообразно из-за дороговизны требующихся металлов; практически рабочая температура новых парогенераторов ограничивается значениями 540—560° С. — *Прим. ред.*

Над паровой турбиной в таблице располагаются топливные элементы, рабочая температура в которых на несколько сотен градусов выше, чем в паровых турбинах. При таком нагреве наша кочерга казалась бы ярко-желтой. Правда, существуют топливные элементы, работающие при гораздо более низких температурах, но те топливные элементы, в которых можно использовать дешевое природное топливо (а только такие элементы и стоит рассматривать, если иметь в виду промышленную выработку электроэнергии) должны работать при температурах около 800—1000°С.

В термоэлектрических генераторах, вероятно, понадобится температуру горячих спаев довести приблизительно до 1100° С, чтобы обеспечить требующуюся для их использования на крупных электростанциях величину к.п.д. Подобный нагрев, почти наверное, потребует использования ядерного горючего, поскольку при использовании обычного (химического) топлива неизбежны большие конвективные потери тепла (с газами, уходящими в дымовую трубу) [1]. Следовательно, понадобятся такие термоэлектрические материалы, которые сохраняли бы свои характеристики под действием ядерных излучений и высоких температур. Привлекательной особенностью термоэлектрического генератора (если будут найдены соответствующие материалы) является то, что он никак не связан ни с вакуумом, ни с высоким давлением. Это снимало бы трудности по поддержанию таких условий, что особенно важно для крупных генераторов.

Поддержание крайне высокого разрежения, близкого к абсолютному вакууму, в большом объеме при температурах порядка 1650—2200°С — основная техническая трудность, с которой сопряжено создание больших термоионных генераторов. Так, для генерирования мощности 100 000 *квт* термоионными генераторами современной конструкции понадобился бы

[1] Эти потери можно снизить путем регенерации тепла (подогрев воздуха для горения) и использования тепла умеренной температуры в обычных парогенераторах. — *Прим. ред.*

катод с рабочей температурой 1925 °С и площадью поверхности, равной почти 9000 $м^2$.

Выше всех генераторов стоит МГД-генератор с рабочей температурой около 2760°С. Это — температура водородно-кислородного пламени (наша кочерга, кстати сказать, уже расплавилась бы при температуре на 1100° ниже). В генераторе мощностью, измеряемой сотнями тысяч киловатт, столь высокую температуру нужно поддерживать в объеме с поперечным сечением в несколько десятых долей квадратного метра и длиной 15—18 *м*. Внутри этого пространства газ должен двигаться со скоростью несколько тысяч километров в час. Из каких материалов нужно создавать канал, внутри которого заключен добела раскаленный сверхураган, из чего сделать электроды для отвода тока? Некоторое представление о правильном ответе на этот вопрос дают современные исследования тугоплавких материалов для ракетных двигателей. Однако надо иметь в виду, что эти двигатели, как правило, действуют непрерывно всего несколько минут, тогда как промышленный МГД-генератор должен выдерживать месяцы, если не годы, непрерывной эксплуатации [1]. Проблемы генерирования энергии для земных нужд еще более сложны, нежели проблемы энергетики в нуждах космических исследований.

Заключение. В настоящей книге дан обзор тех методов, которые выглядят наиболее перспективными для прямого преобразования первичной энергии в электрическую в крупных промышленных масштабах. В гл. 7 попутно были затронуты и отдельные «экзотические» проекты непосредственного генерирования электроэнергии для ряда специализированных назначений.

Техническая осуществимость основных четырех способов генерирования электроэнергии — топливными элементами, а также магнитогидродинамическими,

[1] Очень сложной задачей является также сверхвысокий подогрев воздуха, необходимый для очень высокого нагрева продуктов сгорания без обогащения воздуха дорогим кислородом. Применительно к ядерным установкам очень велики трудности создания не слишком дорогих реакторов, способных длительно работать при подогреве газа до сверхвысоких температур. — *Прим. ред.*

термионными и термоэлектрическими генераторами — убедительно доказана опытами. Однако понадобятся очень большие технические усовершенствования, прежде чем эти методы удастся воплотить на крупных электростанциях. Эти усовершенствования пойдут главным образом по пути повышения к.п.д. процесса преобразования и создания долговечных крупных генераторов [1]. Для этого понадобится фундаментально и подробно исследовать, как изменяются электрические и механические свойства материалов при совокупном воздействии очень высоких температур, интенсивного ядерного излучения и химически агрессивных сред.

Серьезные технические трудности, а также острый недостаток ученых и инженеров, обладающих соответствующими знаниями для работы в этой новой специализированной области, дают основания думать, по общему мнению специалистов, что экономичную выработку электроэнергии прямым преобразованием удастся осуществить не раньше, чем через десятилетие. Однако здесь мне хотелось бы напомнить забавную аксиому: инженер переоценивает то, что он способен совершить за год, и крайне недооценивает то, чего он добьется за ближайшее десятилетие.

Вряд ли можно сомневаться в том, что небольшие установки прямого преобразования будут в ближайшие годы все шире применяться на космических летательных аппаратах и в тех далеких уголках земного шара, где иные средства снабжения электроэнергией не годятся [2]. Можно с уверенностью биться об заклад, что первые люди на Луне будут пользоваться электроэнергией, вырабатываемой путем прямого преобразования тепла от небольшого ядерного реактора.

Сколько же пройдет времени, прежде чем значительная доля наших непрерывно возрастающих потребностей в электроэнергии будет покрываться с помощью рассмотренных нами новых методов ее генерирования при величине к.п.д., вдвое превышающей ту, что есть на современных электростанциях? Надо

[1] А также снижения стоимости используемых материалов и капиталовложений на сооружение электростанции в целом. — *Прим. ред.*

[2] Для удаленных районов применимы и атомные станции обычного типа. — *Прим. ред.*

сказать, что к. п. д. современных электростанций практически уже достиг предельной величины, присущей паровому циклу турбин. В мире, испытывающем энергетический голод, методы генерирования, при которых в отброс уходит более половины высвобождаемой из топлива (химического или ядерного) энергии, неизбежно должны будут уступить дорогу более экономичным методам, какими бы необычными они ни казались. Грядущее поколение не будет находить ничего из ряда вон выходящего в прямом преобразовании; ему придется лишь удивляться, как это мы, зная о том, что запасы ископаемого топлива непрерывно уменьшаются [1], столь долго мирились с разорительно неэкономичными косвенными способами выработки электроэнергии.

---

[1] Разведанные запасы ископаемого топлива пока непрерывно растут, и их хватит еще надолго; поэтому основной проблемой на ближайшие десятилетия остается не более экономное расходование запасов, а их использование для выработки более дешевой энергии. — *Прим. ред.*

Оглавление

Предисловие к русскому изданию 5
Предисловие 15

1. Энергия для золотого века? 19
2. Всевозможные виды энергии (и мощности) . . 25
3. Топливные элементы 49
4. Магнитогидродинамические генераторы 70
5. Термоэлектрические генераторы 100
6. Термоионные генераторы 125
7. На грани фантастики 146
8. Практические перспективы 165

Дж. Гарднер

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО БЕЗ ДИНАМОМАШИН

или грядущая революция в энергетике

Редактор *В. А. Алексеев*
Художник *В. Е. Вольф*
Художественный редактор *Н. А. Фильчагина*
Технический редактор *Л. П. Кондюкова*
Корректор *Е. Г. Литвак*

Сдано в производство 3/XI 1964 г. Подписано к печати 2/III 1965 г. Бумага 84×108 1/32 = =2,75 бум. л. 9,02 печ. л. Уч.-изд. л. 8,52. Изд. № 20/2989. Цена 60 коп. Зак. № 617. (Темплан 1965 г. Изд-во «Мир», пор. № 175).

ИЗДАТЕЛЬСТВО «М И Р»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Московская типография № 20
Главполиграфпрома Государственного комитета
Совета Министров СССР по печати
Москва, 1-й Рижский пер., 2

сказывает английский физик Дж. Гарднер. Конкретные примеры и иллюстрации способствуют уяснению физической сущности проблемы.

Актуальность тематики, свежесть содержания, простой и образный язык делают эту книгу весьма полезной и доступной для широких кругов читателей, знакомых с электричеством в объеме школьного курса физики. Как отмечает академик М. А. Стырикович в предисловии к русскому изданию, «реализация новых методов потребует проведения громадного объема научно-исследовательских работ зачастую в новых отраслях знания. Поэтому понятно то внимание, которое уделяется... привлечению к проведению научно-конструкторских работ в этой области широких кругов исследователей, и прежде всего талантливой молодежи».

60 коп.