А. М. МАГОМЕДОВ

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

г. Махачкала
АОЗТ "Юпитер"

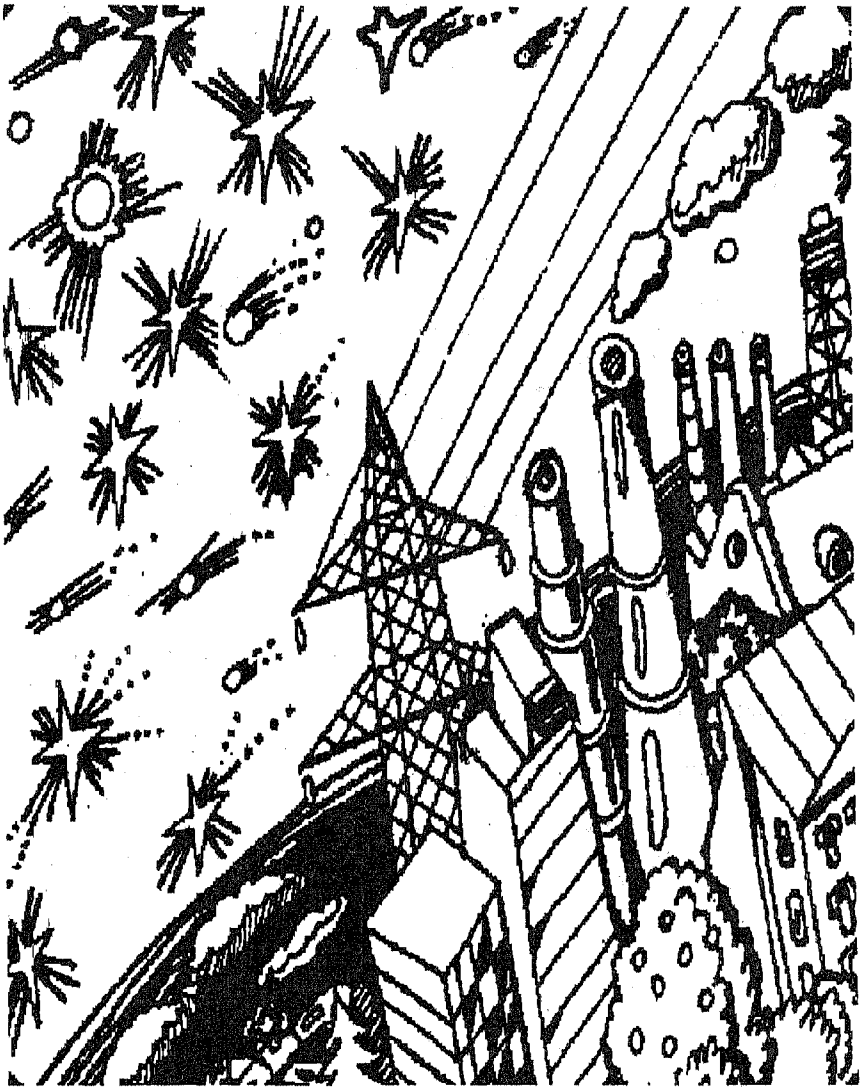
УДК 662.997
621.311
620.92

Абук МАГОМЕДОВ. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Махачкала: Издательско-полиграфическое объединение "Юпитер", г. Махачкала 1996. – 245 с.

Книга посвящена важной и актуальной проблеме - проблеме более разумного и эффективного использования человеком природных энергетических богатств. Рассмотрены состояние и направления разработки технических решений нетрадиционных возобновляемых источников энергии, особенности их использования в Дагестане. Приведена информация использования солнечной, геотермальной, ветровой, потоков воды, химической и других видов энергии, широкое применение которой в народном хозяйстве может приносить большой экономический и экологический эффект.

Книга, предназначенная в основном для студентов специализирующихся по малой энергетике, может быть полезна также для широкого круга читателей: преподавателей школ и лицеев, школьникам старших классов, специалистам, руководителям отраслей народного хозяйства, энергетикам.

© Магомедов А. 1996.



Предисловие

В последние годы все большее внимание привлекают проблемы использования чистых нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) для нужд энергоснабжения различных сельскохозяйственных и промышленных объектов. Актуальность и перспективность данного направления энергетики обусловлена двумя основными факторами: катастрофически тяжелым положением экологии и необходимостью поиска новых видов энергии. Традиционные топливно-энергетические ресурсы (уголь, нефть, газ и т.д.) при существующих темпах развития научно-технического прогресса, по оценкам ученых, иссякнут в ближайшие 100-150 лет.

Практически все развитые страны мира уделяют серьезное внимание проблеме использования НВИЭ. В России также разработана комплексная программа проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ по использованию НВИЭ. Программой предусмотрен ряд организационных мероприятий по освоению промышленностью производства и широкомасштабного внедрения систем энергоснабжения, работающих на НВИЭ.

Использование НВИЭ в Дагестане имеет свои особенности, связанные с ее природно-климатическими условиями, географическим расположением территории и промышленно-хозяйственной инфраструктурой, определяющей распределение и потребление энергии.

Цель этой работы - рассмотреть важные для практики свойства тепла, солнечной, ветряной, гидро-, химической и электрической энергий, их взаимосвязь, а также превращение различных видов энергий в полезную работу. Довольно подробно описываются методы получения НВИЭ, преимущества и недостатки каждого вида энергий. Обо всех этих проблемах в строго научной, но вместе с тем простой и доступной форме излагается в работе.

Пособие предназначено для студентов младших курсов вузов, а также оно адресовано и тем, кто не являясь специалистом в данной области, хотел бы получить об этой важной с технической и экономической точек зрения проблеме более глубокие представления.

ВВЕДЕНИЕ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Миллионы лет на Земле в результате фотосинтеза непрерывно накапливалась лучистая энергия Солнца. Древние растения и животные, погрузившиеся на дно морей и водоемов, отдают нам ее теперь в виде угля, нефти и природного газа - наших основных источников энергии.

Огромные природные резервы человечество тратило постепенно в течение тысячелетий своего существования. Технический прогресс непрерывно увеличивает скорость истощения этих запасов. Вот почему все чаще начинают раздаваться голоса о перспективе энергетического голода и целесообразности экономии природных ресурсов. И это толкает ученых и инженеров на поиски новых путей, которые помогут удовлетворить будущие потребности в энергии.

В каких же направлениях идут поиски ученых? Атомная энергетика, которая уже стала реальностью; проекты использования теплового градиента в мировом океане и энергии приливов; создание геотермических электростанций; управляемая термоядерная реакция, над которой работают на протяжении многих лет ученые, и, наконец, наиболее очевидное - использование солнечной энергии. По мнению многих ученых, в решении энергетических проблем будущего огромную роль должна сыграть химия - гальванические элементы и аккумуляторы, топливные элементы и водородное горючее.

Связь между благосостоянием общества и развитием энергетики известна. Энергетика делает вклад в благосостояние, обеспечивая такие области потребления, как отопление, освещение и приготовление пищи, а также снабжает необходимой энергией производство и транспорт.

До недавнего времени в соотношении "энергетика - благосостояние" на первом месте стояла преимущественно эта выгодная сторона. Вместе с тем затраты на энергетику, включая не только денежные и другие ресурсы, обращенные на получение и использование энергии, но и издержки, связанные с защитой окружающей среды и социально-политическими проблемами, снижают уровень благосостояния.

В последнее время первоочередное значение приобретают именно эти негативные тенденции. Во-первых, возникла стойкая тенденция к росту стоимости энергии. Так, в США за последние 20 лет денежные затраты на снабжение нефтепродуктами возросли на 25 %, а стоимость производства электроэнергии на тепловых и атомных электростанциях увеличилось на 40 % и более. При существующих энергетических системах и технологиях использования энергии потребителем и при сложившихся схемах ее потребления большинство промышленно развитых стран уже подошло к тому рубежу, когда с дальнейшим ростом производства энергии издержки начинают превышать прибыль.

Во-вторых, огромная доля давления на окружающую среду, прихо-

дящаяся на энергоснабжение, теперь нарушает природные процессы уже в широком масштабе.

Среди экологических проблем, связанных с развитием энергетики, самой угрожающей является проблема сильного потепления. Климат определяет большинство экологических процессов, имеющих решающее значение для благосостояния населения. Углекислый газ, накапливающийся в атмосфере в результате сжигания ископаемого топлива, создает условие для возникновения парникового эффекта и изменения климата.Тревога международной общественности по этому поводу постоянно звучит в заявлениях конференций метеорологов, океанологов и представителей других областей геонаук.

Проблемы загрязнения окружающей среды и опасности эксплуатации энергопроизводящего оборудования, бывшие до сих пор локальными, принимают региональный или глобальный характер.

Способность окружающей среды поглощать газовые выбросы и другие отходы энергетики не беспредельна, ее можно отнести к так называемым ограниченным ресурсам. Эта ограниченность материализуется в двух видах расходов на окружающую среду. "Внешние" расходы общество несет из-за разрушения окружающей среды, но они не отражаются на денежных счетах потребителей и производителей энергии. "Внутренние" расходы - это увеличение денежных издержек в связи с теми или иными мерами органов охраны окружающей среды, принимаемыми для снижения "внешних" расходов.

И "внешние" и "внутренние" расходы на окружающую среду растут и будут расти по целому ряду причин. Во-первых, при использовании традиционных видов топлива все более худшего качества увеличивается масса перерабатываемых и перемещаемых материалов, удлиняются перевозки, становятся необходимыми все более мощные энергосооружения и установки. Во-вторых, растущий объем выбросов и отходов энергетических систем привел к тому, что достигла предела способность окружающей среды поглощать эти выбросы и отходы без ущерба для себя.

В настоящее время человечество стоит перед дилеммой: с одной стороны, без энергии нельзя обеспечить материальное благополучие людей, с другой - сохранение существующих темпов ее потребления может привести к разрушению окружающей среды и как следствие - к снижению жизненного уровня и даже к угрозе нашему существованию.

Для того, чтобы сгладить противоречия между энергетикой, экономикой и экологией, необходимо достичь более правильного понимания нынешней ситуации,возможностей и желательного направления ее развития. Нужно широкое публичное обсуждение, которое должно быть подкреплено интенсивными исследованиями для определения схемы энергетики будущего.

Проблема поиска разумных и не грозящих тяжелыми последствия-

ми путей развития энергетики - основная задача при разработке энергетической политики.

В качестве решения проблемы воздействия энергетики на окружающую среду часто предлагают экономию энергии. Безусловно, здесь имеются большие резервы, и человечество постоянно идет по этому пути. В какой степени промышленный прогресс привел к достижению экономии первичной энергии за последние 100 с небольшим лет, легко видеть на примере паровых машин. Если КПД паровых машин в середине прошлого века составлял 3-5 %, то современные комбинированные системы, производящие энергию и состоящие из газовой и паровой турбин, имеют КПД, достигающий 42 %, т.е. налицо 10-кратная экономия энергии.

К аналогичному результату приводит внедрение более совершенных технологий использования энергии для производства единицы продукции. Так, в Англии за последние 100 лет интенсивность потребления энергии на единицу валового продукта снизилась более чем в 2,5 раза. Тем не менее производство первичной энергии продолжало возрастать и по сравнению с серединой прошлого века в расчете на душу населения в Англии, например, увеличилось в 1,5 раза и составляет в настоящее время 6 т у.т. (условного топлива) в год, в США еще больше и составляет 12 т у.т. Однако, даже если производство энергии останется на существующем уровне, острота проблем, связанных с энергетикой, не уменьшится.

Каковы же тенденции и прогнозы развития энергетики? В прошлом наибольшая доля энергии, используемая для промышленных целей, приходилась на нефть и газ, а их потребление увеличивалось каждые 15-20 лет. Если такая скорость сохранится, то в ближайшие 30-40 лет первоначальные запасы исчерпаются на 88 %.

Существуют более значительные запасы другого ископаемого топлива - каменного угля, однако его добыча и использование создают множество экологических проблем. Получение ядерной энергии вряд ли найдет широкое применение, прежде чем будут созданы реакторы нового поколения с заметно улучшенными характеристиками безопасности и прежде чем проблема удаления радиоактивных отходов будет решена реально, а не на бумаге.

Для того, чтобы поддерживать современный уровень благосостояния, человечеству придется перейти на новые системы энергоснабжения. Без этого суммарное потребления высококачественных энергетических ресурсов при все снижающейся способности окружающей среды справляться с давлением энергетики приведет к росту общих расходов даже при постоянном уровне энергопотребления. Чтобы обеспечить экономическое развитие человечества без значительных издержек, которые могут свести на нет все выгоды, нужно еще быстрее переходить на экологически более чистые технологии производства энергии.

Для выработки разумной стратегии в энергетике крайне важно уско-

рение исследований и разработок по использованию перспективных альтернативных источников энергии и в первую очередь солнечной энергии.

Прогнозы относительно тенденций развития энергетики говорят о том, что доля солнечной энергетики в различных ее формах будет непрерывно возрастать.

Так, если в США в 1989 г. на возобновляемые источники приходилось 7,6 %,а на ядерное топливо - 6,6 %, то согласно прогнозу к 2000 г. доля ядерного топлива останется на прежнем уровне, в то время как доля солнечной энергии возрастет до 23,8 %, энергия ветра - до 5,9 %, гидроэнергия будет составлять 4,2 %, энергия биомассы - 17,9 %.

Широкому внедрению солнечной энергетики препятствует ее дороговизна. Она настолько въелась в общественное сознание, что использование энергии Солнца относят к далекому будущему, не отрицая при этом перспективности использования солнечной энергии, для локальных нужд. Для ее оценки необходимо принимать во внимание существующие тенденции изменения цен энергии получаемой от Солнца и традиционных источников. Как показывает развитие энергетики, эти тенденции противоположны: цены на солнечную энергию непрерывно снижаются, а на энергию от традиционных источников - повышаются. Уже в настоящий момент стоимость энергии, получаемой с помощью преобразования солнечной энергии термодинамическим методом, приблизилась к стоимости энергии тепловых станций.

Вместе с тем имеются особенности, которые приводят к возникновению ряда проблем при использовании солнечной энергии. Она имеет низкую плотность потока, которая в тысячу раз меньше, чем в современных парогенераторах. Другой особенностью солнечной энергии, затрудняющей ее использование, является непостоянство потока солнечного излучения: он меняется в течение суток и года, а также в зависимости от метеоусловий.

Основными методами преобразования солнечной энергии являются термодинамический цикл, фотоэлектрическое преобразование и биоконверсия, каждый из которых отдельно не решает задачу. Однако объединение всех методов преобразования в гибридных системах позволяет принципиально производить самую дешевую энергию и преодолеть трудности, связанные с суточной и сезонной цикличностью поступления солнечного излучения и зависимостью от погодных условий.

ГЛАВА I

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

§ 1. СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ДАГЕСТАНА

Энергетика является базовым звеном экономики. Производство валового национального продукта, рост материальных и трудовых ресурсов в решающей степени определяются состоянием топливно-энергетического комплекса и величиной производимой энергии. В силу этого, начиная структурную перестройку экономики, необходимо прежде всего обратить внимание на состояние и тенденции развития энергетики, наличие в ней потенциала энергосбережения и внедрения ресурсосберегающих технологий.

Анализ энергетической базы и топливно-энергетических балансов Дагестана показывает, что основа ее функционирования топливные энергоносители и топливосжигающие технологии. По структуре потребляемых энергоресурсов в экономике на долю топлива (уголь, нефть, газ, дрова) приходится 80 %, а электроэнергии - 20 %. При этом наблюдается постоянное несоответствие между собственным производством топлива и его потреблением: скорость нарастания потребления топлива в республике превышает скорость его производства в 5 раз. В то же время среднегодовой прирост собственного производства электроэнергии составляет 24 %, а прирост ее потребления всего 3,4 %. В темпах потребления электроэнергии Дагестан отстает относительно производства всей энергии более чем в 2 раза.

Не лучше положение и с дешевым потреблением электроэнергии: по уровню его среднегодового потребления Дагестан отстает от России и других стран мира в 3-4 раза, а по отдельным горным районам в 10 раз.

Сложившаяся ситуация крайне неблагоприятна для Дагестана. Во-первых, сохраняющиеся тенденции развития энергокомплекса противоречат общемировым: повсюду в мире потребление электроэнергии опережает ее производство вдвое.

Во-вторых, чтобы обеспечить стабильное функционирование экономики, республике приходится импортировать значительные топливные ресурсы, сжигание которых осложняет экологическую ситуацию.

В-третьих, использование принципов централизации энергообеспечения становится фактором торможения энергосбережения и опасности для окружающей среды. По экспертным оценкам, выполненным на основе информационных материалов топливно-энергетического баланса РД, суммарные потери энергии в республике к началу 90-х годов достигали

величины, равной почти трем четвертям совместной годовой выработки Чирюртовской и Миатлинской ГЭС.

Подобное состояние свидетельствует прежде всего об отсутствии в РД какой-либо системы энергосбережения и о недопустимо низком уровне оснащенности объектов энергетики и промышленности соответствующими техническими средствами учета и контроля расходуемой энергии. Особенно это относится к системам топлива и энергоснабжения. А из-за фактического отсутствия достоверности измерительной информации нельзя добиться эффективности принимаемых решений в одной из важнейших областей энергетической политики - энергосбережении.

Итак, необходим коренной пересмотр энергетической политики Дагестана с учетом состояния основных системных звеньев топливно-энергетического комплекса, местных (региональных) особенностей и природных условий, а также прогрессивных тенденций развития мировой энергетики.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ЗВЕНЬЯ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЭК (ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС)

Топливно-энергетический комплекс республики - один из самых капиталоемких частей экономики. В его развитие и функционирование вовлекается значительное количество материальных и трудовых ресурсов. От его состояния в значительной степени зависят жизнеспособность экономики и повышение уровня благосостояния населения.

Основными звеньями топливно-энергетического комплекса в Дагестане являются системы электроснабжения и транспортной энергетики.

Централизованная система электроснабжения включает в себя всю электрическую сеть, независимо от ведомственной подчиненности. Централизация электроснабжения была обусловлена требованиями максимальной концентрации промышленных производств, но этот принцип имеет очевидные недостатки.

Принципы централизации, во-первых, диктуют крупномасштабное освоение только гидроресурсов посредством строительства больших ГЭС, хотя Дагестан располагает и другими возобновляемыми энергоресурсами. Во-вторых, это требует создания дальних электропередач высоких напряжений для транспортировки энергии в отдаленные районы. В результате - удлиняются сроки освоения гидроэнергоресурсов, усиливается противоэкологическое воздействие энергетики, увеличиваются капиталовложения, потери электроэнергии и в конечном счете снижается эффективность использования энергоресурсов. Последовательная схема освоения гидроэнергоресурсов, принятая в энергетической практике РД, обуславливает диспропорции в социально-экономическом развитии от-

дельных территориальных энергетических зон, вызывая существенное отставание в уровне электрофикации, особенно горных районов.

Существенным недостатком сложившейся системы является то, что, несмотря на наличие в республике определенного избытка электроэнергии, мы импортируем ежегодно из объединенной энергосистемы Кавказа более 1 млрд кВт/ч энергии. Особенно сильна энергетическая зависимость Дагестана от внешних источников в осенне-зимний период. При этом стала постоянной тенденция роста стоимости импортируемой электроэнергии, т.к. вырабатывается она в основном на теплоэлектростанциях. Расчеты показывают, что дефицит осенне-зимнего периода при восстановлении объемов промышленного производства в Дагестане не может быть покрыт даже с вводом в строй Ирганайской ГЭС.

Программа освоения гидроэнергоресурсов Дагестана, принятая до 2010 г., требует суммарных капиталовложений около 3 млрд долларов. Это делает программу фактически неосуществимой.

Необходим неотложный переход к иной - параллельной - схеме широкомасштабного освоения всех основных возобновляемых энергоресурсов республики.

Централизованная система топливообеспечения РД содержит организационные и технические звенья, участвующие в добыче и обеспечении республики твердым, жидким и газообразным топливом и тепловой энергией. Целью ее является передача тепловой энергии и горячей воды коммунально-бытовому сектору.

Покрытие потребности топливно-энергетического комплекса РД в твердом топливе (уголь, отопительные дрова) традиционно осуществляется за счет внешних источников. В связи с отпуском цен на энергоносители и увеличением стоимости угля, отопительных дров, нефтепродуктов и природного газа сократилось и потребление отдельных видов топлива. В тяжелое положение попали горные районы.

Сохранение традиционных методов и средств, реализующих топливную концепцию энергетики, может явиться одной из причин дальнейшего усиления напряженности в энергетике и экологии, а также существенного дефицита в бюджете республики. Если ориентироваться на цены 1993 г. и уровень топливопотребления 1990 г., то суммарные ежегодные расходы только коммунального бытового сектора на топливо составляют около 31 млрд рублей.

Действующая система нефтегазоснабжения вот уже более 10 лет работает в режиме дефицита топлива, который покрывается за счет внешних источников. Принятые в республике решения не только не направлены на изменение этого положения, а еще более усугубят его. Программа газификации республики до 2005 г. потребует для своей реализации капиталовложений около 59 млн долларов. Рост потребления природного газа будет все больше покрываться за счет внереспубликанских источни-

ков, и его дефицит по сравнению с 1990 г. к 2005 г. возрастет в 5 раз. В дальнейшем, при переходе на мировые цены, реализация программы газификации будет ежегодно требовать на покрытие дефицита природного газа около 84 млн долларов, что вряд ли осуществимо с точки зрения состояния республиканского бюджета.

Итак, нынешняя программа газификации РД не учитывает изменени в энергетической политике России, современных тенденций в мировой энергетике, потенциала местных возобновляемых энергоносителей. Единственный выход из складывающейся ситуации - это разработка новой региональной энергетической политики, основанной на бестопливной концепции энергетики, и широкомасштабный переход к бестопливным энерготехнологиям, использующим местные возобновляемые энергоносители.

Существующая система транспортной энергетики Дагестана включает в себя элементы вводного, воздушного, железнодорожного и автомобильного транспорта. Последний вид транспортных средств превалирует в транспортной энергетике. Мощность автотранспорта РД более чем в 7 раз превышает мощность Чиркейской ГЭС и представляет серьезную угрозу для экологии. В структуре топливно-энергетических ресурсов, расходуемых транспортной энергетикой, 11 % составляет электроэнергия, а 89 % - топливо. Сохранение существующей структуры приведет к тому, что ежегодные затраты на топливо при мировых ценах на нефтепродукты достигнут около 500 млн долларов.

Даже если рыночная цена на электоэнергию от существующего предела возрастет в 20 раз, то и доля ежегодных затрат на нее от текуших топливных издержек транспорта составит всего 10 %. Поэтому широкомасштабный переход в перспективе как магистральных (железнодорожных, троллейбусных, на равнине и предгорьях), так и автономных транспортных средств на бестопливные энерготехнологии позволит ежегодно экономить сотни миллионов долларов. Очевидно, что подобный переход немыслим без осуществления радикальной структурной перестройки как в энергетическом, так и в промышленном производстве.

§ 3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЭК РД

Преобладающая часть мировой энергетики, вырабатывая энергию, одновременно увеличивает жизненный риск для населения планеты. Дагестан в экологическом плане трудно отнести к оазису. Более 80 % энергии, потребляемой экономикой РД, генерируется посредством топливосжигающих и рискованных энерготехнологий, оказывающих целый комплекс отрицательных воздействий на природную среду республики. Основная часть этих воздействий эффективно не контролируется и не учитывается.

Экспертные оценки противоэкологического воздействия ТЭК РД свидетельствуют, что его звенья наносят существенный ущерб природной среде. Так, топливосжигающие звенья ежегодно используют более 2,7 млн тонн атмосферного кислорода и выбрасывают в окружающую среду более 5 млн тонн вредных газообразных соединений углерода, азота, серы и др. Серьезной экологической и экономической проблемой как для республики, так и для ее столицы становится функционирование автотранспортного парка. Он сжигает более 1,5 млн тонн кислорода в год и выбрасывает в атмосферу более 1,3 млн тонн вредных веществ, обладающих высокой токсичностью.

Ежегодное удовлетворение нужд экономики в тепловой энергии за счет отопительных дров равноценно сокращению лесных массивов по Дагестану на 567 га. А лес - один из важнейших природных генераторов кислорода.

Экологический ущерб наносит и развитие электроснабжающих звеньев комплекса на принципах централизации и максимальной концентрации производства электроэнергии. При крупном гидро и электросетевом строительстве в десятки раз повышается интенсивность излучения искусственных электромагнитных полей, растут площади земель, изъятых из социально-производственной сферы. Укрупненные оценки показывают, что на 1990 г. под водохранилищами наших ГЭС навсегда осталось более 5 тыс. га земель, а под трассами линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения в целях исключения воздействия опасных доз электромагнитного излучения отчуждено более 8 тыс. га.

Эколого-экономический ущерб, наносимый действующими звеньями топливно-энергетического комплекса РД, составляет более 105 млн. долларов в год. Сюда не входит оценка сокращения земельных площадей, цена которых постоянно растет.

Прогнозные оценки отрицательных воздействий энергетики РД в условиях сохранения имеющихся тенденций на 2010 г. свидетельствуют, что даже при максимальном сокращении импорта каменного угля и расширении объемов газопотребления в республике антропогенная нагрузка возрастет почти вдвое, суммарная площадь изъятых из пользования земель достигнет более 30 тыс. га в то время как площадь ежегодного сокращения лесных массивов из-за использования дров для отопительных нужд только по республике увеличится почти вчетверо и достигнет более 2 тыс. га. При этом нужно отметить, что в связи с поэтапным переводом электроэнергии и топлива на мировые цены низким социально-экономическим положением сельского населения РД и его дислокацией в районах лесных массивов сохранение топливосжигающих основ в энергетическом комплексе может привести к лавинообразному ежегодному росту потребления отопительных дров (например: Армения и Грузия). При таком энергоэкологическом кризисе скорость сокращения лесных массивов мо-

жет возрасти до 10 раз, что создаст реальную угрозу полного исчезновения лесов в Дагестане в ближайшие 20 лет.

Из результатов выполненного анализа комплекса взаимосвязанных элементов действующей энергетики РД, а также мирового энергетического опыта следует, что по мере ее дальнейшего развития по пути традиционной топливной концепции объем социально-экономического ущерба от топливосжигающих технологий будет приближаться к размеру получаемой от нее экономической пользы. Общество может стать перед дилеммой: энергия или чистая атмосфера. Но, хотя в будущем ущербность традиционных энерготехнологий и станет всем более наглядной, чем на настоящем этапе, чрезмерная инерционность современных комплексов во многих случаях практически не позволит провести ускоренную структурную перестройку энергетики и перевод ее на менее опасные для жизни принципы получения энергии.

Вот почему уже сегодня неоходима и экономически целесообразна переориентация топливно-энергетического комплекса Республики Дагестан на принципиально иную концепцию - бестопливную.

§ 4. БЕСТОПЛИВНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ – ПУТЬ ПРОГРЕССА ЭКОНОМИКИ ДАГЕСТАНА

Ведущей идеей принципиально новой программы развития энергетического комплекса Дагестана должна стать мысль об отказе от топливной концепции развития и переходе к энергетике, основанной на широкомасштабном освоении возобновляемых энергоресурсов.

Бестопливная концепция энергетики - это не голая идея, а результат обобщения прогрессивных тенденций мирового энергетического опыта, изучения ее технических, экономических и экологических аспектов, оценки характеристик действующего топливно-энергетического комплекса и потенциала возобновляемых энергоносителей РД и др. Предлагаемая бестопливная концепция - это не очередная попытка внедрения в традиционную энергетику зарубежного передового опыта как дополнительного ее элемента, что имеет место во многих странах мира, в том числе и в России, а единая методологическая основа создания бестопливных энергетических комплексов в любом регионе, где есть достаточный потенциал возобновляемых энергоносителей. Она включает в себя конкретные схемы освоения энергоресурсов, бестопливные технологии, проекты и программы реализации энергообъектов и механизмы организационного управления.

Одним из главных и необходимых условий создания бестопливных энергокомплексов в любом регионе является уровень природного потенциала его возобновляемых энергоносителей.

Дагестан располагает всеми видами возобновляемых энергоресур-

сов, какие известны на Земле: солнечными, ветровыми, гидравлическими, биогазовыми, геотермальными, волновыми.

Достигнутый на сегодня мировой уровень развития технологий использования возобновляемых энергоресурсов весьма различен, поэтому не всегда возможно и экономически целесообразно их промышленное освоение. Однако уже сейчас вполне экономически выгодно широкомасштабное развертывание работ по основным возобновляемым энергоносителям: гидро-, ветро- и гелиоэнергетическим ресурсам. Наиболее отработано в мировой практике освоение гидроресурсов посредством создания ГЭС средней и малой мощности.

Предварительные экспертные оценки свидетельствуют, что суммарные природные ресурсы возобновляемых энергоносителей РД превосходят все ее энергопотребности (1990 г.) более чем в 6000 раз, а практически не используемые в настоящее время в промышленных масштабах ветровые и солнечные энергоносители обладают потенциалом, который на несколько порядков превосходит природные возможности гидроэнергоресурсов. В частности, по расчетам специалистов, природный потенциал возобновляемых энергоносителей РД составляет: солнечных - 23,6 млрд т у.т./год; ветровых - 4,6 млрд т у.т./год; волновых - 308 млн т у.т./год; гидравлических - 18 млн т у.т./год.

Среди благоприятных районов для размещения крупных ветростанций выделяется и Дагестан. Наша республика отличается постоянством ветрового режима. В приморской части республики, особенно в районе г. Махачкалы, среднегодовые скорости ветра составляют более шести метров в секунду. Первая ветровая электростанция Дагестана типа "Циклон - 6" была построена в 1980 году. Она размещена на побережье Каспия на территории Каспийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства.

Дагестан - один из перспективных районов и в области развития гелиоэнергетики. Здесь имеет место активное солнцестояние. В отдельных районах республики среднегодовая продолжительность солнечного сияния доходит до 2500 часов, а количество солнечных дней в среднем составляет до 310 и более в году.

В Махачкале пущен в строй действующий специализированный завод по производству различных видов солнечных установок. Ряд установок для горячего водоснабжения, отопления, сушки сельскохозяйственных продуктов и материалов уже успешно применяется в южных районах Дагестана. В Гунибе еще с 1980 года функционирует пятикомнатный дом с солнечным отоплением и горячим водоснабжением. В селении Гимры гелиотехническая установка обеспечивает работу общественной бани, а на турбазе "Рубас" - душевая на 250 мест. Всего в республике несут службу более 20 таких гелиостанций.

Основными территориальными энергетическими зонами дислокации

возобновляемых энергоносителей по выполненным оценкам являются: Центральная (Сулакская), Северная (Терско-Кумская), Южная (Самурская), Морская (Каспийская). Все они охватывают территорию Дагестана, а также его морскую акваторию. Этот факт, а также наличие в каждой зоне от 3 до 5 видов возобновляемых энергоносителей позволяют развернуть широкомасштабную программу их использования по параллельной схеме освоения и создания децентрализованных систем гарантированного энергообеспечения.

Уже на настоящем этапе, без создания дополнительного научно-технического задела, можно приступить в первую очередь к широкомасштабному освоению гидроресурсов. Реализация малых и средних ГЭС по параллельной схеме (в трех зонах республики, с продвижением сверху вниз по речным бассейнам) уменьшит объемы необходимых капвложений, увеличит эффективность и сократит сроки использования гидроэнергоресурсов, существенно изменит противоэкологическое воздействие ГЭС, ускорит развитие социально-экономической инфраструктуры горных районов.

Расчеты потенциала основных возобновляемых энергоносителей показывают следующее: при стабилизации экономики Дагестана и ежегодном устойчивом росте энергопотребления (4 % в год), освоение хотя бы 1 % природных возобновляемых ресурсов позволит перекрыть все энергетические потребности республики более чем в 53 раза. Таким образом, достаточно практического освоения 0,02 % природных ресурсов, располагаемых энергоносителями, для того чтобы удовлетворить все энергетические и транспортные потребности экономики Дагестана на перспективу до 2010 года без импорта всех видов топлива.

§ 5. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ БЕСТОПЛИВНОЙ КОНЦЕПЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ

Новая региональная энергетическая политика в республике должна включать в себя ряд тактических и стратегических задач. В качестве тактических задач можно предложить комплекс мер по энергосбережению во всех действующих системах топливно-энергетического комплекса. Первоочередной задачей является реформа ценообразования. Нынешнее состояние цен на производственные товары и энергоносители, а также принципы формирования цен на энергию фактически не обуславливают экономические стимулы к энергосбережению.

С точки зрения мирового опыта и экономической науки первичной ценообразующей основой энергии является себестоимость производства и доставки ее до потребителя.

Следующей тактической задачей новой региональной энергетической политики является проведение энергетического обследования всех действующих звеньев экономики на предмет выявления резервов энерго-

сбережения с выдачей рекомендаций по экономике энергии, отражаемых в специальном паспорте. При этом должна быть введена система штрафов и надбавок к тарифам на энергию, размер которых устанавливается в зависимости от выявления резервов экономии энергии, экологической чистоты производимой и потребляемой энергии. Можно предусмотреть льготное (беспроцентное) кредитование мер по экономии энергии и экологическому обеспечению за счет специального республиканского фонда энергосбережения. Решение этой задачи, естественно, невозможно без увеличения и улучшения уровня оснащенности системы учета и контроля энергии во всех элементах комплекса.

По расчетам специалистов, ежегодный сумарный потенциал энергосбережения в республике в настоящее время составляет 58 млн долларов. Это могло бы стать важнейшим фактором сокращения хронического дефицита бюджета Дагестана.

Стратегический механизм реализации бестопливной концепции энергетики требует обязательного наличия 3-х главных составляющих: первая - энергоэкологический капитал, т.е. достаточный для нужд региона природный потенциал возобновляемых энергоносителей; вторая - научно-технический капитал, т.е. достигнутый мировой уровень и сумма передовых энерготехнологий; третье - финансовый капитал, т.е. сумма денежных средств, необходимых для развертывания и управления бестопливным энергетическим комплексом.

Первая составляющая в Дагестане имеется в избытке. Что касается второй составляющей, то в настоящее время мировой энергетический опыт достиг высоких технико-экономических показателей по бестопливным технологиям, преобразующим гидроэнергоресурсы, и средних - по преобразующим ветро- и гелиоресурсы. Дагестан имеет определенный научно-технический потенциал и практический опыт по этим технологиям, а также располагает достаточным промышленным и энергостроительным потенциалом.

Однако основным тормозящим фактором в механизме реализации новой концепции энергетики является отсутствие третьей составляющей - необходимого объема стартового финансового капитала.

Проект реализации бестопливной концепции энергетики важен не только для Дагестана, но имеет и международное значение - здесь будут отрабатываться все механизмы создания бестопливных энергокомплексов будущего. Его цели и задачи полностью отвечают решениям ООН, Всемирного энергетического комитета, Европейской энергетической хартии, положениям новой энергетической политики России.

В скором будущем, территорию Дагестана можно назвать Первой комплексной зоной бестопливных энергоносителей мира, где будут отрабатываться и регулироваться механизмы и элементы создания бестопливного энергокомплекса с учетом опыта мировой цивилизации.

ГЛАВА II

ЭНЕРГИЯ

§ 1. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Слово "работа" известно каждому. Работа играет огромную роль в жизни как отдельного человека, так и всего человеческого общества. В процессе эволюции живой природы именно труд выделила человека из животного мира.

Обычно под работой мы понимаем различного рода деятельность людей в народном хозяйстве, которая направлена на удовлетворение потребностей общества. Это - сев и уборка урожая, добыча руды, разливка металла, вождение поезда и автомашины, пиление и строгание, стирка и домашняя уборка, деятельность инженера, врача и писателя, функционирование государственного аппарата и правосудия. А такие виды деятельности, как туризм, шахматная игра, танцы и многие другие обычно считаются отдыхом и рассматриваются как развлечение.

В действительности же работа неотделима и от этих видов деятельности человека. Рассмотренное выше понятие работы необходимо отличать от понятия работы в физическом смысле, которое намного шире и сложнее.

Легче всего дать определение механической работы, которая была первой ступенью в познании характерных особенностей работы. Чтобы производить работу, нужна сила, и по известному всем определению работа A, совершенная при помощи силы F, равна произведению этой силы на путь S в направлении действия, то есть $A = FS$, если сила при этом не меняется.

В качестве простого примера механической работы приведем работу, совершаемую телом с массой m при свободном падении под действием земного притяжения (характеризуемого ускорением силы тяжести g) с некоторой высоты h. Эта работа в соответствии с формулой равна mgh. Таким образом, тело, на высоте h, обладает тем свойством, что при определенных условиях, т.е. при падении, оно может производить работу. В таком случае говорят, что тело с массой m на высоте h (относительно высоты h=0) обладает потенциальной энергией (энергией положения) mgh. После падения на уровень h=0 потенциальная энергия становится равной нулю (тело уже не способно производить дальнейшую работу), но теперь оно приобретает "новое" свойство, а именно скорость V ($V=2gh$), и, следовательно, обладает кинетической энергией (энергией движения) равной $mV^2/2$.

Итак, механическая работа совершается при изменении состояния тела, производящего работу. В приведенном примере тело в начальном состоянии вследствие своего положения обладало способностью производить работу, а в конечном состоянии его положение уже не обеспечи-

вало ему этой возможности. Однако способность тела производить работу ни в коей мере не исчезла, она лишь видоизменилась. Теперь тело способно производить работу за счет скорости; оно может даже (при условии незначительного трения во время движения) практически произвести столько работы, сколько ее производит в своем начальном состоянии на высоте h. Примером могут служить колебания маятника без трения (рис.1). Если принять, что в самом нижнем положении h=0, то маятник, представляющий собой шарик, висящий на тонкой нити, отклонившись в левое крайнее положение, будет находиться на высоте h=0 и благодаря этому производит работу mgh. Самое нижнее положение (h=0) он проходит со скоростью V, достигнув в результате этого движения, так как его потенциальная энергия mgh перешла в кинетическую энергию $mxV^2/2$. Если трение маятника ничтожно мало, то приобретенная скорость обеспечивает шарику возможность пройти через нижнюю точку и подняться на ту же высоту h. При этом он совершает работу mgh против силы гравитационного поля, а скорость его падает до 0. Таким образом, работа совершается благодаря постоянному превращению энергии. При свободных колебаниях маятника без трения будет непрерывно происходить переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

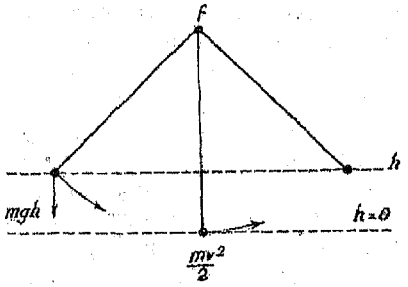


Рис. 1. Взаимное превращение кинетической и потенциальной энергий при колебаниях маятника.

Наши рассуждения ясно показывают, что механическая энергия означает способность производить работу, но она не идентична самой работе. Работа же совершается при превращении одного вида энергии в другой, причем результатом такого превращения не всегда является именно механическая работа, как в рассматриваемом выше примере. Если, например, маятник будет двигаться с очень сильным трением (допустим, в вязкой жидкости), то при возвращении из верхнего положения в нижнее он остановится, то есть его скорость уменьшится до 0. В этом случае потенциальная энергия маятника превращается в кинетическую лишь временно; к концу движения вся энергия маятника переходит в тепло, вследствие чего повышается внутренняя энергия всей системы маятник-окружающая среда. Работа, которую мы можем непосредственно воспринять нашими органами чувств, совершается благодаря движению макроскопических тел. Способность производить работу, а следовательно, и энергия неразрывно связаны с движением. Однако это - необязательно непосредственно наблюдаемое движение макроскпических тел. Энергия может быть также обусловлена движением атомов и молекул, которое не воспринимается нашими органами

чувств. К такому движению относится, например непрерывное хаотическое движение атомов и молекул, соответствующее термической энергии (энергии теплового движения). При определенных условиях это движение все же частично можно упорядочить, и тогда оно проявляется макроскопически и может быть использовано для получения работы.

Выводы, полученные из примера с механической энергией и работой, могут быть обобщены. Работа - это всегда результат превращения одной формы энергии в другую, и она неизбежно связана с какими-либо изменениями, процессами.

Существование различных видов энергии вызывается разнообразием форм движений (кинетическая энергия например, упорядоченным движением тела как целого, термическая энергия - хаотическим движением молекул или атомов, электрическая - движением электронов или других заряженных частиц). Следовательно, работа производится при взаимном превращении различных форм движения различных тел. Иными словами, работа есть количественная мера качественного взаимного превращения. Эти формы энергии могут превращаться друг в друга или переходить от одного тела к другим. Работа возникает лишь как следствие этих превращений. Кроме того работа, которая является результатом изменения состояния тела или системы тел, может изменить состояние других тел. В пределах, установленных законами природы границ, мы можем целесообразно управлять этими превращениями в нужном для нас направлении. Например, в водяных мельницах превратить кинетическую энергию речной воды во вращательную энергию жерновов и использовать ее для размола зерна или химическую энергию, освобождающююся при сжигании угля, нагревающего котел, - в механическую энергию и с помощью произведенной при этом работы изготовить из металлических болванок необходимые нам предметы, из нитей - ткани и т.д. Таким образом, работа становится средством для переработки природных материалов и тем самым важнейшим фактором для человека и общества в целом. Так как можно накапливать только энергию, а не работу, то важнейшая наша задача - найти вещества, содержащие такой вид энергии, который при производстве работы относительно просто превращается в другой вид энергии. Эти вещества мы называем источниками или носителями энергии (энергоносителями).

§ 2. НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ОБЩЕСТВА ФОРМЫ ЭНЕРГИИ

Простейшая деятельность человека - целесообразное изменение первоначальных продуктов природы, защита от неблагоприятных внешних условий (холода, непогоды и диких зверей) - требует в первую очередь механической работы. Большое значение для человека имеет и тепло - явление, также связанное с изменением энергии и в известном смысле аналогичное работе.

Первобытный человек собирал пищу, создавал свои примитивные орудия, охотился и рыбачил, устраивал жилье, применяя механическую работу. Даже в современном обществе энергия используется преимущественно в форме механической работы: в промышленности и сельском хозяйстве, строительстве и транспорте, быту и т.д. Кроме того, еще и сегодня очень важна механическая работа, производимая самим человеком.

Огонь

Наряду с механической работой с древних времен большую роль в жизни человека играло тепло. В древности, для получения его искусственным путем, т.е. добыть огонь, нужно было затратить очень много механической работы, чтобы растереть сухое дерево и разогреть его до такой температуры, которой оно бы воспламенилось. Мы и сейчас не можем обойтись без механической энергии для получения огня, но наши нынешние приспособления (спички, зажигалки) позволяют это сделать с ничтожными затратами сил. Открытие способа добычи огоня означало большой шаг в развитии человечества.

Тепло, которое освобождается в результате химического превращения и проявляется в виде огня, используется современным человеком не только непосредственно для обогрева, но и как некая переходная ступень превращения химической энергии в механическую работу. Нужно заметить, что образование тепла не всегда желательно. Однако почти каждое превращение энергии сопровождается образованием тепла. Поскольку тепло не может быть полностью превращено в работу, в ряде случаев (например, при трении) его можно считать формой энергии, полностью потерянной для человека.

Химическая энергия

Первым в истории человечества искусственно вызванным химическим процессом было, пожалуй, горение - разложение при помощи окисления растительной массы, имеющей сложный химический состав, на вещества более простые такие, как вода, углекислый газ и др. Огонь помог человеку использовать и другие химические процессы: именно благодаря огню человек смог сделать свои продукты питания мягче, вкуснее и удобоваримее.

Со временем люди научились использовать не только огонь, но и другие химические процессы. Однако только к концу XVIII века люди овладели законами природы настолько, что научились искусственно вызывать химические процессы и проводить их целенаправленно. Но теперь уже в большинстве случаев целью этих процессов было не разложение вещества, т.е. получение более простых по своему составу соединений, а

наоборот, синтез веществ более сложного состава из простых "кирпичиков". Разумеется, химическое разложение сложных веществ ни в коей мере не потеряло своего значения: на нем основана, например, выплавка металлов из руды, при которой металлы высвобождаются из соединений. Продукция многих других отраслей промышленности есть результат разложения вещества сложного состава на более простые. Превращение одних химических веществ в другие сопровождается изменением химической энергии. Целесообразное и хорошо продуманное применение определенных видов энергии дает возможность в границах, установленных объективными законами природы, планомерно управлять химическими реакциями. На этой основе в последнее время стремительно развивается химическая промышленность, требующая все больших затрат энергии.

Световая энергия

Долгое время человек получал световую энергию исключительно при помощи сжигания (окисления) нагретых до каления твердых веществ. В факелах, масляных лампах, в свечах, керосиновых лампах газовых фонарях свет излучают либо возникающие в результате неполного сгорания раскаленные угольные частички, либо введенные в пламя другие твердые вещества. В современных лампах накаливания свет дает также раскаленное твердое вещество (вольфрамовая нить накаливания), но здесь свет излучается не благодаря освобождающейся в результате окислительного процесса химической энергии, а за счет превращения электрической энергии в световую.

Все же превращение электрической энергии в световую при посредстве тепла не экономично. Поэтому ныне прилагаются усилия к исключению тепла как посредника при этом превращении. В новейших осветительных приборах электрическая энергия превращается в световую без сколько-нибудь значительного выделения тепла, поэтому такие приборы отдают при одинаковом потреблении электрической энергии в три-четыре раза больше световой энергии, чем лампы накаливания.

Электрическая энергия

В энергетическом балансе современного высокоразвитого общества электрическая энергия играет все большую роль. В действительности нам, разумеется, не нужна электроэнергия как таковая, поскольку мы не можем ее ни воспринимать, ни непосредственно употреблять. Электрическую энергию можно, однако, относительно простыми средствами превращать в тепло, механическую работу или другие формы энергии. Производство электроэнергии, т. е. превращение имеющихся в природе дру-

гих форм энергии в электрическую, в больших масштабах экономически сравнительно выгодно.

Электрическую энергию можно передавать на большие расстояния с относительно малыми потерями и, таким образом, легко подводить к потребителям, поэтому ее следует считать лучшей и наиболее легко поддающейся использованию формой энергии, с помощью которой имеющиеся в природе энергетические ресурсы распределяются в соответствии с нашими нуждами.

Ныне электрическая энергия производится в основном в результате превращения химической энергии угля или нефти сначала в тепло, которое дает возможность получать механическую работу; за счет этой работы и получается в дальнейшем электрическая энергия. Такое непрямое превращение весьма неэкономично, так как при этом пропадает значительная часть энергии.При современном состоянии науки и техники не обойтись без такого, связанного с большими потерями, способа получения электрической энергии, хотя теоретически известно, как можно избежать этих потерь. Соответствующие методы уже применяются в лабораторных условиях. Однако надежное и экономически оправданное непосредственное превращение в больших масштабах химической энергии в электрическую потребует еще очень большой исследовательской работы.

Незначительная часть электрической энергии производится не из химической, а из механической (потенциальной и кинетической) энергии воды на гидроэлектростанциях. В последнее время начинает получать некоторое распространение новый метод получения электроэнергии - путем превращения атомной энергии в электрическую, - однако и здесь потери энергии в виде тепла значительны.

В настоящее время находят также применение, правда в весьма ограниченных масштабах, такие виды энергии, как акустическая и магнитная.

Источники энергии

В большинстве случаев природа поставляет нам энергию не в той форме, в какой она нужна для наших конкретных целей. Поэтому мы вынуждены преобразовывать имеющуюся в нашем распоряжении энергию. Для получения работы мы должны найти соответствующие источники энергии, т. е. такие вещества, которые являются носителями наиболее пригодного для реализации вида энергии.

Следует отметить, что живые организмы (в том числе человек) сами являются носителями значительных запасов энергии. Живые организмы содержат относительно большое количество химической энергии. В ходе таких и до сих пор недостаточно изученных химических процессов про-

исходит превращение энергетически богатых сложных веществ живого организма в простые вещества, которое сопровождается выделением энергии. Эти превращения являются источником мускульной работы человека и животных, при помощи которой они поддерживают свои жизненные функции, перемещаются, обеспечивают себе пропитание, а также могут производить необходимые и полезные изменения окружающей среды. Эти "естественные" источники энергии, питаемые химической энергией собственного тела, удовлетворяли человека только на ранней стадии человеческого общества, длившейся, однако, многие тысячелетия. Уже в первобытную эпоху человек поставил себе на службу "внешний" энергетический источник - мускульную силу животных, что позволило ему значительно увеличить объем производимых работ. В дальнейшем в связи с разделением труда одни люди стали претендовать на мускульную силу других. Позднее, еще через многие тысячелетия, человек заставил работать на себя энергию воды, которая приводила в движение мельничные колеса и устройства оросительных систем и ветра, а он вращал крылья мельниц и надувал паруса судов.

Можно считать, что первые сознательные действия для получения энергии человек совершил тогда, когда научился извлекать огонь из сухих растений. Огонь давал человеку тепло, помогал улучшать пищу и отпугивать диких зверей. Однако использовать огонь для получения механической работы наши предки еще не умели. Известно, что уже во 2 веке до нашей эры Герон в Александрии открыл способ превращения тепла с помощью пара в кинетическую энергию вращающегося тела (в сущности, он открыл паровую турбину), но в течение двух тысячелетий никто не пытался использовать это явление для получения работы. Такое пренебрежение к неживым источникам энергии объясняется не только относительно низкими потребностями тогдашнего общества, но и дешевизной рабочей силы, легкостью ее эксплуатации - не было нужды в изобретении сложных орудий для замены этой силы.

Только с развитием капиталистического способа производства потребности в энергии настолько возросли, что не могли уже полностью удовлетворяться за счет эксплуатации существовавших в то время источников энергии. Примерно 200 лет назад был открыт пар как носитель энергии. Во второй половине XVIII века в Англии, в то время наиболее развитой индустриальной стране, была сконструирована паровая машина, которая начала применяться в широких масштабах и обеспечила невероятно высокий, невиданный до тех пор темп промышленного развития. Поэтому XIX век, а также начало XX, по праву считают веком пара. На исходе прошлого столетия у паровой машины появились конкуренты - двигатели внутреннего сгорания (бензиновые и дизельные). Преимущества двигателей внутреннего сгорания особенно велики для машин малой и средней мощности; для очень больших мощностей все же выгоднее паровая машина.

Уже в конце XIX века наряду с паром получила распространение электрическая энергия, а в первые десятилетия XX она заняла ведущее место. Мы можем с полным правом сказать, что живем в век электричества. Правда, большую часть электрической энергии еще и сегодня получают с помощью паровых машин, но производство ее сосредоточено преимущественно на огромных тепловых электростанциях. Мощные паровые турбины электростанций гораздо рентабельнее малых паровых машин.Электрические моторы и двигатели внутреннего сгорания все больше вытесняют паровую машину как силовую установку. Электромоторы имеют высокий КПД, работают без отходов и бесшумно, электроэнергия может передаваться по проводам на многие тысячи километров от источника.

Наряду с тепловыми электростанциями растет значение гидроэлектростанций, где генераторы электрического тока приводятся в движение не паровыми, а гидротурбинами. Однако при строительстве современных гидроэлектростанций необходимо сооружать водяные плотины и производить другие дополнительные работы, и в большинстве своем они требуют больших капиталовложений, чем тепловые электростанции.Все же производство электроэнергии на гидростанциях обходится дешевле благодаря использованию энергии воды, поставляемой самой природой, но распространение их ограничено в связи с тем, что экономичны они только там, где достаточно воды и благоприятен рельеф местности. Топливо же для котлов тепловых электростанций(уголь, нефть или газ) необходимо добывать из недр Земли весьма трудоемким путем и доставлять к месту потребления.

Энергетические источники будущего

Наряду с тепловыми электростанциями, использующими химическую энергию, источниками которой являются уголь, нефть и газ, начинает завоевывать признание атомная энергия, носителем которой в настоящее время практически прежде всего является уран. Первая атомная электростанция, давшая промышленный ток, была построена в 1954 г. в СССР, а в 1959 г. со стапелей был спущен атомоход "Ленин". С тех пор построено много более мощных атомных электростанций. Запасы урана достаточно велики, он дешев для транспортировки, отдаленность мест его добычи не имеет экономического значения. Если в будущем удастся осуществить управляемую термоядерную реакцию, т.е. синтез ядер гелия из водорода, то топливо (водород, получаемый из воды) для производства электроэнергии мы будем иметь практически в неограниченном количестве.

В настоящее время электроэнергия в большинстве случаев получается с помощью механических устройств, отдельные части которых движутся со значительным трением. На электростанциях химическая энергия превращается в тепло путем окисления топлива, а атомная в ядерных ре-

акторах - в результате ядерных превращений. Полученный при помощи этого тепла пар приводит в движение турбины генераторов тока. Это в общем не выгодно, и не только потому, что значительное количество энергии из-за трения частей машин превращается в тепло (при этом часть полезной мощности пропадает), но главным образом вследствие того, что тепло, являющееся здесь промежуточным продуктом превращения энергии, может переходить в другие, нужные виды энергии лишь с очень низким коэффициентом полезного действия. Поэтому целесообразнее превращать энергию, заключенную в энергоносителях, в электрическую, минуя стадию тепла, поскольку электрическая энергия может быть принципиально полностью, а практически с хорошим КПД переведена в работу. Здесь открываются большие возможности, практическое осуществление которых - задача ближайшего будущего.

Одна из этих возможностей заключается в том, что в некоторых химических соединениях под воздействием света может возникать до некоторой степени направленное движение электронов, т.е. начинает течь ток. Это так называемый фотоэлектрический эффект, который используется в фотоэлементах. Здесь можно говорить о превращении световой энергии в электрическую без выделения сколько-нибудь значительного количества тепла. Принципиально световое излучение Солнца можно таким образом превращать в электрическую энергию без потерь. На практике из-за технического несовершенства фотоэлементы работают пока с КПД, не превышающим 10-12 %, следовательно, превращают в электрическую энергию только 10-12 % падающего на них излучения. На пути широкого внедрения фотоэлементов в технику имеются и другие препятствия, однако в особых условиях (например в приборах, установленных в отдаленных пунктах, на космических кораблях и т.д.) они незаменимы.

В гальванических элементах возможно почти полное превращение химической энергии в электрическую, минуя стадию тепла.

На обычных электростанциях потери полезной работы возникают не только в связи с тем, что при превращении энергии она вначале переходит в тепло, но также из-за трения и износа твердых частей машины. Поэтому предпочтительнее такие машины, которые не имеют твердых движущихся частей. Теоретически, а в какой-то мере и практически такое устройство можно выполнить при помощи термоэлементов, состоящих из двух различных спаянных между собой металлов или полупроводников, где тепло непосредственно превращается в электрический ток.

Магнитогидродинамические генераторы также не содержат твердых движущихся частей, электрический ток возникает здесь в сильно нагретом ионизированном газе, пропущенном через магнитное поле. Однако эти установки вследствие их технического несовершенства пока еще не могут обеспечить производство электроэнергии в широких масштабах.

§ 3. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Законы сохранения и превращения энергии

Тысячелетний опыт науки и техники, бесчисленные эксперименты привели нас к выводу, что энергия не может ни возникнуть из ничего, ни исчезнуть. Мечта многих изобретателей о машине, которая производила бы механическую работу, не питаясь от внешнего энергетического источника (перпетуум мобиле), так и осталась мечтой. Этого факта было достаточно для того, чтобы сформулировать один из основных законов природы, так называемый закон сохранения энергии.

Закон сохранения энергии во многих случаях противоречит нашим непосредственным восприятиям. Часто кажется, что энергия будто бы пропадает. Подмастерье кидает каменщику кирпич вверх: кинетическая энергия кирпича исчезла, поскольку наверху он уже находится в состоянии покоя. Поезд затормозил. Его кинетическая энергия исчезла. Батарея нашего карманного фонаря истощилась - большая часть ее химической энергии исчезла. Можно привести еще бесчисленное количество примеров. На каждом шагу наблюдаются явления исчезновения энергии. Однако при ближайшем рассмотрении этого вопроса можно убедиться, что при исчезновении одного вида энергии всегда одновременно возникает по меньшей мере один новый вид энергии; в большинстве случаев возникает несколько новых видов энергии. Таким образом, энергия не исчезла, а превратилась в один или несколько других видов энергии. Кинетическая энергия кирпича в основном перешла в потенциальную и в меньшей степени - в звуковую и тепловую; кинетическая энергия затормозившего поезда - в тепловую; химическая энергия, содержащаяся в батарее карманного фонаря, при его работе превращается в световую и тепловую энергии; в радиоприемнике электрическая энергия - в звуковую, тепловую и световую энергии.

Переход одного вида энергии в другой может совершаться различными способами. Если не принимать во внимание технических несовершенств, то можно сказать, что из определенного количества энергии одного вида всегда возникает (в случае полного превращения) вполне определенное количество другого вида энергии независимо от того, каким способом и с помощью какого устройства совершено это превращение. Так например, из 1кГм механической работы всегда возникает 2,34 кал и из 1 кВтч электрической энергии - всегда 860 ккал тепла (если при этом не возникают другие формы энергии). Когда в процессе превращения образуются несколько видов энергии, нужно учитывать сумму энергий всех видов, выраженных в одинаковых единицах. Исходя из этого, сделаем вывод, что закон превращения энергии является составной частью закона

сохранения энергии.

Так как энергия есть мера движения тела и составляющих его атомов и молекул, закон сохранения энергии может быть выражен так: движение сохраняется и не может быть остановлено, оно есть важнейшее свойство материи. Из закона превращения энергии видно, что существует много видов движения, например механическое, тепловое, электрическое и т.д., которые могут быть превращены друг в друга, и всегда строго соблюдается принцип "эквивалентности", т.е. в этих процессах движение не уничтожается, не создается "из ничего".

Потери энергии

В связи с практическим использованием энергии обычно говорят о потере энергии с точки зрения экономики. Однако такая потеря энергии не противоречит закону сохранения энергии. Энергия, потерянная для экономики, не превратилась в ничто: речь идет только о том, что часть энергии превратилась не в ту форму, которая нам в данном случае нужна. Когда мы пускаем паровую машину, то делаем это с намерением превратить химическую энергию топлива (угля, нефти и т.д.) в механическую энергию, поскольку в данном случае она представляет для нас ценность. На практике, однако, в паровой машине наряду с механической энергией неизбежно возникает тепло, которое в данном случае можно считать потерянной энергией. Конечно, в других случаях, например при отоплении, ценно именно тепло. Но не следует думать,что при этом в печах нет потери энергии. Только часть тепла, полученного из химической энергии топлива, достигает нашей комнаты или отопительного котла, большая же часть уходит в трубу, через стены комнаты, и следовательно, теряется.

Итак, потери энергии означают не ее исчезновение, а только превращения, которые не служат нашим целям и поэтому бесполезны. В этом смысле потери энергии подобны всем прочим потерям: потеря шляпы или карманного ножа не означает уничтожение этих предметов, другим людям они могут принести туже пользу.

Коэффициент полезного действия процессов превращения энергии

Эквивалентность различных видов энергии, постоянство количественных соотношений при их взаимных превращениях надежно подтверждаются тщательно проведенными научными исследованиями. Однако на практике очень трудно создать условия для полного превращения одного вида энергии в другой, нужный для какой-либо конкретной цели. В большинстве случаев образуются ненужные, для данного случая, а иногда и вредные формы энергии. Так, например, в устройствах, содержащих макроскопические движущиеся части, никак нельзя избегнуть тре-

ния, протекающего с выделением тепла. Тепло это в большинстве случаев не используется, напротив, неизбежное нагревание вредно сказывается на материалах конструкций. Поэтому на практике совершенно обоснованно говорить (в экономическом смысле) о коэффициенте полезного действия процессов превращения энергии.

Коэффициент полезного действия данного процесса превращения энергии показывает, какая часть исходной энергии (выраженная в процентах) преобразуется в нужную нам форму энергии. Например, когда мы говорим, что тепловая электростанция работает с КПД 35%, это означает, что 35% (0,35) химической энергии, освобождающейся при сжигании топлива, превращается в электрическую энергию.

КПД различных процессов или установок, где происходит превращение энергии, сильно отличаются друг от друга. Как правило, с наибольшим КПД происходит превращение в тепло. Механическая, электрическая, химическая и другие виды энергии практически могут быть на 100 % превращены в тепло. КПД при превращении механической энергии в электрическую на гидроэлектростанциях достаточно высок 90-95%. Хороший КПД мы имеем также при непосредственном (минуя стадию тепла) превращении химической энергии в электрическую в гальванических элементах. Однако в настоящее время в связи с техническими трудностями гальванические элементы не могут использоваться для получения электроэнергии в больших количествах.

Значительно хуже обстоит дело, при переводе химической энергии в электрическую не сразу, а постепенно: сначала превращаем ее в тепло, с помощью которого производится механическая работа, а последнюю в электрическую энергию. При этих условиях низкий КПД обусловлен не только техническими трудностями, но и спецификой процесса превращения тепла в другие виды энергии.

Современные большие тепловые электростанции превращают химическую энергию, освобождающуюся при сжигании топлива, в электрическую с КПД от 35 до 40 %. Дизельные двигатели работают с КПД не выше 40-45 %, а КПД паровозов обычно не превышает 6-7 %. КПД осветительных приборов еще ниже: обычная 40-ваттная лампа накаливания превращает только около 1,5 % электрической энергии в видимую световую энергию; даже самые лучшие лампы накаливания имеют КПД не выше 5 %. В керосиновых лампах только 0,1 % освобожденной при сгорании керосина химической энергии превращается в световую.

Правомерно задать такой вопрос: если включение тепловой энергии как промежуточной стадии при превращении химической энергии в работу или электрическую энергию столь выгодно, то почему же большая часть электрической энергии и механической работы на сегодняшний день производится при помощи тепловых двигателей (паровые машины, бензиновые и дизельные двигатели)? Причина заключается в том,

что для создания надежно работающих тепловых двигателей достаточно знания законов движения макроскопических тел, а также макроскопических свойств тепла. Для создания же гальванических элементов, не имеющих макроскопически движущихся деталей, надежно и экономично работающих в промышленных масштабах, нужно глубоко изучить соответствующие законы движения молекул, атомов и электронов. Только в таком случае возможно создание большого количества дешевых гальванических элементов, надежно работающих в условиях производства. Из-за недостаточности знаний в этой области человечество из года в год несет потери энергии, размер которых даже не поддается оценке. Поэтому высокоразвитые страны вкладывают средства в чрезвычайно дорогие исследования с целью восполнить этот пробел.

Теоретически превращения энергии без промежуточной стадии тепла возможны с КПД, равным 100%. В настоящее время КПД таких превращений еще очень низок как вследствие слабого знания механизмов микропроцессов, происходящих при этих превращениях, так и из-за отсутствия соответствующих материалов для изготовления нужных устройств. Таких материалов в природе не существует, поэтому их нужно создавать искусственно. Правда, в живых организмах процессы превращения энергии происходят с очень высоким КПД, но они идут с участием веществ, имеющих чрезвычайно сложную структуру. Эти химические соединения и законы их превращений не изучены нами настолько хорошо, чтобы применять их для практического получения энергии вне живых организмов. Мы пока еще не можем синтезировать все сложные вещества живых организмов и тем более поставлять их для нужд производства.

§ 4. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Мировое производство энергии стремительно растет. В 1962 г. оно уже достигло примерно 33×10^{15} ккал. Большую часть этого количества человечество использует для механической работы и отопления. Непрерывно возрастает количество электрической энергии, включаемой в этот процесс в качестве посредника.

Как уже говорилось, работу нельзя накапливать, таким образом, в природе не может быть "запаса работы". Нет на Земле также электрической энергии в форме, доступной для непосредственного макроскопического использования. Поэтому для покрытия энергетических потребностей общества мы вынуждены обратиться к другим источникам.

Поскольку энергию нельзя "создать" из ничего, мы вынуждены производить необходимые для нас виды энергии путем преобразования других форм, причем это превращение должно быть экономичным и возможным в широких производственных масштабах. К носителям таких видов энергии следует отнести в первую очередь уголь (каменный и бу-

рый), а также нефть и природный газ, применяющийся в настоящее время в промышленности в качестве топлива для двигателей, производящих механическую работу или электрическую энергию. Помимо указанных выше носителей энергии, в странах с подходящим рельефом местности довольно широко используется энергия воды ("белый уголь") и в меньшей мере ветра. В развитых странах применение мускульной энергии животных все больше и больше отходит на задний план. В настоящее время постоянно растет доля атомных электростанций в общем производстве электрической энергии. В связи со стремительным ростом потребности в энергии во всем мире предпринимаются попытки использовать в производственных целях новые источники энергии, например солнечное излучение. Предлагается, в частности, концентрировать солнечную энергию с помощью зеркал, а добытое таким образом тепло использовать для получения пара, который сможет приводить в движение турбины. Исследования в области проводников еще не дали больших результатов, но в настоящее время они уже обеспечивают возможность изготовления термо- и фотоэлементов, при помощи которых энергия теплового или светового излучения Солнца может быть превращена в электрическую энергию с КПД 10-13 %. Ученые занимаются также проблемой использования тепла Земли. Температура внутри Земли растет с глубиной. Если подвести тепло с больших глубин к поверхности земли, то можно понижая эту температуру частично превратить тепло в работу. На этом принципе уже построены геотермические электростанции. Однако на пути их более широкого распространения стоят еще не преодоленные технические трудности.

Предпринимаются также попытки использовать энергию, соответствующую разности уровней поверхности воды во время прилива и отлива.

Все эти новые источники энергии, в настоящее время покрывают весьма малую часть мирового потребления энергии. Ныне потребность в энергии удовлетворяется в основном за счет угля, нефти и пророднего газа; такое положение, очевидно, сохранится и в ближайшем будущем. В связи с этим несомненный интерес представляет вопрос о происхождении энергии, накопленной в этих природных источниках.

Происхождение каменного угля

Уголь (каменный и бурый), употребляемый как горючее или топливо, в большинстве случаев залегает в земле (частично на глубине многих сотен метров). Только некоторые залежи бурого угля встречаются на поверхности земли или непосредственно вблизи поверхностных слоев. Добытый уголь, кроме углерода, содержит различное количество соединений (главным образом соединений углерода с кислородом и водоро-

дом, и в меньшем количестве - с азотом, серой и другими элементами). Основными химическими элементами, входящими в состав угля, являются углерод, кислород и водород.

Бурые и каменные угли в большинстве своем имеют растительное происхождение и содержат в небольшом количестве минеральные вещества. Они образовались в теплом и сыром климате в глубокой древности из сильно разросшихся растений, когда они после гибели погружались на дно водоемов и поэтому не подвергались тлению и горению, при которых содержащийся в растениях углерод большей частью превращается в углекислый газ и другие летучие вещества. В процессах разложения этих растений (главным образом под воздействием микроорганизмов) из них высвобождаются соединения, богатые водородом и кислородом, а содержание углерода растет - образуется торф. Торф затем покрывается другими отложениями (песком, глиной) и в результате геологических движений опускается в глубь земли, где под давлением и при высокой температуре процесс торфообразования переходит в процесс углеобразования (повышение содержания углерода). В ходе связанной с этим процессом миграции элементов содержание водорода и кислорода продолжает уменьшаться, а содержание углерода - расти; в результате из торфа получаются бурый уголь, каменный уголь и, наконец, антрацит. Бурые угли образуются в течение 40-60 миллионов лет, а возраст каменного угля составляет по крайней мере 200-300 миллионов лет. Степень окаменения угля (обогащения углеродом) зависит, однако, не столько от возраста, сколько от других факторов, прежде всего от температуры и давления.

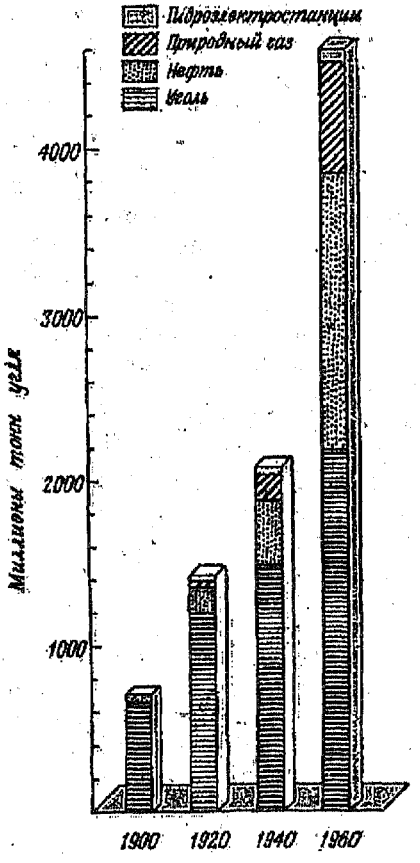


Рис. 2. Примерное распределение мирового производства энергии (выраженной через теплоту сгорания угля с теплотворной способностью 7 ккал/г) по различным видам энергоносителей

Происхождение нефти и природного газа

Нефть и природный газ состоят главным образом из углеводородов (соединений углерода и водорода), а также в небольшом количестве из других элементов (серы, азота, кислорода и т.д.). Нефть содержит 82-87 % углерода и 11-14 % водорода. По вопросу происхождения нефти существуют различные точки зрения. Наиболее признанной является теория, согласно которой газ и нефть состоят из органических веществ, главным образом животного происхождения (некоторые ученые полагают, что нефть и газ во многих случаях образовались в глубинах земли в результате действия воды на карбиды металлов). Живые организмы, погибшие и опустившиеся на морское дно, попадают в такие условия, где они не могут ни распадаться в результате окисления, ни уничтожаться микроорганизмами, а вследствие отсутствия контакта с воздухом образуют илистые осадки. В результате геологических движений эти осадки проникают на большие глубины. Там под влиянием давления и высокой температуры, а возможно, и под воздействием микроорганизмов в течение миллионов лет проходит процесс сухой возгонки, при котором содержащийся в осадках углерод в большей своей части переходит в углеводородные соединения, в то время как большая часть кислорода и других элементов мигрирует. Жидкая субстанция, состоящая главным образом из смеси различных по молекулярному весу углеводородов, может и самостоятельно мигрировать, проникая через поры и трещины земных недр. Основными составными частями природного газа являются низкомолекулярные углеводороды (прежде всего метан и этан), нефть же представляет собой высокомолекулярные углеводороды.

Названия каменный уголь, нефть, указывающие на их происхождение из неживого материала (геологическое, а не биологическое), оправданы только отчасти. В действительности эти продукты образовались из веществ, возникших в результате жизнедеятельности животных и растений, и поэтому имеют биологическое происхождение. Однако те превращения, которые привели к образованию из животных и растительных организмов каменного угля, нефти и газа, в большинстве своем не носят биологического характера, а являются следствием геологических и геохимических условий (давление, температура и т.д.), создавшихся в окружающей неживой среде. Известны и другие минералы, которые представляют собой продукты превращений биологических веществ (например мел).

Происхождение энергии угля, нефти и природного газа

Таким образом, основные природные источники энергии имеют биологическое происхождение и содержат главным образом углерод. В связи с этим естественно возникают различные вопросы.Откуда берется энергия у живых существ? Какую роль играет углерод в энергоносите-

лях ? Как происходит накопление энергии в них и ее последующее превращение в тепло или работу? Глубоко не вдаваясь в подробности биологических процессов, можно сказать, что в развитии живого мира решающую роль играют растения. Известно, что растения могут существовать без животных, а животные без растений нет. Значительная часть животных поедает растения, остальные (плотоядные) питаются мясом травоядных (это относится также к человеку). Таким образом, косвенно, они добывают свою пищу также из растительного мира; последний служит не только материалом для строительства тканей тела, но и дает необходимую им энергию. Итак, чтобы узнать происхождение энергии у живых организмов, достаточно исследовать вопрос о происхождении энергии, аккумулированной в растениях.

Вопрос о происхождении вещества, из которых строятся растительные организмы, составляет предмет научного спора уже в течение столетий, поскольку процесс питания растений (в отличие от животных) не поддается непосредственному наблюдению. Только в XIX столетии было окончательно установлено, что растения строят свои организмы из атмосферного углекислого газа, всасываемой из почвы воды, а также азота, фосфора, серы, калия и других элементов, входящих в состав неорганических веществ, которыми питаются растения. Углекислый газ и вода, служащие основным питанием растений,- очень простые, энергетически бедные соединения, характеризующиеся низкой химической активностью, тогда как основные соединения растительного (а также животного) происхождения имеют, как правило, очень сложный состав, высокое энергетическое содержание и, при определенных условиях, относительно большую химическую активность. Таким образом, естественно предположить, что построение растительных организмов из природного "сырья" должно происходить под воздействием некоего мощного источника энергии, которая может быть превращена в химическую энергию сложных соединений. Только во второй половине XIX столетия было точно установлено, что источником этой энергии является Солнце (его световая энергия).

Энергия солнечного излучения, ежегодно достигающая Земли, равна 10^{21} ккал. Большая ее часть превращается в тепло или снова отражается в мировое пространство.

Незначительную часть (сотые доли процента), однако, потребляют растения и с помощью хлорофилла, содержащегося в их зеленых частях, в процессе фотосинтеза строят из углекислого газа, воды и других энергетически бедных веществ сахар, крахмал, глюкозу, протеин, нуклеиновые кислоты, алкалоиды и другие энергетически богатые и сложные по составу соединения. В общих чертах это совершается следующим образом: с помощью поглощаемой хлорофиллом световой энергии химические связи в углекислом газе, воде и других питательных веществах ос-

лабляются или разрываются, временно образуются богатые энергией атомы и радикалы, из которых в ходе различных химических процессов возникают вещества со все более сложными молекулами. Многочисленные атомы связаны в них друг с другом большим числом различных химических связей. Солнечная энергия аккумулируется, таким образом, в виде химической энергии. Схематически реакцию фотосинтеза можно наглядно показать на процессе образования 1 моля глюкозы:

$$6CO_2 + 6H_2O + 674 \text{ ккал} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2.$$

При фотосинтезе освобождается кислород. Реакции с образованием кислорода называются восстановительными.

Следовательно, живые организмы черпают свою химическую энергию из энергии излучения Солнца. Концентрация солнечной энергии происходит главным образом в углеводах: (соединения состоящие из углерода, водорода и кислорода) глюкоза ($C_6H_{12}O_6$), свекловичный сахар ($C_{12}H_{22}O_{11}$), крахмал и целюлоза $(C_6H_{10}O_5)_n$, где n-переменная величина. В дальнейшем часть углеводов окисляется, при этом, например, из 1моля глюкозы образуются углекислый газ и вода в соответствии со следующей химической реакцией:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 674 \text{ ккал}.$$

Энергия, освобождающаяся при этом из углеводов, идет на построение необходимых для функционирования организма еще более сложных и энергетически богатых соединений (жиров, протеинов, нуклеиновых кислот, алкалоидов и т.д.).Часть этих веществ (прежде всего жиры) окисляется, выделяющаяся при этом энергия концентрируется в организме и идет на покрытие его энергетических потребностей.

В результате окисления сложные органические соединения, полученные в процессе фотосинтеза, снова превращаются в исходные энергетически бедные вещества - углекислый газ и воду. В конечном счете весь растительный организм либо отмирает, либо становится кормом для животных (или людей). Соединения в отмершем организме начинают распадаться и под воздействием микроорганизмов окисляться.

Круговорот углерода, водорода и кислорода

Углерод, водород и кислород совершают, таким образом, круговорот в природе: из энергетически бедных углеродных соединений в живых организмах под воздействием солнечной энергии образуется энергетически более богатые органические соединения, при этом освобождается ки-

слород; затем в ходе длинного ряда сложных превращений при поглощении кислорода вновь образуется углекислый газ и вода и т.д.

Циклический характер химии живого мира, т.е. то обстоятельство, что при распаде снова образуются исходные продукты ("сырье"), чрезвычайно важен, так как в результате этого сырьевой баланс живых организмов никогда не может быть нарушен. Если бы, например, микробы не разлагали отмершие организмы, то жизнь на Земле не могла бы долго продолжаться, так как в этом случае имеющийся в нашем распоряжении запас углерода "за короткий срок" (с геологической точки зрения) осел бы в отмерших организмах. Не следует забывать, что изученная часть Земли (земная кора и воздух) содержит лишь 0,09% углерода.

В течение своего "нормального" круговорота углерод задерживается в живых организмах относительно короткое время (самое большое - несколько сотен лет). Уже здесь он может быть использован: древесина и остальные части растений также являются энергоносителями, используемыми людьми с древнейших времен. С ростом потребности общества в энергии дерево уже не могло больше удовлетворить этой потребности, а стремительное уменьшение лесных массивов привело к настоятельной необходимости использовать вместо дерева другие источники энергии. В XIX столетии быстро возрасло значение каменного угля как источника энергии. Уголь начали добывать уже с XIII века, но до XIX века его в основном использовали лишь для отопления.

Нарушение круговорота

Каменный уголь фактически образовался вследствие нарушения естественного круговорота углерода, когда распад сложных углеродных соединений живых организмов не дошел до самого низкого энергетического состояния (до углекислого газа), а остановился на промежуточной ступени. Для беспрепятственного круговорота углерода, т.е. полного завершения процесса распада, необходимо столько кислорода, сколько можно выделить из воздуха. Если же в ходе процесса распада органические вещества были по каким-либо причинам геологического характера лишены доступа воздуха, то течение его изменялось - он значительно замедлялся. В этих условиях вследствие недостатка кислорода окислительные процессы уступали место восстановительным, продукты которых во многом зависят от физических и химических условий превращения (давление, температура, микроорганизмы и т.д.). При образовании нефти и газа из соединений органического происхождения, состоящих главным образом из углерода, в первую очередь возникают углеводороды, в то время как в ходе образования угля из большей части веществ погибших организмов углерод высвобождается. Как углеводороды, так и элементарный углерод содержат больше химической энергии, чем углекислый

газ, поэтому они сжигаются (соединяются с кислородом) с выделением тепла и при этом образуется более бедный энергией углекислый газ:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 210{,}8 \text{ ккал},$$

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 526{,}3 \text{ ккал},$$

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 94{,}3 \text{ ккал}.$$

Углекислый газ несгораем, он не может при соединении с воздухом (кислородом) высвобождать энергию.

Какое состояние вещества наиболее стабильно?

На первый взгляд может показаться неожиданным, что элементарная форма углерода энергетически не самая бедная, не самая стабильная. Следует отметить, что наиболее стабильными являются такие состояния веществ, при которых в данных условиях их энергия имеет наименьшее значение.

Рассмотрим пример из механики. Пусть в комнате на четвертом этаже шар находится в устойчивом положении тогда, когда он лежит на полу. На столе или на шкафу состояние шара менее устойчиво: отсюда он может "сам по себе" (без подвода энергии) упасть на пол, причем его потенциальная энергия превращается в кинетическую, а затем при ударе об пол - в тепловую и звуковую. В обратном направлении это процесс "сам по себе" идти не может. Перенести шар на стол или шкаф возможно лишь при затрате определенной энергии. На полу (при условии, что он ровный и строго горизонтальный) шар сам по себе не будет перемещаться, его состояние стабильно. Однако эта стабильность относительна и не означает, что шар больше не обладает потенциальной энергией - ведь он находится на значительной высоте над землей. В данном случае имеет место только относительный минимум энергии. При изменении условий может произойти дальнейшее высвобождение потенциальной энергии. Например, если на полу окажется дыра, то шар упадет на этаж ниже, если и здесь будет дыра, то он упадет еще ниже и т.д. Он может достичь таким образом первого этажа, при этом потенциальная энергия шара переходит в другие виды. Стабильность шара даже на первом этаже не абсолютна. При соответствующих условиях он может упасть в подвал или достичь дна глубокой шахты и т.д.

Аналогичная картина наблюдается при превращениях природных энергоносителей, содержащих углерод. В углеродных соединениях органического происхождения накоплено много химической энергии. В ходе химических превращений эта энергия может частично высвобождаться и, будучи преобразованной в другие виды, использоваться. Сами по себе

происходят только такие химические превращения, которые связаны с уменьшением свободной энергии, и только они могут быть использованы для получения энергии. Содержание энергии в веществах, образовавшихся в процессе превращения, меньше, чем в исходном веществе, как раз на количество освободившейся энергии. Химические превращения в зависимости от условий происходят быстро или медленно (иногда даже миллионы лет) и идут до тех пор, пока не образуются продукты, энергия которых при данных условиях уже не может уменьшаться (такие продукты будут стабильны).

Если окисление углеродных соединений происходит при наличии достаточного количества воздуха, то возникают соединения, все более богатые кислородом, пока, наконец, углерод не предстанет в форме углекислого газа, а водород - в форме воды. Эти соединения не могут далее окисляться, и из них при обычных условиях не высвобождается химическая энергия. CO_2 и H_2O в естественных условиях представляют собой стабильное состояние углерода и водорода. Таким образом, газ и вода - это самые стабильные конечные продукты, которые могут быть превращены в другие вещества только с помощью дополнительной энергии иного происхождения (например солнечной или электрической).

Аккумуляция солнечной энергии

Отдельные периоды круговорота углерода в природе (образование энергетически богатых углеродных соединений из углекислого газа и воды и их последующий распад на те же соединения) имеют продолжительность от нескольких месяцев до нескольких столетий. Если же обычные условия меняются (как это произошло, например, при образовании нефти, газа и угля), процессы превращения могут протекать исключительно медленно, в течение миллионов лет.

В земной коре без доступа воздуха углеводороды и уголь относительно стабильны, и часть химической энергии в них еще сохранилась в неизменном виде: они как бы законсервировали солнечную энергию. Здесь очевидна аналогия с рассмотренным выше примером с шаром. При изменении условий (извлечении нефти, угля или газа на поверхность земли и их использовании) стабильность состояния этих веществ нарушается: при сгорании они соединяются с кислородом, образуя углекислый газ и воду. На этом круговорот углерода и водорода, нормальный ход которого по геологическим причинам задержался на миллионы лет, быстро заканчивается. При сжигании освобождается энергия солнечного излучения, которую растения долгое время хранили в себе. Таким образом, нефть, природный газ и каменный уголь - это законсервированная энергия, являющаяся частью когда-то поглащенной солнечной энергии.

Происхождение энергии воды и ветра

Известно, что гидростанции потребляют ту потенциальную энергию воды в реках и водопадах, которая освобождается благодаря естественному перепаду высот. Но вода в своем вечном круговороте попадает на возвышенные участки земли в результате испарения морей, рек и озер, которое происходит в первую очередь под действием солнечного излучения. Пар, превращаясь в капли воды, собирается в облака или тучи, откуда вода в виде дождя или снега попадает обратно на землю, в том числе и на возвышенности. Скапливающаяся здесь вода обладает большим запасом потенциальной энергии, которая затем при помощи турбин,приведенных в действие естественными или искусственно созданными водопадами, может быть превращена в электрическую энергию или механическую работу. Таким образом, большая часть энергии, полученной на гидростанциях, также обязана своим происхождением солнечному излучению. Только незначительная часть энергии, потребляемой при испарении различных водоемов,- это тепло Земли, которое в свою очередь освобождается в результате происходящих внутри Земли процессов радиоактивного распада.

Энергия ветра также в значительной степени обязана своим происхождением Солнцу: разница в нагреве отдельных областей земной поверхности вызывает атмосферные течения (т.е. ветер).

Хорошо ли используется солнечная энергия?

Как мы уже убедились, большая часть нашей потребности в энергии покрывается за счет солнечной энергии. Но к сожалению, живая природа использует эту солнечную энергию недостаточно эффективно.

Солнце излучает ежегодно огромное количество энергии, равное ~ $3x10^{30}$ ккал, из нее Земли достигает около 10^{21} ккал. Примерно 60% энергии поглощается воздухом (2,5% ее превращается в энергию ветра); 25,5% достигает водной поверхности, но из этого количества только 0,04% передается воде; очень незначительную часть потребляют водные растения; 14,5% энергии солнечного излучения достигает суши и только 0,12 % ее благодаря растениям превращается в химическую энергию. "Неиспользованная" энергия солнечного излучения Земли переходит обратно в мировое пространство. Земля отдает больше энергии, чем получает от Солнца, так как она излучает еще и энергию, освобождающуюся в результате радиоактивных процессов, происходящих в ее недрах.

Таким образом, растительный и животный мир, включая человека, использует совершенно ничтожную долю солнечной энергии, попадающей на Землю. Задача будущего - найти и разработать средства и методы, которые помогут человеку более полно использовать эту энергию.

Глубокое проникновение в тайны природы, по-видимому, поможет открыть принципиально новые возможности в этой области.

Один из методов более эффективного использования солнечной энергии, требующий дальнейшей теоретической разработки,-это интенсификация сельского хозяйства за счет лучшей обработки почвы и внесения искусственных удобрений, а также культивирования таких растений, которые более рационально используют эту энергию. Другой метод - создание термо- и фотоэлементов, где происходит непосредственное превращение солнечной энергии в электрическую.

Запасы природных источников энергии

Углерод (как энергоноситель) распределяется на Земле следующим образом: в атмосфере его содержится 640 млрд.т в виде углекислого газа, при этом около 150 млрд.т ежегодно потребляются растениями в процессе фотосинтеза; в растительных организмах запасено 500 млрд.т, а в животных - 5 млрд.т углерода. Большая часть углерода, содержащегося в живых организмах, после окисления снова поступает в атмосферу в виде углекислого газа. Углерод, не участвующий в окислительных процессах, накоплен в недрах земли в виде торфа (~1000 млрд.т), угля (~10000 млрд.т), нефти (~20 млрд.т).

Образование нефти, газа и угля - процесс, длившийся много миллионов лет в специфических условиях, которых нет в настоящее время, поэтому в ближайшем будущем нельзя рассчитывать на появление новых месторождений.

Из запасов угля, составляющих около 10000 млрд.т, человечество на сегодняшний день использовало приблизительно 60-70 млрд.т. В настоящее время ежегодная потребность составляет больше 2 млрд.т. Это незначительный расход по сравнению с имеющимися запасами. Такое же положение и с нефтью. Кроме того, благодаря применению новейших методов геологоразведки открываются новые месторождения, однако все они не неисчерпаемы и распоряжаться ими следует разумно. Нужно также учесть, что нефть, природный газ и уголь являются не только источниками энергии, но и важнейшим сырьем для химической промышленности. Из них получают исходные продукты для предприятия органической химии, они служат сырьем для производства искусственных удобрений и взрывчатых веществ, поскольку водород, необходимый для получения аммиака NH_3, основного исходного продукта этих отраслей промышленности, экономичнее всего получать из нефти или газа. Поэтому важнейшей задачей научных и прикладных исследований является разработка новых методов получения энергии, что позволит передать нефть и газ химической промышленности.

Итак, почти во всех природных источниках энергии в основном за-

пасена энергия Солнца. Можно сказать, что в настоящее время каждая электростанция или двигатель питаются фактически ею. Исключением являются атомные электростанции, однако в общем производстве электроэнергии они пока играют ничтожную роль. Но и атомная энергия косвенным образом связана с солнечным излучением, так как образование урана, как и других химических элементов, связано с Солнцем, с возникновением Солнечной системы.

§ 5. СОЛНЦЕ КАК ВАЖНЕЙШИЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Поскольку энергия всех практически используемых энергоносителей происходит от Солнца, то естественно возникает вопрос о происхождении энергии самого Солнца.

Ранние представления о происхождении солнечной энергии

Проблема происхождения солнечного света занимала людей еще с давних пор. В древности думали, что Солнце - это нечто, подобное мощному горящему факелу. Однако уже в первой половине XIX столетия было доказано, что в таком случае продолжительность существования Солнца не превышала бы 6000-8000 лет. Из геологических и палеонтологических исследований известно, что по крайней мере за последние 3-4 млрд.лет интенсивность солнечного излучения изменилась весьма незначительно. Примерно сто лет назад были попытки объяснить солнечную энергию постоянно падающими на Солнце метеоритами, кинетическая энергия которых превращается в тепло. Однако расчеты показывают, что это исключено хотя бы потому, что увеличение массы Солнца за счет метеоритов должно было бы привести к заметному увеличению солнечной гравитации. Предполагали также, что под действием собственной гравитации Солнце сжимается, и освобождающаяся при этом энергия превращается в тепло. Но это должно было бы привести к заметному уменьшению диаметра Солнца, и более того, как показывают подсчеты, оно бы уже остыло. Так что и эта теория оказалась несостоятельной.

Таким образом, классическая физика и химия не смогли ответить на вопрос о происхождении энергии, излучаемой Солнцем в течение миллиардов лет. Только современная атомная физика показала, что источником солнечной энергии являются ядерные превращения, происходящие в недрах Солнца.

Ядерные реакции - источник энергии Солнца

Революция в физике, совершившаяся на рубеже XIX и XX веков в частности благодаря открытию радиоактивности (Беккерель,1896), раз-

работке квантовой теории (Планк,1900) и теории относительности (Эйнштейн,1905), привела к открытию ядерных реакций, при которых освобождается в миллионы раз больше энергии, чем при химических. В ходе ядерных реакций (радиоактивного распада) атомные ядра (неделимые с точки зрения классической физики) одних радиоактивных элементов превращаются в атомные ядра других. В природе происходит естественный радиоактивный распад ряда химических элементов. В лабораторных условиях в настоящее время возможно искусственное превращение атомных ядер всех химических элементов. Эти процессы совершаются при бомбардировке атомных ядер различных элементов высокоэнергетическими ядерными частицами.

На основе лабораторных исследований ядерных реакций Бете (1938) пришел к заключению, что энергия, излучаемая Солнцем, - это продукт происходящего на Солнце процесса слияния (синтеза) ядер атомов водорода (протонов) в атомные ядра гелия. При этом возникают также позитроны (e^+) и нейтрино (ν) в соответствии с бруттоуравнением [отнесенным к одному молю (4 г) He.

$$4H \rightarrow He + 2e^+ + 2\nu + 580 \cdot 10^6 \text{ккал}.$$

Синтез ядер, ведущий к образованию гелия, происходит при температуре в миллионы градусов (поэтому эти процессы называют термоядерными реакциями) и при очень высоком давлении.

Для наглядного представления об истинных размерах энергии, освобождающейся при ядерном синтезе, интересно сравнить его с реакциями окисления водорода или углерода, которые относятся к числу наиболее "энергетически богатых" химических процессов:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 137 \text{ ккал},$$
$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 94 \text{ ккал}.$$

Видно, что энергия, выделяющаяся при термоядерных реакциях, во много миллионов раз превосходит теплоту сгорания. С помощью спектроскопических исследований установлено, что Солнце в основном состоит из водорода: на каждые четыре атома водорода приходится только один атом гелия. В течение 5-6 миллиардов лет, прошедших со времени возникновения Солнца, лишь относительно небольшая часть содержащегося в нем водорода превратилась в гелий. Следовательно, Солнце может излучать энергию еще в течение нескольких миллиардов лет.

Таким образом, благодаря успехам современной физики доказано, что потребность в энергии живой и неживой природы, а также человеческого общества, в конечном счете удовлетворяется за счет термоядерных

процессов, происходящих на Солнце. При современных способах получения атомной энергии ее можно использовать лишь после многочисленных преобразований. Осуществление в искусственных условиях управляемой термоядерной реакции дало бы человечеству мощный источник энергии. Вот почему над этой проблемой работают физики всего мира. Неуправляемый ядерный синтез с огромной скоростью совершается при взрыве водородной бомбы.

§ 6. ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ КАК НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Как уже отмечено выше, большинство источников энергии несет в себе энергию солнечного излучения в виде химической энергии, которая различными способами может быть превращена в форму, удобную для использования.

Химическая энергия с точки зрения термодинамики и теории строения вещества

К исследованию химической энергии можно подойти двумя различными путями. При макроскопическом подходе достаточно ограничиться непосредственно наблюдаемыми энергетическими процессами, не принимая во внимание механизма этих процессов. Именно таким путем идет термодинамика, которая обеспечивает теоретическую основу при разработке тепловых двигателей. Для определенного уровня практических требований такой подход вполне удовлетворителен.

Однако более глубокое понимание процессов превращения энергии возможно только при проникновении в микромир, т.е. при исследовании свойств атомных и молекулярных структур, которые лежат в основе процессов возникновения и разрыва химических связей. Этими вопросами занимается наука о строении вещества, в частности атомная физика и квантовая теория. Структура атомов и молекул чрезвычайно сложна, поэтому упрощенное представление о ней (хотя оно и возможно) весьма грубо отражает действительность. Полученные на основе такого представления результаты часто недостаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, следовательно, их применение на практике весьма ограничено. Дальнейшее развитие науки потребовало разработки теорий, более точно отражающих действительность, а поэтому более сложных и гораздо менее наглядных. Такой теорией является квантовая теория (квантовая механика и квантовая химия), изучающая структуру и превращения атомов и молекул. Эта теория лишена наглядности, она занимается скрытыми явлениями природы, нигде непосредственно не встречающимися, которые не воспринимаются нашими органами чувств.

Химические связи и химическая энергия

При образовании химических связей между атомами освобождается энергия. Эта энергия в большинстве случаев выделяется в виде тепла, но при определенных условиях можно большую часть освобождающейся химической энергии перевести в работу. Другими словами, между атомами возникает сила химического притяжения, которая при образовании химической связи между двумя атомами производит работу. Если, напротив, мы хотим разделить уже связанные атомы, разорвать химическую связь, то нужно произвести работу, т.е. затратить энергию. Следовательно, суммарная энергия двух отдельных друг от друга атомов больше, чем энергия двух химически связанных атомов. Разница этих энергий и есть энергия связи, эквивалентная той работе, которую необходимо затратить, чтобы разорвать химическую связь между двумя атомами.

Энергия связи

Энергия, которая называется химической, - это собственно энергия, выделяющаяся при образовании химических связей в веществах, являющихся продуктами химического превращения. Естественно, что молекулы большинства веществ состоят не из двух, а из большего количества атомов; химическая энергия таких веществ - сумма энергий - тем выше, чем больше число атомов, входящих в состав молекулы, и тем меньше, чем больше сумма энергий связи этих атомов.

Энергия связанного состояния каждой пары атомов меньше, чем энергия свободного состояния. В молекуле, состоящей более чем из двух атомов, энергия связи двух атомов зависит не только от свойств этих атомов, но и от свойств остальных атомов и их положения в молекуле. Два одинаковых атома в различных соединениях могут быть по-разному связаны друг с другом (например, одно-, двух- или трехвалентными связями). Так, в случае одинарной связи атомов углерода и кислорода (С-О) энергия связи $E_{св}$ = 85 ккал/моль, а в случае двойной связи (С=О) $E_{св}$ =180 ккал/моль.

Энергией связи обладают не только соединения, но и химические элементы, поскольку химическое притяжение может действовать также между одинаковыми атомами. В земных условиях большинство элементов существует не в виде изолированных атомов, а в виде двух- или многоатомных молекул. В некоторых веществах, находящихся в твердом или жидком агрегатном состоянии, возможно существование химических связей между атомами без образования молекул (так, энергия связи между атомами углерода равна 85 ккал/моль на каждую связь). Лишь немногие вещества состоят из отдельных атомов (например пары металлов или инертные газы), кислород, азот и водород образуют двухатомные молекулы, где два одинаковых атома обладают значительной энергий связи:

O_2-$E_{св}$=96 ккал/моль; N_2-$E_{св}$=226 ккал/моль; H_2-$E_{св}$=104,2 ккал/моль.

Таким образом, химическая связь между двумя одинаковыми или различными атомами образуется в том случае, если при этом стабильность их внешних электронных оболочек увеличивается, а их энергия уменьшается. Освобождающаяся здесь энергия называется энергией химической связи.

Вопросы химической связи рассматриваются в квантовой химии, которая позволяет в относительно простых случаях установить, какие атомы и при каких условиях могут образовывать химическую связь, какая при этом выделяется энергия, какова структура вновь образованной молекулы.

§ 7. ОСВОБОЖДЕНИЕ И ПРЕВРАЩЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Если известны состав и структура соединения, свойства составляющих его атомов, каким образом эти атомы связаны между собой и какая энергия соответствует различным связям, то можно вычислить сумму всех энергий связи, т.е. количество химической энергии на 1 моль данного вещества.

Какие вещества можно рассматривать как энергоносители?

Химическая энергия может быть превращена в тепло, в работу или в другой вид энергии только с помощью химической реакции. Если продукты превращения содержат меньше химической энергии, чем исходные вещества, то реакция идет с выделением энергии. Пригодность вещества для производства энергии зависит от того, к каким превращениям оно способно. Проведем аналогию с процессом использования энергии воды. В каждом озере или другом водоеме вода обладает потенциальной энергией, величина которой, отнесенная, например к 1 кг воды, зависит от того, на какой высоте эта вода находится. Однако только высота еще ничего не говорит о том, можно ли эту энергию воды использовать для получения электроэнергии на гидроэлектростанции. Если например озеро, находящееся на высоте 500 м над уровнем моря, окружено со всех сторон высокими отвесными скалами или большими плоскогорьями и нет никакой возможности отвести эту воду на более низкий уровень, то ее потенциальная энергия практически не может быть использована. Но если вблизи такого озера имеется место, лежащее несколько ниже, куда может быть отведена вода, то разницу в потенциальной энергии на этих двух уровнях можно превратить в другой вид энергии, следовательно, использовать воду этого озера для производства энергии.

Таким образом, чтобы судить о том, можно ли данное вещество рассматривать как энергоноситель, недостаточно знать только химическую энергию, содержащуюся в веществе (энергию связи). В исходном состоянии химическая энергия для нас так же бесполезна, как и потенциальная энергия покоящейся в озере воды. Необходимо знать, возможно ли при

данных условиях такое химическое превращение, при котором конечный продукт будет энергетически более бедным, чем исходный. Например, энергия связи углекислого газа CO_2 или азота N_2 составляет соответственно 360 и 226 ккал/моль, но ни один из этих газов нельзя рассматривать как энергоноситель, так как на Земле в естественных условиях невозможно осуществить такой процесс с их участием, конечный продукт которого был бы энергетически более бедным веществом, чем данные исходные продукты. Напротив, углерод и метан (важнейший компонент природного газа) - это энергоносители, которые находят практическое применение, поскольку при окислении сверхсоответствующих этим соединениям энергий связи (170 и 396 ккал/моль соответственно) дополнительно освобождается часть содержащейся в них химической энергии (с большей энергией связи):

$$\underset{170\text{ккал}}{C} + \underset{96\text{ккал}}{O_2} \rightarrow \underset{360\text{ккал}}{CO_2} \qquad \underset{396}{CH_4} + 2\underset{192}{O_2} \rightarrow \underset{360}{CO_2} + 2\underset{440}{H_2O}$$

Итак, в 1 моле CO_2 энергия связи на 94 ккал больше, чем в 1 моле углерода и 1 моле кислорода; эта разность есть химическая энергия, высвобождающаяся при сгорании. В 1 моле CO_2 и 2 молях H_2O сумма энергий связи на 212 ккал больше, чем в 1 моле метана и 2 молях кислорода. Эта разность и есть полезная химическая энергия, получаемая при сгорании метана. Поскольку эти процессы совершаются при очень простых условиях, то и С и CH_4 являются энергоносителями.

Скорость процессов, идущих с высвобождением энергии

Существует еще одно требование к энергоносителям: процесс, идущий с выделением тепла при легкоосуществляемых условиях (иногда после соответствующего возбуждения), должен протекать с достаточно большой скоростью. При очень медленных процессах в единицу времени выделяется так мало энергии, что она практически не может быть использована. Так, например, известно, что уголь слабо греет, если в печи он медленно горит, так как тепло сгорания, получаемое в единицу времени, успевает уйти через дымоход или стены, не обогрев комнаты. Однако слишком ускоренный процесс в большинстве случаев также нежелателен, так как в этом случае температура повышается больше, чем это необходимо,- появляется опасность взрыва. Таким образом, скорость процессов, в ходе которых выделяется энергия, должна хорошо регулироваться.

Хорошо регулируемые окислительные процессы, поставляющие энергию, протекают, например в живых организмах. Здесь только часть химической энергии превращается в тепло, часть производит работу, значительная же часть идет на построение более сложных соединений, содер-

жащих больше энергии, чем исходные вещества. Так возникают необходимые для обеспечения жизненных функций разнообразные соединения, энергетически более богатые, чем непосредственно образующиеся под воздействием солнечного света углеводы (глюкоза или крахмал). Лучшими регуляторами процессов производства энергии являются катализаторы. В живых организмах их роль выполняют энзимы и ферменты.

Резюмируя можно сказать, что энергия, заключенная в химических соединениях и элементах, освобождается в химических реакциях при образовании межатомных связей в продуктах этих реакций и частично (за вычетом межатомных связей исходных веществ) может быть превращена в другие виды энергии.

Если мы просто сжигаем энергоносители, то почти все количество освободившейся химической энергии превращается в тепло, идущее на нагревание окружающей среды. Полученную тепловую энергию можно различными способами превратить в другие, нужные нам виды энергии. Однако в ряде случав освобождающаяся химическая энергия превращается в другие виды непосредственно, без промежуточной стадии тепла. Например, в гальванических элементах электрическая энергия прямо получается из химической; в процессах, сопровождающихся химической люминесценцией, часть химической энергии непосредственно преобразуется в энергию оптического излучения; в живых организмах часть энергии, освобождающейся при распаде различных веществ, используется для синтеза энергетически более богатых соединений.

При обычном получении энергии вне живых организмов (при горении) химическая энергия почти полностью превращается в тепло - никакая работа непосредственно не производится. Такое положение приемлемо лишь в том случае, когда используется энергия для отопления, но не тогда, когда из этого источника нужно получить другой вид энергии: механическую, электрическую, световую и т.д. Таким образом, непосредственное превращение химической энергии в электрическую - задача первостепенной важности. Такое превращение можно осуществить в гальванических элементах. Однако материалы, необходимые для известных в настоящее время, надежно работающих гальванических элементов слишком дороги,чтобы использовать эти элементы в широких масштабах в качестве источников энергии. В настоящее время весьма интенсивно проводятся исследования с целью создания надежных в эксплуатации гальванических элементов (так называемых топливных элементов), в которых использовались бы энергоносители, имеющиеся в достаточном количестве.

§ 8. ПОЧЕМУ ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ НЕ ВЫСВОБОЖДАЕТСЯ САМА СОБОЙ?

Почему химические процессы, идущие с образованием энергетически более бедных соединений, протекают не самопроизвольно, а только после

соответствующего возбуждения или в присутствии катализаторов? Почему при обычных условиях кислород и водород самопроизвольно не образуют воду, а азот и водород - аммиак? Ответы на эти вопросы связаны с одной из фундаментальных проблем не только химии, но и всей живой природы.

Какие соединения стабильны?

Если бы мы рассматривали тела только с энергетической (термодинамической) точки зрения, то пришли бы к заключению, что в природе могут существовать лишь простейшие соединения, которые энергетически наиболее стабильны, в действительности это не так: существуют миллионы соединений, большинство из которых энергетически богаты, а следовательно, энергетически нестабильны. Таким образом, одна только энергетическая стабильность еще не объясняет, почему существуют различные химические вещества и вся живая природа.

Энергетическая стабильность указывает лишь на возможность процесса превращения, но ничего не говорит о том, произойдет ли оно в действительности и какова скорость этого процесса.

Энергия активации

Прежде всего рассмотрим один пример из механики. Имеются три тела с одинаковой массой m, но различной формы (рис.3) с центрами тя-

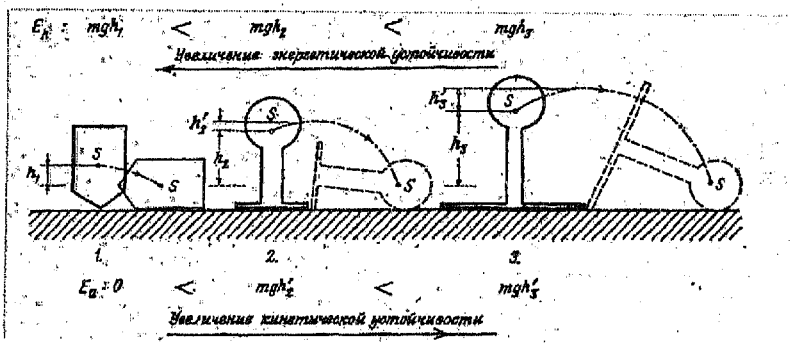


Рис. 3. Связь между потенциальной энергией тела и его устойчивостью.

жести s, расположенными на различной высоте от общей опорной плоскости. Все три тела можно опрокинуть так, что при данных условиях их центр тяжести займет наинизшее положение. С точки зрения потенциальной энергии наиболее стабильным будет состояние тела, обладающего

наименьшей потенциальной энергией (E_h), центр тяжести которого расположен ниже, чем у других. Потенциальная энергия этих трех тел увеличивается в следующей последовательности: $mgh_1 < mgh_2 < mgh_3$ (где g-ускорение силы тяжести; h_1, h_2, h_3-изменение высоты центра тяжести при опрокидывании тел 1,2,3 соответственно). Если исходить из чисто энергетических соотношений, то самым стабильным должно быть тело 1. Однако даже с первого взгляда видно, что его положение наименее устойчиво. Даже если нам удастся поставить его в положение, изображенное на рис.3, то уже при малейшем сотрясении оно упадет, так как его центр тяжести начинает опускаться, а потенциальная энергия соответственно уменьшаться. Потенциальная энергия тела 2 больше, чем тела 1, но его положение более устойчиво из-за наличия подставки и, чтобы привести тело 2 в наклонное положение, надо сначала поднять центр тяжести на высоту h_2, совершив работу mgh_2. При опрокидывании тела его центр тяжести описывает некоторую траекторию, и тело начинает падать само, как только центр тяжести пройдет высшую точку траектории. При этом освобождается потенциальная энергия $mg(h_2+h_2')$, но поскольку вначале была уже затрачена энергия mgh_2', то в конечном итоге потенциальная энергия тела уменьшается только на величину $mg(h_2+h_2') - mgh_2 = mgh_2$; следовательно, в другие виды переходит именно это количество энергии. Еще более устойчиво тело 3, поскольку для его опрокидывания необходимо затратить энергию mgh_3'.

Таким образом, для того чтобы опрокинуть тела 2 и 3, необходимо вначале их "активировать", затратив на это некоторую энергию, энергию активации $E_a = mgh_2'$ или mgh_3'. Однако эта энергия нужна только временно. После того как мы поднимем центр тяжести на нужную высоту и приведем тело в активированное состояние, энергия активации выделится обратно при опускании центра тяжести до высоты h_2 или h_3. Только после этого начнет выделяться энергия, обусловленная разностью энергий начального и конечного состояний. Из этого примера видно, что "кинетическая" стабильность состояния зависит не столько от потенциальной энергии тела, соответствующей этому состоянию, сколько от величины энергии активации.

Приведенный пример помогает понять, почему не происходит самопревращений во всех веществах, которые способны к таким превращениям с точки зрения запасенной (потенциальной) химической энергии. Хотя в результате превращения энергетически нестабильных соединений в стабильные выделяется энергия, но с начала этого процесса соответствующие вещества необходимо активировать, затратив на это определенную энергию активации, которая, однако, не учитывается в суммарном энергетическом балансе процесса.

В качестве относительно простого примера рассмотрим более под-

робно образование соляной кислоты из водорода и хлора:

$$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl + 44 \text{ ккал.}$$

В данном процессе выделяются 44 ккал энергии, поэтому 2 моля соляной кислоты стабильнее, чем смесь 1 моля газообразного водорода и 1 моля газообразного хлора. Несмотря на это, в темноте такой процесс не идет. Образование соляной кислоты, как и любой другой химический процесс, происходит с перегруппировкой атомов и с изменением связей между ними. В исходных веществах (молекулах H и Cl) химически связанные атомы должны отделиться друг от друга, чтобы затем соединиться по-другому и образовать продукт реакции (в нашем случае соляную кислоту). Чтобы такой процесс стал возможен, должны быть разорваны или по крайней мере ослаблены связи между атомами во взаимодействующих молекулах, для чего требуется энергия активации. Если предположить, что для образования соляной кислоты необходимо разложить на атомы молекулу хлора, то потребуется 57 ккал энергии в случае H_2 - 103 ккал. Свободные атомы могут так располагаться вокруг молекулы H_2, что одновременно с образованием связей H-Cl будут разрываться связи H-H и при этом образовываться молекулы H-Cl. На рис. 4 схематически представлены эти энергетические соотношения. Для приведения системы в активированное состояние, имеющее энергию 217 ккал (H_2+2Cl), необходимо к химической энергии (энергии связи) в 160 ккал, соответствующей состоянию H_2+Cl_2, добавить из внешнего источника еще 57 ккал. подведенной энергии активации и 44 ккал в виде теплоты. Эта последняя величина и есть разница энергий между конечным состоянием 2HCl и начальным состоянием H_2+Cl_2. Приведенная схема ясно показывает, почему переход в более стабильное состояние не происходит самопроизвольно. Ведь для этого следует подвести из какого-либо внешнего источника энергию активации. Возникает вопрос, откуда может быть получена энергия, необходимая для активации процесса образования соляной кислоты. В темноте и при комнатной температуре H и Cl не вступают в реакцию с образованием соляной кислоты. Это свидетельствует о том, что энергия, выделяющаяся при столкновении молекул, меньше чем энергия активации. Но при высоких температурах реакция протекает очень бурно и даже со взрывом. С повышением температуры увеличивается средняя скорость движения молекул и, следовательно возраста-

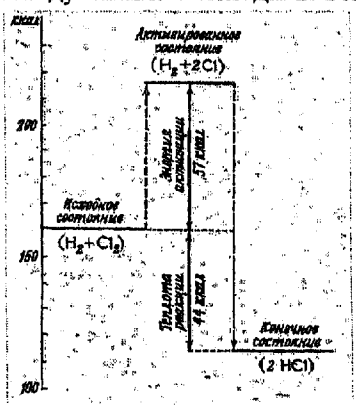


Рис. 4. Энергетические соотношения при образовании соляной кислоты.

ет их кинетическая энергия; при столкновениях выделяется большая энергия, которая затрачивается на разрыв или ослабление химических связей.

Итак, при "обычном" химическом способе получения соляной кислоты энергия активации черпается из термической энергии молекул (термическая активация). Такие химические превращения называются термическими реакциями.

Эксперимент показывает, что это не единственный источник энергии активации. Активация может происходить также под воздействием света, при радиоактивном облучении, электрическом разряде и т.д.

Если воздействовать на хлороводородный гремучий газ светом высокой частоты, то газ взорвется даже при комнатной температуре - с большой скоростью превратится в соляную кислоту. Энергия фотонов с $\lambda < 4785$ A° достаточна, чтобы превысить энергию активации, необходимую для образования соляной кислоты, вызвать реакцию и поддерживать ее.

Общие условия протекания химических процессов

Как правило, для начала химического процесса нужна энергия активации, причем даже тогда, когда конечным результатом процесса является большое количество освобожденной энергии. Благодаря энергии активации разрываются (или ослабляются) химические связи, существующие между атомами в исходном веществе, и атомы могут перегруппироваться в соответствии с химическими превращениями. Освобожденные атомы в результате столкновения могут соединяться друг с другом и образовать структуру, соответствующую продукту реакции.

Энергия активации E_a, необходимая для возбуждения реакции, как уже отмечалось, не учавствует в окончательном энергетическом балансе всего процесса.

Катализ

Катализаторы - это вещества, которые ускоряют химические процессы, не изменяясь при этом сами. Существует очень большое количество таких веществ, и они играют исключительно важную роль в регулировании процессов, происходящих в неживой и особенно живой природе.

Опытным путем можно установить, что катализаторы уменьшают энергию активации процесса и тем самым ускоряют его. Действие твердых катализаторов основано главным образом на том, что они связывают молекулы исходных веществ на своей поверхности (адсорбируют их), при этом молекулы так деформируются, что ослабляются те связи, разрыв которых необходим для химической реакции. Однако катализатор будет действенным лишь в том случае, когда продукты реакции не

остаются связанными на его поверхности, так как в противном случае это будет препятствием для ослабления связей в других молекулах и, следовательно, для "подготовки" к продолжению реакции.

Аналогично действуют газообразные или растворенные катализаторы. Молекулы катализатора вступают в слабую связь с реагирующими молекулами, деформируя их настолько, что в них ослабляются именно те связи, которые должны быть расслаблены для данной химической реакции. После превращения продукты реакции больше не взаимодействуют с катализатором; его молекулы снова готовы к выполнению своей роли "посредника". Катализаторы ускоряют "старение" (гниение, разложение) многих органических веществ, в частности продуктов питания, что во многих случаях нежелательно.

Направляющие действия катализатора

Различные катализаторы по-разному воздействуют на связи в молекуле, и соответственно продукты реакции получаются различными. Простейшими примерами этого служат каталитические реакции разложения. Например, спирт при нагревании в присутствии катализатора (окиси металла) теряет воду и превращается в этилен

$$\underset{\text{спирт}}{CH_3 - CH_2 - OH} \rightarrow \underset{\text{этилен}}{CH_2 = CH_2} + \underset{\text{вода}}{H_2O}$$

В присутствии же металлических катализаторов спирт теряет водород и образует кислоту:

$$\underset{\text{спирт}}{CH_3 - CH_2 - OH} \rightarrow \underset{\text{уксус. кисл.}}{CH_3 - CHO} + H_2$$

Таким образом, катализатор не только ускоряет химическую реакцию, но может также определить ее **направление.**

Благодаря своему влиянию на химические процессы катализаторы играют очень важную роль как в природе, так и в технике. Функции живых организмов возможны только при воздействии соответствующих катализаторов (биокатализаторов, энзимов и ферментов). Большинство процессов в химической промышленности также осуществляется при участии катализаторов.

Стабильность веществ

Теперь известно, что устойчивость химических соединений и скорость их превращений определяются не их химической энергией, а главным образом их энергией активации (рис.5). Соединения с большой химической энергией (термодинамически менее стабильные) не обязательно будут менее устойчивыми, чем вещества с малой химической энергией (термодинамически более стабильные). Бывает, что энергия активации соединений,

богатых химической энергией, очень велика, поэтому они более устойчивы, чем многие вещества с малой химической энергией, но требующие для своего разложения меньшую энергию активации. Это обстоятельство делает возможным длительное существование миллионов соединений, образующихся в живых организмах или создаваемых искусственно, хотя подавляющее большинство этих соединений энергетически нестабильно.

Без большого преувеличения можно утверждать, что существование всей живой природы возможно именно вследствие относительно высокой энергии активации разложения энергетически нестабильных соединений углерода. Из всех продуктов питания жиры обладают наибольшей химической энергией, однако они относительно устойчивы и сохраняются в течение многих месяцев, что объясняется достаточно высокой энергией активации окисления жиров. Конечные продукты окисления жиров - это CO_2 и H_2O. Сахар обладает меньшей химической энергией и значительно большей энергией активации разложения, поэтому он более стабилен, чем жир. Известно, что сахар может, не разлагаясь, храниться неограниченно долгое время. Химическая энергия белка почти не отличается от энергии сахара, однако белок намного сильнее подвержен разложению. Известно, что мясо и молоко, содержащие много белка, могут, не портясь, храниться в обычных условиях всего несколько дней. Энергия активации разложения белка очень мала. В живых организмах сахар и белок при своем окислении проходят через различные промежуточные стадии.

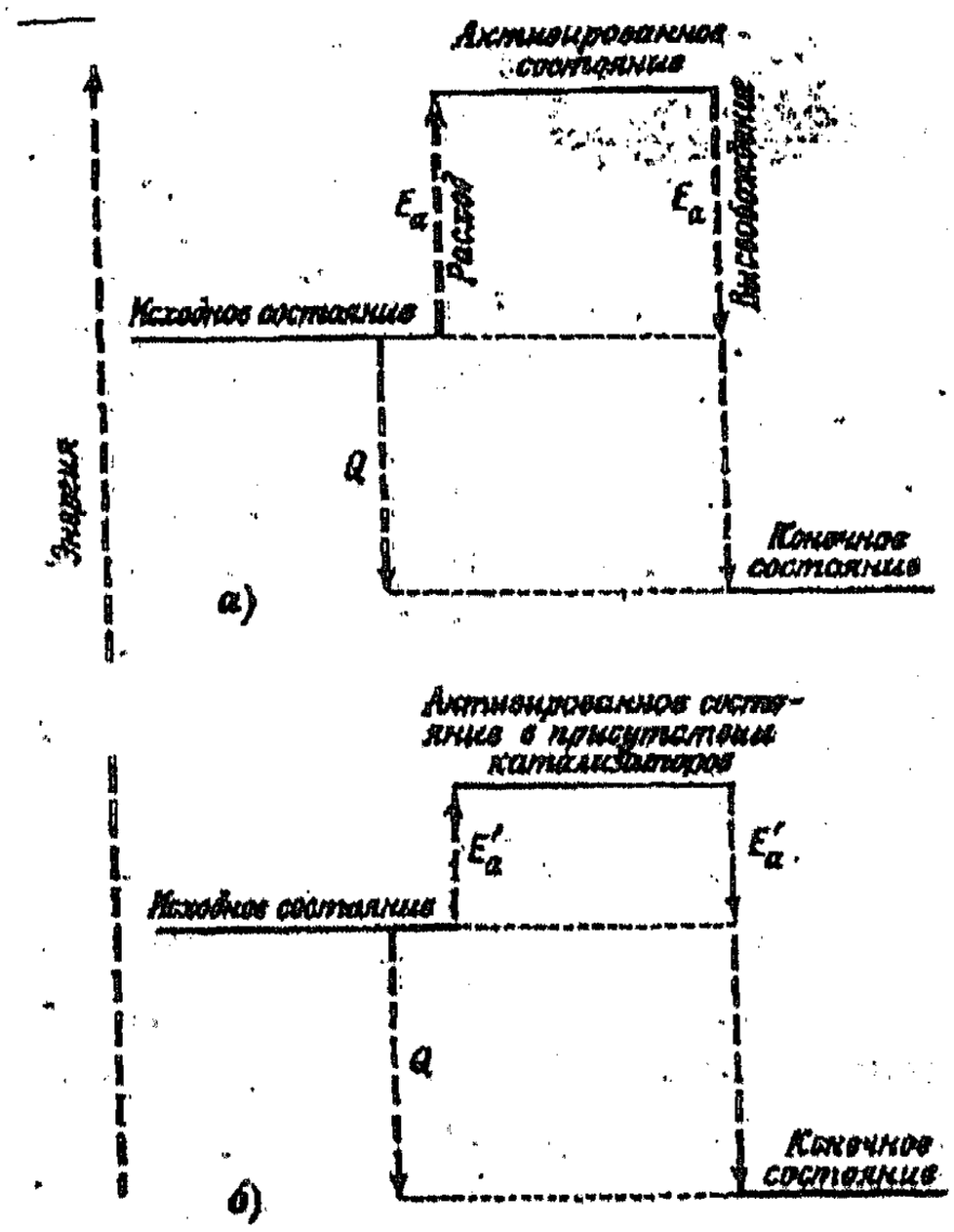


Рис. 5. Соотношение между теплотой реакции (Q) и энергией активации (E_a):
а - в отсутствие катализатора; б- при наличии катализатора, снижающего энергию активации от значения E_a до значения E'_a

ГЛАВА III

ТЕПЛО

§ 1. ЧТО ТАКОЕ ТЕПЛО?

Холод и тепло - повседневно встречающиеся понятия. Каждому известно, например, что тепло выделяется, когда сгорает уголь или электрический ток проходит через нагреватель утюга. В то же время тепло обладает совершенно особыми свойствами и играет исключительно важную роль в неживой и живой природе. Поэтому это явление стоит рассмотреть подробнее.

Что же, собственно, представляет собой тепло? Многие столетия этот вопрос занимал ученых. В течение долгого времени тепло рассматривали как некую невесомую жидкость (тепловой флюид), которая течет от более нагретого тела к менее нагретому.

Тепло как форма энергии

Только в конце XVIII века обратили внимание на то, что механическая работа может превращаться в тепло. Например, при рассверлении стволов пушек выделяется тепло. В середине XIX века на основании различных наблюдений было установлено, что тепло есть одна из форм энергии, а не какая-то особая жидкость; следовательно, закон сохранения и превращения энергии справедлив и для тепла: другие виды энергии могут превращаться в тепло и наоборот; тепло не может ни возникнуть из ничего, ни исчезнуть бесследно.

Итак, тепло есть один их видов энергии. Удивительно, что тепло повсюду возникает как бы само по себе, без постороннего вмешательства, а это в ряде случаев весьма нежелательно. Когда камень падает с высоты на землю, часть его кинетической энергии переходит в тепло; если мы движемся пешком, то кинетическая энергия вследствие трения частично переходит в тепло. В лампах накаливания, предназначенных для освещения, значительное количество электрической энергии также бесполезно превращается в тепло и т.д. Словом, совершенно очевидно, что каждый вид энергии относительно легко может быть превращен в тепло. Это процесс идет сам по себе.

Однако обратный процесс - самопроизвольное превращение тепла в какую-либо другую форму энергии - не происходит. Превращение тепла в полезную для нас работу требует применения весьма сложных машин, которые сами должны получать энергию от какого-либо другого источника. Таким образом, тепло с полным правом можно считать одним из видов энергии, способных к различным превращениям. Но вместе с тем

оно обладает и некоторыми отличительными свойствами.

Прежде чем ответить на вопрос, почему тепло так легко образуется, но с большим трудом превращается в другие формы энергии, необходимо выяснить, что же представляет собой тепло.

Тепло и термическая энергия

При соприкосновении тел с различной температурой холодное тело нагревается, а нагретое охлаждается. Происходит тепловой обмен. Но что же кроется за утверждением "одно тело теплее, чем другое"? "Тепло" и "холод" характеризуются температурой и обусловлены хаотическим движением атомов или молекул. Известно, что атомы и молекулы беспрерывно движутся и это движение не прекращается даже при самой низкой температуре - абсолютном нуле. Чем больше средняя кинетическая энергия движения, тем выше температура; поэтому такое движение называется тепловым движением, а соответствующая ему энергия - термической энергией (энергией теплового движения). Наиболее просто показать характер этого движения на примере одноатомного газа, скажем неона.

Расчет показывает, что при температуре 0°С и давлении в 1 атм. каждый атом неона в течение 1 с сталкивается с другими $4{,}2 \times 10^{10}$ раз. Среднее расстояние, которое атом неона проходит по прямой между двумя столкновениями, составляет $1{,}3 \times 10^{-5}$ см, его называют средней длиной пробега. С уменьшением давления средняя длина пробега увеличивается и при давлении 0,001мм.рт.ст. достигает ~ 10 см.

Кинетическая теория газов

Еще в середине XIX столетия Максвелл и Больцман, анализируя свойства газов и характер движения молекул газа, пришли к выводу, что хотя эти молекулы имеют самые различные скорости, соотношение между числом молекул и их скоростями не произвольно. Частые столкновения приводят к тому, что устанавливается некоторое вероятное равновесное состояние, при котором молекулы газа с различными скоростями распределены в соответствии с определенным числовым соотношением. Это соотношение надо понимать статистически, так как в ре-

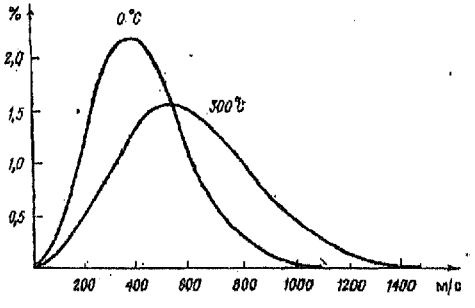


Рис. 5'. Распределение молекул кислорода по скоростям при температуре 0 и 300°

зультате столкновений скорость каждой молекулы практически непрерывно изменяется. Можно тем не менее вычислить, какой процент всех молекул будет иметь скорость, например 100, 101, 102 м/с и т.д. Мы приходим к так называемому распределению скоростей по Максвеллу-Больцману, которое позволяет установить, какой процент молекул в среднем движется с теми или иными скоростями. На рис. 5' представлено в качестве примера распределение скоростей молекул в кислороде. На оси абсцисс отложены средние скорости движения молекул. Кривая показывает, какое количество (в %) молекул движется с той или иной скоростью, видно, что для данной температуры имеется наиболее вероятная скорость (она соответствует максимуму на кривой): при 0°С 2,2% всех молекул имеют скорость приблизительно 380 м/с. Чем больше скорость молекул отличается от наиболее вероятной, тем меньшее число молекул движется с такой скоростью; так число молекул, имеющих скорость 1000 м/с, весьма мало. При другой температуре кривая распределения скоростей приобретает иной вид. Например, при 300°С для кислорода наиболее вероятная скорость, с которой движется наибольший процент всех молекул, равна 500 м/с. Однако только 1,6% всех молекул имеют скорость, близкую к этой. Итак, с ростом температуры максимум на кривой распределения сдвигается в сторону более высоких скоростей, уменьшаясь при этом по величине. Растет число частиц с большими скоростями. Этот факт очень важен для объяснения увеличения скорости химических реакций с ростом температуры.

§ 2. ПРЕВРАЩЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛО

Зная свойства термической энергии или тепла, можно понять, почему любое превращение энергии всегда сопровождается выделением тепла, точнее увеличением термической энергии. Ведь термическая энергия обусловлена хаотическим движением атомов и молекул, в то же время как остальные виды энергии связаны с более или менее упорядоченным их движением. Однако упорядоченное движение легко может стать хаотическим, тогда как упорядочение хаотичексого движения наталкивается на значительные трудности.

Упорядоченное и хаотическое движение

Рассмотрим свойства упорядоченного движения в его связи с механической энергией. Например, камень, падающий на Землю, обладает термической энергией, его атомы и молекулы движутся хаотически, но вследствие падения имеется некоторое преимущественное направление их скоростей в сторону Земли. Иначе говоря, при падении камня к средней одинаковой во всех направлениях скорости теплового движения его мо-

лекул прибавляется еще одна компонента, направленная вниз. Правда, при этом хаотичность движения сохраняется, термическая энергия остается неизменной, но благодаря этой направленной вниз компоненте скорости растет кинетическая энергия частиц. Такой рост энергии не приводит, однако, к увеличению термической энергии, так как причиной его служит упорядоченное движение. Этим объясняется, почему энергию падающего вниз тела можно использовать для получения работы (например падающую вниз воду для вращения мельничного колеса). Работа требует именно упорядоченного движения, так как только благодаря ему мы можем изменять состояние макроскопического тела в макроскопических масштабах. Что же происходит с кинетической энергией падающего тела? Если оно падает в вакууме, вследствие силы тяжести его скорость все время растет, что, однако, не оказывает влияния на хаотическое движение - температура тела не изменяется. Но если оно падает в воздухе, то во время движения сталкивается с хаотически движущимися молекулами воздуха (возникает трение). В результате этих столкновений растет энергия хаотического движения как молекул падающего тела, так и газа, т.е. растет их термическая энергия, повышается температура. Термическая энергия в виде тепла переходит в воздух. Переход тепла идет в направлении выравнивания термической энергии.

Столкновение частиц тела, находящегося в макроскопическом движении, с молекулами окружающей среды приводит к тому, что компоненты скорости, направленные в сторону движения, уменьшаются: макроскопическое движение тормозится. Скорость тела, свободно падающего в воздухе, меньше (в жидкости еще меньше), чем она была бы при падении в вакууме с той же высоты.

Таким образом, часть кинетической энергии упорядоченного движения, которой обладает падающее тело, преобразуется из-за трения в термическую энергию и рассеивается.

Наступает момент, когда этот процесс кончается: камень ударяется о землю, кинетическая энергия поступательного движения переходит в другие формы. Большая часть кинетической энергии падающего тела превращается в термическую энергию, а меньшая - в звуковую (в энергию колебания воздуха и Земли) - мы слышим звук удара. Выделение термической энергии говорит о том, что средняя скорость хаотического движения частиц возросла за счет упорядоченной компоненты. В месте удара повышается температура по сравнению с кружающей средой, и термическая энергия в форме тепла переходит из нагретых слоев в более холодные. Таким образом, и здесь большая часть энергии упорядоченного движения рассеивается в виде термической энергии.

Рассеяние энергии

В химических процессах энергия упорядоченного движения также рассеивается в виде энергии хаотического движения. Например, при сжигании метана, сопровождающимся уменьшением химической энергии исходных веществ, образуется углекислый газ и вода. Химическая энергия зависит от суммы энергий связи между атомами продуктов химической реакции. Химически связанные между собой атомы не находятся в состоянии покоя, а колеблются. Эти колебательные движения отчасти хаотичны (направление и энергия колебаний постоянно изменяются), и в этом смысле их можно отнести к тепловому движению; но отчасти они упорядочены, так как в двухатомных молекулах атомы всегда могут колебаться приблизительно вдоль направлений связей. Хотя в многоатомных молекулах колебательные движения гораздо сложнее, но до известной степени и упорядочены. При обычном сгорании часть освободившейся в процессе химического превращения (окисления) химической энергии переходит в термическую энергию практически независимых друг от друга молекул и в таком виде рассеивается.

При соответствующих условиях (например в живых организмах или в гальванических элементах) освободившаяся химическая энергия способствует образованию энергетически более богатых соединений, а также может быть использована для получения работы. Однако и в этом случае часть химической энергии рассеивается.

Энергия электрического тока есть, в сущности, энергия движущихся в проводниках электрически заряженных частиц (электронов - в металлах, ионов - в электролитах). Сами заряженные частицы движутся хаотически и, следовательно, обладают термической энергией. Но при протекании электрического тока возникает также упорядоченное движение частиц в направлении протекания тока, при этом с макроскопической точки зрения их энергия увеличивается. Электрически заряженные частицы при своем движении в проводящих средах (металлах, жидкостях) сталкиваются с другими частицами среды, энергия хаотического даижения этих частиц растет. В результате часть электрической энергии также рассеивается, превращается в тепло.

Подобные наблюдения позволяют сделать следующее заключение: в существующих на Земле условиях во всех естественных макроскопических явлениях по меньшей мере часть энергии упорядоченного движения рассеивается в виде энергии теплового (хаотического) движения. Этот важнейший закон природы известен как второе начало термодинамики (первое начало термодинамики - это закон сохранения энергии). Причина данного явления заключается в том, что при движении материальных тел относительно друг друга их частицы взаимодействуют между собой

таким образом, что энергия их хаотического движения увеличивается.

Второе начало термодинамики позволяет определить направление процессов, которые в природе протекают самопроизвольно. Как мы видим, выделение тепла связано с увеличением термической энергии, т.е. энергии хаотического движения. Выделение тепла это всеобщее явление, поскольку упорядоченное движение легко становится хаотическим. Обратить этот процесс, т.е. перевести тепло в другой вид энергии, гораздо труднее, так как хаотическое движение само по себе не становится упорядоченным, а рассеянная термическая энергия не концентрируется сама по себе, чтобы вновь стать энергией упорядоченного движения.

И все же тепло можно превратить в работу (примером тому служит всякий тепловой двигатель), но для этого требуются совершенно особые условия.

§ 3. ПРЕВРАЩЕНИЕ ТЕПЛА В РАБОТУ

Невозможность создания вечного двигателя

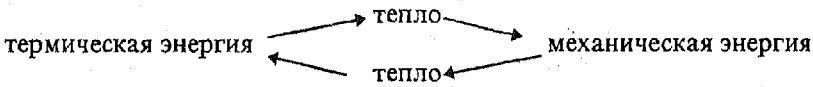
В течение тысячелетий естествоиспытатели и изобретатели безуспешно пытались сконструировать машину, которая могла бы неограниченно совершать работу без потребления энергии от внешнего источника, - перпетуум мобиле (вечный двигатель). Чтобы остановить поток многочисленных предложений и проектов, Французская Академия наук еще в конце XVIII века приняла решение рассматривать изобретения перпетуум мобиле только тогда, когда вместе с проектом будет представлена действующая модель. Этой модели, естественно, никому не удалось создать. Однако еще и сегодня существуют фантазеры, придумывающие все новые и новые неосуществимые конструкции. Обычно изобретатели относят свои неудачи за счет каких-то мелких ошибок или недостатков, но эти "мелочи" оказываются принципиально неустранимыми. Неудачи привели ученых к выводу, что перпетуум мобиле противоречит некоторому всеобщему закону природы. Этот закон есть закон сохранения и превращения энергии (первое начало термодинамики). Он утверждает, что энергия не может ни возникать из ничего, ни уничтожаться: отдельные виды энергии могут лишь переходить друг в друга. Таким образом, перпетуум мобиле (первого рода) противоречит закону сохранения и превращения энергии, поэтому его создание невозможно.

Согласно первому началу термодинамики, различные виды энергии могут переходить друг в друга в определенных количественных соотношениях. Так,например, если превращение будет полным, т.е. без возникновения других видов энергии, из 1 кгм механической работы возникает 2,34 кал тепла. Однако закон сохранения энергии ничего не говорит о том, любой ли вид энергии может превращаться в другой и в каком на-

правлении идут процессы превращения энергии. С точки зрения этого закона все виды энергии и направления их превращений равнозначны.

Поэтому закон сохранения энергии (хотя он абсолютно верен) - лишь часть истины. Опыт показывает, что различные материальные превращения протекают по вполне определенным направлениям, которые в каждых конкретных условиях определяются однозначно. Так, например, при отсутствии ветра камень падает на Землю вертикально (сильный ветер может изменить это направление); сахар в воздухе сгорает, превращаясь в CO_2 и H_2O, а не в крахмал, хотя в других условиях (в живых организмах) такой процесс возможен.

Закон сохранения энергии ничего не говорит об особенностях тепла, поэтому полное превращение термической энергии в тепло ему не противоречит. Именно это натолкнуло многих изобретателей на мысль сконструировать машину, способную производить работу на основе возможно более полного превращения термической энергии. Например, на корабле такая машина могла бы работать следующим образом: она отбирала бы от воды термическую энергию в виде тепла, несколько охлаждая при этом воду. При помощи судового двигателя эта энергия превращалась бы в механическую работу, при этом тепло, выделяемое в результате трения различных частей двигателя, снова бы передавалось воде, слегка ее нагревая. Круговой процесс повторялся бы на протяжении всего движения судна, обеспечивая это движение.



Подобная машина превращала бы, таким образом, термическую энергию в механическую в определенных пропорциях, вытекающих из первого начала термодинамики, а затем переводила бы ее обратно в термическую в тех же пропорциях. Возможность создания машины, производящей полезную работу через нормальный круговой цикл превращения энергии, не противоречит закону сохранения энергии. Но практически такая машина, временно забирающая энергию из почти неисчерпаемого водного резервуара Земли и возвращающая эту энергию обратно, все же была бы перпетуум мобиле.

Известно, что на Земле имеется приблизительно 1млрд.км^3 воды. Если охладить эту воду только на 0,001 градуса, то этим можно отобрать у воды 10^{15} кВт/ч энергии. Для сравнения укажем, что современное мировое потребление электроэнергии составляет около 10^{12} кВт/ч. Таким образом, даже незначительное охлаждение мирового океана позволило бы получить столько энергии, сколько хватило бы при современном уровне потребления на 1000 лет. Более того, подобные машины, превращая эту

термическую энергию в механическую, вовсе не потребляли бы энергии безвозвратно, так как из-за трения механическая энергия вновь превращалась бы в термическую. Практически это был бы перпетуум мобиле, неограниченно производящий работу, питаясь из неисчерпаемого энергетического резервуара. В отличие от перпетуум мобиле, невозможность создания которого вытекает из первого начала термодинамики, описанная выше машина называется перпетуум мобиле второго рода.

Перпетуум мобиле второго рода – это машина, которая непрерывно отбирает термическую энергию из окружающей среды, преобразует ее в работу и вновь превращает последнюю в термическую энергию. Однако все попытки создать такую машину оказались безрезультатными, как и попытки создать перпетуум мобиле первого рода. По-видимому, существование перпетуум мобиле второго рода также противоречит какому-то закону природы. В чем заключается этот закон ?

Направление перехода тепла

На данный вопрос можно ответить, наблюдая и правильно оценивая явления природы, с которыми мы сталкиваемся в повседневной практике. Когда у нас мерзнут руки, мы их трем, превращая таким образом, механическую энергию в термическую, или приближаем к горячей печи, с тем чтобы термическая энергия из нее в форме тепла перешла в наши руки. Мы знаем из опыта, что бесполезно прикладывать руки к нетопленной печи или стене - они не станут от этого теплее, – хотя как нетопленная печь, так и стена обладают запасом термической энергии, а переход части ее в наши руки и их согревание не противоречили бы закону сохранения энергии. С точки зрения этого закона безразлично, в каком направлении происходит переход термической энергии.

Существующие факты однозначно показывают, что есть всеобщий закон природы, по которому термическая энергия сама по себе не может перейти от менее нагретого тела к более нагретому. Другими словами, этот закон гласит, что при непосредственном контакте двух тел термическая энергия может перейти от более нагретого тела к менее нагретому, но не наоборот.

Вышесказанное не означает, что термическую энергию вообще невозможно передать от менее нагретого тела к более нагретому. Ведь происходит же, например, этот процесс постоянно в холодильнике, где от охлаждаемых тел, находящихся примерно 0°С, отнимается тепло и передается окружающему воздуху, температура которого, скажем, 20°С. Однако осуществить это можно только в том случае, если подвести к холодильнику энергию из внешнего источника, т.е. питать его электрической или химической энергией. Но как только мы прекратим подачу энергии, про-

цесс пойдет в обратном направлении, и все, что находится внутри холодильника, начнет отбирать тепло от окружающего воздуха. Невозможно также создать такую длительно работающую машину, в которой происходил бы переход термической энергии между двумя телами с одинаковой температурой.

Термическая энергия в форме тепла может переходить сама по себе от более нагретого тела к менее нагретому. При этом процессе из тепла можно получить работу, но и в данном случае в непрерывно работающей машине нельзя полностью превратить тепло в работу.

Невозможность создания перпетуум мобиле второго рода следует из того, что термическая энергия не может быть полностью превращена в работу. Полное же превращение механической работы в термическую осуществимо. Существуют ли ограничения для взаимного превращения других видов энергии? Опыт показывает, что не существуют. Другие виды энергии могут принципиально безгранично переходить из одного в другой, хотя при этом какая-то незначительная часть энергии любого вида, как правило, переходит в термическую. В результате КПД таких превращений всегда меньше 100%. Поэтому весьма невыгодно использовать химическую энергию топлива тем способом, который на сегодняшний день наиболее распространен: вначале путем сжигания превращать ее в термическую энергию, а затем из термической при помощи двигателей получать работу или электрическую энергию. Целесообразно химическую энергию непосредственно превращать в электрическую, что может осуществляться в гальванических элементах.

§ 4. ДВА НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

Как мы видели, термическая энергия, с которой мы постоянно сталкиваемся в жизни, обладает некоторыми особыми свойствами по сравнению с другими видами энергии. Эти особые свойства, характерные именно для термической энергии или тепла, привели к созданию и развитию самостоятельной науки, называемой термодинамикой, которая изучает процессы термической энергии, ее превращения в работу и другие виды энергии только с макроскопической точки зрения, без учета структуры материи. Анализ термических явлений на молекулярном уровне производится при статистическом рассмотрении кинетических и других свойств молекул (например в кинетической теории газов).

Поскольку изменение термической энергии связано с переходом ее в форме тепла от одного тела к другому, можно сказать, что термодинамика – это наука, занимающаяся изучением процессов превращения тепла.

Основу термодинамики составляют два закона, так называемые начала термодинамики, которые были выведены при обобщении накопленных опытных фактов.

Первое начало

Первое начало термодинамики – это закон сохранения энергии применительно к тем превращениям, при которых происходит преобразование термической энергии, сопровождаемое выделением тепла.

Все разнообразные формы энергии, встречающиеся в природе, можно с точки зрения термодинамики объединить в три группы:1) внутренняя энергия, 2) тепло, 3) работа. Согласно этой классификации, под внутренней энергией (U) понимают всю энергию, содержащуюся в данном теле (например в 1моле), т.е. суммарную энергию вращательного и поступательного движения молекул, колебания атомов, движения электронов, а также движения атомных ядер как целого и элементарных частиц, из которых они состоят, и т.д. Таким образом, внутренняя энергия объединяет термическую и химическую энергии, не включая ни кинетической, ни потенциальной энергии тела как целого.

Наши ученые пока еще не могут даже для простейших тел точно определить величину внутренней энергии. Непосредственно же в эксперименте проявляются только изменения внутренней энергии (Δ U), и все закономерности, установленные на основании эксперимента, также относятся лишь к изменениям внутренней энергии. Эти изменения проявляются либо в виде тепла (Q), либо в виде какой-то другой формы энергии. Поскольку все виды энергии, за исключением тепла, могут быть в принципе без всяких ограничений превращены в работу или друг в друга, в термодинамике все они объединяются под одним названием - работа (A).

Такая классификация различных видов энергии позволяет сформулировать первое начало термодинамики: увеличение внутренней энергии (Δ U) какого-либо тела определяется количеством подведенного тепла и работой, произведенной над этим телом или системой (работу производят внешние силы). Математически этот закон выражается так:

$$\Delta U = Q + A . \qquad (1)$$

Если в изучаемом процессе тело теряет тепло, то Q отрицательно (если тело производит внешнюю работу, то отрицательно A).

Из первого начала термодинамики вытекает целый ряд закономерностей, представляющих не только теоретический интерес, но и имеющих важное практическое значение, например при конструировании тепловых двигателей. Однако этот закон, несмотря на его особую важность и всеобщность, отражает лишь одну сторону явления. Первое начало термодинамики показывает взаимосвязь различных видов энергии в процессе их превращения, но не говорит о том действительно ли произойдет в

данных условиях это превращение, в каком направлении пойдет процесс и каков будет результат превращения: возникнет ли один или несколько видов энергии. Первое начало термодинамики не указывает на особенности термической энергии или тепла, отличающих их от других видов энергии. Особые свойства термической энергии и ограничения, наложенные на возможность ее превращения в другие виды энергии отражены во втором начале термодинамики. Этот закон отвечает на основной вопрос: при каких условиях и в каких соотношениях тепло может быть превращено в работу или другие виды энергии?

Максимальная работа

Коэффициент полезного действия машины зависит от ее принципа действия, конструкции и качества. Более полное использование способности машины производить работу может повысить ее КПД. Однако эта способность сама зависит от многих дополнительных условий, и поэтому невозможно точно установить, насколько полно машина может быть использована. Но если машина, осуществляющая превращение энергии, технически совершенна, а ее способность производить работу полностью использована, можно дать однозначный ответ на вопрос о величине максимальной работы, принципиально получаемой в каком-либо определенном процессе (например при сгорании 1 кг угля). Для этого нужно выяснить, при каких условиях машина работает с наибольшим КПД.

Разберем этот вопрос на примере простейшей машины, состоящей из цилиндра с невесомым поршнем, движущимся без трения, но герметически прилегающим к стенкам цилиндра. Конструкция многих реальных машин основана на такой системе (рис.6). Пусть газ в цилиндре первоначально находится под давлением P атм. (P>1атм.) и расширяется от объема V_1 до объема V_2, при этом поршень проходит путь S (в сантиметрах). Какова же величина работы, произведенной газом, при таком процессе? Она зависеть от веса груза, подымаемого поршнем. Если сделать над поршнем вакуум, а весом груза пренебречь, то можно считать, что газ при расширении не производит никакой работы. Если же на поршень действует атмосферное давление и груз, то газ, расширяясь, совершает работу против этих сил тем большую, чем больше вес груза. Мы видим, что работа, совершаемая газом при одном и том же изменении состояния (расширение газа от объема V_1 до объема V_2 при постоянной температуре), зависит от условий, в которых протекает этот процесс. Увеличивая груз, можно увеличить работу газа, но только до того момента, когда уравниваются силы, действующие на поршень сверху (груз и атмосферное давление) и снизу (давление газа). В этот момент поршень остановится, наша "система" (поршень и газ в цилиндре) будет находиться в состоянии равновесия. Если дальше увеличивать груз, то процесс пойдет в

обратном направлении, то есть нерасширяющийся газ будет производить работу, а внешние силы работать над газом, заставляя его сжиматься. При заданном давлении газа P мы получим максимальную работу, если вес груза над поршнем на бесконечно малую величину меньше веса, необходимого для поддержания равновесия. Это–наибольший возможный груз, который расширяющийся газ может поднять в данных условиях. В таком случае газ производит максимальную работу, но при этом объем газа не может измениться на конечную величину (например от V_1 до V_2), поскольку после расширения газа на бесконечно малую величину наступает новое состояние равновесия. Если газ расширяется при постоянной температуре, то его давление падает, поэтому после подъема нашего максимального груза на бесконечно малую величину равновесие между весом груза и силами, действующими на поршень снизу, мгновенно восстановится. Для того чтобы газ дальше мог производить работу, нужно снова уменьшать вес груза. Максимальная работа получается только в том случае, если каждое уменьшение веса груза обеспечивает расширение газа на бесконечно малую величину. Максимальная работа складывается из большого числа бесконечно малых порций. Этот процесс мы будем вести до тех пор, пока газ не расширится до заданного объема V_2 и поршень не поднимется на высоту S см.

Естественно, возникает вопрос, почему для достижения максимальной работы нужно уменьшать вес груза отдельными порциями. Не проще было бы после достижения равновесия сразу снять столько груза, сколько необходимо для расширения газа до заданного конечного объема V_2 и подъема поршня на высоту S см за один цикл? Несомненно, этот путь более простой, но газ совершил бы меньшую работу, поскольку на начальном этапе расширения ему пришлось бы поднимать груз меньший, чем он способен поднять при начальном давлении P. Итак, мы видим, что даже в идеальном мысленном эксперименте весьма трудно осуществить процесс, в котором совершалась бы максимальная работа.

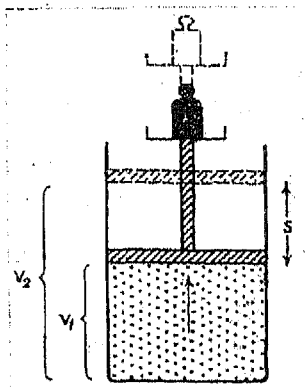


Рис. 6. Простейшая машина, состоящая из цилиндра с поршнем, в которой работу производит расширяющийся газ.

Каждый раз, по достижении состояния равновесия, необходимо уменьшать вес груза, давящего на поршень, бесконечно малыми порциями, чтобы газ расширялся также на бесконечно малую величину и производил при этом соответствующую максимальную работу. Этот процесс необходимо повторять до тех пор, пока не будет достигнуто заданное конечное состояние. Если мы просуммируем работу, совершенную газом на каждом шаге, то

получим максимальную работу, достижимую в данном процессе. Характерная особенность каждой фазы такого процесса – это бесконечно малое отличие состояния системы от равновесного и возможность ведения процесса не только в прямом, но и в обратном направлении, если вместо уменьшения груза мы будем его увеличивать на ту же бесконечно малую величину. Процессы, производимые по такому методу, называются обратимыми. Итак, максимальную работу можно получить только в том случае, если процесс ведется обратимо. В обратимом процессе материальная система последовательно проходит ряд состояний, каждое из которых бесконечно мало отличается от равновесного. По этой причине такие процессы называются также равновесными.

Осуществим ли вообще обратимый процесс? Из сказанного выше видно, что практически ни один процесс не может быть проведен строго обратимо уже по той простой причине, что в таком процессе нужно уменьшать противодействующую силу бесконечно малыми порциями и бесконечно много раз, на что, естественно, потребуется длительное время. Кроме того, невозможно полностью устранить трение и другие потери.

Как же тогда узнать величину максимальной работы?

Известно, что невозможно осуществить обратимый процесс, но можно провести процесс так, чтобы он достаточно мало отличался от обратимого. Если соответствующим образом регулировать величину противодействующей силы и максимально уменьшить силу трения, то полученная работа будет мало отличаться от максимально возможной. Это отличие тем меньше, чем больше удастся снизить необратимость процесса. Из данных, полученных в реальном эксперименте, можно теоретически (с достаточной точностью) вычислить максимальную работу многих процессов.

Практическое значение обратимых процессов

Знание величины максимальной работы, которую можно получить в обратимых процессах, во многих случаях имеет большое практическое значение. Так, например, знание максимальной работы, достижимой в некотором процессе, позволяет оценить КПД машины, использующей такой процесс, и определить возможности реальной машины, а, следовательно, саму целесообразность ее создания и возможности усовершенствования. Если, например, расчеты покажут, что какой-либо процесс при обратимом его проведении должен давать в единицу времени 100кГм работы, а реальная установка дает только 8кГм, то совершенно очевидно, что эта установка весьма несовершенна по сравнению с заложенными в ней реальными возможностями, и объективно имеет смысл работать над дальнейшим совершенствованием ее конструкции. Если же окажется, что машина дает 90 кГм, то ясно, что КПД можно увеличить максимально на 10% и поэтому вряд ли целесообразно вкладывать средства в дальнейшие

исследования. Очевидно, бессмысленно от этой установки добиваться, например, 200 кГм работы. Зная работу, получаемую в обратимом процессе, можно судить о рентабельности машины и определить наиболее целесообразное направление научных исследований и развития техники.

Одноступенчатое превращение тепла в работу

Рассмотрим еще раз пример с газом, заключенным в цилиндре с поршнем. Это простое устройство, являющееся существенной частью наиболее распространенных двигателей (паровой машины, бензинового и дизельного двигателей), поможет выяснить некоторые важные моменты процесса превращения термической энергии в работу.

Пусть цилиндр наполнен идеальным газом. В таком газе молекулы можно рассматривать как точки и пренебречь их притяжением. В действительности идеального газа не существует, но многие реальные газы (H_2, O_2, N_2, He и др.) при не слишком низких температурах и не очень больших давлениях (например при комнатной температуре и атмосферном давлении) ведут себя почти как идеальный газ. Важнейшее свойство идеального газа – это независимость внутренней энергии определенного количества газа (например 1моля) от объема (или давления). Так, внутренняя энергия 2 г водорода при давлении в 5 атм. практически имеет ту же величину, что и при 1 атм.

Поместим цилиндр с газом в большой сосуд с водой, в котором при помощи хорошего терморегулятора поддерживается постоянная температура. После того как температура газа и цилиндра с поршнем сравняется с температурой воды, будем менять груз на поршне так, чтобы газ расширился обратимо от объемаV_1 до объема V_2 При этом газ произведет против сил, действующих на поршень, максимальную работу, которую мы обозначим A.

Откуда берется эта работа? Ответ дает нам первое начало термодинамики. Согласно соотношению (1), расширяющийся газ совершает работу (A) либо за счет уменьшения своей внутренней энергии ($-\Delta U$), либо за счет отобранного у воды тепла (Q), либо, наконец, за счет того и другого вместе. Так как в данном случае работу совершает идеальный газ, то его внутренняя энергия не изменяется: при объеме V_2 она такая же, как при объеме V_1. Это значит, что $\Delta U = 0$, откуда $A = -Q$.

Таким образом, расширяющийся газ превращает в работу тепло, отобранное от окружающего пространства. Если расширение происходит обратимо, то есть бесконечно медленно, то между газом и водяной ванной нет разности температур. На первый взгляд кажется, что таким образом мы можем осуществить вечный двигатель второго рода – полное превращение термической энергии в работу. Однако возможность проведения такого процесса даже при условии его обратимости очень ограничена.

Газ в цилиндре может расширяться только до тех пор, пока сила его давления на поршень не сравняется с силой атмосферного давления и весом груза. По достижении такого равновесия газ не может более производить работу. Это значит, что наша простая машина может полностью превратить в работу одну-единственную порцию термической энергии, после чего она, при данных условиях, не способна вновь производить работу. Очевидно, что такая машина не имеет никакого практического смысла.

Превращение тепла в работу в циклическом процессе

Возникает вопрос, можно ли каким-либо способом вновь восстановить работоспособность установки, потерянную ею в результате расширения газа. Очевидно, это возможно, если мы с помощью давления вновь сожмем газ, хотя, конечно, такой процесс потребует затраты работы. Если мы сожмем газ до первоначального объема V_1, то он вновь окажется в исходном состоянии и будет, таким образом, способен дать очередную порцию работы. Такая последовательность изменений, которая в конце концов приводит систему в первоначальное состояние, называется циклическим процессом.

Для установления энергетического баланса циклического процесса мы должны выяснить, в каком соотношении находится работа, полученная при расширении газа на первой стадии, и работа, затраченная на восстановление первоначального состояния. Если на первой стадии мы получим больше работы, чем ее нужно затратить на восстановление первоначального состояния, то циклический процесс дает выигрыш в энергии и многократном повторении этого процесса можно получить работу. В противном случае устройства такого типа не пригодны для этого.

На первой стадии при обратимом расширении газ производит наибольшую работу. Рассуждая аналогично тому, как в случае расширения газа, можно показать, что сжатие газа потребует наименьшей работы, если процесс будет идти обратимо. Но даже в этом идеальном предельном случае обратимое сжатие газа до исходного состояния потребует точно такого же количества работы, какое дает газ при обратимом расширении. Таким образом, баланс энергии всего кругового процесса, даже в этом принципиально возможном благоприятном случае, равен нулю: для того чтобы вновь восстановить способность машины совершать работу, мы должны полностью затратить ту работу, которую мы получим на первой стадии. Следовательно, это устройство даже в идеальном предельном случае не сможет длительно производить работу.

Действительное положение вещей еще менее благоприятно, так как циклический процесс никогда нельзя провести обратимо. Необратимость приведет к тому, что работа, полученная на первой стадии, будет меньше максимальной, и по той же причине работа, затраченная на второй ста-

дии, – больше минимально необходимой. Итак, весь процесс заканчивается с отрицательным энергетическим балансом.

Работа, получаемая при наличии разности температур

Таким образом, циклический процесс, состоящий из расширения и сжатия газа, не подходит для получения работы, так как сжатие требует слишком большой ее затраты. Нельзя ли уменьшить эту работу настолько, чтобы энергетический баланс циклического процесса все же стал положительным и мы получили бы выигрыш в работе? Для этого давление газа на стадии сжатия должно быть меньше, чем на соответствующей стадии расширения. Этого можно добиться, охлаждая газ перед началом второй стадии. С понижением температуры давление данной массы газа также понижается, если при этом не изменяется его объем. Соотношение между давлением, объемом и температурой идеального газа описывается объединенным газовым законом. Он утверждает, что для одного моля газа соотношение между давлением P, объемом V и абсолютной температурой T имеет вид

$$PV = RT, \qquad (2)$$

где R = 1,98 кал/(кмоль) – так называемая универсальная газовая постоянная, не зависящая от свойств газа. При заданном значении V давление газа пропорционально температуре.

С учетом приведенного соотношения описанный выше циклический процесс можно сделать "рентабельным": после того как данное количество при температуре T_2 расширится от объема V_1 до объема V_2 и совершит при этом работу A_2, газ в цилиндре нужно охладить до температуры T_1 и сжать его до объема V_1, при этом совершив работу A_1. Наконец, для достижения исходного состояния газ нужно вновь нагреть до температуры T_2.

Здесь циклический процесс заканчивается (рис.7): газ возвращается в исходное состояние и процесс может быть повторен вновь. Проверим энергетический баланс этого кругового процесса в идеальном случае, когда на всех стадиях процесс идет обратимо (цикл Карно). Теперь он закончится чистым выигрышем в работе, так как работа, необходимая для восстановления исходного состояния, меньше, чем полученная при расширении газа $|A_1| < |A_2|$. Разность – это "чистая" работа циклического процесса $|A| = |A_2| - |A_1|$. Для циклического процесса, который ведется при двух различных температурах, необходимо иметь два "тепловых резервуара", например два сосуда с водой с температурами T_2 и T_1. На первой стадии процесса цилиндр находится в резервуаре с более высокой

температурой T_2. Расширяющийся газ производит работу A_2 за счет термической энергии резервуара, из которого он забирает тепло Q_2 и полностью превращает его в работу. Затем цилиндр переносится в более холодный резервуар, соответственно газ в нем охлаждается и сжимается, при этом затрачивается работа A_1. Так как обратимое сжатие - процесс, строго противоположный обратимому расширению, то тепло Q_1, эквивалентное затраченной работе A_1, переходит в более холодный резервуар. Затем цилиндр каким-нибудь "подходящим способом" (адиабатическое сжатие) нагревают до температуры T_2. Можно доказать, что в циклическом процессе газ при охлаждении отдает столько энергии, сколько получает при нагревании, то есть суммарный энергетический баланс процессов охлаждения и нагревания газа равен 0, поэтому его не надо принимать во внимание.

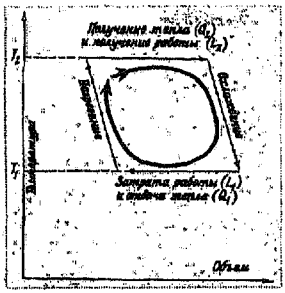


Рис. 7. Схема циклического процесса, при котором работа совершается за счет нагревания и охлаждения газа (цикл Карно).

Таким образом, в рассматриваемом случае газ отбирает из более теплого резервуара тепло Q_2 и отдает более холодному - тепло Q_1, при этом Q_2 превращается в работу лишь частично:

$A = Q_2 - Q_1$, а Q_1 переходит в термическую энергию более холодного резервуара.

Второе начало термодинамики

Итак, в циклическом процессе получить полезную работу из тепла можно только тогда, когда термическая энергия в форме тепла переходит из резервуара с более высокой температурой в резервуар с более низкой, и при этом в работу превращается только часть тепла. В результате довольно сложного расчета получено выражение для определения полезной работы, совершаемой в рассмотренном процессе:

$$A_m = -Q_2 \frac{T_2 - T_1}{T_2} . \quad (3)$$

Здесь $(T_2 - T_1)/T_2 = \eta$ – коэффициент полезного действия циклического процесса.

На основании опытных данных установлено, что уравнение (3) справедливо для любого обратимого циклического процесса, в котором работа получается из тепла. Следовательно, это уравнение универсально, оно является математическим выражением второго начала термодинамики.

§ 5. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА ПРЕВРАЩЕНИЯ ТЕПЛА В РАБОТУ

Второе начало термодинамики утверждает, что получение работы из тепла возможно только при наличии нагревателя и охладителя, между которыми поддерживается определенная разность температур. Отобранное от нагревателя тепло Q_2 частично превращается в работу, а частично переходит к более холодной части установки (охладителю). КПД обратимого процесса получения работы η не зависит ни от вещества, используемого для получения работы, ни от устройства машины, а лишь от разности температур между нагревателем и охладителем. КПД такого идеального обратимого процесса имеет максимальное значение, которого он может достигнуть. В реальных процессах из-за неустранимой необратимости КПД значительно ниже. Разность между фактическим КПД реальной машины, получающей работу из тепла, и идеальным КПД $(T_2-T_1)/T_2$ есть мера необратимости соответствующего процесса.

Увеличение коэффициента полезного действия

Из второго начала термодинамики следует, что КПД идеальной машины, производящей работу из термической энергии, будет тем выше, чем больше разность температур между нагревателем и охладителем (радиатором) и чем ниже температура радиатора. На практике температура охладителя не может быть ниже температуры окружающей среды, как правило, она почти всегда выше.

Температура нагревателя зависит от многих факторов. Так как тепло, переводимое в работу, получается в результате сгорания различных видов топлива, то температура нагревателя в первую очередь зависит от теплоты и скорости сгорания. Современные устройства позволяют хорошо регулировать эту скорость и получать очень высокую температуру, но практически величина температуры ограничена, так как при высокой температуре в металлах и других метериалах возможны нежелательные изменения. В современных паровых машинах котел нагревается путем внешнего сгорания топлива. В таких машинах пар можно нагреть до $T_2=650^{\circ}C$ (923 К). Если при этих условиях температура охладителя $T_1=60^{\circ}C$ (333 К), то КПД при обратимом процессе составляет

$$\eta = \frac{923-333}{923} \cdot 100 = 63{,}8\% \ .$$

В действительности КПД значительно ниже.

Даже на современных больших электростанциях КПД тепловых турбин не превышает 45%, для малых мащин он еще ниже например КПД паровых двигателей на паровозах составляет лишь 5-7%.

В двигателях внутреннего сгорания (бензиновых и дизельных моторах), в которых горючее сгорает в самих цилиндрах, температура может достигать 1600–1800°С без ущерба для материалов цилиндра и поршней охлаждаемых снаружи. КПД дизельных локомотивов может превышать 25%; в стационарных моторах двигателей внутреннего сгорания КПД достигает 45%; еще больший КПД имеют газовые турбины.

Таким образом, из второго начала термодинамики вытекает, что в длительно работающей машине тепло даже принципиально не может быть полностью превращено в работу – часть тепла идет на повышение термической энергии охладителя. С точки зрения производимой работы эта энергия теряется. Поэтому тепловые двигатели принципиально нерентабельны.

В тепловых машинах химическая энергия топлива (угля, нефти, газ) сначала превращается в термическую энергию, а последняя используется затем для получения работы, причем с очень низким КПД. При таком преобразовании мы, по существу, "обесцениваем" химическую энергию, которая в принципе может быть непосредственно и почти полностью превращена в работу. Термическая энергия как переходная ступень используется в настоящее время главным образом потому, что ее превращение в работу можно осуществить с помощью относительно простых устройств, для конструирования которых достаточно лишь знания законов движения макроскопических составных частей машин.

Существуют устройства, в которых химическая энергия непосредственно, без промежуточного преобразования в тепло, превращается в электрическую энергию,– это гальванические элементы (сухие элементы и аккумуляторы), применяемые пока лишь для получения относительно малых количеств энергии. Материалы, используемые для создания известных на сегодняшний день надежно работающих гальванических элементов, слишком дороги для производства энергии в больших масштабах. До сих пор еще не удалось создать из дешевых материалов надежно работающие гальванические элементы, пригодные для широкого применения. Кроме того еще недостаточно изучены законы движения молекул, атомов и электронов, которые определяют данные химические превращения.

Что такое абсолютный нуль?

Итак, в длительно работающей машине (в циклическом процессе) принципиально невозможно полностью перевести все тепло в работу.

Однако оказывается, что полное превращение в работу было бы возможно, если бы удалось довести температуру охладителя до абсолютного нуля ($T_1=0$). Именно в этом случае КПД обратимого процесса был бы равен 1 в соответствии с уравнением (4). Правда, для практики это не имеет никакого значения, так как температура охладителей в тепловых двигателях всегда выше температуры окружающей среды, которая, естественно, всегда намного выше абсолютного нуля. Это обстоятельство может быть использовано для термодинамического определения понятия абсолютного нуля. Абсолютный нуль – такая темпертура охладителя, которая в обратимом цикле Карно обеспечивает КПД $\eta=1$.

§ 6. ОХЛАЖДЕНИЕ НАГРЕВАНИЕМ

В природе термическая энергия самопроизвольно всегда переходит от более нагретых тел к менее нагретым. На практике же иногда необходимо провести обратный процесс, то есть перенести тепло от менее нагретых тел к более нагретым. Такой процесс, например, осуществляется в холодильнике. Там термическая энергия отбирается у охлаждаемых тел и отводится в окружающее пространство, температура которого обычно 20-25°С. Однако такой процесс требует затраты работы. По принципу работы холодильник – это тепловой двигатель, работающий в обратном направлении.

Холодильник – обращенный тепловой двигатель

Кратко рассмотрим работу холодильника. В холодильнике трубы, проведенные в объеме, подлежащем охлаждению, наполняются жидкостью, имеющей низкую температуру кипения и высокую теплоту испарения (например аммиак, фреон $C_2F_2Cl_2$ и др.) Энергию, необходимую для испарения, жидкость берет из термической энергии охлаждаемого объема, температура которого вследствие этого понижается. После установления заданной низкой температуры последняя поддерживается благодаря испарению охлаждающей жидкости.

Внутренняя энергия пара больше, чем внутренняя энергия соответствующей жидкости. В холодильнике процесс охлаждения осуществляется за счет того, что рабочее вещество превращает термическую энергию, отобранную из охлаждаемого объема, в энергию своего пара. Затем пар отводится из охлаждаемого объема, сильно сжимается в конденсаторе при помощи компрессоров, превращаясь, таким образом, снова в жидкость, которая возвращается в охлаждаемый объем. Так заканчивается один цикл процесса. С новым испарением начинается новый цикл и т. д.

Тепло, освобождающееся при сжижении пара в конденсаторе холодильника, отдается в окружающее пространство. Количество этого тепла

тем больше, чем отобранное у охлаждаемой камеры, так как в тепло переходит и работа, необходимая для переноса его к телам окружающего пространства, имеющим более высокую температуру; отдается здесь и то дополнительное тепло, которое возникло в холодильнике из-за неизбежной необратимости процессов. Следовательно, нужно читывать, что холодильник в то же время нагревает окружающую среду.

Не в каждом холодильнике имеется компрессор. Есть и такие, в которых энергия, необходимая для переноса в окружающее пространство тепла, отобранного от холодильной камеры, поставляется не посредством механической работы, а через тепло. Рабочее вещество холодильной машины (например аммиак) не сжижается здесь под давлением, а растворяется в воде и выпаривается кипячением. При кипении тепло отбирается из окружающей среды (охлаждаемого объема) – это стадия охлаждения. Напротив, при растворении аммиака в воде освобождается тепло – на этой стадии рабочая жидкость нагревает окружающую среду. Это так называемые абсорбционные холодильные машины.

Как можно согласовать тот факт, что тепло переходит от холодильной камеры с низкой температурой в окружающее пространство, имеющее более высокую температуру, с всеобщим законом, в соответствии с которым тепло само по себе переходит только от более нагретых тел к менее нагретым?

Прежде чем ответить на этот вопрос, попробуем для сравнения разобрать пример из области механики. Известно, что под действием силы тяжести все тела падают вниз, однако с помощью силы тяжести тела можно поднимать вверх. Если к одному концу троса, перекинутого через блок, привязать тело, которое мы хотим поднять, а к другому - тело большей массы как противовес, то первое поднимается вверх, а противовес опустится вниз. Это стало возможным в результате того, что одновременно тело большой массы опустилось вниз, затратив больше работы, чем необходимо для поднятия груза. Если рассматривать оба тела как единую материальную систему, то ее потенциальная энергия уменьшилась, так как центр тяжести системы двух тел теперь лежит ниже, чем прежде. Таким образом, система как целое под действием силы тяжести опустилась, но одна часть её все же поднялась. Работу, необходимую для ее поднятия, совершила вторая, опустившаяся часть. Такие явления, когда в сложных процессах на каких-то этапах совершаются изменения, идущие в направлениях, казалось бы противоположных общим законам природы, встречаются не только в холодильных машинах или в механических процессах, но и в других случаях. Например, в живых организмах происходит построение энергетически богатых соединений из менее богатых. Синтез энергетически более богатых веществ происходит также и вне живого организма. Возникновение энергетически богатых соединений осуществля-

ется за счет уменьшения энергии других соединений, необходимая же для синтеза дополнительная химическая энергия может черпаться и из другого энергетического источника. Видно, что несмотря на однозначность основных законов природы, явления, а также искусственно осуществляемые человеком процессы, отличаются большим многообразием. Для понимания этих явлений, кроме знаний общих законов природы, необходимо подробно изучить механизмы различных энергетических превращений, причем одного только термодинамического подхода явно недостаточно – требуется проникновения в микромир этих явлений. Ведь термодинамика имеет дело только с макроскопически измеряемым энергетическим балансом результирующего процесса, состоящего из многих отдельных промежуточных процессов.

§ 7. КАК ПРОТЕКАЮТ ПРОЦЕССЫ В ПРИРОДЕ ?

Можно привести множество примеров того, что в естественных условиях процессы и изменения протекают по вполне определенным направлениям: вода в реке течет вниз по долине, а в водопаде падает сверху вниз и, пока находится в воздухе, не растекается горизонтально, тем более не течет вверх; газы расширяются, понижая при этом свое давление; тепло переходит от более нагретых тел к менее нагретым; сильные кислоты взаимодействуя со щелочами, образуют соли и воду, которые самопроизвольно никогда не могут превратиться в кислоту и щелочь; углерод или водород, сгорая в воздухе, образуют соответственно CO_2 или H_2O, которые при комнатной температуре самопроизвольно не разлагаются обратно на кислород и углерод (или водород); электрический ток течет от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким потенциалом; сахар самопроизвольно растворяется в воде, однако обратно из раствора не выпадает (если мы не будем испарять жидкость) и т.д.

Что же означает этот факт? Не существует ли всеобщий закон природы, позволяющий предсказать, какие изменения будут происходить в данной материальной системе при заданных условиях? Нельзя ли на основании этого закона делать надежные научные прогнозы? Можно ли вообще на основании законов природы предсказывать исход процессов?

Фактор, определяющий направление процесса

Если мы сопоставим разнообразные процессы, самопроизвольно проходящие в природе, то обнаружим у них некоторые общие черты. Так, с давних времен реки и водопады приводят в движение мельничные колеса; ветер вращает крылья ветряных мельниц; электрический ток приводит в движение электромоторы и т.д.

Любой, самопроизвольно происходящий природный процесс можно с помощью соответствующих устройств использовать для получения ра-

боты. Спонтанно (самопроизвольно) протекающие процессы не обязательно производят работу – они только таят в себе эту возможность, которая при определенных условиях может быть реализована. Вода, реки, ветер или молния, возникающая вследствие разности электрических потенциалов, в общем не производят никакой полезной работы (их энергия рассеивается в форме тепла), но если вести процесс надлежащим образом, используя турбину, ветряной двигатель или электрический мотор, то полезную работу получить можно. При этом величина производимой работы зависит не только от самого процесса (например от количества воды, протекающей в единицу времени через водопад, или от его высоты), но и от параметров устройств, используемых для превращение энергии в работу. Так, на одной и той же реке старое, вращающееся с большим трением мельничное колесо производит меньше работы, чем современная, даже небольшая гидростанция.

Мы уже видели, что только самопроизвольно протекающий процесс при использовании соответствующих устройств обеспечивает возможность получения работы. Справедливо и обратное утверждение: в определенных условиях самопроизвольно может протекать только такой процесс, который при помощи соответствующего устройства способен давать работу.

На основании этого утверждения можно, например, предсказать, что произойдет, если открыть кран резервуара, расположенного на некоторой высоте. Потечет ли вода вверх, или вниз, или, может быть, растечется горизонтально? Для этого только нужно установить, в каком случае текущая вода сможет произвести работу. Разумеется, что она сможет произвести работу лишь в том случае, когда вода потечет вниз, следовательно, она должна течь вниз. Если при определенных условиях процесс нельзя использовать для получения работы, даже если вести его обратимо, то этот процесс не может идти самопроизвольно. В таком случае мы говорим, что при данных условиях существует равновесие. Если изменятся условия, то равновесие может быть нарушено.

Уравнение Гиббса-Гельмгольца

От каких факторов зависит возможность получения работы при каком-либо процессе? Исходя из каких данных, можно рассчитать максимально возможную работу процесса? Эти проблемы мы будем рассматривать прежде всего применительно к химическим превращениям. В связи с получением работы при химических процессах справедливо поставить вопрос, возможен ли полный перевод в работу внутренней энергии, освобождающейся при химических превращениях.

Вследствие рассеяния энергии при реальных, то есть необратимых процессах только часть освобождающейся внутренней энергии превра-

щается в работу, а остальная рассеивается в виде термической энергии. До некоторой степени возможность более полного превращения освобождающейся энергии в работу зависит от технического совершенства оборудования, предназначенного для получения работы. Возможно ли полное превращение в работу освободившейся в обратимом процессе внутренней энергии?

В соответствии с первым началом термодинамики изменение внутренней энергии системы (ΔU), работа (A) и тепло (Q), которым система обменивается с окружающей средой, связаны соотношением

$$\Delta U = Q + A. \quad (5)$$

При уменьшении внутренней энергии ΔU отрицательно ($\Delta U<0$), если данная материальная система производит работу, то A отрицательна, и если тепло переходит в окружающую среду, то Q отрицательно.

Однако первое начало термодинамики ничего не говорит о том, какими факторами определяются величины самих слагаемых в формуле (5). Может ли Q равняться нулю? Это означало бы, что освобожденная в химическом процессе энергия полностью перешла в работу. Из первого начала термодинамики невозможно определить, при каких условиях $A<0$, следовательно, в каком направлении идут процессы.

В какой-то степени ответ на этот вопрос дает второе начало, которое позволяет определить направление перехода термической энергии. Согласно второму началу, часть тепла Q, отобранного в циклическом процессе у тела с абсолютной температурой T_2, превратится в полезную работу только в том случае, если остальная его часть будет отдана телу с температурой T_1. Максимальная работа, которая может быть получена при обратимом процессе, определяется формулой

$$A_m = -Q\frac{T_2 - T_1}{T_2}.$$

Если количество тепла Q, переходящее от тела с температурой $T+dT(=T_2)$ к телу с температурой $T(=T_1)$, бесконечно мало, то полученная при этом максимальняа работа (dA_m) также бесконечно мала.

По второму закону

$$dA_m = -Q\frac{dT}{T}, \quad (6)$$

$$\text{откуда} \quad Q = -T\frac{dA_m}{dT}. \quad (7)$$

Если мы введем это выражение в уравнение (5), то получим

$$\Delta U = A_m - T\frac{dA_m}{dT}.$$

Таким образом, максимальная работа обратимого процесса

$$A_m = \Delta U + T\frac{dA_m}{dT}. \quad (8)$$

Следовательно, максимальная работа зависит от температуры. В уравнении (8) dA_m выражает увеличение максимальной работы данного процесса при повышении температуры на dT. В простейшем случае dA_m/dT – это увеличение максимальной работы при повышении температуры на один градус, другими словами, dA_m/dT – *температурный коэффициент* максимальной работы. Уравнение (8), называемое *уравнением Гиббса-Гельмгольца,* объединяет первое и второе начала термодинамики. Оно показывает, что A_m, полученная при химической реакции и даже при обратимом ведении процесса не равна высвобождавшейся внутренней энергии dU, так как температурный коэффициент в общем случае не равен нулю, в исключительных случаях этот коэффициент все же может равняться нулю ($dA_m/dT=0$), тогда $A_m = \Delta U$, и освобождающаяся в обратимом процессе внутренняя энергия полностью превращается в работу.

Свободная энергия

Температурный коэффициент максимальной работы в большинстве случаев положительный, вследствие этого внешняя работа, совершаемая в каком-либо процессе, несколько меньше освободившейся внутренней энергии. Поэтому даже в обратимом процессе часть энергии самопроизвольно в форме тепла переходит в окружающее пространство. Часть энергии, превращенная в обратимом процессе в работу, называется изменением свободной энергии, а часть, превращенная в тепло, – изменением связанной энергии. Таким образом, изменение свободной энергии (при постоянной температуре) равняется максимальной работе. В описанном

примере изменение свободной энергии меньше, чем общее уменьшение энергии (ΔU). Температурный коэффициент максимальной работы бывает и отрицательным. В этом случае максимальная работа больше, чем уменьшение внутренней энергии: такие химические реакции, если вести их обратимо, превращают в работу не только освобождающуюся внутреннюю энергию (в основном химическую), но и некоторую часть термической энергии окружающей среды.

С учетом полученного соотношения между максимальной работой и внутренней энергией системы мы можем сделать следующее заключение. Процессы протекают самопроизвольно в том направлении, в котором изменение свободной энергии идет в сторону ее уменьшения (система производит внешнюю работу). Это одно из основополагающих определений термодинамики, оно позволяет путем расчетов заранее установить, в каком направлении в заданных условиях пойдет самопроизвольный процесс в системе, состоящей из данных веществ. Точное предсказание направления процесса позволяет рассчитать максимально возможную при определенных условиях работу.

Температурный коэффициент максимальной работы, как правило, мал. Поэтому изменение свободной энергии (при комнатной температуре) незначительно отличается от общего изменения энергии.

§ 8. ХАОТИЧНОСТЬ И УПОРЯДОЧЕННОСТЬ В МИРЕ МОЛЕКУЛ

Состояние молекул в газах, определяемое их расположением, а также величинами и направлениями скоростей теплового движения, хаотично. Однако это состояние не является абсолютно хаотичным: в реальных условиях молекулы газа находятся под действием силы тяжести, направленной к центру Земли. Если бы на молекулы действовала только эта сила, они все собрались бы на дне сосуда, то есть в известном смысле упорядочились бы. С другой стороны, вследствие теплового движения молекулы газа, заключенного в сосуде, с одинаковой вероятностью могут находиться в любом месте этого сосуда (наблюдается равномерное среднее распределение молекул в сосуде с газом). Однако действие силы тяжести приводит к тому, что в нижних слоях молекулы расположены более плотно, чем в верхних, там создается некоторое подобие упорядоченности. Поэтому плотность и давление газа (пропорциональны числу молекул в единице объема) уменьшаются с высотой. При небольшой высоте сосуда этим, так называемым барометрическим перепадом давления, или перепадом плотности, еще можно пренебречь, но при больших высотах разница очень значительна. Например, на высоте 5400 м давление составляет лишь 0,5 атм. В сосуде высотой несколько сантиметров влияние силы тяжести ис-

чезающе мало, поэтому состояние молекул можно считать хаотическим, не допуская при этом какой-либо существенной ошибки.

Совершенно иначе обстоит дело со скоростями молекул газа. Хотя эти скорости не упорядочены, все же нельзя считать, что они полностью хаотичны. Если пренебречь действием силы тяжести, то можно сказать, что в движении молекул нет никаких преимущественных направлений, все направления движения равновероятны. С точки зрения величин скоростей совершенно хаотическое состояние означает, что с различными скоростями (малыми, средними и большими) в среднем должно двигаться одинаковое количество молекул. Однако в результате столкновений скорость каждой молекулы постоянно изменяется. Столкновения происходят приблизительно по законам столкновения упругих шаров, и в зависимости от условий скорость (а вместе с ней и кинетическая энергия) одних молекул возрастает, других уменьшается. Наибольшую вероятность имеют, таким образом, средние скорости.

Это справедливо не только для энергии поступательного движения молекул газа, но и для энергии вращения молекул и колебания атомов внутри них. При столкновениях молекул происходит непрерывный обмен энергиями между различными видами движения.

Состояние газа, вызванное взаимодействием всех молекул, подчиняется статистическим закономерностям. Статистическая теория изучает те свойства коллектива, состоящего из очень многих индивидуумов, которые характерны для него как единого целого. Статистика не занимается отдельными индивидуумами, ее данные для них совсем не показательны, причем не потому, что судьба каждого не зависит от совокупности действующих факторов, а потому, что для статистики важны свойства только всего коллектива.

При отсутствии внешнего воздействия в газе в результате взаимных столкновений молекул всегда устанавливается распределение энергий по Максвеллу-Больцману. Это и есть то состояние, в котором газ может находиться длительное время.

Это состояние может быть нарушено, например при наложении электрического или магнитного полей; однако после устранения возмущающего фактора первоначальное распределение энергии вновь восстанавливается. Их состояние зависит только от условий в данный момент (P,T).

Можно говорить как о пространственном, так и о временном распределении молекул по энергиям. Если рассматривать газ в какой-либо определенный момент времени, то в этом случае можно говорить о пространственном распределении большого числа молекул по энергиям, которое соответствует закону Максвелла-Больцмана. Если же в течение определенного, достаточно продолжительного, отрезка времени наблюдать за движением одной-единственной молекулы и подсчитать, сколько раз за это время энергия молекулы принимает различные значения, а затем

построить эту зависимость, то можно видеть, что и она соответствует распределению Максвелла-Больцмана. Это уже временное распределение. Среднестатическое распределение молекул по энергиям в данный момент полностью соответствует распределению энергии одной молекулы в течение длительного времени.

Распределение Максвелла-Больцмана по энергиям есть наиболее вероятное состояние, которое наступает вследствие обмена энергией между всеми молекулами.

Под внешним воздействием число наиболее вероятных состояний уменьшается.

Упорядоченность молекул в жидкостях и кристаллах

Мы видели, что в газах, несмотря на хаотическое движение молекул, все же имеется некоторая упорядоченность, которая проявляется в статистическом распределении энергии. В жидкостях расстояние между молекулами намного меньше, соответственно взаимодействие значительно сильнее, чем в газах, поэтому упорядоченность несколько больше. В кристаллах упорядоченность частиц (молекул, атомов, ионов) еще больше: они расположены в так называемых кристаллических решетках и колеблются (в отдельных случаях вращаются) вокруг вполне определенных положений равновесия. Но и в кристаллах упорядочение неполное: атомы и ионы колеблются во всех направлениях, их энергия различна и все время меняется. Внутренняя энергия жидкости и газов складывается из кинетической энергии вращательного и колебательного движений частиц и потенциальной энергии, связанной с их взаимным притяжением.

Причины упорядоченности и беспорядка

Притяжение, действующее между частицами, способствует упорядочению, в то время как тепловое движение его разрушает. В результате этих двух воздействий в зависимости от условий в системе устанавливается определенная степень упорядоченности. При низких температурах наиболее стабильно упорядоченное кристаллическое состояние. С повышением температуры стабильным становится менее упорядоченное жидкое и, наконец, наиболее хаотическое газообразное состояние. С повышением температуры степень упорядоченности газообразного состояния снижается, на что указывает уменьшение максимума на кривой Максвелла-Больцмана (рис.5!). Распределение частиц по скоростям или энергиям становится более равномерным, что означает, в сущности, рост беспорядка.

Понижение температуры, напротив, приводит к большему упорядочению. Чем больше молекулярный порядок в некотором макросостоянии, тем меньше число осуществляющих его микросостояний, т.е. уменьшается термодинамическая вероятность состояния. Согласно квантовой теории,

при абсолютном нуле состояние чистого кристаллического вещества может осуществляться только в одном-единственном виде (а именно так, что все атомы будут находиться в квантовом состоянии с минимальной энергией); термодинамическая вероятность этого состояния равна единице.

Значение среднего распределения

Рассмотрим следующий пример. Пусть известно, что средний возраст людей в некоторой группе, состоящей из 100 человек, составляет 40 лет. Этот средний возраст может быть получен из многих различных комбинаций, поэтому на основании только таких сведений нельзя судить о состоянии данного коллектива. Один и тот же результат получится, если, например, 50% лиц имеют возраст 39 лет, а остальные 50% – 41 год, и если 50% лиц будут иметь возраст 70 лет и 50% – 10 лет. В первом случае речь идет о людях, в сущности, одного возраста, во втором же случае коллектив состоит из совершенно различных возрастных групп: из детей и весьма пожилых людей. Данный пример показывает, что в случае, если средние значения какой-либо величины для различных систем одинаковы, но ее распределения для каждой системы могут существенно отличаться.

В кинетической теории газов мы интересуемся распределением молекул по энергиям и говорим о некоторой средней (термической) энергии системы и температуре как мере этой средней энергии. Однако мы уже видели, что свойства системы определяются не только средним значением энергии, но и ее распределением. Поэтому под температурой системы мы понимаем меру термической энергии такой системы, в которой энергия распределена по закону Максвелла-Больцмана.

§ 9. ЭНТРОПИЯ

Как уже сказано выше, при осуществлении различных процессов превращения химических соединений очень важно знать, в каком направлении пойдет изменение в соответствующей материальной системе. Мы уже познакомились с энергетическим критерием этого направления: изменения происходят самопроизвольно в том направлении, в котором система способна производить работу. При рассмотрении вопроса с позиций кинетической теории этот критерий формулируется следующим образом: процессы протекают самопроизвольно в тех направлениях, в которых система переходит в состояние с большей термодинамической вероятностью. Следовательно, знание состояния системы позволяет нам судить о направлении химических процессов. Оба эти следствия, полученные при рассмотрении реальных процессов с двух различных точек зрения, можно в известном смысле объединить, если ввести новую величину, которая определяется исходя из обеих точек зрения. Эта величина есть энтропия.

Энтропия как мера вероятности

Наиболее наглядно энтропия определяется из кинетической теории как непосредственная мера термодинамической вероятности. Энтропия (S) данной системы, находящейся в определенном состоянии, пропорциональна натуральному логарифму термодинамической вероятности (W) этого состояния:

$$S = k \ln W, \quad (9)$$

где $k=1{,}380 \times 10^{-16}$ эрг/К - постоянная Больцмана.

Как установленно, материальная система из состояния с малой вероятностью самопроизвольно переходит в состояние с большей вероятностью. Следовательно, в предоставленной самой себе (изолированной) материальной системе (отсутствует обмен энергией с окружающей средой) протекают только такие процессы, в которых энтропия увеличивается. Так как вероятность какого-либо состояния растет с ростом молекулярного беспорядка, то вышеизложенная формулировка означает также и то, что процессы протекающие в изолированных материальных системах, приводят к уменьшению порядка в них.

Энтропия с точки зрения термодинамики

Кинетическая теория дает возможность довольно наглядно представить физический смысл энтропии. Теродинамический подход к объяснению этого понятия лишен такой наглядности и осуществляется через второе начало термодинамики на основании обратимых процессов: если в какой-то "момент" обратимого процесса система поглощает количество тепла dQ при абсолютной температуре T, то при этом происходит бесконечно малое изменение энтропии:

$$dS = \frac{dQ}{dT} \cdot \quad (10)$$

Изменение энтропии в конечном (макроскопическом) процессе мы получим путем суммирования таких бесконечно малых изменений.

Например, при постоянной температуре изменение энтропии ΔS в таком обратимом процессе, при котором система отбирает от окружающей среды количество тепла Q,

$$\Delta S = \frac{Q}{T}. \qquad (11)$$

Если система при обратимом превращении изолирована от окружающей среды, Q=0, а поэтому и $\Delta S=0$. Это означает, что в процессе обратимого превращения в изолированной системе энтропия остается постоянной (ее изменение равно нулю).

Третье начало термодинамики

На основании первого и второго начал термодинамики можно определить лишь изменение энтропии. Для термодинамического определения абсолютного значения энтропии необходимы новые данные, которые могут быть получены при исследовании различных химических и физических процессов при очень низких температурах. Экспериментально установлено, что энтропия чистого кристаллического вещества при абсолютном нуле (или при температуре, близкой к нему) равна нулю. Это и есть формулировка третьего начала термодинамики. Исходя из этого экспериментального закона и с использованием других законов термодинамики, можно вычислить энтропию вещества и при более высоких температурах.

Третье начало термодинамики не вытекает из первых двух. Это самостоятельный фундаментальный закон, основанный на экспериментальных данных. При абсолютном нуле все атомы чистого кристаллического соединения находятся в состоянии с минимальной энергией. Термодинамическая вероятность такого состояния поэтому равна единице, и в соответствии с уравнением (9) энтропия равна нулю.

Термодинамическая трактовка энтропии связана с обратимыми процессами, которые практически не могут быть осуществлены. Однако можно говорить и об энтропии на основе реальных необратимых процессов, так как в необратимых процессах, протекающих в термически изолированных системах, энтропия всегда растет. Таким образом, в реальных изолированных системах будут идти только такие процессы, которые протекают с возрастанием энтропии. Если процессы не могут идти с увеличением энтропии, то есть в данных условиях энтропия имеет наибольшую величину, то в системе не происходит никаких изменений: система будет находиться в равновесии. Следовательно, максимум энтропии – условие равновесия процессов.

Закон энтропии позволяет предсказать направление термодинамических процессов, однако этот закон действителен лишь для таких процессов, в которых участвуют вещества, термически изолированные от окружающей среды. При этом действительно происходят только такие превращения, в которых растет энтропия.

Если вещества, участвующие в превращении, не полностью термически изолированы от окружающей среды, то возможны процессы, при которых энтропия уменьшается. Но в этом случае в окружающей среде происходят процессы, в которых энтропия растет, притом в большей мере, чем уменьшается в исследуемом процессе. Таким образом, суммарная энтропия данной системы и окружающей среды растет.

Так как энтропия есть мера молекулярного беспорядка, то приведенное выше утверждение можно сформулировать так: беспорядок может уменьшиться в данном конкретном месте, но при этом на другом "соседнем" участке он увеличится в большей степени.

Например, в живых организмах из веществ относительно простого состава (вода,углекислый газ и сахар), в которых упорядоченность очень низка, образуются многие сложно построенные соединения (белки и т.д.), имеющие весьма высокую упорядоченность атомов. Такие процессы (например синтез белков) идут с уменьшением энтропии. Зато одновременно другие вещества (молекулы сахара, жиры и т.д.) в результате окисления распадаются на более простые соединения (в конечном счете на углекислый газ и воду), а при этом снова происходит значительный рост энтропии. Конечно, в растениях из углекислого газа и воды в процессе фотосинтеза образуются также сахар и другие углеводы, но этот процесс идет не изолированно, а с поглощением энергии излучения Солнца.

В лабораторных и промышленных условиях процессы, связанные с получением таких соединений, в которых упорядоченность больше, т.е. энтропия меньше, чем в исходных соединениях, также осуществляются с потреблением энергии извне; чаще всего ее получают при сжигании каменного угля. Уголь состоит в основном из кристалликов графита, где в кристаллической решетке упорядоченно расположены миллиарды атомов углерода. При сгорании угля образуются молекулы CO_2 и H_2O, в которых упорядоченно связаны только три атома, в то время как сами молекулы расположены хаотично. Этот процесс идет, таким образом, с большим приростом энтропии, поэтому суммарная энтропия увеличивается.

ГЛАВА IV.

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

§1. Характеристика солнечной радиации

Количество лучистой энергии Солнца во всем диапазоне длин волн, получаемой в единицу времени единичной площадкой, перпендикулярной солнечным лучам, вне земной атмосферы на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца, называется солнечной постоянной. Значение солнечной постоянной, полученное в результате прямых измерений с космических аппаратов и рекомендованное NASA в качестве стандартной

$$I_0 = 1353 \text{ Вт/м}^2 \pm 1{,}5\ \%.$$

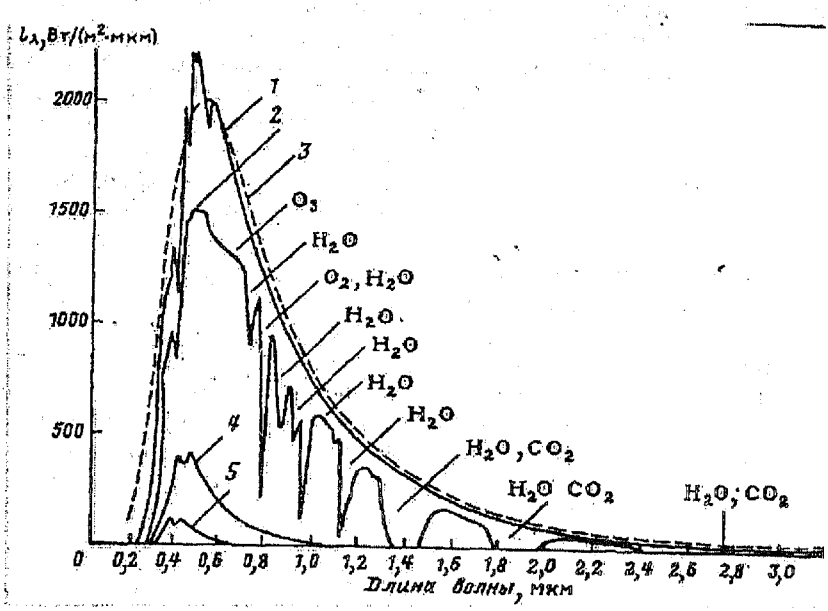


Рис. 8. Спектральное распределение интенсивности солнечного излучения:
1 - за пределами атмосферы; 2 - на уровне моря при m=1; 3 - излучение абсолютно черного тела при температуре 5800 К; 4 - диффузная составляющая при легкой дымке; 5 - диффузная составляющая при ясном небе.

Это значение используется до настоящего времени в гелиотехнике. В последние годы появились работы, в которых предлагается уточненное

значение солнечной постоянной, равное 1373 Вт/м$_2$+1,2%. Поскольку расстояние между Землей и Солнцем претерпевает сезонные изменения, интенсивность солнечной радиации, падающей на единичную площадку, также не остается постоянной. Эффективная солнечная постоянная $I_{o\,эф.}$ учитывающая эти сезонные колебания, может быть рассчитана по формуле:

$$I_{o\,эф.} = \left[1 + 0{,}033\cos\left(\frac{(360^\circ \times n)}{365}\right)\right] \cdot I_o, \qquad (1)$$

где n - порядковый номер дня, отсчитанный от 1 января.

Важной характеристикой солнечного излучения является его спектральное распределение (рис. 8).

Доля энергии солнечного излучения, приходящаяся на интервал длин волн от 0 до λ (f_o-λ), приведена в таблице 1, из которой видно, что почти вся энергия, излучаемая Солнцем, приходится на узкий диапазон длин волн в видимой и ближней ИК-области (в диапазоне 0,24-4 мкм заключено 98% энергии излучения).

Таблица 1. Доля энергии солнечного излучения, приходящаяся на интервал длин волн от 0 до λ_o (I_o = 1353 Вт/м)

λ	f_o-λ	λ	f_o-λ	λ	f_o-λ
0.24	00.014	0.47	0.1817	1.2	0.7840
0.25	00.019	0.48	0.1968	1.4	0.8433
0.26	00.027	0.49	0.2115	1.6	0.8861
0.27	00.041	0.50	0.2260	1.8	0.9159
0.28	00.056	0.51	0.2420	2.0	0.9349
0.29	00.081	0.52	0.2538	2.2	0.9483
0.30	0.0121	0.53	0.2674	2.4	0.9586
0.31	0.0166	0.54	0.2808	2.6	0.9667
0.32	0.0222	0.55	0.2938	2.8	0.9731
0.33	0.0293	0.56	0.3065	3.0	0.9783
0.34	0.0372	0.57	0.3191	3.2	0.9822
0.35	0.0452	0.58	0.3318	3.4	0.9830
0.36	0.0532	0.59	0.3444	3.6	0.9872
0.37	0.0615	0.60	0.3568	3.8	0.9891
0.38	0.0700	0.62	0.3810	4.0	0.9906
0.39	0.0782	0.64	0.4042	4.5	0.9934
0.40	0.0873	0.66	0.4266	5.0	0.9951
0.41	0.0992	0.68	0.4481	6.0	0.9972

0.42	0.1122	0.70	0.4688	7.0	0.9982
0.43	0.1247	0.75	0.5169	8.0	0.9988
0.44	0.1373	0.80	0.5602	10.0	0.9994
0.45	0.1514	0.90	0.6387	50.0	1.0000
0.46	0.1665	1	0.6949		

При прохождении через атмосферу солнечное излучение ослабляется за счет процессов поглощения и рассеяния. Это ослабление зависит от длины пути солнечных лучей в атмосфере, которая называется массой атмосферы. Масса атмосферы m=1, когда длина пути отсчитана от уровня моря по вертикали (положение Солнца в зените). При зенитном угле θz (угол между вертикалью и направлением на Солнце) масса атмосферы $m=\sec\theta_z$.

Поглощение солнечной радиации атмосферой обусловлено в основном присутствием в ней озона, водяных паров и CO_2. Озон почти полностью поглощает излучение в ультрафиолетовой части спектра до 0,29 мкм, - поглощает до 0,35 мкм и не поглощает в остальной части спектра за исключением узкой зоны длин волн вблизи 0,6 мкм. Водяные пары и CO_2 вызывают появление достаточно широких зон поглощения в ближней ИК-области.

Полученные при прямых измерениях данные по солнечной радиации обрабатываются и представляются в табличной или графической форме.

Угол падения солнечных лучей θ на рассматриваемую плоскость в заданный момент времени может быть вычислен с помощью следующего соотношения:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\gamma \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega, \quad (2)$$

где φ - широта местности;

δ - склонение (угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора);

β - угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной плоскостью;

γ - азимутальный угол (угол между проекцией нормали к рассматриваемой плоскости и местным меридианом);

ω - часовой угол (отсчитанный от солнечного полдня, угловое смещение Солнца относительно местного меридиана, обусловленное вращением Земли и соответствующее 15° в час).

При отсчете углов соблюдаются следующие правила:

значения φ и δ положительны для северного полушария и отрицательны для южного; γ отсчитывается от южного направления и имеет по-

ложительный знак при отклонении к востоку и отрицательный - при отклонении к западу; ω равняется нулю в солнечный полдень, до полудня имеет отрицательные значения, после полудня – положительные.

Склонение δ определяется по формуле:

$$\delta = 23{,}45 \cdot \sin\left(360 \times \frac{284+n}{365}\right), \qquad (3)$$

где n - порядковый номер дня года.

Часто из литературных источников известны данные по солнечной радиации, приходящейся на горизонтальную поверхность, а при расчете гелиотехнического оборудования обычно нужны данные по солнечной радиации, приходящейся на наклонную поверхность.

Если известной величиной является среднемесячный дневной приход суммарной радиации на горизонтальную поверхность $\overline{H}$, то среднемесячный дневной приход суммарной радиации на наклонную поверхность $\overline{H}_T$ может быть рассчитан по формуле:

$$\overline{H}_T = \overline{R} \times \overline{H}$$

где $\overline{R}$ – коэффициент зависящий от широты местности φ, угла наклона к горизонту β и показателя облачности K_T. Показатель облачности K_T определяется через среднемесячный дневной приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность за пределами земной атмосферы H_o.

$$K_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_o}. \qquad (5)$$

§2. Термодинамическое преобразование солнечного излучения

Компоненты термодинамического преобразования солнечного излучения.

Преобразование солнечного излучения в механическую или электроэнергию не является современным изобретением. Первая машина, качавшая воду под давлением расширяющегося воздуха, нагретого солнцем, была разработана в 1615 г. во Франции. Аналогичная установка, приводившая в действие печатный станок, демонстрировалась на выставке в Париже в 1879 г. До 1950 г. действовало довольно много машин, работавших на солнечной энергии, мощностью от нескольких ватт до 50 кВт. В большинстве моделей концентрирующие коллекторы использовались для нагрева воды или воздуха до температур порядка нескольких сот гра-

дусов. Полученный пар или нагретый воздух применялись затем для совершения механической работы по термодинамическому циклу.

Из солнечной энергии методом термодинамического преобразования можно получать электричество практически так же, как и из других источников. Однако солнечное излучение, падающее на Землю, обладает рядом характерных особенностей: низкой плотностью потока энергии, суточной и сезонной цикличностью, зависимостью от погодных условий. Поэтому при термодинамическом преобразовании этой энергии в электрическую следует стремиться к тому, чтобы изменения тепловых режимов не вносили серьезных ограничений в работу системы и не возникало затруднений, связанных с ее использованием. Желательно также, чтобы система допускала изменение производства электроэнергии во времени в соответствии с необходимостью потребления. Следовательно, подобная система должна иметь аккумулирующее устройство для исключения случайных колебаний режимов эксплуатации или обеспечения необходимого изменения производства энергии во времени. При проектировании солнечных энергетических станций важно правильно оценивать метеорологические факторы. Часто место постройки выбирается исходя лишь из одного критерия: годового числа часов солнечного сияния, при этом нередко пренебрегают другим фактором – облачностью.

Термодинамический преобразователь солнечной энергии должен содержать следующие компоненты:

а) систему улавливания падающей радиации;

б) приемную систему, преобразующую энергию солнечного излучения в тепло, которое передается теплоносителю;

в) систему переноса теплоносителя от приемника к аккумулятору или к одному или нескольким теплообменникам, в которых нагревается рабочее тело;

г) тепловой аккумулятор;

д) теплообменники, образующие горячий и холодный источники тепловой машины.

Конструкции термопреобразователей

Возможны две принципиальные схемы. В первой (рис.10,а) в приемнике нагревается теплоноситель, в связи с чем обеспечивается тепловая загрузка аккумулятора. При этом рабочее тело нагревается от аккумулятора, который сглаживает изменения в поступлении солнечной радиации. Таким образом, аккумулятор постоянно играет роль буфера, а связь системы "приемник -аккумулятор" с тепловой машиной осуществляется с помощью по меньшей мере одного теплообменника.

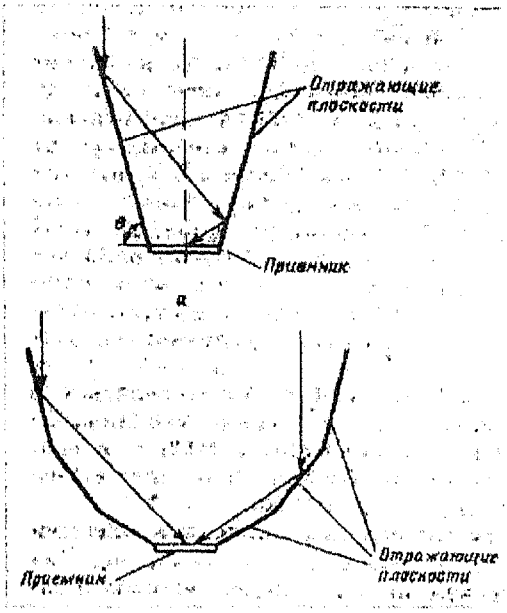


Рис. 9. Плоские фоклины:
а - односекционный; б - многосекционный

Во-второй схеме (рис.10, б) в приемнике непосредсвенно нагревается рабочее тело. Зарядка аккумулятора осуществляется путем отвода части нагретого тела, а связь с тепловой машиной происходит без промежуточных устройств.

В первой схеме по сравнению со второй имеет место в среднем большее снижение температурного напора, т.е. разность температур между нагревателем и холодильником тепловой машины. Во второй схеме тепло теряется лишь при аккумулировании и возврате. Однако в первом случае тепловая машина и ее вспомогательные устройства не подвержены случайным колебаниям температуры даже при отсутствии системы регулирования. Кроме того, во многих случаях теплоноситель сам играет роль теплового аккумулятора.

Системы улавливания солнечной радиации

Системы улавливания солнечной радиации обеспечивают разные степени концентрации (рис.9).

Малая степень концентрации (порядка 100) получается при использовании отражающих поверхностей, концентрирующих энергию при любом направлении прихода солнечных лучей. Наблюдение за Солнцем осуществляется в этом случае с помощью упрощенной системы управления. К устройствам такого типа относятся параболоцилиндрические отражатели, ось которых либо горизонтальна, либо перпендикулярна плоскости движения Солнца. Управляется такая установка только в соответствии с изменением положения Солнца на небосводе в течение дня. Изменение положения Солнца в течение года при этом не учитывается, и принимаются меры лишь к тому, чтобы фокальное изображение не выходило за пределы поверхности приемника концентрированного излучения.

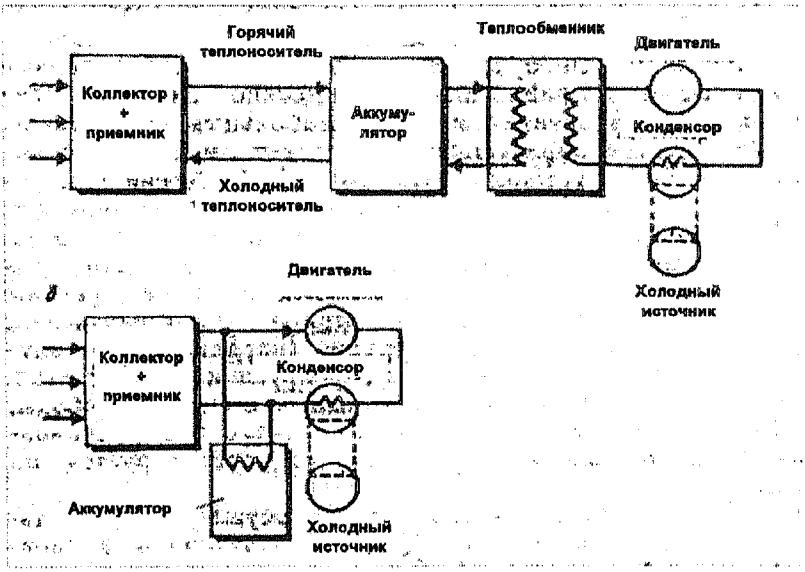


Рис. 10. Схема термодинамического преобразования солнечной энергии: а - схема с теплообменником; б - схема без теплообменника.

Средняя степень концентрации (порядка 1000) получается при использовании фокусирующих гелиостатов, управляемых по двум вращательным степеням свободы. Таким гелиостатом может быть зеркало в форме параболоида вращения, ось которого ориентируется на Солнце.

Высокая степень концентрации осуществляется единичной оптической системой (плоские гелиостаты и параболоидный отражатель). Она позволяет достичь весьма высоких температур.

Сконцентрированное солнечное излучение поглощается поверхностью приемника и преобразуется в тепло. Чтобы снизить потери тепла, связанные с излучением нагретым приемником в тепловой области спектра, поверхность приемника покрывают тонкой пленкой из селективно поглощающих материалов. Это позволяет значительно повысить КПД системы.

Аккумуляторы энергии

Поскольку солнечная радиация поступает на поверхность Земли периодически и достаточно случайно, солнечная энергетическая станция с термодинамическим циклом должна иметь устройство для аккумулирования энергии. При разработке таких устройств необходимо выяснить, как появление дополнительных установок повлияет на общую стоимость выра-

батываемой энергии и т.п. Аккумулирование может быть кратковременным, на 1-2 ч. в период облачности, для предотвращения колебаний тепловой нагрузки станции и сглаживания резких изменений выходной мощности. Необходимо также аккумулировать энергию в течение дня для выработки ее в темное время суток, а также в часы пиковых нагрузок. В случае увеличения стоимости энергии в часы пик аккумулирование может снизить затраты на создание аккумулирующей системы. Кроме того, необходимо также сезонное аккумулирование для обеспечения энергией потребителей в периоды длительного и неблагоприятного сезона за счет энергии, запасенной во время поступления солнечной радиации.

Аккумуляторы тепла

В настоящее время накопление энергии осуществляется за счет аккумулирования тепла.

Тепловой аккумулятор - дорогостоящий элемент. В зависимости от температуры системы аккумулирования энергии обычно подразделяют на низкотемпературные (до 100°С), среднетемпературные (от 100 до 550°С) и высокотемпературные (> 550°С).

Низкотемпературные аккумуляторы, в частности водяные, нашли широкое применение в гелиотехнике для отопления зданий и горячего водоснабжения. Для низкотемпературного аккумулирования используют также обратимые реакции гидратации и сольватации солей и кислот, а также процессы фазового перехода. Для этих целей в качестве теплоаккумулирующих веществ используют парафины и эмульсии, состоящие из парафина и воды. Скрытая теплота плавления парафина порядка 44 кал/г, а температура плавления 35-50°С.

Новый тип систем термохимического аккумулирования "Тепидус" разрабатывается в Швеции. В этой установке используется процесс выделения тепла при гидротации сульфида натрии.

Для среднетемпературного аккумулирования, а также в качестве теплоносителя используют соли и их эвтектики, характеризующиеся температурой плавления в несколько сот градусов и большой величиной скрытой теплоты фазового перехода.

Весьма перспективны для среднетемпературного аккумулирования гидраты оксидов щелочноземельных металлов. Использование процессов аккумулирования реакций гидратации оксидов отличается целым рядом достоинств.Это высокая плотность запасаемой энергии, простое долгосрочное аккумулирование при температуре окружающей среды, компактность твердого энергоаккумулирующего вещества, низкая его стоимость, получение достаточно высокопотенциального тепла на стадии гидратации.

Высокотемпературное аккумулирование осуществляется с помощью обратимых экзоэндотермических реакций. При этом реакции можно разделить на две группы: реакции каталитического разложения, продукты которых можно не разделять и хранить вместе, и реакции, протекающие без катализаторов, продукты которых должны быть разделены при температуре солнечного приемника, чтобы предотвратить обратную реакцию.

Выбор типа термодинамического цикла и природы рабочего тела определяется областью рабочих температур теплового двигателя, т.е. характеристики системы концентрации, аккумулятора и параметров цикла тесно взаимосвязаны. В солнечных установках с концентрацией предпочтение отдается пароводяным циклам.

Два типа солнечных установок

Существует два подхода к созданию солнечных станций, работающих по термодинамическому циклу. Первый - использование небольших централизованных станций для отдаленных районов. Второй - создание крупных солнечных энергетических установок мощностью в несколько десятков МВт, рассчитанных на работу в центральной электросети (рис.11-14). В установках на несколько десятков МВт использовать устройство для промежуточного прогрева пара невыгодно, поскольку его стоимость не окупается приростом мощности. Здесь предлагается использовать два типа двигателей. Для солнечных станций, включенных в энергосеть, наиболее подходящими являются турбины, хотя их диапазон рабочих режимов довольно узок и сложны конструкции.

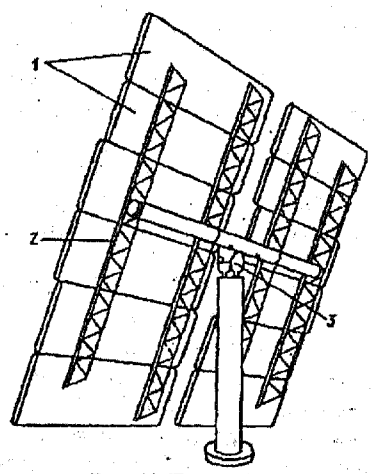


Рис. 11. Гелиостат.
1 - зеркала; 2 - опорная конструкция; 3 - система поворота

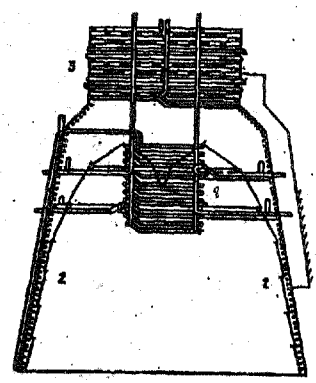


Рис. 12. Центральный приемник полостного типа:
1 - экономайзер; 2 - испарительная секция; 3 - пароперегреватель.

Для автоматических станций с переменной нагрузкой могут оказаться более эффективными поршневые двигатели, область рабочих режимов которых более широка.

Тип цикла и природа рабочего тела определяются областью рабочих температур теплового двигателя. Это предполагает в первую очередь взаимосвязь между характеристиками системы концентрации, аккумулятора и параметрами цикла. Идеальным рабочим телом с этой точки зрения является вода, но для работы с ней температура горячего источника должна быть 200-500° С.

Чтобы добиться таких температур, необходимо на приемнике получить 500-кратную концентрацию солнечной радиации, а с учетом потерь на излучение и конвекцию требуется концентрация вдвое больше. Такие значения практически невозможно обеспечить с помощью линейных концентраторов, поэтому разрабатываются концентрирующие устройства, фокусирующие радиацию в точку приемника.

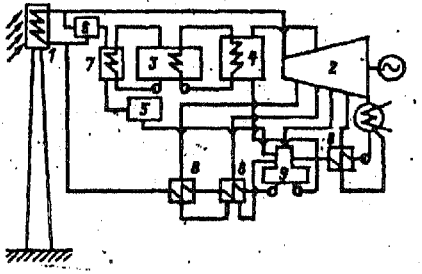


Рис. 13. Принципиальная тепловая схема одноконтурной СЭС с центральным приемником внешнего облучения (Барстоу, США, 10 Мвт); 1 - центральный приемник; 2 - турбина; 3 - тепловой аккумулятор, содержащий 7 тыс. т гравия и песка и 900 тыс. л термостойкого масла; 4 - парогенератор системы аккумулирования; 5 - расширительный бак; 6 - охладитель пара, идущего на зарядку системы аккумулирования; 7 - промежуточный нагреватель системы аккумулирования теплоты; 8 - регенеративные подогреватели; 9 - деаэратор.

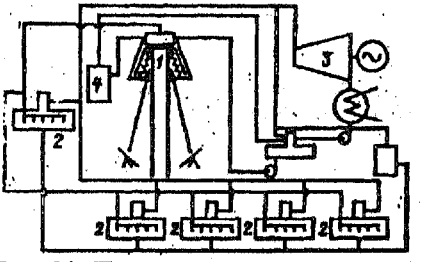


Рис. 14. Принципиальная тепловая схема СЭС с грибовидным центральным приемником (Нио, Япония, 1 Мвт)
1-центральный приемник; 2 - аккумуляторные баки с водой; 3 - турбина; 4 - расширительный бак.

Естественно, такие устройства должны слединть за движением Солнца, вращаясь вокруг двух осей. Требуемую конценрацию можно без труда обеспечить с помощью небольших параболоидов, например диаметром 6м, однако они имеют два сущесвенных недостатка. Во-первых, для каждого такого отражателя требуется достаточно сложный по конструкции температурный приемник, который размещается в его фокальной области. Во-вторых, для съема энергии с 10-20 тыс. параболоидных отражателей, обеспечивающих привод в действие генератора

мощностью 100 МВт, необходим дорогой высокотемпературный обменный контур, соединяющий рассредоточенные концентраторы.

Указанные выше трудности разрешаются, если вместо 10 – 20 тыс. приемников сделать один, аналогичный по своим параметрам и размерам паровому котлу обычного типа, и поднять его над поверхностью Земли.

Гелиостанция башенного типа

В случае гелиостанции башенного типа (рис. 15-17) все параболоиды заменяются практически плоскими отражателями тех же размеров. Каждый гелиостат отражает " солнце " на элемент поверхности центрального приемника, т.е. энергия передается к приемнику оптическим способом вместо транспортной сети паропроводов, требуемой в случае применения системы с рассредоточенными коллекторами. Стоимость гелиостатов составляет около 80% стоимости станции, поэтому в настоящее время основное внимание обращается на конструктивную разработку гелиостатов для облегчения их изготовления при массовом производстве.

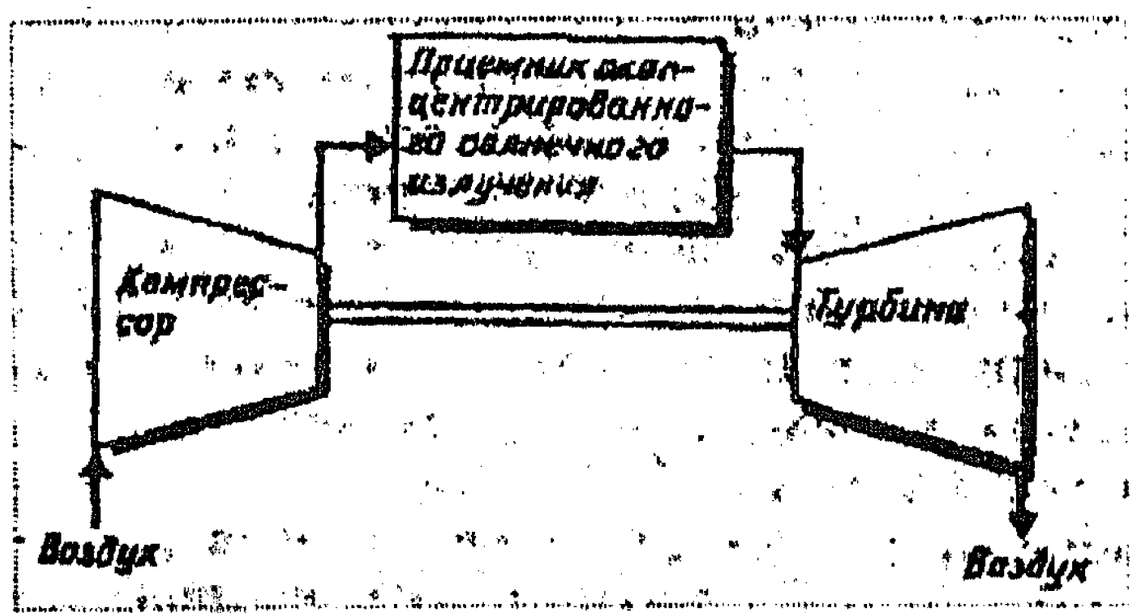


Рис. 15. Схема преобразования солнечной энергии по открытому циклу Брайтона.

Управлять гелиостатами можно двумя способами: с помощью оптической системы и с использованием вычисленных координат. Требуемая точность фокусировки на приемник составляет 10^{-3} рад.

При использовании координат управление осуществляется с помощью вычислительной машины. Скорость видимого движения Солнца составляет 20"/с. За 6 с оно перемещается более чем на 2', и гелиостат должен повернуться на 1', чтобы сохранить постоянным направление отраженных лучей. Каждые 6 с требуется определить новое по-

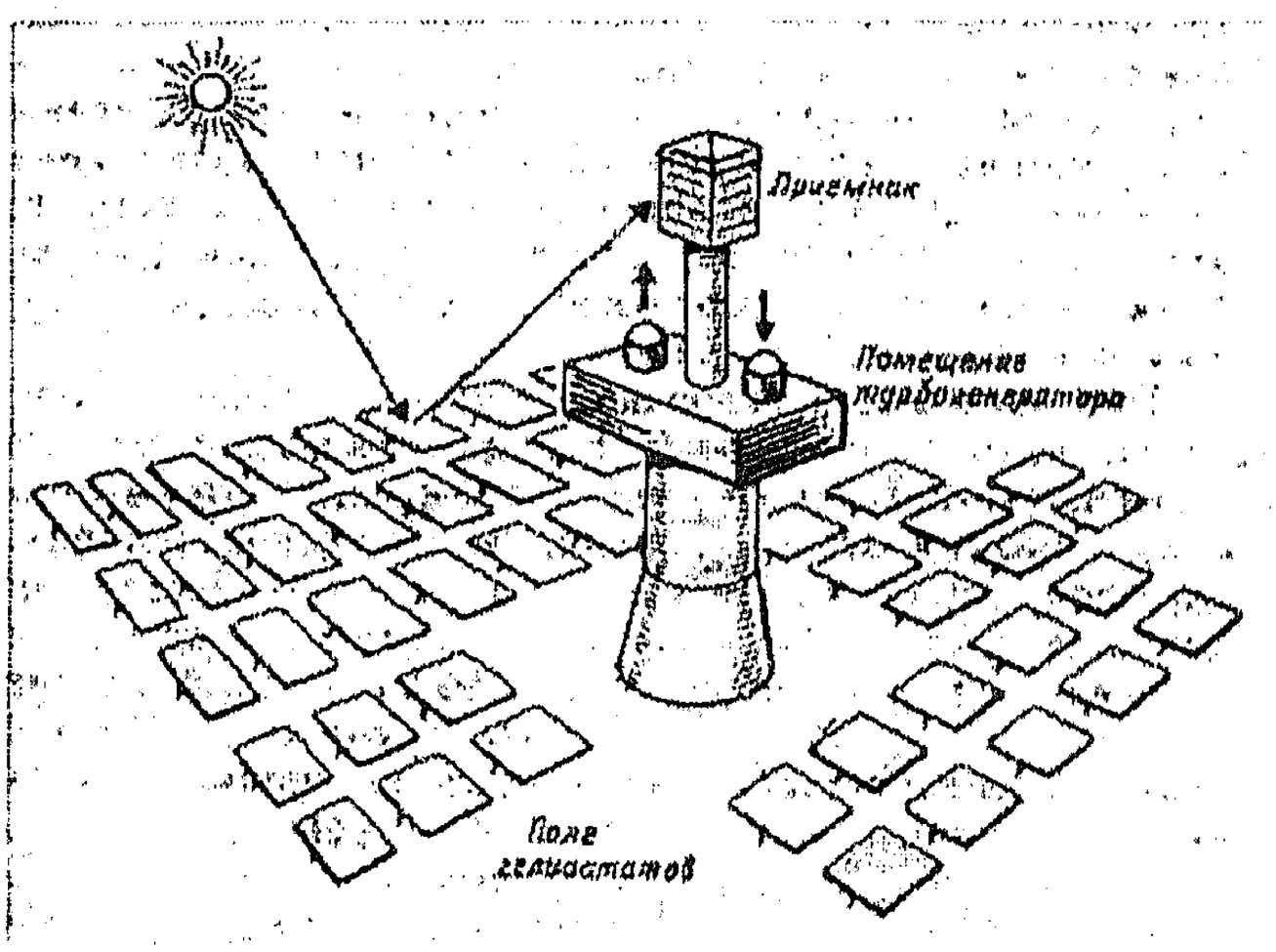


Рис. 16. Схема устройства солнечной станции башенного типа.

ложение каждого гелиостата. Это можно эффективно осуществить лишь централизованным путем для всех гелиостатов. Такой способ управления позволяет следить за Солнцем даже при пасмурной погоде.

Поскольку стоимость гелиостатов составляет до 80% всей стоимости подсистемы сбора солнечной энергии, то основные усилия при их разработке направлены на снижение затрат при сохранении требуемых эксплуатационных качеств. Основная задача состоит в создании максимально экономичных гелиостатов и последующим размещении их в поле отражения таким образом, чтобы свести к минимуму стоимость энергии, обеспечиваемой системой сбора.

Примером рассматриваемой установки может служить станция мощностью 10 МВт, построенная в северо-западной части Мексики, вблизи города Эрмосильо. Это засушливый район, где Солнце регулярно светит в течение 95% светлого времени года. Здесь также наблюдается высокая плотность солнечной радиации, достигающая 0,8 - 0,95 кВт/м2 в среднем за солнечный день, который длится 10-13 ч. В районе постоянная нехватка воды, и следовательно, вода стоит дорого, поэтому в качестве рабочего тела для станции был выбран воздух как наиболее дешевый и доступный теплоноситель.

Стоимость 1 кВт установленной мощности для такой станции составляет 1800 долл., тогда как для обычных топливных станций 200-300 долл.

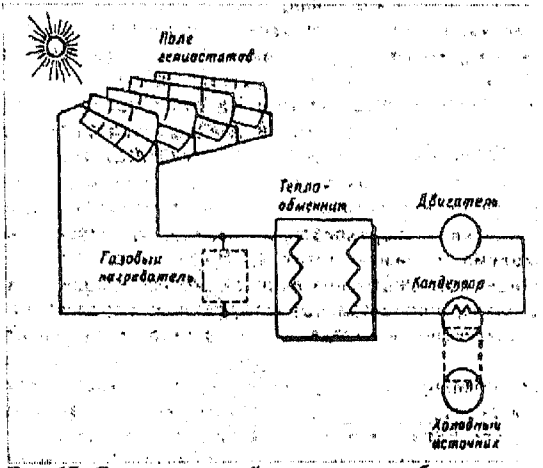


Рис. 17. Схема солнечной станции с параболоцилиндрическими концентраторами.

Преимущество станций башенного типа заключается в том, что не нужно осуществлять транспортировку рабочей жидкости на большие расстояния от приемника до турбины, однако в них система сбора солнечной радиации оказывается дорогой и недостаточно эффективной. Из-за погрешностей в слежении, возможных при наличии большого количества гелиостатов, действительный коэффициент концентрации у термоэлектрогенератора часто составляет 1/3 расчетного.

Как показывает опыт, более перспективными оказываются станции с распределенным приемником энергии. В этих станциях концентраторы, представляющие собой параболоцилиндрические отражатели, вращают-

ся вокруг одной оси и имеют трубчатые приемники, совмещенные с фокальной линией (рис. 17). Вращение по одной оси позволяет существенно уменьшить стоимость концентратора при уменьшении количества получаемой энергии всего на 5% по сравнению с системой слежения, использующей вращение вокруг двух осей.

Первой станцией данного типа, стоимость электроэнергии которой сравнима со стоимостью тепловых станций, стала станция, построенная американской фирмой "Луз", основанной в 1979 г. В 1985 г. этой фирмой построена солнечная электростанция в калифорнийской пустыне Мохаве, которая занимает 340 га. Еще на рассвете компьютерная система начинает ориентировать 540 тысяч параболоцилиндрических зеркал, чтобы они могли улавливать свет. Расположенные рядом зеркала поворачиваются за солнцем с восхода до заката. Они фокусируют солнечные лучи и направляют их на тонкую трубу из нержавеющей стали с черным покрытием. По трубе протекает синтетическое масло, которое нагревается до 390° С. Перегретое масло поступает в теплообменники, где отдает свое тепло воде, превращая ее в пар, который приводит в действие турбогенератор обычного типа, вырабатывающий электроэнергию.

Система сбора солнечной радиации

Система сбора солнечной радиации станции "Луз" высокоэффективна. Слежение производится по одной координате вдоль оси, направленной с севера на юг с помощью простой гидродинамической системы. Приемником является нержавеющая труба с селективным покрытием. Приемник заключен в стеклянную трубку, в которой создается вакуум, что обеспечивает уменьшение конвекционных потерь.

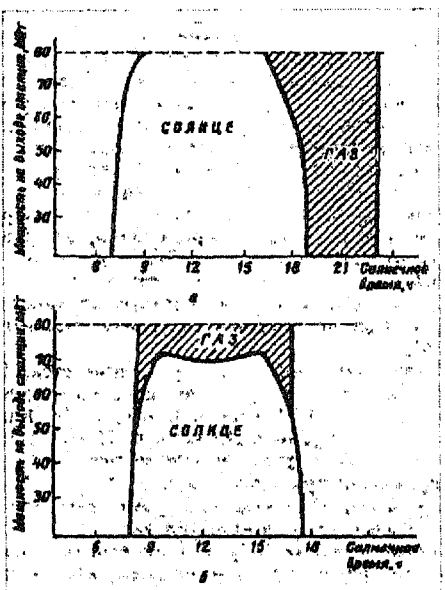


Рис. 18. Режим работы станции "Луз": а - летний день; б - зимний день.

Солнечные электрические станции, сооружаемые компанией "Луз", имеют важную особенность: они используют в работе природный газ для компенсации изменения поступления солнечной радиации, т.е. являются гибридными станциями. Концепция гибрида "солнечная энергия - природный газ" оказалась очень удачной, что позволило при очень небольших затратах получать максимум полез-

ной мощности. Режимы работы станции в летний и зимний день приведены на рис.18. Годичное распределение электроэнергии, производимой с помощью солнечной радиации и газа для станции мощностью 80 МВт, представлено на рис.19. Как видно из рисунка, 2/3 элекроэнергии станции производится с использованием солнечной радиации.

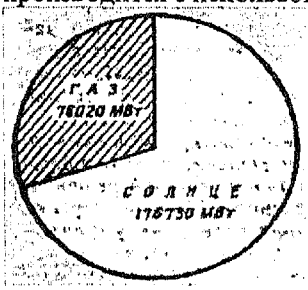


Рис. 19. Годичное распределение электроэнергии, производимой с помощью солнечной радиации и газа для станции мощностью 80 МВт.

Первая из пяти новых установок мощностью 80 МВт начала работать в 1989 году и 1 кВт-ч электроэнергии стоил 24 цента. Новые установки стоят около 1 млрд. долл. и вырабатывают электроэнергию стоимостью меньше 8 центов за кВат/ч.

Солнечные станции "Луз" обеспечивают дополнительную электроэнергию при пиковых нагрузках, особенно летом, когда потребность в элекричестве большая.

Плоские солнечные коллекторы

Плоский солнечный коллекор представляет собой теплообменник, предназначенный для нагрева жидкости или газа за счет солнечной энергии. Область применения плоских солнечных коллекторов - системы отопления жилых и производственных эданий, горячего водоснабжения, а также энергетические установки с низкокипящим рабочим телом. Основными элементами плоского солнечного коллектора (рис.20) являются:

поверхность, нагревающаяся за счет поглощения солнечной радиации и передающая теплоту рабочему телу; стекло, подавляющее потери теплоты за счет излучения; тепловая изоляция и корпус. Совершенство коллектора определяется его оптическим и тепловым КПД.

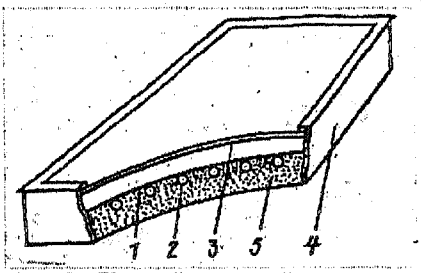


Рис. 20. Плоский солнечный коллектор: 1 - поверхность, поглощающая солнечную радиацию; 2 - трубки с теплоносителем; 3 - стекло; 4 - корпус; 5 - тепловая изоляция.

Оптический КПД η_o показывает, какая часть солнечной радиации, достигающей поверхности остекленения коллектора, оказывается поглощенной абсорбирующей излучение черной поверхностью, и учитывает потери энергии, связанные с поглощением в стекле, отражением и отличием коэффициента теплового излучения абсорбирующей поверхности от единицы. Для коллектора с однослойным остеклением при нормальном падении лучей на его поверхность:

$$\eta_o = (\tau \cdot \alpha)\,, \qquad (1)$$

где τ - коэффициент пропускания стекла; α - коэффициент поглощения абсорбирующей излучение поверхности.

В том случае, если угол падения лучей отличается от прямого, вводится поправочный коэффициент К, учитывающий увеличение потерь на отражение от стекла и поверхности, поглощающей солнечную радиацию:

$$K = \tau\alpha\ /(\tau\alpha)_n\,,$$

где $\tau\alpha$ относится к произвольному углу падения лучей.

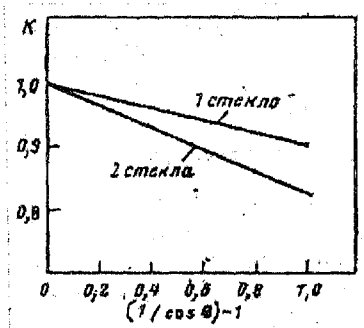


Рис. 21. Поправочный коэффициент, учитывающий отражение солнечных лучей от поверхности стекла и от черной абсорбирующей поверхности.

На рис. 21 приведены графики $K = f[(1/\cos\theta)-1]$ для коллекторов с однослойным и двухслойным остеклением.

Оптический КПД с учетом угла падения лучей, отличного от прямого,

$$\eta_o = K(\tau\alpha)_n\,. \qquad (2)$$

Кроме этих потерь, в коллекторе любой конструкции присутствуют потери теплоты в окружающую среду $Q_{пот}$, которые учитываются его тепловым КПД. Тепловой КПД равен отношению количества полезной теплоты $Q_{пол}$, отведенной от коллектора за определенное время, к количеству энергии, поступающей к нему от Солнца за то же время:

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{I \cdot S}\,, \qquad (3)$$

где S - площадь апертуры коллектора; I - интенсивность солнечной радиации.

Оптический и тепловой КПД коллектора связаны между собой отношением

$$\eta = \eta_o \frac{Q_{пот}}{I \cdot S}\,. \qquad (4)$$

Тепловые потери $Q_{пот}$ характеризуются полным коэффициентом потерь

$$U = \frac{Q_{пот}}{S(T_a - T_o)}\,, \qquad (5)$$

где T_a - температура черной поверхности, абсорбирующей солнечную радиацию, К; T_o - температура окружающей среды, К. Величина U с достаточной для расчетов точностью может считаться константой. В этом случае подстановка $Q_{пот}$ из формулы (5) в (4) приводит к уравнению прямой

$$\eta = \eta_o - \frac{U(T_a - T_o)}{I} . \qquad (6)$$

Тепловой КПД коллектора может быть записан также через среднюю температуру протекающего через него теплоносителя:

$$\eta = F' \left(\eta_0 - U \frac{T_T - T_0}{I} \right) , \qquad (7)$$

где $T_T = (T_{вх} + T_{вых})/2$ - средняя температура теплоносителя; F' - параметр, обычно называемый " эффективностью коллектора" и характеризующий эффективность переноса теплоты от поверхности, поглощающей солнечное излучение, к теплоносителю; зависит от конструкции коллектора и имеет значение, слабо зависящее от других факторов; типичные значения параметра F': 0,8 - 0,9 - для плоских воздушных коллекторов; 0,9 - 0,95 - для плоских жидкостных коллекторов; 0,95 - 1,0 - для вакуумных коллекторов.

В ряде случаев удобнее (в практическом отношении) выразить тепловой КПД коллектора через температуру теплоносителя на входе $T_{вх}$

$$\eta = F_R \left(\eta_0 - U \frac{T_{вх} - T_0}{I} \right) , \qquad (8)$$

В этом случае замена T_T на $T_{вх}$ учитывается коэффициентом F_R, который называется коэффициентом отвода теплоты. В общем виде формула для теплового КПД коллектора может быть записана в виде

$$\eta = F \left(\eta_0 - U \frac{T - T_0}{I} \right) , \qquad (9)$$

где

$$F = \begin{cases} I, \text{ если } T = T_a, \\ F', \text{ если } T = T_T, \\ F_R, \text{ если } T = T_{вх} . \end{cases}$$

На графике $\eta = f [(T - T_o)/ I]$ прямая, соответствующая уравнению (9), при $T = T_o$ отсекает на оси ординат отрезок $F\eta_o = F(\tau\alpha)_n$ и имеет наклон, соответствующий FU (рис. 22).

Величины $F(\tau\alpha)_n$ и FU используются при определении характеристик системы солнечного теплоснабжения и в принципе могут быть рассчитаны теоретически. Однако чаще всего эти величины определяют на основании стандартных испытаний коллекторов и построения зависимостей, аналогичных рис. 22.

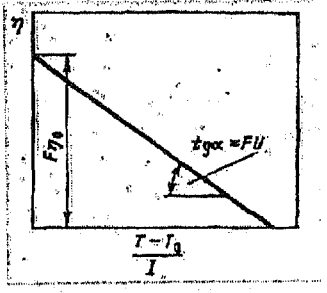


Рис. 22. Температурная зависимость теплового КПД солнечного коллектора.

При некотором значении температуры T тепловой КПД коллектора оказывается равным 0. Эта температура является предельно достижимой для данного типа коллектора.

В схемах солнечного теплоснабжения во избежание замерзаний теплоносителя часто используются двухконтурные схемы с антифризом в первом контуре и промежуточным теплообменником.

Полезное количество теплоты, отводимое от коллектора в первом контуре, равно

$$Q_{пол} = F_R\ S\ [I\eta_o - U\ (T_{вх} - T_o)]. \qquad (10)$$

Для удобства расчетов вводят понятие эффективного коэффициента отвода теплоты F_R^1, подстановка которого в уравнение (10) вместо F_R позволяет рассчитывать характеристики коллектора с учетом промежуточного теплообменника.

Вакуумные коллекторы

Плоские солнечные коллекторы имеют при повышенных температурах сравнительно большой полный коэффициент потерь и низкий тепловой КПД. В силу этого обычно их используют в системах, где уровень нагрева теплоносителя не превышает 50 – 80°C. В том случае, если необходим нагрев до более высоких температур, используют вакуумные коллекторы. В вакуумном коллекторе объем, в котором находится черная поверхность, поглощая солнечное излучение, отделен от окружающей среды вакуумированным пространством, что позволяет практически полностью устранить потери теплоты в окружающую среду за счет теплопроводности и конвекции.

Потери на излучение в значительной степени подавляются за счет применения селективного покрытия. Так как полный коэффициент потерь в вакуумном коллекторе мал, теплоноситель в нем можно нагреть до более высоких температур (120 - 150 °C), чем в плоском коллекторе. На рис.23 показаны примеры конструктивного выполнения вакуумных коллекторов.

Селективные покрытия

Эффективность работы гелиоэнергетических установок во многом зависит от оптических свойств поверхности, поглощающей солнечное излучение. Для сведения к минимуму потерь энергии необходимо, чтобы в видимой и ближней инфракрасных областях солнечного спектра коэффициент поглощения этой поверхности был как можно ближе к единице, а в области длин волн собственного теплового излучения поверхности к единице должен стремиться коэффициент отражения. Таким образом, поверхность должна обладать селективными свойствами - хорошо поглощать коротковолновое излучение и хорошо отражать длинноволновое.

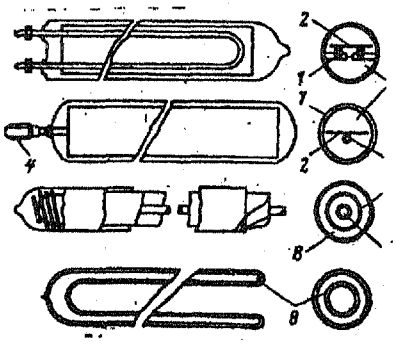


Рис. 23. Типы вакуумных коллекторов: 1 - трубка с теплоносителем; 2 - пластина с селективным покрытием, поглощающая солнечное излучение; 3 - тепловая труба; 4 - теплосъемный элемент; 5 - стеклянная трубка с селективным покрытием; 6 - внутренняя трубка подачи теплоносителя; 7 -наружный стеклянный баллон; 8 - вакуум.

На рис.24 показаны спектры излучения Солнца и абсолютно черного тела в сравнении со спектром отражения селективного покрытия "черный хром".

По типу механизма, ответственного за избирательность оптических свойств, различают четыре группы селективных покрытий: 1) собственные; 2) двухслойные, у которых верхний слой обладает большим коэффициентом поглощения в видимой области и малым в ИК-области, а нижний слой - высоким коэффициентом отражения в ИК-области; 3) с микрорельефом, обеспечивающим требуемый эффект; 4) интерференционные.

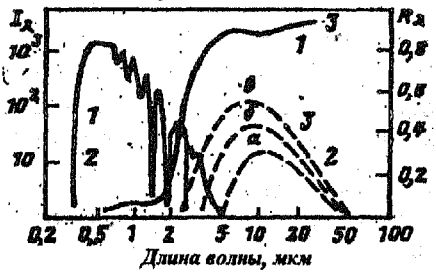


Рис. 24. Коэффициент отражения селективной поверхности и спектров излучения Солнца и абсолютно черного тела при температурах: 1 - коэффициент отражения селективной поверхности "черный хром"; 2 - спектр излучения Солнца при m=2; 3 - спектр излучения абсолютно черного тела при температурах 30(а), 40(б) и 100°С(в).

Собственной избирательностью оптических свойств обладает небольшое число известных материалов, например W, Cu_2S, HfC.

Наибольшее распространение получили двухслойные селективные покрытия. На поверхность, которой необходимо придать селектив-

ные свойства, наносится слой с большим коэффициентом отражения в длинноволновой области спектра, например медь, никель, молибден, серебро, алюминий. Поверх этого слоя наносится слой прозрачной длинноволновой области, но имеющий высокий коэффициент поглощения в видимой и ближней ИК-областях спектра. Такими свойствами обладают многие окислы. Простейший пример получения двухслойной селективной поверхности - окисление поверхности металла. Двухслойная селективная поверхность возможна также в "обратном" варианте, когда названные выше слои располагаются в обратном порядке: слой, отражающий длинноволновое излучение, - сверху, а слой, поглощающий видимую и ближнюю ИК-области спектра, - снизу. В этом случае верхний слой для видимой части спектра должен быть прозрачен (например SnO_2, In_2O_3).

Селективность поверхности может быть обеспечена за счет чисто геометрических факторов: неровности поверхности должны быть больше длины волны света в видимой и ближней ИК- областях спектра и меньше длины волны, соответствующей собственному излучению поверхности. Такая поверхность для первой из указанных областей спектра будет черной, а для второй - зеркальной.

Селективными свойствами обладают поверхности с дендритной или пористой структурой при соответствующих размерах дендритных игл или пор.

Интерференционные селективные поверхности образованы несколькими перемежающимися слоями металла и диэлектрика, в которых коротковолновое излучение гасится за счет интерференции, а длинноволновое - свободно отражается.

Системы солнечного теплоснабжения.

Нагретый в коллекторе теплоноситель может быть использован в системах отопления, горячего водоснабжения и для технических нужд. На рис.25 показаны примеры систем солнечного горячего водоснабжения.

Схема рис. 25, а работает по принципу термосифона. Бак с водой в этом случае располагается выше коллектора. Нагретая вода поступает в верхнюю часть бака, а ее место занимает холодная вода из его нижней части. Системы горячего водоснабжения с использованием термосифонного эффекта являются простыми (нет насоса и системы регулирования) и потому получили наиболее широкое распространение.

В схеме рис. 25,б предусмотрена принудительная циркуляция воды в контуре с помощью насоса. Насос включается автоматически, как только разность температур в верхней части коллектора и в нижней части бака достигает заданного значения. Бак в этой схеме может располагаться ниже коллекторов.

Если система рассчитана на работу в условиях отрицательных температур, используют двухконтурную схему с антифризом в первом контуре.

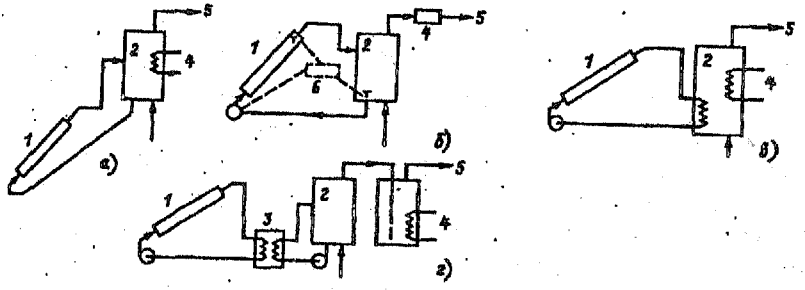


Рис. 25. Схема солнечного горячего водоснабжения.
1 - коллектор; 2 - бак-аккумулятор; 3 - промежуточный теплообменник; 4 - дублирующий источник тепла; 5 - горячая вода к потребителю; 6 - система автоматического регулирования.

Передача теплоты от антифриза к воде может осуществляться либо в аккумуляторном баке (рис. 25,в), либо в отдельном промежуточном теплообменнике (рис. 25,г).

Как правило, в системах горячего водоснабжения предусматривается вспомогательный источник теплоты (электрический или топливный), который либо встраивается в аккумуляторный бак, либо устанавливается на линии, идущей к нагрузке.

В принципе система теплоснабжения может быть спроектирована таким образом, чтобы полностью удовлетворять потребности в теплоте за счет Солнца. Однако экономически такой вариант, как правило, оказывается неоправданным, так как в летний период дорогостоящее гелиооборудование оказывается сильно недогруженным.

На основе детального математического моделирования установлена корреляция между долгосрочными характеристиками системы и безразмерными параметрами. Эта корреляция положена в основу так называемого f- метода расчета, позволяющего оценить долю f общей тепловой нагрузки, которую целесообразно возложить на солнечную систему теплоснабжения.

В f-методе коэффициент замещения f связывается с двумя безразмерными комплексами:

$$X = F_R U \frac{F_R^1}{F_R} (100 - \bar{t}_0)\, \Delta\tau \, \frac{S}{Q_{мес}^{пол}};$$

$$Y = F_R(\tau\alpha)_n \frac{F_R'}{F_R} \frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\overline{\tau\alpha})_n} \overline{H}_\tau N \frac{S}{Q_{мес}^{пол}},$$

где $\Delta\tau$ - число секунд в месяце; t_o - среднемесячная температура окружающей среды; U - полный коэффициент тепловых потерь коллектора; $Q_{ме}^{пол}$ — полная месячная тепловая нагрузка – отопления и горячего водоснабжения; H_τ - среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора; N - число дней в месяце; $\tau\alpha$ - среднемесячная приведенная поглощательная способность при нормальном и произвольном падении лучей на его плоскость.

Значение F_RU и $F_R(\tau\alpha)_n = F_R\eta_o$ определяются по результатам стандартных испытаний коллектора. Физический смысл безразмерных комплексов X и Y:

$$X = \frac{\text{месячные тепловые потери коллектора при темп.100°C}}{\text{полная месячная тепловая нагрузка}},$$

$$Y = \frac{\text{энергия, поглощаемая коллектором в течение месяца}}{\text{полная месячная тепловая нагрузка}}.$$

Зависимость между f и X,Y для системы с жидкостным теплоносителем аппроксимируется уравнением $f = 1{,}029Y - 0{,}065X - 0{,}245Y^2 + 0{,}0018X^2 + 0{,}0215Y^3$, справедливым для $0<X<18$ и $0<Y<3$.

Вместимость водяных аккумуляторов в системах отопления с жидкостным теплоносителем составляет обычно от 50 до 100 л в расчете на 1м² площади коллектора. В f-методе вместимость аккумулятора соответствует стандартной величине 75 л воды на 1м² коллектора.

В системах с воздушным теплоносителем зависимость между f и X,Y - аппроксируется уравнением:
$f = 1{,}040Y - 0{,}065X - 0{,}159Y^2 + 0{,}001187X^2 - 0{,}0095Y^3$, справедливым для $0<X<18$ и $0<Y<3$.

Стандартная вместимость галечного теплового аккумулятора при этом соответствует 0,25м³ на 1м² площади коллектора, а стандартный расход воздуха через коллектор равен 10^{-2}м³/с на 1м² площади коллектора. При использовании f-метода значение f вычисляется для каждого месяца, а месячное количество теплоты, получаемой системой теплоснабжения за счет Солнца, определяется как

$$Q_{мес.}^{сол.} = fQ_{мес.}^{пол}.$$

Доля годовой тепловой нагрузки, покрываемой за счет солнечной энергии, равна

$$F_r = \frac{\Sigma Q_{мес}^{солн}}{Q_{год}^{полн}},$$

где $Q_{год.}^{пол}$ – полная годовая тепловая нагрузка.

§3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ФЭП)

Принцип действия и характеристики ФЭП

Фотоэлектрический (или фотовольтаический) метод преобразования солнечной энергии в электрическую является в настоящее время наиболее разработанным в научном и практическом плане. Впервые на перспективу его использования в крупномасштабной энергетике обратил внимание еще в 30-е годы один из основателей советской физической школы академик А. Ф. Иоффе. Однако в то время КПД солнечных элементов не превышал 1%. В последующие десятилетия благодаря значительному объему исследований в области физики и технологии этот показатель увеличился до 20-25% .

Механизм преобразования солнечного света в электричество отличается от других способов получения электричества. Особенности этого метода определяют возможности и перспективы его использования в широких масштабах.

При любом способе производства электричества необходимо иметь электрические заряды и обеспечить механизм их разделения. В индукционном методе для получения электричества используют свободные заряды металлических проводников, а их разделение осуществляется в результате перемещения проводников в магнитном поле.

В фотовольтаическом методе получения электричества нет механических перемещений деталей конструкции. Он основан на свойствах полупроводниковых материалов и их взаимодействии со светом. В фотовольтаическом элементе свободные носители образуются в результате взаимодействия полупроводника со светом, а разделяются под действием электрического поля, возникающего внутри элемента. До недавнего времени практически все фотоэлементы изготовлялись из кристаллического кремния, однако сейчас все более широкое применение находят и другие материалы.

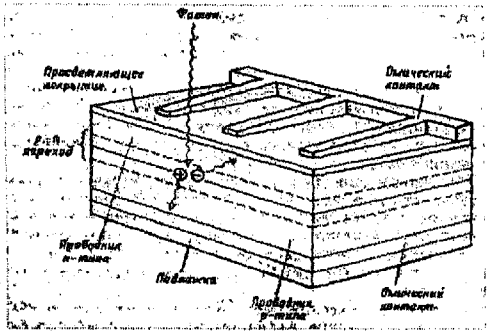


Рис. 26. Схема устройства солнечного элемента.

Явление фотоэффекта основано на преобразовании световой энергии (энергии электромагнитного излучения) в электрическую. Различают три вида фотоэффекта:

1) внешний - вырывание электронов из поверхности тел под действием света;

2) внутренний - изменение электропроводимости полупроводников и диэлектриков под действием света;

3) запирающегося слоя - возбуждение элекродвижущей силы на границе между проводником и светочувствительным полупроводником.

Для целей преобразования энергии электромагнитного излучения практически может быть применен только фотоэффект запирающегося слоя (фотоэффект на p-n переходе).

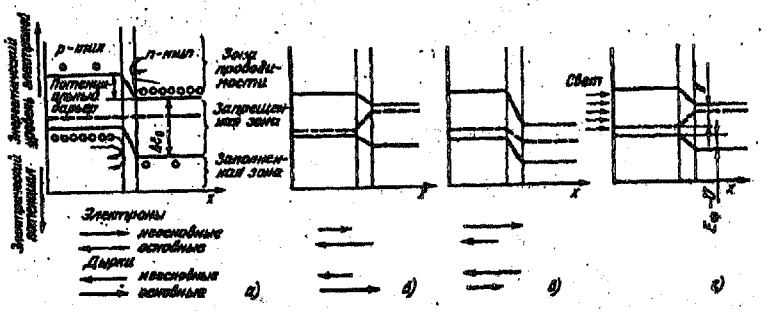


Рис. 27. Основные процессы в p-n-переходе.
а - в темноте; б - при прямом смещении; в - при обратном смещении; г - при освещении

Элекронно-дырочный переход или p-n переход представляет собой некоторую область между двумя частями вещества с разным типом проводимости. В изолированном от внешних воздействий (света и теплоты) образце в этой переходной зоне возникает взаимная диффузия избыточных носителей тока, приводящая к образованию двойного электрического слоя объемных зарядов - контактного электрического поля, напряженность которого направлена от области n-типа к области p-типа.

Установившаяся контактная разность потенциалов определяется как

$$V_k = \frac{kT}{e}\ln\frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e}\ln\frac{p_p}{p_n} = \frac{\Delta\mathcal{E}_0}{e} - \frac{kT}{e}\ln\frac{\nu_n\nu_p}{N_n N_d}, \quad (1)$$

где n_n, n_p - концентрация электронов; p_n, p_p - концентрация дырок в материалах n и p-типа; $\Delta\mathcal{E}_0$ - ширина запрещенной зоны вещества;

$$\nu_n = 2\,(2\pi m_n^* \cdot KT)^{3/2}h^3, \quad \nu_p = 2\,(2\pi m_p^* \cdot KT)^{3/2}h^3 -$$

- эффективная плотность состояний электронов и дырок в зоне проводимости (валентной зоне); N_a, N_d - концентрация акцепторов и доноров; T - температура полупроводника. Полученная картина представлена на рис. 27,а.

Поток основных носителей заряда через p-n переход представляет собой диффузионный ток $I_д$, поток неосновных носителей - дрейфовый ток I_s. При равновесии токи $I_д$ и I_s по абсолютной величине равны и результирующий ток через p-n переход равен нулю.

Приложение к p-n переходу положительного потенциала (U>0, прямое смещение) приводит к изменению взаимного расположения уровней Ферми (рис.27,б), уменьшению потенциального барьера, росту диффузионного тока (дрейфовый ток остается неизменным). Результирующий ток через p-n переход носит название прямого тока. Если U<0 (обратное смещение), то барьер увеличивается (рис.27,в), диффузионный ток уменьшается, дрейфовый ток остается неизменным. Результирующий ток называется обратным током. Уравнение вольт-амперной характеристики (ВАХ) p-n перехода в этом случае имеет вид:

$$I = I_s(2e^{eU/kT} - 1), \quad (2)$$

где U - внешнее напряжение, приложенное к p-n переходу, с учетом знака; I_s - значение, к которому стремится обратный ток при увеличении обратного напряжения.

Когда монохроматическое излучение с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны, падает на полупроводник вблизи p-n перехода, в нем образуются новые пары электрон-дырка. Это приводит к возникновению дополнительной разности потенциалов (рис. 27,г), что в свою очередь вызывает эффект прямого смещения и увеличения тока основных носителей.

Если внешняя цепь разомкнута, то устанавливается динамическое равновесие первичного светового тока избыточных неосновных носителей $I_{св}$, созданных квантами света, и тока, обратного ему по направлению, обусловленного накоплением пространственных зарядов. Результирующая разность потенциалов представляет собой фото-ЭДС. При подключении внешней нагрузки происходит ответвление тока во внешнюю

цепь. Суммарный ток по-прежнему будет равен световому. Поскольку направление фото-ЭДС и контактной разности потенциалов противоположно, ток $I_н$ во внешней цепи будет равен:

$$I_н = I_{св} - I_{нас}(e^{eU_ф/kT} - 1), \qquad (3)$$

где $I_{нас} = I_s$ - ток неосновных носителей, проходящих через неосвещенный p-n переход, равный току насыщения; $U_ф$ - напряжение на зажимах фотоэлемента при включении нагрузки во внешнюю цепь.

Это уравнение представляет собой ВАХ ФЭП. Значение $U_ф$ равно:

$$U_ф = \frac{KT}{e}\ln\left(\frac{I_{св} - I_н}{I_{нас}} + 1\right). \qquad (4)$$

Для разомкнутой цепи $I_н = 0$, откуда ЭДС фотоэлемента

$$E_ф = \frac{KT}{e}\ln\left(\frac{I_{св} - I_н}{I_{нас}} + 1\right). \qquad (5)$$

Максимальное значение $eE_ф$ не может быть больше $\Delta\mathcal{E}_0$. Значение генерируемого светом тока короткого замыкания $I_{к.з.} = I_{св}$ определяется формулой

$$I_{св} = I_{к.з.} = e \cdot \int_{\Delta\mathcal{E}_0 = h\nu}^{\infty} Q_т(h\nu) \cdot N_ф(h\nu) d(h\nu), \qquad (6)$$

где $Q_т(h\nu)$ - коэффициент собирания неосновных носителей (или абсолютная спектральная чувствительность элемента), который согласно определению показывает, какая часть носителей, генерированных при поглощении фотонов с энергией $h\nu$, дает вклад в $I_{к.з}$; $N_ф(h\nu)$ – плотность потока фотонов с энергией $h\nu$, падающих на ФЭП.

Технология производства ФЭП должна обеспечивать коэффициент собирания, близкий к единице, для всех фотонов солнечного спектра, энергия которых больше ширины запрещенной зоны.

На форму ВАХ существенное влияние оказывает сопротивление элемента: при его увеличении форма ВАХ становится более плоской, коэффициент заполнения и мощность уменьшаются. По ВАХ можно определить значения напряжения U_m и тока I_m, соответствующие режиму максимальной мощности:

$$\left(1+\frac{U_m}{KT}\right)e^{\frac{eU}{KT}} = e^{\frac{eEф}{KT}} . \qquad (7)$$

$$I_m = I_{св} - I_{нас}\left[E^{eUm/KT} - 1\right] = I_{св}\left(1+\frac{I_{нас}}{I_{св}}\right)\cdot \frac{eU_m}{kT+eU_m}. \qquad (8)$$

Для максимальной мощности имеет вид:

$$N_m = I_m U_m = I_{св} U_m \left(1+\frac{I_{нас}}{I_{св}}\right)\frac{eU_m}{kT+eU_m} \approx \frac{eI_{св}U_m^2}{kT+eU_m} . \qquad (9)$$

У серийных кремневых элементов при солнечном освещении

$$I_{св} \approx 35^{мА}/_{см^2} \text{ и } I_{нас} = 10^{-8} А/_{см^2}, \text{ т.е. } \frac{I_{нас}}{I_{св}} < 10^{-4} .$$

Максимальный КПД, т.е. КПД при согласованной нагрузке, представляется выражением

$$\eta_{max} = \frac{I_m U_m}{N_{подв}} = \frac{eI_{св}U_m^2}{(kT+eU_m)N_{подв}} = k\,\frac{I_{св}E}{N_{подв}} , \qquad (10)$$

где k - коэффициент заполнения, который определяет степень приближения ВАХ к прямоугольной форме. При $I_{св}/I_{нас} > 10^4$, $K \geq 0{,}72$, т.е. $\eta_{max} \geq 0{,}72(I_{св}E/N_{подв})$.

При поступлении на ФЭП, имеющий температуру T_2, энергии в узком спектральном интервале от пороговой частоты ν_{min} до $\nu_{min} + \left(\frac{kT_2}{h}\right)$ из общего излучения абсолютно черного тела, нагретого до температуры T_1, его предельный КПД будет равен КПД цикла Карно:

$$\eta = (T_1 - T_2)/T_1. \qquad (11)$$

С учетом джоулевых потерь в самом ФЭП максимальный КПД имеет следующий вид:

$$\eta_0 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot \left[1 - \frac{\ln\left[\frac{\Delta\mathcal{E}_0}{kT_2}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) + 1\right]}{\frac{\Delta\mathcal{E}_0}{kT_2}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)}\right] = \eta_k \eta_э . \qquad (12)$$

Предельный КПД фотоэлемента, преобразующего солнечное излучение, имеет вид

$$\eta = \eta_0 \eta_c ,$$

где η_c – КПД преобразования солнечного света, равен отношению мощности использованного излучения эквивалентного черного тела к мощности солнечного излучения и может быть определен из зависимости η_c = от X_0 (рис. 28)

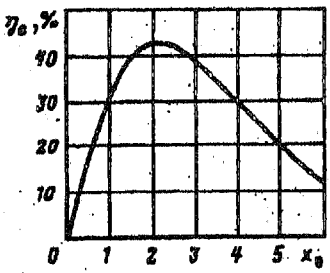


Рис. 28. Зависимость η_c от x_0

$$\eta_c = f(x_0), \text{ где } x_0 = \frac{\Delta\mathcal{E}_0}{kT_c} ;$$

T_c - температура поверхности Солнца.

Значение η_0 вычисляется по формуле (12) при подстановке эквивалентной температуры абсолютно черного тела T_1.

Значения предельных КПД ФЭП для различных материалов при разных температурах окружающей среды приведены на рисунке 29.

Материалы фотоэлементов

Оптимальными материалами для солнечных ФЭП являются соединения $A^{III}B^{V}$ и в первую очередь арсенид галлия (GaAS). Разработка высокоэффективных ФЭП на основе материалов с широким диапазоном изменения ΔE_0 позволит на практике перейти к использованию сочетаний различных типов ФЭП и реализации идей сложных, например гетерогенных и каскадных, фотоэлектрических устройств, позволяющих использовать весь спектр солнечного излучения.

Предельный КПД солнечного элемента логарифмически растет при увеличении интенсивности освещения, что определяется соответствующим ростом фотоэдс Это определяет интерес к использованию для ФЭП солнечного излучения, концентрированного более чем в 1000 раз. Однако при этом возникает проблема, обусловленная резким возрастанием токов в ФЭП и соответствующим возрастанием потерь мощности на внутреннем сопротивлении.

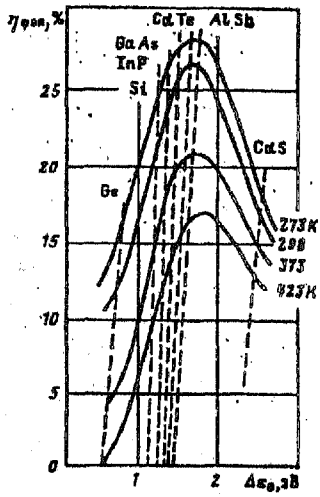


Рис. 29. Зависимость эффективности ФЭП от ширины запрещенной зоны полупроводника при различных значениях температуры

Внедрение солнечных ФЭП с концентраторами в практику во многом зависит от разработки дешевых и простых систем слежения за Солнцем, а также от разработки недорогих концентраторов, стабильных при длительной эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях, что является сложной технической задачей.

В качестве отражающего покрытия солнечных концентратов используется, как правило, алюминий, который имеет наиболее высокий интегральный коэффициент отражения в диапазоне волн солнечного спектра, хотя в некоторых случаях применяется и серебро.

Для защиты отражающего покрытия от внешних воздействий на него наносят пленки SiO, SiO_2, Si_2O_3, Al_2O_3 и др. При выборе защитного покрытия должны учитываться спектральные характеристики преобразователя солнечной энергии, так как, например, пленки из SiO и Si_2O_3 значительно снижают отражательную способность зеркал в коротковолновой области спектральной чувствительности солнечных элементов.

Для пленочных космических концентраторов используются металлизированные полимерные пленки различного химического состава. По совокупности свойств наиболее подходящим и в космических конструкциях являются пленки из майлара и каптона.

Возможности эффективного применения на космических аппаратах (КА) концентраторов в значительной степени определяются их способностью длительное время работать в условиях космической среды, сохраняя высокие оптико-энергетические характеристики.

За двадцать лет промышленного использования в основном в качестве бортовых источников для космических аппаратов ФЭП получили достаточно широкое развитие. Для наиболее освоенного типа кремниевых ФЭП достигнутые в эксплуатации значения КПД составляют около 15%. ФЭП на базе GaAS в лабораторных условиях показали КПД до 20%. Однако сегодня ФЭП все еще очень дороги.

В последнее время для изготовления фотоэлементов стало возможным использование ряда новых материалов. Один из наиболее перспективных - аморфный кремний, который в отличие от кристаллического не имеет регулярной структуры. Для аморфной структуры вероятность поглощения фотона и перехода в зону проводимости больше. Таким образом, по поглощательной способности этот материал значительно превосходит кристаллический кремний. Для нужд полупроводниковой энергетики его можно использовать в виде тонких, толщиной около 0,5 мкм, пленок. Поскольку на элементы из аморфного кремния расходуется меньше материала и технология их изготовления проще, они дешевле.

Другим достижением в технологии тонкопленочных солнечных элементов стало получение многослойных элементов, позволяющих охватить большую часть спектра солнечного излучения. Так, например, верхний слой такого материала может собирать свет из синей части спектра, позволяя красному свету проходить к тому слою, который более эффективен именно в этой области спектра.

Герметический блок из элементов, соединенных между собой в промышленных условиях, называется фотоэлектрическим модулем. Несколько модулей образуют батарею. Высокая стоимость солнечных элементов – это именно то, что задерживает развитие крупных фотоэнергетических установок. В 1974 г. стоимость модуля солнечных элементов составляла 50 долл. на 1Вт пиковой мощности. Стоимость электроэнергии, получаемой от такого модуля, была исключительно высока: 3 долл. за 1кВт/ч. Стоимость электроэнергии, производимой электростанциями, работающими на ископаемом и ядерном топливе составляет от 5 до 10 центов за 1 кВт/ч. Такая разница побудила приложить огромные усилия к снижению стоимости энергии, вырабатываемой солнечными установками. Исследования охватили материалы, из которых изготавливаются солнечные элементы, структуру элементов и процессы массового производства.

Движение на пути к этой цели не замедляется: постоянно рождаются новые идеи и разработки, не за горами и производство крупных блоков. Ожидать снижения стоимости элементов можно тогда, когда начнется массовое производство новых материалов.

Концентраторы солнечной энергии

Одним из препятствий на пути использования солнечного излучения в энергетике является его низкая плотность. Преодолеть это препятствие можно путем концентрирования излучения. Применение концентраторов позволяет не только поднять энергетическую эффективность солнечных фотоэлектрических установок, но и улучшить их экономические показатели за счет уменьшения расхода дефицитных полупроводниковых материалов, снижения стоимости и массы, повышения устойчивости к действию внешних факторов. При использовании концентрированного излучения для освещения модулей солнечных элементов одним из важных требований является равномерность плотности лучистого потока на приемнике. Для создания такого потока используются концентраторы с плоскими отражающими поверхностями - плоские фоклины. Если образующая концентратора является прямой линией, их называют односекционными (рис.9,а), если ломаной - многосекционными (рис.9,б). Концентрация солнечного излучения в них достигается в результате многократного отражения от зеркальных поверхностей. Односекционные плоские системы позволяют увеличить в 2-10 раз концентрацию солнечного излучения и во столько же раз снизить площадь полупроводниковых элементов для получения той же энергии.

Для этой цели применяются также фокусирующие коллекторные системы, в которых используются отражатели и линзы, фокусирующие лучи на солнечных элементах. Характер работы устройств двух типов различен, так как плоская система эффективна даже в облачную погоду, в то время как фокусирующие системы оправдывают себя только при прямом солнечном свете. Однако степень концентрации у них на много выше. Недостатки фокусирующей системы можно частично компенсировать, если снабдить ее высокоэффективными солнечными элементами, включая элементы на монокристаллическом кремнии и арсениде галлия, КПД которых в настоящее время достигает 20-26%.

Использование концентрирующих систем позволяет снизить стоимость солнечных электростанций, так как они дешевле солнечных элементов, поэтому их применение на солнечных станциях даст возможность сэкономить на фотоэнергетических устройствах.

Перспективы развития солнечных фотоэнергетических установок

По мере того как за последние 10 лет снижались цены на солнечные элементы, появилась возможность постройки крупных фотоэлектрических установок. В США в 70-е годы были выделены средства на строительство 9 электростанций средней мощности от 10 до 100 кВт. К 1984 г.

было построено 14 относительно крупных солнечных электростанций мощностью от 200 кВт до 7 МВт в США, Японии, Италии, Саудовской Аравии и ФРГ.

Европейское сообщество и ряд отдельных стран разрабатывают 20 демонстрационных установок мощностью от 15 до 300 кВт. В Японии работает свыше 10 электростанций такого типа, имеющих мощность от 3 до 200 кВт, а в 1985 г. вошла в строй станция мощностью 1МВт, построенная организацией разработки новых источников энергии. Японский проект "Солнечное сияние", который начал осуществляться в 1974 году, объединяет работы по изучению возобновляемых источников энергии, с тем чтобы к 2000 г. в значительной мере удовлетворить за счет них энергетические потребности страны.

Крупнейшая из существующих солнечная электростанция находится в Кариса - Плейнз в Калифорнии. Она была построена менее чем за год и имеет пиковую мощность, равную 7,2 Мвт. Учитывая возможные усовершенствования в производстве новых материалов и создании новых устройств, следует ожидать, что к 2000 г. электроэнергия, вырабатываемая фотоэнергетическими установками, сможет конкурировать по цене с энергией, вырабатываемой обычными электростанциями. Последние будут производить электроэнергию по цене от 3 центов за 1кВт/ч (гидроэлектростанция) до 35 центов за 1кВт/ч. (тепловые станции, работающие на угле).

К тому времени фотоэнергетические установки будут вырабатывать электроэнергию по цене 15 центов за 1кВт/ч. Прогнозируемое дальнейшее усовершенствование в этой области должно привести к снижению стоимости энергии до 8 центов за 1кВт ч.

Солнечная фотоэнергетическая установка обладает рядом достоинств, помимо того что использует чистый и неистощимый источник энергии. Она не имеет движущихся частей и поэтому не требует постоянного контроля со стороны обслуживающего персонала. Солнечные элементы легко производить массовыми партиями, подобно тому как сейчас производятся транзисторы и интегральные схемы. Это должно привести к снижению их стоимости за счет снижения затрат, достигаемого при массовом производстве.

Электростанция, мощность которой измеряется мегаваттами, может быть построена менее чем за год - значительно быстрее, чем обычная электростанция, и тем более - атомная. По этой причине есть возможность гибко учитывать изменения, обусловленные требованиями потребителей.

Быстрое снижение стоимости фотоэлектричества (от 60 долл. за 1кВт/ч. до 1 долл. в 80-е годы и 20-30 центов сегодня) и образование в этой области рынка повысили потребность в такого рода энергии, причем она возрастает на 25% в год. Сегодняшняя стоимость фотоэлектриче-

ства все еще примерно в 5 раз выше стоимости электричества от традиционных источников, но прогресс в этой области обгоняет прогнозы.

КПД преобразования энергии в фотоячейке в лабораторных условиях повысился с 16-18% в середине 70-х годов до 28% в настоящее время для ячейки с кристаллическим кремнем и до 35% для ячейки с полупроводником на основе арсенида галлия (ячейка с двумя слоями, которые поглощают различные части солнечного спектра).

Появился новый класс перспективных фотоматериалов на базе тонких пленок полупроводниковых материалов. Хотя эти ячейки в общем случае менее эффективны (КПД 16%), потенциально они будут иметь очень низкую стоимость, возможно, в 10 раз меньше стоимости в массовом производстве существующих фотоэлектрических модулей. Тонкопленочная технология особенно ценна для снижения себестоимости в массовом производстве и для нее достаточно очень малые количества активного материала. Фотоэлектрические системы требуют минимального обслуживания, не нуждаются в воде и поэтому хорошо приспособлены для отдаленных и пустынных районов. Диапазон их мощностей очень широк - от сравнительно небольших портативных установок в несколько ватт до многомегаваттных электростанций, покрывающих миллионы квадратных метров площади. Малые фотоэлектрические системы являются потенциально экономически выгодными даже в относительно облачные дни или на высоких широтах, где использование солнечной энергии представляется неэффективным.

В частности в ФРГ была доказана экономичность использования солнечной энергии для энергоснабжения потребителей в тех местах, где не проложены еще распределительные сети. Например, для обеспечения электропитанием отдельных горных приютов или автоматических радиостанций, малых телепередающих устройств, линейных телефонов на автострадах или для гальванической противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов.

Поскольку поступление солнечной энергии периодично, фотоэлекрические системы наиболее рационально включают в гибридные станции, использующие и солнечную энергию, и природный газ. Гибридные маломощные станции, состоящие из фотоэлектрических панелей и дизельных генераторов, уже являются надежными поставщиками энергии (рис.18-19).

§4. БИОКОНВЕРСИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Способы получения энергии из биомассы

Биомасса, если иметь в виду древесину, солому, является одним из самых древних возобновляемых энергоресурсов, используемых человеком.

В биомассе - зеленой массе растений, создаваемой в процессе фотосинтеза, - солнечная энергия запасается в виде химической энергии, которая может быть высвобождена различными путями.

Растительный покров Земли составляет более 1800 млрд. т сухого вещества, что энергетически эквивалентно $3 \cdot 10^{22}$ Дж. Эта цифра соответствует известным запасам энергии полезных ископаемых. Леса составляют 68% биомассы суши, травяные экосистемы - примерно 16%, а возделываемые земли - 8%. В целом на Земле при помощи фотосинтеза ежегодно производится 173 млрд.т сухого вещества, что более чем в 20 раз повышает используемую в мире энергию и в 200 раз - энергию, содержащуюся в пище всех более 4 млрд. обитателей планеты.

Запасенная в биомассе энергия органических соединений может быть использована непосредственно в виде пищевых продуктов человеком или животными или же для получения энергии в промышленных целях.

Сжигание

Древнейший способ прямого получения энергии из биомассы - это ее сжигание. Даже в настоящее время он является самым распространенным в сельской местности, где свыше 85% энергии получают именно этим путем.

Биомасса как топливо имеет ряд достоинств. В отличие от ископаемого топлива при ее сжигании выделяется менее 0,1% серы и от 3 до 5% золы в сравнении 2-3 и 10-15% соответственно для угля. Количество углекислого газа, высвобождающегося при сжигании биомассы, компенсируется количеством углекислого газа, потребляемого при фотосинтезе. В результате содержание CO_2 в атмосфере остается неизменным.

Этиловый спирт (этанол)

Энергию можно получить из сельскохозяйственных культур, специально выращиваемых для этой цели. Это могут быть особые виды быстрорастущих деревьев, растения, богатые углеводами, из которых получают этиловый спирт (этанол). Для производства этилового спирта из такой растительной биомассы необходимо экстрагировать и подвергнуть гидролизу запасенные углеводы с последующим их сбраживанием в спирт.

Из растений, продуцирующих этиловый спирт, наиболее широко используется сахарный тростник. Этанол из сахарного тростника в больших количествах производится в Бразилии. В связи с растущим дефицитом торгового баланса, вызванного резким увеличением цен на нефть в последние годы, в Бразилии было решено использовать в качестве автомобильного топлива не бензин, а чистый этанол и смесь этанола с бензином. По сравнению с бензином этанол обладает не только экономическими, но и техническими преимуществами, например более высоким октановым числом. Про-

изводство этанола путем ферментации сока сахарного тростника возросло с 900 млн.л в 1973 г. до 6 млрд.л в 1992 г., из них 2,2 млрд.л пошли на получение смеси безводного этанола с бензином. Благодаря использованию этанолового топлива воздух в таких загрязненных городах, как Сан-Паоло и Рио-де-Жанейро, стал значительно чище.

Стоимость этанола, производимого на юге Бразилии, составляет в среднем 18,5 цента за 1 л. При такой стоимости он мог бы легко конкурировать с импортной нефтью, если бы цена на мировом рынке оставалась равной 24 долл. за баррель. Эффективная стоимость этанола может снизиться еще более, если пар, полученный при сжигании выжимок сахарного тростника, использовать для выработки электроэнергии. В настоящее время паровые турбины низкого давления способны производить около 20 кВт/ч. электроэнергии при сжигании выжимок, полученных из 1 т сахарного тростника. С помощью паровых турбин высокого давления можно было бы производить в 3 раза, а с помощью газовых - в 10 раз больше электроэнергии. Комбинации подобных технологий представляются весьма перспективными, и благодаря им сахарные заводы могут стать экспортерами энергии.

В США небольшое количество этанола, получаемого из зерновых, используется в качестве добавки к бензину. Этот этанол относительно дорог, однако в настоящее время разрабатывается технология получения сырья с использованием ферментов. Специалисты из научно-исследовательского института солнечной энергии считают, что к 2000 г. этанол, получаемый из дешевых источников, будет конкурентоспособен по отношению к бензину.

Биогаз

Другой способ производства энергии из биомассы состоит в получении биогаза путем анаэробного перебраживания. Такой газ представляет собой смесь из 65% метана, 30% углекислого газа, 1% сероводорода и незначительного количества азота и водорода. Метановое "брожение", или биометаногенез, – давно известный процесс превращения биомассы в энергию. Он был открыт в 1776 г. Вольтой, который установил наличие метана в болотном газе. Бездымное горение болотного газа причиняет людям гораздо меньше неудобств по сравнению со сгоранием дров и навоза. Энергия, заключенная в 28 м^3 биогаза, эквивалентна энергии 16,8 м^3 природного газа, 20,8 л нефти или 18,4 л дизельного топлива.

Биогаз дает воэможность использовать самые современные средства теплоэнергетики - газовые турбины. В этих установках газ сгорает, приводя в движение турбину, которая вращает генератор, производящий электроэнергию. В свою очередь газообразные продукты сгорания затем направляются в котел для нагревания воды и получения пара, который

может быть использован в промышленности или для дополнительного производства энергии.

Газовые турбины проще и дешевле традиционных паровых. В то время как у последних эффективность не улучшалась с конца 50-х годов, газовые турбины непрерывно совершенствуются.

Наиболее многообещающим вариантом использования биомассы в газовых турбинах является ее газификация при взаимодействии с воздухом и паром при высоких давлениях и очистке газа от примесей, которые могут повредить лопасти турбин. Для повышения эффективности процесс газификации и производство электроэнергии следует смещать в одной установке. Такая технология разрабатывается сейчас для угля. Однако эта технология может даже быстрее найти коммерческое применение с использованием биомассы, нежели угля, так как биомассу легче газифицировать и она обычно содержит малое количество серы. Предварительные оценки показывают, что энергия, полученная на установке с газофицированием биомассы и газовой турбиной, по стоимости может быть сравнима с электроэнергией, производимой на обычных угольных или ядерных электростанциях в большинстве промышленных и развивающихся стран.

Одним из направлений при получении биогаза является использование органических отходов и побочных продуктов сельского хозяйства и промышленности. Производство биогаза в процессе метанового брожения - одно из возможных решений энергетической проблемы сельскохозяйственных районов. Перспективы этого направления весьма многообещающие. Действительно, если 300 млн.т сухого вещества, содержащегося в навозе, превратить в биогаз, то выход энергии составит 33 млн.т нефтяного эквивалента. Производство можно также увеличить за счет таких сельскохозяйственных отходов, как солома, жом сахарного тростника и др. В Индии с 1980 по 1984 гг. был построен 1млн. небольших установок для производства биогаза, удовлетворяющих потребности в энергии отдельных семей.

Производство биогаза из сельскохозяйсвенных отходов во все более возрастающих масштабах осуществляется также в Китае. Так, уже в конце 1978 г. здесь работало 7,15 млн. установок для получения биогаза - в 15 раз больше, чем в 1975 г. К 1980 г. было построено еще 20 млн., а к 1985 - 70 млн, что позволяет 70% крестьянских семей использовать биогаз для приготовления пищи.

Преимущество производства биогаза из сельскохозяйственных отходов заключается в том, что они являются средством получения энергии, доступным даже на семейном уровне. Отходы процесса служат высококачественным удобрением, а сам процесс способствует поддержанию чистоты в окружающей среде. Однако количество биомассы данного вида ограничено земельной площадью, на которой осуществляет-

ся сельскохозяйственная деятельность. Существенное увеличение пригодных для культивирования площадей вряд ли реально. Вместе с тем имеется возможность использовать для получения биомассы водную среду, а именно - осуществлять культивирование водорослей, в частности микроводорослей.

Итак, достоинством биогаза можно считать следующее: возможность получения его из бросового сырья (сельскохозяйственных, промышленных и городских углеродосодержащих отходов), попутное получение при этом высокоэффективных удобрений и кормовых добавок, очистка сточных вод. Недостатками получения и потребления биогаза являются расход кислорода и выброс углекислого газа при сжигании биогаза, неуправляемость и длительность процесса брожения, необходимость иметь емкости значительного объема для осуществления процесса брожения.

Микроводоросли

Первые сообщения о возможности использования микроводорослей для производства пищевых продуктов относятся к XVI в. В 1521 г. Бернол Диас упомянул о галетах, которые продавались на базаре в Мехико и состояли из высушенных слоев микроводоросли спирулины. Дальнейший тщательный анализ образцов спирулины показал, что она содержит до 70% белка, 19% углеводов, 6% пигментов, 4% липидов, 4% нуклеиновых кислот. Возник интерес к массовому культивированию микроводорослей. Сначала основное внимание было сконцентрировано на получении продуктов питания, но затем выявили другие области применения микроводорослей, включая биоконверсию солнечной энергии. Эксперименты по массовому культивированию микроводорослей проводятся все более интенсивно с начала 50-х годов.

За период с 1950 по 1970 г. был достигнут значительный прогресс в технологии массового культивирования микроводорослей в таких странах, как Япония, ФРГ, Израиль, Франция, США и Мексика. Культивирование производилось как в специально построенных для этой цели установках, так и в естественных водоемах. В этих странах была получена следующая средняя продуктивность: в США 30 г/м^2 в день, Японии - 12 г/м^2 в день, Израиле - от 10 до 40 г/м^2 для зимних и летних условий соответственно.

В зависимости от целей использования культивируются различные микроводоросли. Некоторые из низ в процессе метаболизма продуцируют углеводы, которые можно использовать для получения газообразного, жидкого или твердого топлива.

Идея использования углеводородов, вырабатываемых растениями, не нова. В США из молочая чиновидного, распространенного в Кали-

форнии, получают 3000 л масла с 1 га. Такое же количество дает молочай, культивируемый в Японии. Из нефтяного ореха, растущего на Филиппинах, получают 300 л масла, содержащего 75-80 долей октана.

Появились сообщения о способности некоторых водорослей вырабатывать углеводороды, об успешном их использовании для производства нефти. Так, в Израиле в 1976 г. была получена высокосортная нефть из водорослей, обильно разрастающихся в соленых водоемах при ярком солнечном свете. Обнаружили быстро растущую зеленую водоросль дуналиеллу, которая в естественных условиях при минимальных затратах дает значительный "урожай". Было показано, что из биомассы дуналиеллы, получаемой с 1м^2, в день можно выделить 11 г протеина, 8 г глицерина, 0,4 бета-каротина.

Исследование возможности применения различных видов водорослей в промышленных целях проводились в Институте исследований солнечной энергии (США). Изучив несколько тысяч видов водорослей выделили 10-12 наиболее перспективных. Однако исследования показали, что в большинстве случаев количество углеводородов составляет лишь примерно 0,1% сухого веса биомассы. Единственным исключением является ботриококкус браунии, которая имеет две разновидности: зеленая - до 36% углеводородов и коричневая - до 86% сухой массы клеток водоросли.

Углеводороды, вырабатываемые ботриококкусом браунии, в основном локализованы на наружной поверхности клетки и могут быть удалены простыми механическими методами. Остающуюся биомассу можно либо возвратить в культиватор, либо подвергнуть гидрокрекингу, в процессе которого из нее получают 65% газолина, 15% авиационного топлива, 3% остаточных масел. Таким образом, задача культивирования микроводорослей для производства энергии принципиально решена: созданы соответствующие установки, найдены подходящие виды водорослей. Вместе при получении таким способом энергии, сравнимой по стоимости с энергией от традиционных источников, возникает ряд проблем.
Одна из них - повышение эффективности и производительности установок. Для интенсификации процесса образования биомассы надо одновременно добиться необходимой освещенности клеток, обеспечить их нужным количеством CO_2 и максимально увеличить количество клеток, подвергающихся действию света и способных поглотить его.

Рассмотрим устройство для культивирования микроводорослей, содержащих фотоблок с профилированным дном и барботажные трубки, расположенные на дне фотоблока (рис. 30). Дно фотоблока выполнено в виде волнистой поверхности, вдоль которой расположены барботажные трубки, снабженные патрубками, направленными вниз по касательной к поверхности дна.

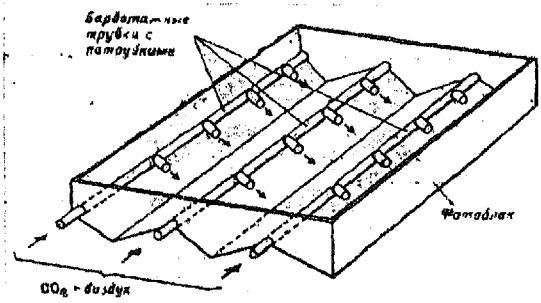


Рис. 30. Схема устройства для культивирования микроводорослей с барботированием культуральной жидкости в фотоблоке.

Устройство работает следующим образом. В фотоблок наливают суспензию, содержащую питательный раствор и рассаду микроводорослей, и пропускают по барботажным трубкам газовоздушную смесь, содержащую 0,5-1% CO_2. Необходимый для фотосинтеза свет поступает к водорослям через верхнюю открытую часть фотоблока от внешнего источника освещения (Солнца или искусственного источника). Струя газовоздушной смеси, обогощающая суспензию CO_2, одновременно используется для вертикального перемешивания жидкости: расположение барботажных трубок и форма дна позволяют создать потоки жидкости во всем рабочем объеме среды культивации.

Низкая эффективность установок пока не дает возможности приступить к промышленному культивированию микроводорослей для производства энергии. Существенным препятствием на этом пути является необходимость отторжения под размещение установок больших площадей земли, что практически нереально.

§5. ГИБРИДНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ СТАНЦИИ

Рассмотрение основных методов преобразования солнечной энергии показывает, что каждый из них имеет определенные достоинства, однако ни один не может обеспечить надежное производство энергии.

Фотоэлектрические системы дают возможность производить электричество в светлое время суток, при этом радиация может быть прямой или рассеянной. Для их работы не требуется высокая степень концентрации. Однако в темное время суток производство энергии с помощью таких станций невозможно.

Солнечные станции, использующие термодинамический цикл, могут преобразовывать только прямую солнечную радиацию, поскольку для их работы требуется высокая степень концентрации солнечного излучения. Преимущество солнечно-термальных станций в том, что они приспособлены к высокотемпературному аккумулированию тепла в пределах суток, что позволяет производить электричество в темное время суток или в ус-

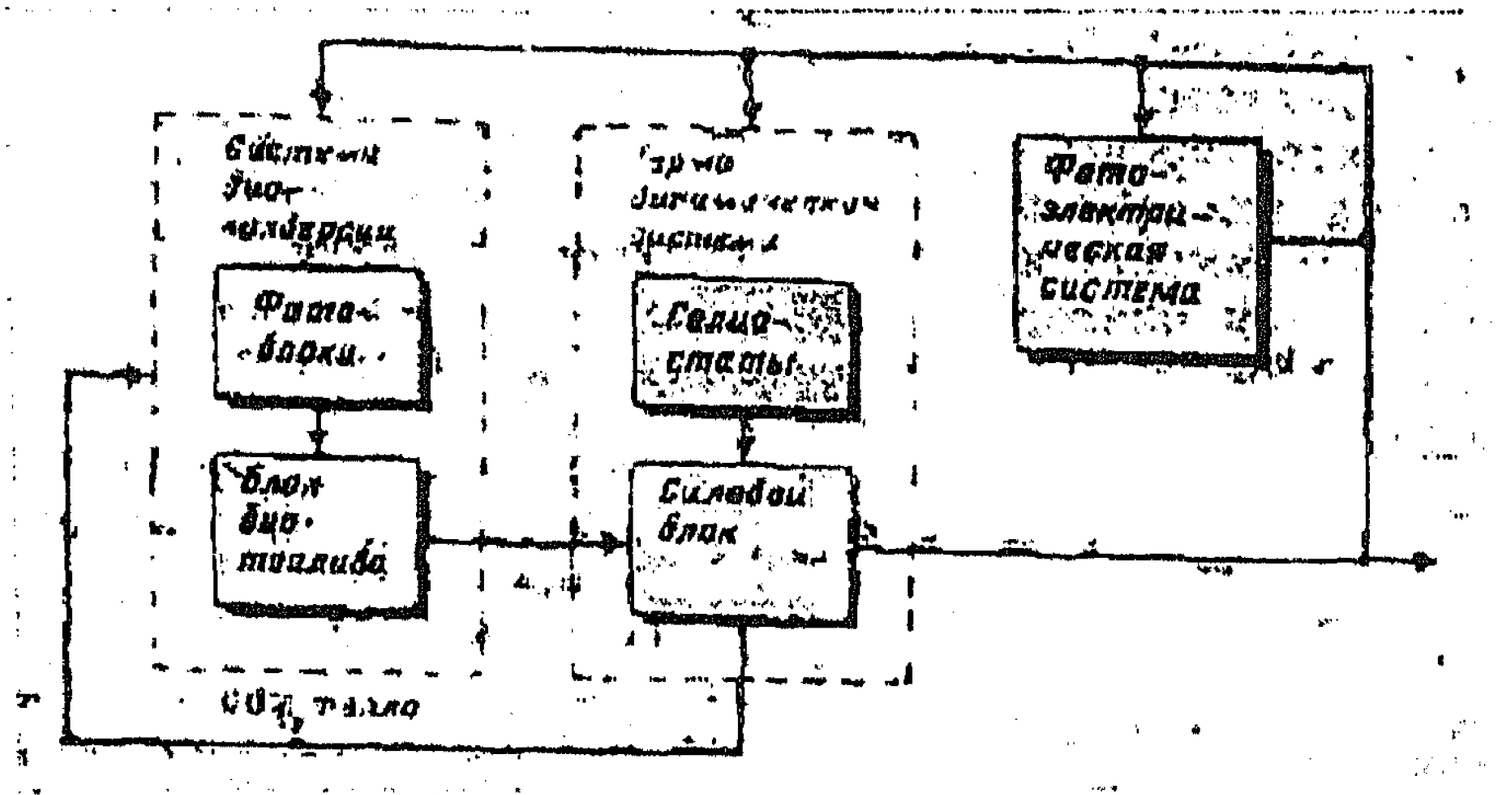


Рис. 31. Схема гибридной солнечной станции

ловиях кратковременного отсутствия прямой солнечной радиации. Высокотемпературное аккумулирование тепла в настоящее время потенциально более экономично, чем батареи или другое нетопливное накопление, особенно когда жидкость-теплоноситель также и аккумулирует тепло. Однако при длительном отсутствии прямой солнечной радиации такие станции работать не могут, поскольку солнечная энергия аккумулируется ненадолго.

Долгосрочную аккумуляцию дает биоконверсия. Специальное выращивание биомассы с последующим ее перебраживанием в спирт или метан позволяет создать искусственные аналогии процесса образования органического топлива,во много раз превосходящие по скорости естественные процессы. Недостатком системы биоконверсии является низкий КПД преобразования солнечной энергии. Он обусловлен низкой эффективностью фотосинтеза, в результате которого получается органическое топливо, гребующее дополнительного преобразования, что еще больше уменьшает КПД системы.

Один из возможных путей повышения надежности солнечных станций - подключение к Солнечной системе недорогой системы на ископаемом топливе, энергия от которой может компенсировать колебания "сол-

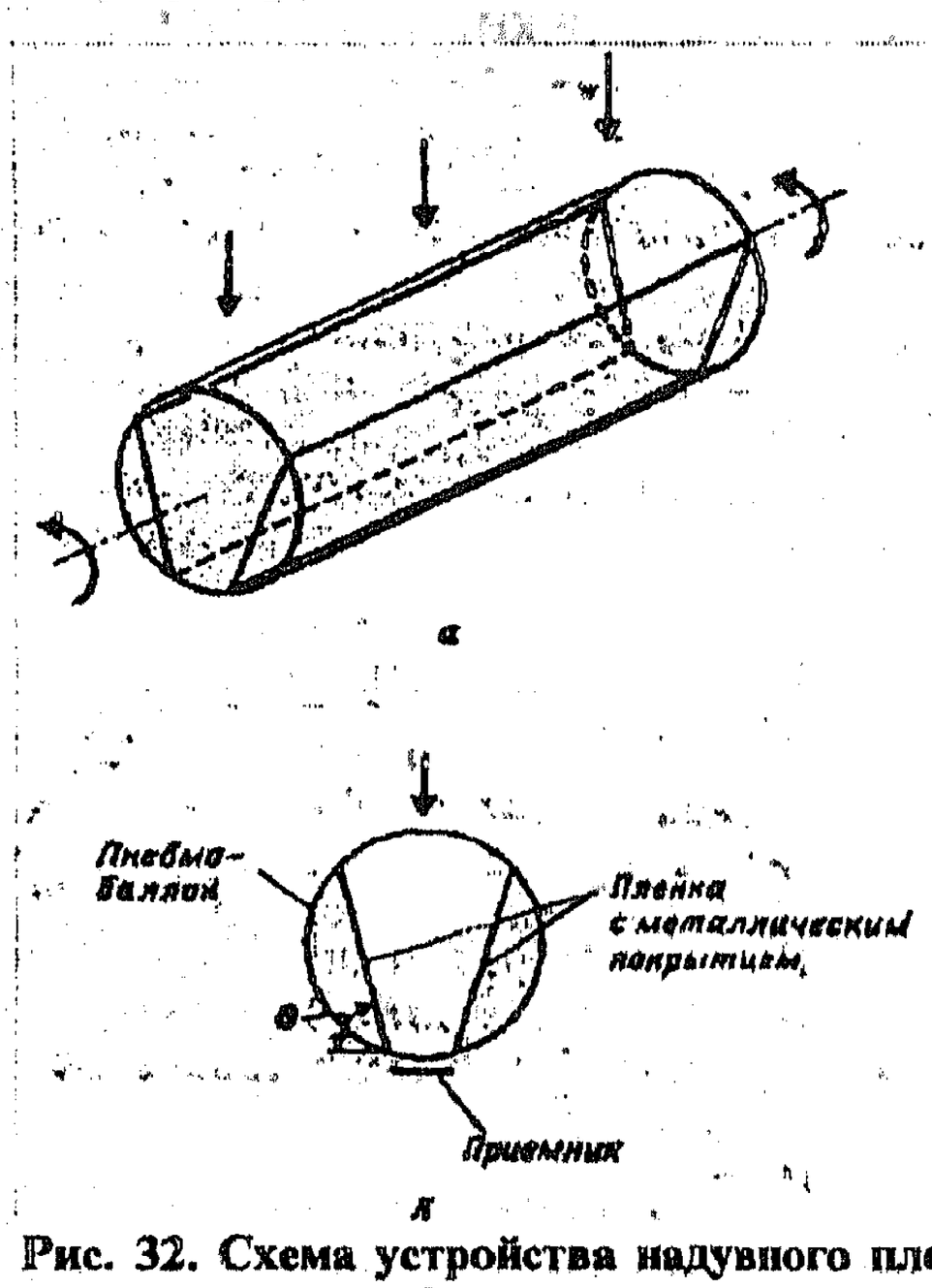


Рис. 32. Схема устройства надувного пленочного плоского фоклина:
а - общий вид; б - поперечный разрез

нечного снабжения". Однако гибридные системы такого типа уже не являются солнечными станциями в полном смысле слова.

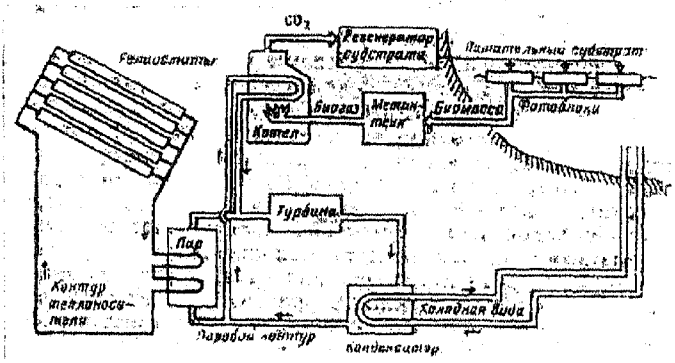


Рис. 33. Схема включения системы биоконверсии водного базирования в гибридную станцию.

Вместе с тем задачу надежного производства энергии с использованием только солнечной радиации можно решить, если построить гибридную станцию, совмещающую в себе все три метода преобразования солнечной энергии: фотоэлектрический, солнечно-термальный и биоконверсию. Действительно, в такой станции фотоэлектрическая система прямо преобразует солнечную радиацию в электричество, которое может потребляться сразу в момент его производства. Термодинамическая система аккумулирует солнечную энергию для работы станции в часы пик и в темное время суток. Система биоконверсии обеспечивает работу станции в периоды длительного отсутствия солнечной радиации за счет аккумулирования биотоплива.

Требуемое количество аккумулированной энергии зависит от расположения станций и может быть небольшим. Обычно потребность в электроэнергии имеет суточные пики в середине дня и сезонные в начале лета, т.е. тогда, когда возможна максимальная выработка энергии от солнечных установок. Поэтому для удовлетворения нужд довольно широкого круга потребителей вполне достаточно умеренного количества аккумулированной энергии.

Схема возможного варианта гибридной солнечной станции показана на рис. 31-33. Поскольку это не просто механическое соединение трех систем преобразования солнечной энергии, а единая взаимосвязанная система, стоимость станции значительно снижается.

Система имеет общий силовой блок для производства электроэнергии с помощью теплоносителя и биотоплива. В свою очередь, тепло и углекислый газ, получающиеся при сжигании биотоплива, используются

при выращивании биомассы. В результате система оказывается замкнутой по CO_2, а использование тепла позволяет существенно продлить сезон выращивания биомассы.

В каком же состоянии находятся разработки различных компонентов гибридных солнечных станций, когда можно ждать осуществления этих проектов, какие трудности препятствуют созданию солнечных станций и каковы возможные пути их преодоления?

Наиболее распространены в настоящее время солнечно-термальные станции, что в значительной мере связано с успехами, достигнутыми компанией "Луз". Стоимость энергии, вырабатываемой ее станциями последнего образца, сопоставима со стоимостью энергии тепловых станций.

В настоящее время существует эффективный способ уменьшения стоимости фотоэлектрических станций даже при существующей технологии производства фотобатарей. Он разработан в лаборатории возобновляемых источников энергии МГУ и основан на использовании надувных пленочных концентраторов. Его схема представлена на рис.32. Он состоит из пневмобаллона, изготовленного из тонкой пленки, к внутренней поверхности которого прикреплены две полосы пленки с напыленным металлическим покрытием. Поверхность пневмобаллона, ориентированная к свету, прозрачна. Поверхность со стороны выходного отверстия также может быть прозрачной.

Отражающими плоскостями надувного фоклина служат металлизированные пленки, которые натягиваются за счет натяжения стенок пневмобаллона под действием давления газа. КПД установки может составлять 6-7%.

Отличительной особенностью гибридных станций является то, что их размещение должно производиться на основе учета ряда физических данных, важнейшими из которых являются параметры солнечной радиации.

§ 6. СОЛНЕЧНЫЕ ПЕЧИ

В принципе, используя достаточно большие концентраторы, можно получить в их фокусе очень высокую температуру. Подобные системы лежат в основе так называемых солнечных печей.

Замечательные возможности солнечно-зеркальной энергетики предвидел К. Э. Циолковский. Он писал, что в космическом пространстве "можно непосредственной силой Солнца с помощью зеркал и стекол получить огненные очаги любой величины с температурой от 273 градусов холода до 6000 градусов тепла. Преобразованием солнечной энергии... можно получить до 20000 градусов и более."

В первые послевоенные годы в Ташкенте можно было увидеть чащу десятиметрового параболоида, покрытую квадратиками зеркал. В течение многих лет гигантский железобетонный подсолнух возвышался над

корпусами консервного завода, питая его тепловой энергией. В уникальной по тем временам установке температура в фокусе превышала 1000°С. Современная солнечная печь диаметром 10 м, работающая в армянском отделении ВНИИТ, выполнена из зеркал-фацет, которые установлены на металлическом каркасе. Солнечное излучение подается в печь от гелиостата, следящего за солнцем. Зеркало солнечной печи установлено над гелиостатом и развернуто к земле таким образом, чтобы оптическая ось была вертикальной. Это позволяет проводить плавки в вертикальных тиглях. В фокусе концентратора температура достигает 2000°С. Подобные установки перспективны для решения многих практических задач.

Принцип зеркал-фацет применен в более значительных конструкциях. На юге Франции, вблизи селения Одейо, построена солнечная печь. Северная стена девятиэтажного здания представляет собой параболическое зеркало. Размеры его внушительны - 40х50 м, но состоит оно из слегка закругленных зеркальных элементов. Их здесь 9500. Перед зданием на площади 3000 м разместилось 63 подвижных плоских зеркала (гелиостатов) площадью 45 м^2 каждое. Они направляют солнечные лучи на параболическое зеркало, фокальная зона которого имеет диаметр около 40 см, температура в зоне пятна достигает 3800°С. Отдельными элементами солнечной печи управляет ЭВМ.

В СНГ уже построено и строятся несколько мощных солнечных печей - в Ташкенте, Ереване, Крыму и других местах. В них можно получить рабочие температуры от 2500 до 4000°С. Применение солнечных печей может очень многое дать науке и технике. Сегодня мы вправе говорить о рождении новых областей - гелиохимии и гелиометаллургии. Дело в том, что по сравнению с "классическими" печами солнечные печи обладают рядом существенных преимуществ. Прежде всего они дают возможность получить резкий скачок температуры. Скорость "теплового удара" в них превышает тысячу градусов в секунду. Во-вторых, расплавленное вещество не соприкасается ни с топливом, ни с угольными электродами, которые обычно являются источниками загрязнения продуктов плавки. Проникновению примесей из формы, неизбежному при любых иных способах плавки, препятствует то, что сконцентрированный солнечный луч может плавить вещество в узкой зоне - как бы в форме из того же вещества. Можно вести плавку в окислительной или восстановительной атмосфере. Все это важно для получения особо чистых металлов и сплавов, для производства редкоземельных металлов, например скандия, иттрия, лантана, которые удается выделить из их окислов только при температуре более 2000°С и при условии, что источник энергии не выделяет загрязнений.

Высокотемпературные солнечные установки дадут возможность выплавлять особо чистое стекло для волоконной оптики, способной произвести революцию в технике связи. Солнечные печи очень удобны для порош-

ковой металлургии, для получения химически чистых и тугоплавких материалов, применяемых в авиации, космонавтике и ядерной энергетике.

Важное преимущество солнечных печей состоит в том, что их эксплуатация не оказывает вредных воздействий на окружающую среду.

§7. СОЛНЕЧНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ (СКЭС)

В заключение - немного фантастики, хотя идеи, лежащие в основе этого проекта, в наши дни совершенно не выглядят фантастичными в традиционном смысле этого слова. Есть место, где Солнце светит всегда, а параметры излучения постоянны, вне зависимости от географической широты, времени суток и года, день там не сменяется ночью, лето - зимой, нет облаков или атмосферы, которые могли бы ослабить солнечные лучи. Открытый космос - лучшее место для размещения солнечных электростанций.

В 1968 г. американским ученым Глазером был предложен и в настоящее время серьезно обсуждается проект создания на гелиостационарной орбите солнечной космической электростанции (СКЭС) с полупроводниковым СЭ, энергия которой передается на Землю в виде СВЧ в дециметровом диапазоне. Необходимо отметить, что первый проект, предусматривающий крупное масштабное преобразование космического солнечного излучения в электрическую энергию для питания двигателей гелиоракетоплана, был предложен и разработан В. П. Глушко в 1928-1929 гг.

Что же представляет собой солнечная космическая электростанция? Разместиться она должна будет на так называемой геостационарной орбите - круговой траектории радиусом 35800 км. Обращаясь вокруг Земли за 24 часа, станция движется синхронно с планетой и как бы повисает над определенной точкой ее поверхности (на такие орбиты в наши дни запускают трансляционные спутники связи - широко известные "Экраны" и др.). Станция, находящаяся на такой орбите, свыше 99% времени будет освещаться солнечными лучами. Каждый квадратный метр фотоэлектрических "крыльев" станции получит от Солнца около 1,36 кВт мощности. В принципе нет ничего трудного в том, чтобы построить "крылья" площадью несколько десятков квадратных километров и вырабатывать миллионы киловатт электроэнергии. Согласно одному из проектов солнечная электростанция с двумя "крыльями" размером 5×6 км, каждое при коэффициенте преобразования света в электричество 0,1, сможет давать 5млн. кВт - столько же, сколько дают сегодня наши крупнейшие гидроэлектростанции.

Есть и другой проект, в соответствии с которым вместо фотоэлектрических батарей в космосе из отдельных модулей собираются гигантские зеркала. С их помощью можно сфокусировать солнечные лучи с большой площади на мощный паровой котел, а дальше по привычной

схеме: образующийся перегретый пар вращает турбину, та, в свою очередь, приводит в движение электрогенератор.

Масса оборудования СКЭС мощностью 10 млн. кВт с солнечными батареями составит около 35 тыс. т, а станция с турбогенераторами - более 100 тыс. т. Как же забросить такую махину в космос? Ясно, сборку СКЭС лучше всего, вероятно, проводить на околоземной орбите по частям, используя для их доставки автоматические транспортные корабли, прототипы которых - "Прогрессы" - стали уже привычным атрибутом наших космических экспедиций. Когда станция будет смонтирована, ее с помощью ракетных двигателей медленно и аккуратно - чтобы не создавать больших перегрузок и не повредить конструкции - переведут на геостационарную орбиту.

Допустим, что все проблемы, связанные со строительством СКЭС и выработкой на ней электроэнергии, решены. Станция вырабатывает миллиарды киловатт-часов электричества, но что с ним делать дальше? Энергию ждут потребители на Земле, но как ее туда передать, не по проводам же?

В принципе есть два способа: сделать это либо с помощью лазерного луча, либо с помощью сверхвысокочастотного электромагнитного излучения. Наиболее отработан сегодня второй способ, в расчеты и практическое осуществление которого большой вклад внес выдающийся советский физик, лауреат Ленинской и Нобелевской премий академик П.Л. Капица. Использование электромагнитного излучения сулит огромные выгоды: электричество можно будет перекачивать по волноводам - трубам, подобно нефте- и газопроводам, проложенным под землей.

Но ведь из космоса не проложишь трубу до Земли. А она и не потребуется. В условиях космического вакуума энергия СВЧ-лучей будет распространяться практически без рассеяния и потерь. В атмосфере под действием СВЧ-излучения возникает узкий канал, образованный ионизированными молекулами газа. По этому каналу энергия в форме электромагнитного излучения будет беспрепятственно передаваться на десятки тысяч километров от СКЭС к потребителям на Земле. На ее поверхности чаша приемной антенны диаметром в несколько километров примет СВЧ-излучение, которое затем будет преобразовано в обычный переменный или постоянный ток и поступит в электрическую сеть.

Однако жизнь может внести в этот проект существенные коррективы. Все чаще в земных условиях, желая ограничить протяженность высоковольтных ЛЭП и уменьшить потери электроэнергии, расходы на строительство, непроизводительное отчуждение земель, мы стремимся приблизить энергоемкие производства к источникам энергии. Так почему бы не пойти по этому пути и в космосе?

Принцип размещения на космических орбитах в единственном комплексе со СКЭС таких производств, как металлургия, химия, полупроводниковая электроника, имеет множество достоинств. В условиях кос-

мического вакуума и невесомости легче, чем на Земле, получать особо чистые вещества или материалы заданным распределением компонентов, выращивать однородные большие кристаллы и т.д. Первые эксперименты на советских орбитальных станциях показали перспективность космических технологий, и, безусловно, не за горами стадия промышленного освоения этих новых процессов.

Мы видим, как идея солнечной электростанции в космосе начинает срастаться с идеями космических поселений, "эфирных городов", трансформируясь в проект своеобразного "космического ТПК", подобно тому, как энергетические центры на Земле становятся сердцем территориально-производственного комплекса, включающего в себя различные промышленные предприятия.

Для освоения космического пространства и энергоснабжения будущих космических индустриальных комплексов идея СКЭС весьма актуальна и перспективна, поскольку в этом случае традиционные способы передачи энергии неприемлемы. Однако при оценке схемы крупномасштабного производства энергии для электроснабжения Земли технико-экономические, экологические и социальные факторы являются решающими, и требуется тщательное изучение всех аспектов проблемы.

В первых работах по СКЭС указывалось, что эффективность использования СКЭС на геосинхронной орбите оказывается на порядок выше, чем на Земле. Был проведен более тщательный расчет с учетом зависимости КПД СЭ от спектрального состава излучения и температуры, который показал, что количество электроэнергии, выработанной СКЭС, оказывается в наше время в 1,5-3,5 раза, а в будущем с учетом повышения КПД СВЧ-тракта, в 2,25-5,17 раза больше количества энергии, выработанной наземной СФЭС, установленной в районах от 20° до 55° с.ш.

Если использовать в СКЭС концентраторы, температура СЭ значительно возрастает, но в наземных условиях она может быть сделана более низкой даже при более высокой концентрации излучения, а эффективность использования СЭ на Земле будет более высокой благодаря возможности применения тепловой энергии в промышленности, коммунальных системах отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования.

Учитывая высокую стоимость вывода на орбиту, сборки и обслуживания орбитального комплекса с СКЭС, предполагаемое увеличение выработки электроэнергии в 2-5 раз по сравнению с наземной СФЭС является недостаточным для компенсации затрат, связанных с проектированием и изготовлением комплекса.

Широтная схема расположения наземных СФЭС, объединенных в энергосистему, позволит исключить один из основных недостатков солнечного излучения на Земле - зависимость его от времени и погодных условий. Для создания мировой или региональной энергосистемы в будущем может оказаться целесообразным создание системы спутников и

приемных станций для трансляций с Земли больших потоков энергии с помощью СВЧ или лазерных устройств в районы с интенсивным энергопотреблением. Особенно большое значение передача энергии через спутники-отражатели будет иметь для развития труднодоступных районов Сибири и северных районов России.

Технико-экономические преимущества использования спутников-ретрансляторов не вызывает сомнений, однако должно быть тщательно изучено влияние СВЧ-потоков на биосферу и климат Земли.

Мощные пучки СВЧ-излучения пронзят ионосферу и атмосферу. Как это скажется на их состоянии? А что будет с птицами, попадающими в зону мощного СВЧ-излучения? В принципе СВЧ-лучи представляют опасность и для людей, путешествующих по воздуху. По идее, корпус самолета должен защитить, экранировать экипаж и пассажиров от вредного воздействия лучей. Но не возникнут ли при этом сбои в работе бортовой электронной аппаратуры, гибельные для самолета? Возможно, что какие-то зоны придется объявить запретными для воздушного транспорта. Самого внимательного изучения требует и проблема размещения наземных приемных антенн и их влияние на окружающую среду.

Есть еще одна серьезная опасность. Она, впрочем, может стать препятствием на пути не только СКЭС, но и массового космического транспорта. Современные ракетные двигатели, работающие на химическом топливе, выбрасывают в атмосферу большое количество окислов азота. Накапливаясь в районах космических трасс, они будут влиять на состав и свойства верхних слоев атмосферы. В частности, окислы азота способствуют распаду молекул озона, что в конечном счете может привести к разрушению озонового пояса - своеобразного щита, укрывающего все живое на планете от губительного действия жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Между тем строительство и эксплуатация СКЭС и других объектов космической индустрии потребует создания мощного космического флота, который мог бы регулярно доставлять большие партии грузов. Как поведет себя озоновый пояс под такой огромной нагрузкой, сказать трудно.

Проект солнечной электростанции, предложенный в России, предполагает вывод на геостационарную орбиту системы гелиостатов, отражающих солнечное излучение на наземную приемную станцию, содержащую концентраторы излучения на основе параболойдных отражателей или линз Френеля и полупроводниковые охлаждаемые СЭ. Гелиостаты, выполненные из стекла или тонкой металлизированной пленки, имеют оптические фильтры, отражающие на Землю излучение в диапазоне 0,4-1,1 мкм. Для гелиостационарной орбиты максимальный общий диаметр наземных концентраторов составит 336 км. Площадь СЭ из кремния при концентрации $5 \cdot 10^3$ составит 22,6 км^2, масса - $5 \cdot 10^6$ кг.

Электрическая мощность, вырабатываемая СФЭС, зависит от диаметра гелиостата и наземной станции. При диаметре гелиостата 10 км освещенность СЭ и электрическая мощность будут равны показателям американского проекта при освещенности наземной СФЭС, составляющей только 0,5 Вт/м^2. Оптический КПД гелиостата принят равным 0,85, концентратора - 0,85, пропускание атмосферы в диапазоне 0,4 - 1,1 мкм - 80%.

С увеличением площади гелиостата или наземной станции линейно возрастает освещенность СЭ и электрическая мощность СКЭС. Электрическая мощность СФЭС, соответствующая суммарной установленной мощности на всех электростанциях России, будет получена при диаметре гелиостата 55 км и наземной СФЭС 336 км, при освещенности СЭ примерно 10 Вт/см^2, интенсивности освещения наземной станции 25 Вт/м^2 (0,025 солнечной постоянной).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени достигнут большой прогресс в преобразовании солнечной энергии различными методами. Проведение эффективной политики ускорения перехода к солнечной энергетике является разумной стратегией в условиях всевозрастающего беспокойства по поводу состояния окружающей среды. Солнечная энергетика при ее повсеместном внедрении приводит к формированию нового типа культуры, когда экологические ценности выйдут на первое место.

Однако опыт показывает, что имеется еще ряд вопросов, которые необходимо решить, чтобы внедрить солнечную энергетику. Эти вопросы носят прежде всего психологический, организационный и экономический характер, так как в принципе технологические возможности для широкого внедрения солнечной энергетики существуют. Один из них - вопрос цен на энергию. Несмотря на большой прогресс, достигнутый в прошлом десятилетии в технологии солнечной энергетики и снижении стоимости солнечной станции, многие из них все еще не конкурентоспособны с традиционной энергетикой в силу существующей системы цен на энергию, которая не отражает многие косвенные социальные затраты на производство и использование энергии, включая загрязнение воздуха, опасность ядерной энергетики, влияние глобального изменения климата на экономику, экологию и здоровье людей. Цены с учетом этих факторов были бы значительно ниже для солнечных станций.

Другой проблемой является повышение надежности производства энергии солнечными станциями. Принципиальное решение этой проблемы существует на базе создания гибридных солнечных станций, однако в этой области необходимо проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, основанных на модульном принципе

построения солнечных технологий, предполагающих организацию производства по образцу предприятий, выпускающих массовую продукцию. Лучший подход здесь - содействовать объединению исследователей, производителей и потенциальных потребителей для создания совместных предприятий, ускоряя тем самым продвижение в лаборатории, на заводе и в сфере потребления.

Государственная помощь должна оказываться как фундаментальной, так и прикладной науке, а также внедрению в промышленность технических решений: нужно поощрять разработку, размещение и эксплуатацию системы солнечной энергетики. Выполненные проекты должны стимулировать прогресс технологии и развитие производственных мощностей, при этом затраты должны быть поделены между государством, производителями и потенциальными потребителями.

Главной трудностью является создание промышленной инфраструктуры для солнечной энергетики. Наиболее приемлемые варианты использования будут зависеть от выбранной технологии и района размещения. Характер ресурсов солнечной энергии и технологии предполагают, что, хотя индустрия солнечной энергетики будет, возможно, иметь некоторые структурные особенности, отличные от сегодняшней структуры энергетической индустрии, существующие отрасли имеют возможность помочь солнечной энергетике задействовать весь свой потенциал.

Основные направления работ по солнечной энергетике следующие:

обеспечение благодаря использованию солнечной энергии максимально возможной экономии топлива в народном хозяйстве;

сооружение систем солнечного горячего водоснабжения, отопления и кондиционирования воздуха для жилых домов и общественно-коммунальных учреждений;

строительство сезонных установок для летних баз отдыха, кемпингов, детских лагерей с системами горячего водоснабжения;

создание централизованных систем солнечного теплоснабжения для небольших населенных пунктов и микрорайонов;

строительство для нужд сельского хозяйства гелиотеплиц, гелиосушилок сельскохозяйственной продукции, солнечных опреснителей воды, водоподъемных установок, ферм с системами солнечного тепло- и хладоснабжения, солнечных установок по переработке биомассы;

строительство экспериментальных и опытно-промышленных солнечных электростанций с термодинамическим циклом для комбинированной выработки тепла и электрической энергии;

строительство крупных электростанций с фотоэлектрическим преобразованием солнечной энергии в электрическую, соединенных с энергосистемой или гидроаккумулирующей станцией;

создание и производство малогабаритных фотоэлектрических станций мощностью 0,01-10 кВт для снабжения автономных потребителей;

строительство солнечных высокотемпературных установок для технологических целей, в частности для получения тугоплавких и сверхчистых материалов.

ГЛАВА V. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

§1. Источники тепла в недрах земли

В соответствии с современными представлениями выделение теплоты в недрах Земли связано с совокупностью следующих процессов.

1. Радиоактивный распад элементов: элементы с периодом полураспада, меньшим периода формирования Земли, распались при первоначальном разогреве планетного вещества; распад долгоживущих элементов продолжается в настоящее время. Общее количество теплоты, выделившейся за счет радиоактивного распада, оценивается в $(0,6\text{-}2,0)\cdot10^{31}$ Дж.

2. Воздействие притяжения Солнца и Луны, приводящее к земным приливам и торможению Земли. За счет этого фактора за время существования Земли выделилось до 30% теплоты радиогенного происхождения.

3. Гравитационная деформация материала Земли с образованием плотного ядра и менее плотной оболочки вызвала (по оценкам) выделение $(1,5\text{–}2,0)\cdot10^{31}$ Дж теплоты.

4. Тектонические процессы, вызывающие вертикальные и горизонтальные смещения крупных блоков земной коры и ее упругие деформации, приводят к ежегодному выделению $3\cdot10^{18}$ Дж теплоты.

5. Предполагается, что химические превращения в недрах Земли могли привести к выделению $1,2\cdot10^{31}$ Дж теплоты.

В центре Земли температура находится в пределах 4000–5000 К, в магматических очагах, сравнительно близких к поверхности, достигает 1200-1500 К. Плотность теплового потока из внутренних областей Земли к ее поверхности в среднем составляет $6\cdot10^{-3}$ Вт/м^2. Этому соответствует температурный градиент около 30 К/км. В районах молодых складчатых областей тепловой поток может доходить до 0,3 Вт/м^2 при температурном градиенте 200 К/км и более.

§ 2. Геотермальные ресурсы земли

Геотермальные ресурсы классифицируются по четырем группам:

1) месторождения сухого пара - ресурсы сравнительно легко осваиваются, но встречаются редко;

2) месторождения влажного пара - распространены в большей степени, однако при освоении возникают проблемы, связанные с коррозией и повышенным содержанием солей;

3) горячая вода - ресурсы большие, используются главным образом для отопления в тепличном хозяйстве;

4) теплота сухих горных пород - ресурсы большие, однако технология использования находится в ранней стадии освоения.

По характеру скопления термальные воды делят на трещинно-жильные и пластовые. Трещинно-жильные термальные воды встречаются в горно-складчатых областях и характеризуются локальными выходами термальных источников и парогидротерм с температурой до 370 К и выше.

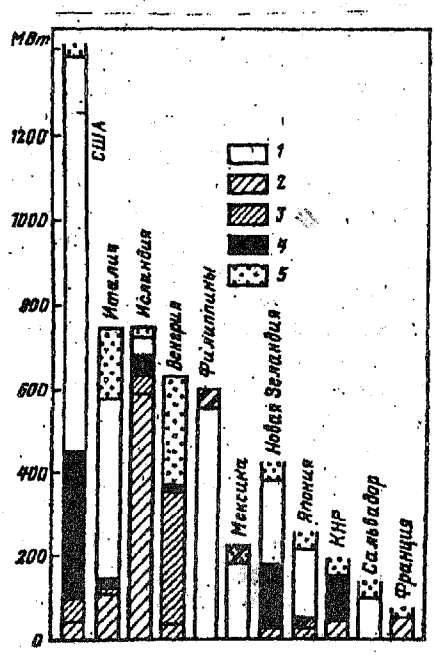


Рис. 34. Современное использование геотермальных ресурсов за рубежом:
1 - для выработки электроэнергии; 2 - для теплоснабжений зданий; 3 - в сельском хозяйстве; 4 - в промышленности; 5 - в бальнеологии.

Пластовые термальные воды залегают в пределах континентальных платформ, краевых прогибов и горных впадин. Такие бассейны могут занимать площади в сотни тысяч и миллионы квадратных километров.

По степени минерализации различают: термальные воды с низкой минерализацией (до 10 г/л), которые могут использоваться без предварительной подготовки; термальные воды со средней минерализацией (10-35 г/л), требующие очистки; термальные воды с высокой термализацией (35-200 г/л и более), которые могут использоваться в двухконтурных схемах.

Наиболее перспективными зонами с большими геотермальными ресурсами являются зоны тихоокеанского и среднеземноморского вулканического пояса, где сосредоточено до 80% всех действующих вулканов на Земле. В отмеченных районах на глубине 1-2 км исследовано более 100 геотермальных систем, в большинстве которых температура около 450 К, в 20 районах более 510 К, в 6 более 570 К, а в геотермальной системе Кампи Флегрей (Италия) -738 К.

В относительно небольшом количестве в парогидротермах преобладает пар с температурой более 500 К, в остальных системах вода.

Данные по геотермальным ресурсам и их практическому освоению представлены на рис. 34.

Активное использование геотермальных ресурсов может оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Основными негативными факторами являются: повышенный уровень шума на выходе из скважины; загрязнение водоемов при сбросе в них термальных вод с повышенным содержанием солей; загрязнение окружающего воздуха попут-

ными газами (H_2S, CH_4, NH_4); тепловое загрязнение окружающей среды; повышение влажности воздуха за счет испарения в градирнях.

Во многих странах проводятся исследовательские работы, направленные на очищение окружающей среды от последствий эксплуатации геотермальных месторождений. Разрабатываются звукогасители, методы закачки использованной воды в пласт, методы предотвращения выброса вредных газов.

§3. Схемы действующих ГЕОТЭС

Типичные примеры тепловых схем действующих ГеоТЭС представлены ниже.

Схема 1 (рис.35). Сухой пар из скважин после отделения в сепараторе твердых включений направляется непосредственно в турбину, оттуда в конденсатор смешивающего типа. Конденсат охлаждается в градирне. Часть охлажденного конденсата используется для конденсации пара, вышедшего из турбины, а остальная - закачивается обратно в пласт. Пример реализации такой схемы - блоки ГеоТЭС "Гейзеры", введенные в эксплуатацию до 1979 г.

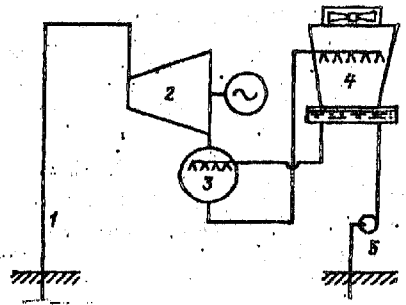


Рис. 35. Схема ГеоТЭС, работающей на сухом паре с кондиционером смешивающего типа:
1 - пар из скважины; 2 - турбина; 3 - смешивающий конденсатор; 4 - градирня; 5 - закачка в пласт.

Схема 2 (рис.36). Отличается от предыдущей тем, что пар после турбины направляется в конденсатор поверхностного типа, а сопутствующие газы отводятся эжектором и очищаются от сероводорода. По такой схеме работают блоки ГеоТЭС "Гейзеры", введенные в эксплуатацию после 1979 г.

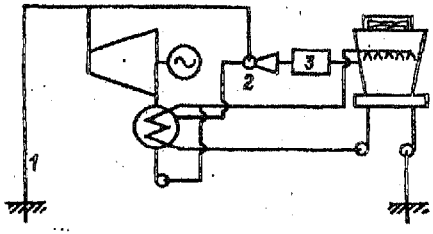


Рис. 36. Схема ГеоТЭС, работающей на сухом паре с конденсатором поверхностного типа:
1 - пар из скважины; 2 - эжектор; 3 - система удаления H_2S.

Схема 3 (рис.37). Используется в тех случаях, когда в геотермальной среде преобладает вода. Пароводяная смесь поступает в сепаратор, в котором пар отделяется от жидкости и направляется в турбину, а рассол закачивается обратно в пласт.

Схема 4. (рис.38). Отличается от схемы 3 наличием, кроме сепаратора, еще и расширителя. Использование расширителя усложняет схему, обуславливает необходимость использования двух паровпусков в турбины, но позволяет существенно (на 15-20%) повысить выработку электроэнергии на единицу массы рассола, поднимаемого из скважины.

Вторая ступень расширения воды могла бы еще более увеличить степень использования рассола, однако из-за большого усложнения схемы этот вариант оказывается экономически невыгодным и практически не используется. По схеме с сепаратором и расширителем работает установка мощностью 50 МВт на японской ГеоТЭС Хочебару, установка мощностью 40 МВт на станции Эль Сальвадор (Сальвадор).

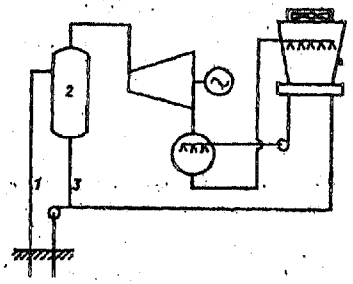


Рис. 37. Схема ГеоТЭС, работающей на пароводяной смеси с одноступенчатым расширением:
1 - пароводяная смесь из скважины; 2 - расширитель; 3 - закачка в пласт.

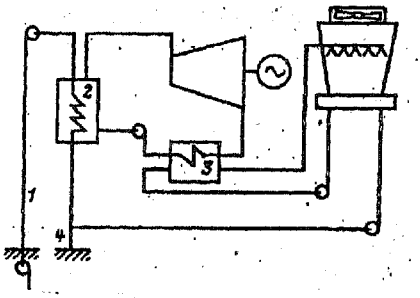


Рис. 38. Схема ГеоТЭС, работающей на пароводяной смеси с двухступенчатым расширением:
1 - пароводяная смесь из скважины; 2 - первая ступень расширителя; 3 - вторая ступень расширителя; 4 - закачка в пласт.

Схема 5 (рис.39). Двухконтурный цикл, в котором геотермальная среда передает теплоту в промежуточном теплообменнике другому рабочему телу. Преимущества двухконтурного цикла:

1) более полное использование теплоты рассола и закачка его в пласт с меньшей температурой;

2) возможность использования геотермальных сред с пониженной температурой;

3) агрессивные компоненты геотермальной среды не попадают в турбину, конденсатор и другое оборудование, что обеспечивает более длительный срок их эксплуатации;

4) сопутствующие вредные газы не попадают в окружающую среду.

Одной из проблем при использовании двухконтурных циклов является необходимость установки погруженных насосов для поддавливания геотермальной среды и обеспечения ее однофазности в промежуточном теплообменнике. Продолжительность работы таких насосов невелика из-за большой агрессивности среды, в которой они находятся.

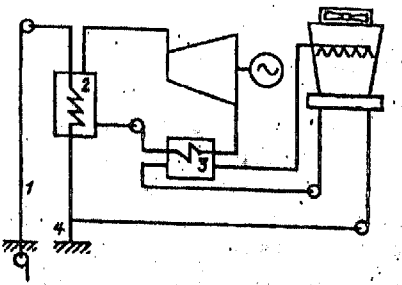


Рис. 39. Схема ГеоТЭС с бинарным циклом: 1 - пароводяная смесь (рассол) из скважины; 2 - парогенератор второго контура; 3 - поверхностный конденсатор; 4 - закачка в пласт.

В России в настоящее время подземная теплота используется для выработки электроэнергии на Паужетской ГеоТЭС (Камчатка). Мощность станции 11 МВт, параметры пара в устье скважин: температура 417-473 К, давление 0,2-0,4 МПа; глубина скважин 220-480 м. Минерализация воды 1,0-3,4г/л. Конденсация неконденсирующихся газов: CO_2 500 мг/кг, H_2S 25 мг/кг, NH_3 15 мг/кг. Вода после сепаратора, имеющая температуру 370-380 К, частично используется для теплоснабжения, частично сбрасывается в реку.

Более мощная ГеоТЭС проектируется в районе Мутновского месторождения. Здесь выявлено четыре перспективных участка: Дачный, Северо-Мутновский, где скважины дают сухой насыщенный пар, Жирновский и Западный, где геотермальная среда представлена пароводяной смесью. В соответствии с особенностями геотермального теплоносителя тепловые схемы блоков на этих участках различаются. Разработанный в ЭНИН им. Г. М. Кржижановского предварительный вариант тепловой схемы Мутновской ГеоТЭС на Дачном и Северо-Мутновском месторождениях предусматривает подачу сухого пара из скважин непосредственно в турбину и последующей закачкой части конденсатора в пласт. На Западном и Жирновском участках планируется реализовать тепловую схему с сепаратором и расширителем. В обоих случаях предполагается использование смесительных конденсаторов и вентиляторных градирен с закачкой термальных вод в пласт. Общая мощность проектируемой Мутновской ГеоТЭС составит 200 МВт.

§ 4. Достоинства и недостатки геотермальной энергетики

Геотермальная энергия всегда привлекала людей возможностями полезного применения. Главным достоинством геотермальной энергии является ее практическая неиссякаемость и полная независимость от условий окружающей среды, времени суток и года. Геотермальная энергия своим "проектированием" обязана раскаленному центральному ядру Земли, с громадным запасом тепловой энергии. Только в верхнем трехкилометровом слое Земли запасено количество тепловой энергии, эквивалентное энергии примерно 300 млрд. т угля. Тепло центрального ядра Земли имеет прямой выход на поверхность Земли через жерла вулканов и в виде горячей воды и пара.

Кроме того, магма передает свое тепло горным породам, причем с ростом глубины их температура повышается. По имеющимся данным, температура горных пород повышается в среднем на 1°С на каждые 33 м глубины (геотермическая ступень). Это означает, что на глубине 3-4 км вода закипает, а на глубине 10-15 км температура пород может достигать 1000-1200°С. Но иногда геотермическая ступень имеет другое значение, например, в районе расположения вулканов температура пород повышается на 1°С на каждые 2-3 м. В районе Северного Кавказа геотермическая ступень составляет 15-20 м. Из этих примеров можно сделать заключение о том, что имеется значительное разнообразие температурных условий геотермальных источников энергии, которые будут определять технические средства для ее использования, и что температура является основным параметром, характеризующим геотермальное тепло.

Существуют следующие принципиальные возможности использования тепла земных глубин. Воду или смесь воды и пара в зависимости от их температуры можно направлять для горячего водоснабжения и теплоснабжения, для выработки электроэнергии либо одновременно для всех трех целей. Высокотемпературное тепло околовулканического района и сухих горных пород предпочтительно использовать для выработки электроэнергии и теплоснабжения. От того, какой источник геотермальной энергии используется, зависит устройство станции.

Если в данном регионе имеются источники подземных термальных вод, то целесообразно их использовать для теплоснабжения и горячего водоснабжения. Например, по имеющимся данным, в Западной Сибири имеется подземное море площадью 3 млн м^2 с температурой воды 70-90°С. Большие запасы подземных термальных вод находятся в Дагестане, Северной Осетии, Чечено-Ингушетии, Кабардино-Балкарии, Закавказье, Ставропольском и Краснодарском краях, Казахстане, на Камчатке и в ряде других районов России.

В Дагестане уже длительное время термальные воды используются для теплоснабжения. За 15 лет откачано более 97 млн.м^3 термальной воды для теплоснабжения, что позволило сэкономить 638 тыс.т условного топлива.

В Махачкале термальной водой отапливаются жилые здания общей площадью 24 тыс.м^2, в Кизляре - 185 тыс.м^2. Перспективны запасы термальных вод в Грузии, которые допускают расход в сутки 300-350 тыс.м^2 с температурой до 80°С. Столица Грузии находится над месторождением термальных вод с метановоазотным и сероводородным составом и температурой до 100°С.

Какие проблемы возникают при использовании подземных термальных вод? Главная из них заключается в необходимости обратной закачки отработанной воды в подземный водоносный горизонт. В термальных

водах содержится большое количество солей различных токсичных металлов (например бора, свинца, цинка, кадмия, мышьяка) и химических соединений (аммиака, фенолов), что исключает сброс этих вод в природные водные системы, расположенные на поверхности. Например, термальные воды Большебанного месторождения (на реке Банная, в 60 км от Петропавловска - Камчатского) содержат различных солей до 1,5 г/л, фтора - до 9 мг/л, кремниевой кислоты - до 300 мг/л. Термальные воды Паужетского месторождения в том же регионе (температура 144 - 200°С, давление на устье скважины 2-4 атм) содержат от 1,0 до 3,4 г/л различных солей, кремниевой кислоты - 250 мг/л, борной кислоты - 15 мг/л, растворенных газов: углекислого – 500 мг/л, сероводорода – 25 мг/л, аммиака - 15 мг/л. Геотермальные воды Тарумовского месторождения в Дагестане (температура 185°С, давление 150-200 атм) содержат до 200 г/л солей и 3,5 –4 м^3 метана в нормальных условиях на 1 м^3 воды.

Наибольший интерес представляют высокотемпературные термальные воды или выходы пара, которые можно использовать для производства электроэнергии и теплоснабжения. У нас в стране эксплуатируется экспериментальная Паужетская геотермальная электростанция (ГеоТЭС) установленной электрической мощностью 11 МВт, построенная в 1967 году на Камчатке.

Однако ее роль в энергообеспечении региона была незначительной. Кроме того, в 1967 году была введена в эксплуатацию экспериментальная ГеоТЭС мощностью 0,75 МВт на низкопотенциальном геотермальном месторождении (температура воды 80°С).

Итак, достоинствами геотермальной энергии можно считать практическую неисчерпаемость ресурсов, независимость от внешних условий, времени суток и года, возможность комплексного использования термальных вод для нужд теплоэлектроэнергетики и медицины. Недостатками ее являются высокая минерализация термальных вод большинства месторождений и наличие токсичных соединений и металлов, что исключает в большинстве случаев сброс термальных вод в природные водоемы.

§ 5 Петротермальная энергия.

Еще не налажено практическое использование залежей "сухого" тепла, аккумулированных в горячих горных породах, так называемых петротермальной энергии. Между тем это наиболее крупные и широко распространенные источники энергии, потому что горячие скальные породы, залегающие, правда, на разных глубинах, есть повсюду.

Промышленное использование петротермальной энергии будет налажено прежде всего в местах с повышенным температурным градиентом, т.е. там, где на глубине не более 2 км температура 80-100°С. Такие

зоны обнаружены в Дагестане, Армении, Западной Украине - районах, где потребности в энергии очень велики. Проведенные оценки показали экономическую целесообразность строительства здесь электростанций.

Так, по прогнозным оценкам, на термоаномальных площадях только европейской части России с глубинными температурами до 150-170°С можно соорудить геотермальные электростанции общей мощностью до 160 млн. кВт.

Утилизация "сухого" глубинного тепла могла бы открыть для энергетики поистине неисчерпаемые возможности. Когда бурение на 8-10 км станет делом технологически освоенным и экономичным, ГеоТЭС можно будет сооружать в любой географической точке, где возникнет надобность в энергетике. Особенно нужной петротермальная энергия может оказаться в районах освоения Сибири и Севера.

Суть проблемы здесь примерно та же, что и в солнечной энергетике: чтобы повысить единичную мощность станции, собирать тепло с как можно большей площади. Есть проекты по созданию больших подземных полостей или разветвленных систем трещин в горных породах обычными или ядерными взрывами. Но для этого требуется тщательно изучить массу вопросов, прежде всего выяснить, не вызовет ли наша столь активная деятельность нежелательных изменений в тектонике земной коры.

ГЛАВА VI. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

§1. Ресурсы ветровой энергии на территории России

Энергия ветра, так же как и солнечная, относится к возобновляемым энергоресурсам. Иногда в быту можно услышать такой термин относительно солнечной и ветровой энергии - даровая, неисчерпаемая. У людей, живущих в местностях, где постоянно дуют ветры, возникала естественная мысль о полезном использовании энергии. Ведь все так просто - поставь ветряк и получай энергию для жилища, освещения маяка, подъема воды из артезианской скважины или других целей - возможности полезного использования энергии разнообразны.

Вот такое сообщение появилось в печати более 100 лет назад в 1887 году: " У Гаевского маяка близ Гавра (Франция) ставят колоссальный ветряной двигатель с целью утилизировать силу ветра для вращения динамоэлектрической машины. Двигатель этот американской системы. Крылья его имеют 12 м в диаметре и весьма прочный станок, в котором на каменном фундаменте, скрепленном железными связками, покоится ось. Ток динамомашины предполагается сначала собирать в аккумулятор и потом уже употреблять его для получения света. Так как на берегу моря безветренные дни редки, то надеются, что количество добываемого этим способом электричества всегда более достаточно для освещения маяка".

Каковы особенности ветровой энергии и условия ее полезного использования? Как следует из опубликованной информации, перемещения воздушных масс, вызванные сложными геофизическими процессами, происходящими над земной поверхностью, характеризуются направлением, скоростью, вертикальным профилем, величиной порывистости, суточными и сезонными изменениями. Теоретически предсказать эти характеристики с достаточной степенью достоверности для конкретного района крайне сложно.

Поэтому пользуются наблюдениями сети метеорологических станций, которые дают возможность получить некоторые среднестатистические показатели для данной местности и должны служить основой для решения вопроса о сооружении ветроэнергетической установки или ветроэнергетической станции.

Считается, что сооружение ветровой установки мощностью до 5-6 кВт экономически оправдано при скорости ветра, превышающей 3,5-4,0 м/с. Для больших установок требуется скорость ветра 5,5-6,0 м/с.

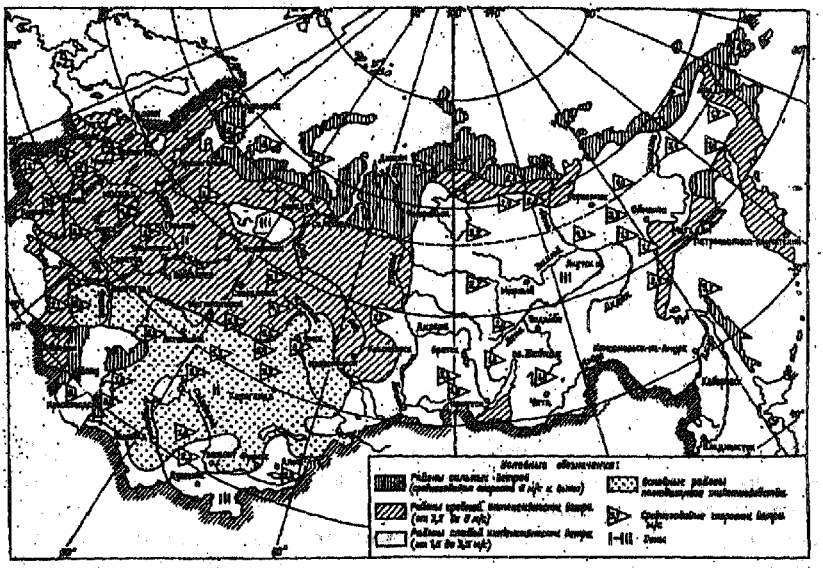


Рис. 40. Схема районирования ветрового режима на территории СССР.

Из зарубежных данных видно, что для сооружения ветровой энергетической установки мощностью в несколько мегаватт предпочтительны районы со среднегодовой скоростью ветра 8 м/с на высоте размещения ветроколеса. Приведем данные о скорости ветра для отдельных районов России (рис.40). Скорости ветра 8 м/с и более наблюдаются в следующих пунктах России (в скобках указаны значения среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м в м/с): Амдерма (8,0), Мархотский перевал в Краснодарском крае (9,3), мыс Желания в Архангельской области (8,0), Пестрая Дресва на Магадане (9,0), Симутир на Курильских островах (10,4), Сюркуль в Хабаровском крае (10,4), гора Эльбрус (8,7). Скорости ветра от 7 до 7,9 м/с характерны для следующих пунктов: Анадырь (7,6), Вайда-Губа в Мурманской области (7,5), Ванкарем (7,9), Гижига в Магаданской области (7,9), Колюгино на Чукотке (7,4), Кресты на Таймыре (7,3), Петропавловск-Камчатский (7,0), Шумшу на Сахалине (7,9).

В то же время в районах восточнее реки Енисея до побережья Охотского моря преобладают ветры слабой интенсивности - от 1,5 до 3,5 м/с; только на самом побережье она повышается.

Из этого перечня можно увидеть определенную закономерность - высокие скорости ветра характерны для морских побережий и горных перевалов. Эта закономерность подтверждается также зарубежными исследователями. Например, западногерманские специалисты, изучавшие воз-

можность создания системы мощных ветровых электростанций в Германии, сообщает о том, что скорости ветра на Балтийском побережье Германии находятся в интервале 6-7,5 м/с, во внутренних же районах эти значения меньше. Одновременно они приводят данные о периоде затишья. Оказалось, что периоды затишья (штиля) наблюдаются, как правило, летом, на морском побережье Германии продолжительностью 7-10 ч, во внутренних районах страны - 16-30 ч максимально до 130 ч. Эти же специалисты указывают еще на одну деталь при определении скорости ветра.

Систематические метеонаблюдения и определения скорости ветра ведут, как правило, на высоте 10 м, а ветроколесо расположено на высоте 100 м. По этой причине нахождение расчетной скорости на высоте 100 м осуществляется путем экстраполяции, которая не всегда дает надежные результаты. Экономически приемлемой считается работа ветровой установки в течение примерно 2500 ч/год. Сразу же возникает вопрос: что делать потребителю в то время когда, ветра нет или его скорость недостаточна для обеспечения работы установки? В этом случае имеется несколько возможностей. Одна из них - использование резервного источника энергии, в частности подключение другой энергосистемы. Другой вариант предусматривает работу ветровой установки в комбинации с аккумулятором энергии (механическим, тепловым или электрическим). Зарубежные специалисты отмечают, что только аккумулирование энергии одной или нескольких ветровых установок экономически невыгодно. Целесообразно применять аккумуляторы ветровой установки в комбинации с энергосистемой, причем рекомендуется иметь их электроемкость 1-2 кВт/ч на 1 кВт установленной мощности ветровой установки. Наконец, третий вариант - это комбинация ветровой и солнечной электростанции, которые в принципе могут резервировать друг друга.

§2. Принципы преобразования ветровой энергии

Кинетическая энергия потока воздуха, занимающего объем V, имеющего плотность ρ и движущегося со скоростью v,

$$E = \frac{1}{2}\rho V \cdot v^2 .$$

Мощность ветрового потока, проходящего через площадь S,

$$N = \frac{1}{2}\rho v^3 \cdot S .$$

С помощью ветроэнергетической установки в механическую энергию может быть преобразована только часть энергии ветрового потока. Отношение кинетической энергии ветрового потока Ев, преобразованной с помощью ветровой турбины в механическую энергию, к кинетической энергии невозмущенного ветрового потока Е называется коэффициентом мощности, или коэффициентом использования энергии ветра

$$\xi_p = \frac{E_в}{E}$$

С учетом коэффициента мощности мощность ветротурбины

$$N_в = \frac{1}{2}\xi\rho \cdot v^3 \cdot S \ .$$

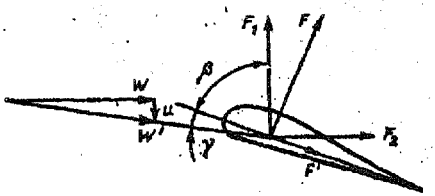


Рис. 41. Силы, действующие на лопасть, движущуюся в ветровом потоке.

В большинстве конструкций ветроэнергетических установок для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию используется принцип подъемной силы крыла (рис. 41).

Если лопасть, имеющая профиль крыла, омывается ламинарным потоком воздуха, то за счет разной скорости воздуха в нижней и верхней части лопасти возникает разное давление и на лопасть действует подъемная сила F и сила лобового сопротивления F'. При разработке профиля стремятся к тому, чтобы сила F была максимальной, а сила F' - минимальной. Сила F_1 обеспечивает перемещение лопасти в плоскости ее вращения, сила F_2 воспринимается опорой. Угол β между хордой лопасти и направлением движения лопасти называется углом установки, угол γ между хордой и направлением относительной скорости ветра w' - углом атаки. Угол β зависит только от ориентации лопасти, угол γ - от скорости ветра и скорости перемещения лопасти. Скорость v перемещения элемента лопасти зависит от расстояния r этого элемента, от оси вращения и от частоты вращения ω:

$$v = r\omega \ .$$

Таким образом, при фиксированном угле установки угол атаки γ на разных участках лопасти оказывается разным. Чтобы выдержать угол атаки в пределах оптимального, прибегают к закрутке лопасти по его длине.

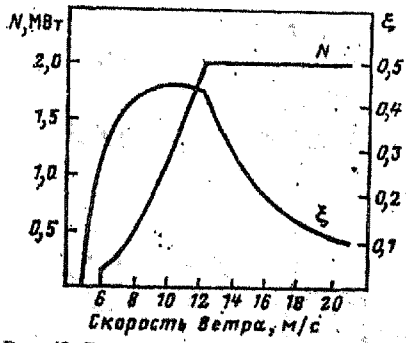


Рис. 42. Зависимость мощности ветровой турбины и коэффициента использования ветра от скорости ветра

В большинстве современных ветровых турбин с помощью специальных устройств (центробежных, гидравлических и других) обеспечивается возможность поворота всей лопасти или ее части, изменения за счет этого угла атаки и регулирования мощности на валу по заданному закону.

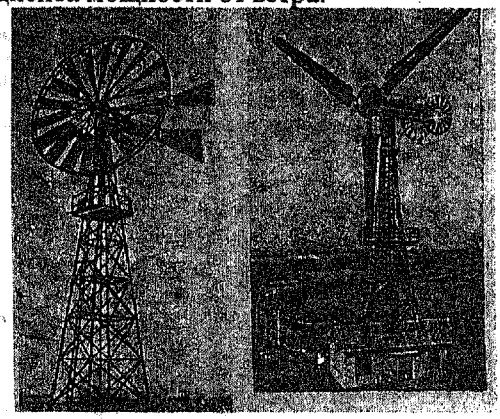
При скорости ветра, меньшей номинальной, лопасть разворачивается таким образом, чтобы угол атаки был оптимальным и коэффициент использования ветра максимальным. При скорости ветра, большей номинальной, разворотом лопасти добиваются уменьшения коэффициента использования энергии ветра до значения, при котором мощность на валу соответствует номинальной. На рис. 42 на примере ветровой турбины номинальной мощностью 2МВт показана зависимость мощности и коэффициента мощности от ветра.

Угол атаки γ, определяющий коэффициент мощности ξ_p, зависит от скорости ветра w и частоты вращения ротора ω. В силу этого коэффициент мощности удобно выражать с помощью параметра, учитывающего и w и ω. Таким параметром является коэффициент быстроходности

$$Z = \frac{r\omega}{w},$$

где r - максимальный радиус окружности, ометаемой ротором.

Ветровые турбины различных типов имеют существенно отличающиеся зависимости коэффициента использования энергии ветра от коэффициента быстроходности (рис. 43).



Крыльчатый многолопастный *ветровой двигатель*

Полуавтоматическая *ветроэлектрическая* станция Д-20 с тепловым резервным двигателем

Рис. 43

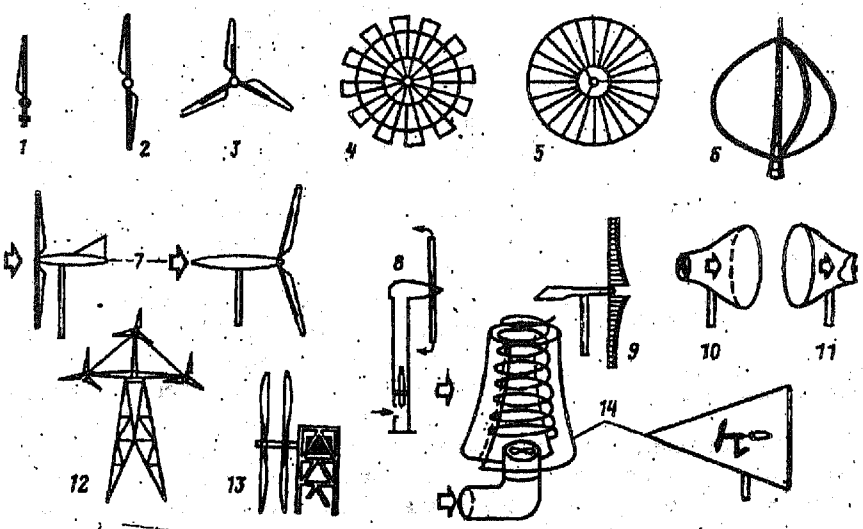


Рис. 44. Принципиальные конструкции основных типов ветровых турбин: 1 - однолопастный ротор; 2 - двухлопастный ротор; 3 - трехлопастный ротор; 4 - многолопастный ротор; 5 - ро тор типа велосипедное колесо; 6 - Ротор Дарье; 7 - с горизонтальной осью вращения; 8 - с пневмопередачей мощности; 9 - Парусного типа; 10 - с диффузором; 11 - с концентратором; 12 - многороторная; 13 - двухроторная; 14 - вихревые

На рис. 44 представлены принципиальные конструкции основных типов ветровых турбин.

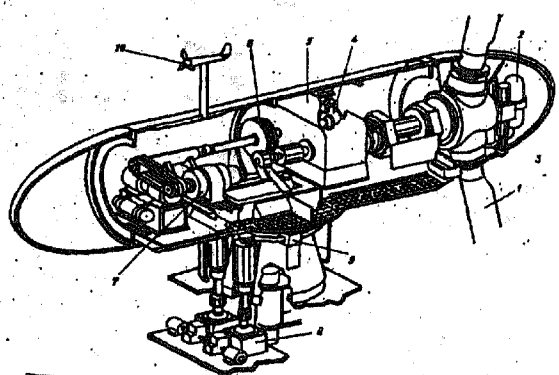


Рис. 45. Основные узлы ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения 1 - лопасть; 2 - система разворота лопасти 3 - втулка; 4 - дисковый тормоз; 5 - мультипликатор; 6 - гидромуфта; 7 - генератор; 8 - механизм системы поворота; 9 - тормоз системы поворота; 10 - датчик системы поворота

Пример компановки основных узлов ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения показана на рис.45.

§3. Достоинства и недостатки ветроэнергетики

Каковы недостатки ветровых энергетических установок?

Прежде всего их работа неблагоприятно влияет на работу телевизионной сети. Вот какой любопытный пример можно привести в этой связи. Несколько лет тому назад от жителей Оркнейских островов (Великобритания) стали поступать необычные жалобы. Оказалось, что при работе ветровой станции, построенной на одном их холмов, возникают такие сильные помехи в работе телевизионной сети, что на экранах телевизоров пропадает изображение. Выход нашли в строительстве рядом с ветровой установкой мощного телевизионного ретранслятора, который позволил усиливать телевизионные сигналы. По имеющимся данным, ветровая энергетическая установка мощностью 0,1МВт может вызвать искажение телевизионных сигналов на расстоянии до 0,5 км.

Другая неожиданная особенность ветровых установок проявилась в том, что они оказались источником достаточно интенсивного инфразвукового шума, неблагоприятно действующего на человеческий организм, вызывающего постоянное угнетенное состояние, сильное беспричинное беспокойство и жизненный дискомфорт. Как показал опыт эксплуатации большого числа ветровых установок в США, этот шум не выдерживают ни животные, ни птицы, покидая район размещения станции, т.е. территории самой ветровой станции и примыкающие к ней становятся непригодными для жизни людей, животных и птиц.

Однако главный недостаток этого вида энергии наряду с изменчивостью скорости ветра - это низкая интенсивность, что требует значительной территории для размещения ветровой установки. Из проведенных специалистами расчетов следует, что оптимальным для ветрового колеса является диаметр 100 м. При таких геометрических размерах и плотности энергии на единицу площади ветрового колеса 500 Вт/м^2 (скорость ветра 9,2 м/с) из ветрового потока можно получить электрическую мощность, близкую к 1 МВт. На площади 1 км^2 можно разместить 2-3 установки указанной мощности с учетом того, что они должны находиться одна от другой на расстоянии, равном трем их высотам, чтобы не мешать друг другу, и не снижать эффективности своей работы.

Примем для оценки, что на площади 1 км^2 размещено 3 установки, т.е. с 1 км^2 можно снять 3 МВт электрической мощности. Это означает, что для размещения ветровой станции электрической мощностью 1000 МВт нужна площадь, равная ` 330 км^2. Если сравнивать ветровые и тепловые электростанции по энерговыработке в течение года, то полученное значение следует увеличить не менее чем в 2-3 раза. Для сравнения укажем, что площадь Кур-

ской АЭС мощностью 4000 МВт вместе с вспомогательными сооружениями, водоемом-охладителем и жилым поселком составляет 30 км², т.е. на 1000 МВт электрической мощности приходится 7,5 км². Другими словами, размер территории ветровой станции в расчете на 1000 МВт на 2 порядка превышает площадь, занимаемую современной АЭС.

Приведенная оценка расхода земельных ресурсов для размещения мощной ветровой электростанции, во первых свидетельствует о необходимости тщательного выбора площадки для нее, имея в виду использование бросовых земель, не пригодных для сельскохозяйственного оборота; во-вторых, ставит вопрос о целесообразности сооружения менее мощных ветровых станций для снабжения энергией небольшого района или населенного пункта. Создание таких электростанций (вместе с аккумулятором энергии) может оказаться полезным для электрообеспечения отдаленных поселков и деревень, а также различных сельскохозяйственных работ.

Несмотря на это, отдельные ученые считают, что следует развивать крупномасштабную ветроэнергетику. Перед войной у нас в стране только в колхозах и совхозах работало более 8000 ветровых установок. В 1930г. на базе отдела ветродвигателей ЦАГИ был создан Центральный ветроэнергетический институт, в 1938 г. было организовано конструкторское бюро по ветровым энергетическим установкам. В предвоенные годы и после войны было разработано и выпущено довольно большое число (примерно 10 тыс.шт.) разнообразных ветровых установок. Интенсивная работа по использованию энергии ветра ведется в ряде зарубежных стран.

Итак, можно указать следующие достоинства и недостатки энергии ветра: отсутствие влияния на тепловой баланс атмосферы Земли, потребления кислорода, выбросов углекислого газа и других загрязнителей, возможность преобразования в различные виды энергии (механическую, тепловую, электрическую), но при этом низкая плотность энергии, приходящейся на единицу площади ветрового колеса; непредсказуемые изменения скорости ветра в течение суток и сезона, требующие резервирования ветровой станции или аккумулирования произведенной энергии; отрицательное влияние на среду обитания человека и животных, на телевизионную связь и пути сезонной миграции птиц. Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о технической осуществимости и целесообразности сооружения и эксплуатации ветровых энергетических установок небольшой мощности для удаленных поселков и отгонных пастбищ, а также в аграрном секторе.

§ 4. Ветроэлектрические станции

Ветроэлектрическая станция - установка, преобразующая кинетическую энергию ветра в электрическую энергию. Состоит она из ветродвигателя, генератора электрического тока, автоматического устройства управления работой ветродвигателя и генератора, сооружений для их ус-

тановки и обслуживания. На период безветрия ветроэлектрическая станция имеет резервный тепловой двигатель. Различают крылатые ветродвигатели с коэффициентом использования энергии ветра до 0,48, карусельные и роторные, с коэффициентом использования не более 0,15 и барабанные. Ветродвигатели применяют в ветроэнергетических установках, которые состоят из ветроагрегата, устройства, аккумулирующего энергию или резервирующего мощность, и систем автоматического управления и регулирования режимов работы установки. Различают ветроэнергетические установки специального назначения (насосные или водоподъемные, электрически зарядные, мельничные, водоопреснительные и т.п.) и комплексного применения (ветросиловые и ветроэлектрические станции). Мощность ветроэнергетических установок - от 10 до 1000 Вт.

На рис. 43 показаны крыльчатый многопластовый ветродвигатель и полуавтоматическая ветроэлектрическая станция Д-20 с тепловым резервным двигателем.

ГЛАВА VII. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

§1. Характеристика гидроэнергетики

Первоначально энергию потока воды использовали в приводах рабочих машин - мельниц, станков, молотов воздуходувок и т.д. С изобретением гидравлической турбины, электрической машины и способа передачи электроэнергии на значительные расстояния гидроэнергетика приобрела новое значение уже как направление электроэнергетики, связанное с освоением водной энергии путем преобразования ее в электрическую на гидроэлектрических станциях (ГЭС). ГЭС являются мобильными энергетическими установками, выгодно отличающимися от тепловых электростанций в отношении регулирования частоты, покрытия пиковых нагрузок и обеспечения аварийного резерва энергосистемы.

Технический потенциал гидроэнергетических ресурсов крупных и средних рек России оценивается мощностью в 240 млн. кВт или 2100 млрд. кВт/ч годовой выработки электрической энергии, а экономически эффективные гидроэнергетические ресурсы составляют около 125 млн.кВт или 1095 млрд.кВт/ч. ГЭС удовлетворяют около 15% общей потребности в электроэнергии. В ряде районов России (особенно в Азиатской части) ГЭС составляют основу энергетического хозяйства.

Однако использование гидроэнергии применительно к нашей стране имеет некоторые особенности. По имеющимся данным, 7% речного стока приходится на реки, впадающие в Балтийское, Черное и Азовское моря, примерно 21% - в Берингово, Охотское, Японское моря, 9% - в Каспийское море и Арал, 63% - в моря Северного Ледовитого океана, то есть основная масса энергоресурсов находится в восточных районах, в то время как большая часть населения проживает в западных и южных районах страны.

Другая важная особенность использования гидроресурсов заключается в значительной неравномерности речного стока во времени, зависящей от разнообразных причин (величины водостока, его рельефа, климатической зоны и т.д.). По данным института "Гидропроект", сток в бассейнах Волги, Дона и Днепра в многоводные годы может превышать среднюю величину в 1,5-2 раза, а в маловодные - уменьшаться до 0,7-0,6 от среднего значения. То же характерно и для других рек. Это ведет к тому, что часть агрегатов ГЭС не работает и выработка электроэнергии существенно падает по сравнению с проектной. Например, в маловодные годы и при низком уровне водохранилища на Красноярской ГЭС работают 1-2 агрегата общей мощностью 500-1000 тыс.кВт вместо установленных 12 агрегатов. Кроме того, проявляется еще одна особенность в эксплуатации гидроресурсов. В летнее время требуется заполнять водохранилище ГЭС, чтобы сравниваться с максимальными нагрузками осенью

и зимой, а вода в этот период требуется для полива сельскохозяйственных культур.

§2. Принципы преобразования гидроэнергии

Гидроэлектрическая станция (ГЭС) - это комплекс сооружений и оборудования, посредством которых энергия водотока преобразуется в электрическую энергию. ГЭС состоит из гидротехнических сооружений, обеспечивающих необходимую концентрацию потока воды создание сосредоточенного напора, а также энергетического оборудования, преобразующего энергию движущейся под напором воды в электрическую.

Основное энергетическое оборудование размещают в здании ГЭС: в машинном зале - гидроагрегаты, вспомогательное оборудование, устройства автоматического управления - пульт оператора-диспетчера или автооператор. Повышающие трансформаторы, как правило, располагаются у продольной стены здания ГЭС на открытом воздухе, распределительные устройства высшего напряжения - на специальных открытых площадках. По напору ГЭС делятся на высоконапорные (более 80 м), средненапорные (от 80 до 25 м) и низконапорные (до 25 м). На высоконапорных ГЭС устанавливает ковшовые и радиальноосевые турбины с металлическими спиральными камерами; на средненапорных - поворотнолопастные и радиально-осевые турбины с железобетонными и металлическими спиральными камерами; на низконапорных - поворотнолопастные турбины в бетонных и железобетонных спиральных камерах, иногда горизонтальные турбины в капсулах или в открытых камерах.

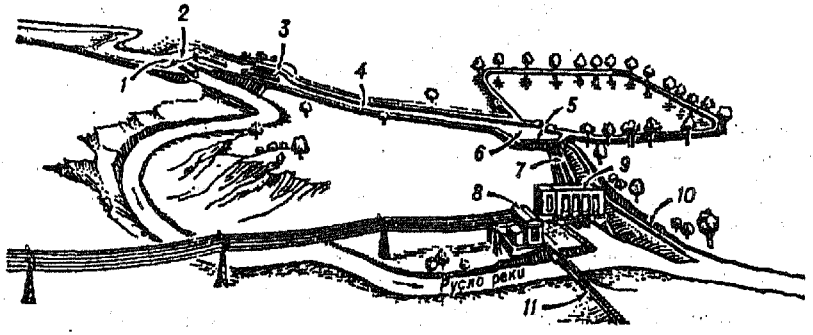


Рис. 46. Схема деривационной гидроэлектрической станции:
1 - плотина; 2 - водоприемник; 3 - отстойник; 4 - деривационный канал; 5 - бассейн суточного регулирования; 6 - напорный бассейн; 7 - турбинный водовод; 8 - распределительная установка; 9 - здание ГЭС; 10 - водосброс; 11 - подъездной путь

Существуют основные схемы ГЭС (рис.46,47): плотинная (с искусственным подпором уровня реки за счет плотины) и деривационная (с отводом воды из русла реки по специальному выводу к месту с большой разностью уровней). В зависимости от особенностей выполнения гидротехнических сооружений различают русловые ГЭС (здание станции входит в состав водонапорных сооружений), приплотинные ГЭС (здание станции располагается за плотиной), деривационные ГЭС. Широкое распространение получили совмещенные ГЭС, у которых здание станции одновременно выполняет функцию водосборного сооружения.

Особое место среди ГЭС занимают гидроаккумулирующие и приливные электростанции. Отдельные ГЭС или каскады ГЭС, как правило, работают в энергосистеме совместно с конденсационными электростанциями, теплоэлектроцентралями, атомными электростанциями, газотурбинными электростанциями. В зависимости от характера участия в покрытии графика нагрузки ГЭС могут быть базисными, полупиковыми и пиковыми.

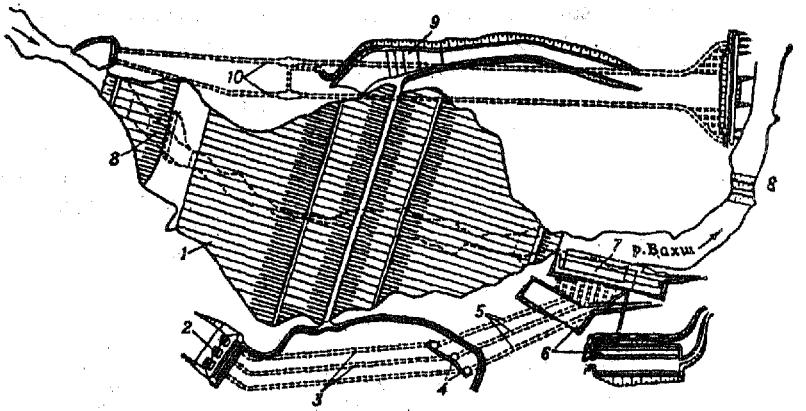


Рис. 47. Схема гидроузла Нурекской ГЭС на р. Вахш: 1 - плотина; 2 - водоприемник ГЭС; 3 - напорные водоподводящие туннели; 4 - уравнительные резервуары; 5 - турбинные водоводы; 6 - открытое распределительное устройство; 7 - здание ГЭС; 8 - верховая и низовая перемычки; 9 - открытый водосброс с отводящим каналом; 10 - строительные туннели

Наиболее крупные гидроэлектростанции в России: Волжская ГЭС им. В. И. Ленина мощностью 2400 МВт, Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС - 2650 МВт, Братская ГЭС (на реке Ангара) - 4500 МВт, Красноярская ГЭС (на реке Енисей) - 6000 МВт, Саяно-Шушенская ГЭС (на реке Енисей) - 6400 МВт. На рис.46, 47, 49 показаны схемы некоторых типов гидроэлектростанций.

§ 3. Гидравлическая турбина

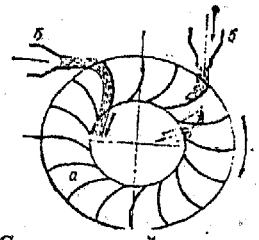


Схема активной гидравлической турбины: а - рабочее колесо; б - сопла

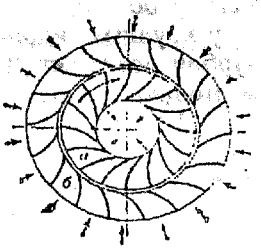


Схема реактивной гидравлической турбины

Схема реактивной гидравлической турбины:
а - рабочее колесо; б - направляющий аппарат

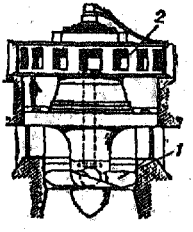
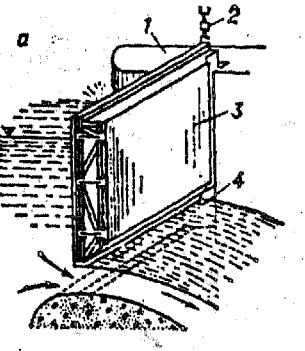
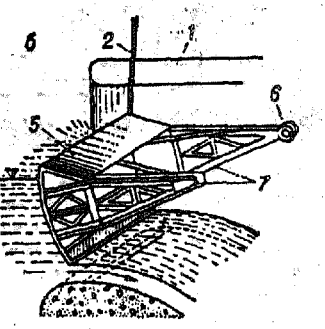
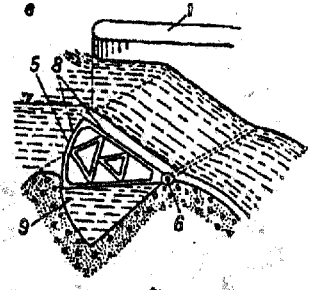


Рис. 48. Гидроагрегат:
1 - гидравлическая турбина; 2 - гидрогенератор







Гидротехнические затворы:
а - плоский; б - сегментный; в - секторный; 1 - бык; 2 - тяга; 3 - тело затвора; 4 - паз; 5 - затвор; 6 - шарнирная опора; 7 - ноги затвора; 8 - обшивка; 9 - ниша затвора

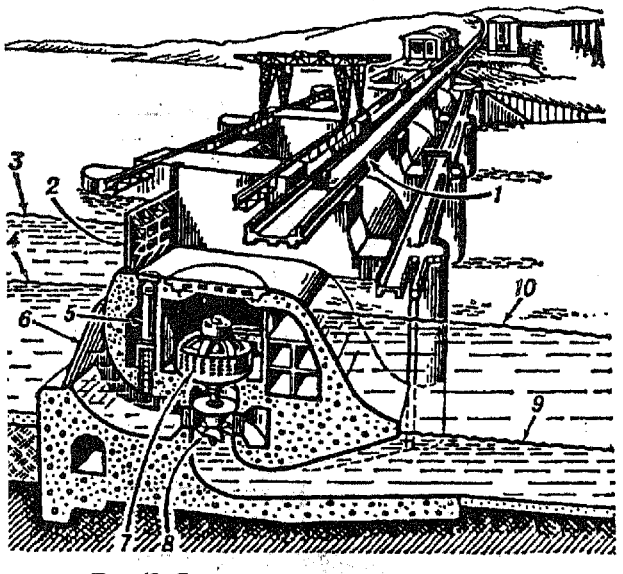


Рис. 49. Схема гидроэлектрической станции:
1 - плотина; 2 - затворы; 3 - максимальный уровень верхнего бьефа; 4 - минимальный уровень верхнего бьефа; 5 - гидравлический подъемник; 6 - сороудерживающая решетка; 7 - гидрогенератор; 8 - гидравлическая турбина; 9 - минимальный уровень нижнего бьефа; 10 - максимальный паводковый уровень

Гидротурбина (рис. 48) это лопаточная машина, приводимая во вращение потоком жидкости, обычно речной воды. По принципу действия гидравлические турбины подразделяют на активные (свободоструйные) и реактивные (напороструйные); по конструкции - на вертикальные и горизонтальные. Диаметр рабочего колеса у крупных гидротурбин достигает 10 м, мощность - более 500 МВт. Из активных гидротурбин наибольшее распространение получили ковшовые турбины. Реактивные гидро турбины по направлению потока делятся на осевые и радиально-осевые турбины.

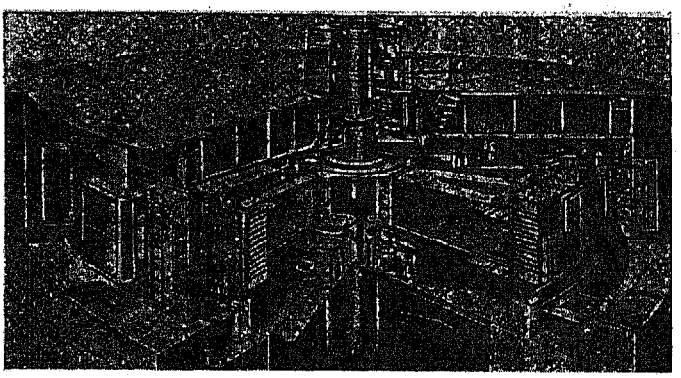


Рис. 50. Гидрогенератор мощностью 508 МВт, установленный на Красноярской ГЭС

К реактивным гидротурбинам одинарного регулирования относят турбины, имеющие направляющий аппарат (либо рабочее колесо) с поворотными лопастями (лопатками). У гидротурбин двойного регулирования и направляющий аппарат и рабочее колесо - с поворотными лопастями. Обычно гидротурбины используются в гидроэлектрических станциях для привода электрических генераторов.

Гидрогенератор - синхронный генератор, приводимый во вращение гидравлической турбиной,(рис.50).

В зависимости от расположения оси вращения различают вертикальные и горизонтальные гидрогенераторы; по частоте вращения - тихоходные (до 100 об/мин) и быстроходные (свыше 100 об/мин). Мощность гидрогенераторов от нескольких десятков до нескольких сотен МВт.

§4. Гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС)

Насосно-аккумулирующая электростанция - гидроэлектрическая станция, принцип действия которой заключается в преобразовании электрической энергии, получаемой от других электростанций, в потенциальную энергию воды (аккумулирование) с последующим - по мере необходимости - преобразованием ее вновь в электрическую энергию, отдаваемую в энергосистему, главным образом на покрытие пиков нагрузки.

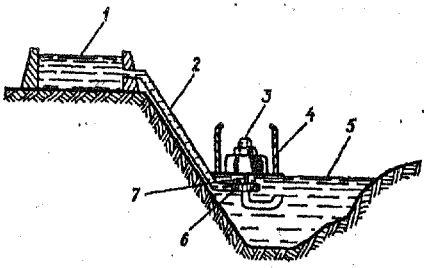


Рис. 51. Схема устройства гидроаккумулирующей электростанции:
1 - верхнее водохранилище; 2 - водовод; 3 - генератор-электродвигатель; 4 - здание ГАЭС; 5 - нижнее водохранилище; 6 - гидротурбина-насос; 7 - вал, на котором размещены гидротурбина-насос и генератор-электродвигатель

ГАЭС состоят из двух бассейнов (водохранилищ), расположенных один над другим и соединенных трубопроводом (рис. 51). Гидроагрегаты, установленные в здании ГАЭС у нижнего конца трубопровода, могут состоять из обратимой электрической машины (генератор-двигатель), гидротурбины и насоса или из обратимой электромашины и обратимой гидромашины, которая может работать как насос или как турбина. В ночные часы ГАЭС перекачивает насосами воду из нижнего бассейна в верхний (аккумулирующий). В периоды пиков нагрузки вода из верхнего бассейна по трубопроводу поступает к агрегатам ГАЭС, включенным на работу в генераторном режиме. Количество аккумулированной энергии определяется вместимостью бассейнов и рабочим напором ГАЭС. Время пуска и смены режимов работы измеряется несколькими минутами.

§ 5. Достоинства и недостатки гидроэнергетики

Гидроэнергия в качестве энергоресурса имеет принципиальные преимущества по сравнению с углем или ядерным топливом. Ее не нужно добывать, как-либо обрабатывать, транспортировать, ее использование не дает вредных отходов и выбросов в атмосферу. В некоторых случаях плотины гидростанции позволяют регулировать речной сток, они надежны, просты в эксплуатации (по сравнению с ТЭС и АЭС), дешевы. Вода водохранилищ может использоваться в сельском хозяйстве для полива, в них можно разводить рыбу. Одним словом, достоинства ГЭС являются достаточно серьезными для принятия решения о их строительстве.

Однако при размещении ГЭС на равнинных реках отчуждаются плодородные пойменные земли, что, безусловно, является отрицательным моментом. Необходимо учитывать также, что с ростом площади водохранилищ ГЭС происходит снижение скорости воды, что неблагоприятно сказывается на их водно-химическом и гидробиологическом режимах. Наличие плотин, в большинстве своем без рыбоподъемников, оказывает серьезное отрицательное влияние на ценные породы промысловых рыб. Наконец, серьезную опасность представляют высотные плотины при их случайном или намеренном разрушении. Указанные недостатки гидроэнергии свидетельствуют о необходимости всестороннего экологического сопоставления вариантов сооружения ГЭС и других альтернативных источников.

Хотелось бы обратить внимание на возможности бесплотинных ГЭС, которые могут быть сооружены на малых реках и даже ручьях. Например, по сообщениям печати, Каджисайский электротехнический завод в Киргизии изготовил опытную микро-ГЭС мощностью 1,5 кВт для установки на небольших ручьях с достаточным напором и подготовил их серийный выпуск. Вес микроГЭС ` 90 кг, ее можно быстро установить на месте, она надежна и проста в обслуживании. Поэтому увеличение числа бесплотинных ГЭС на малых реках может оказаться полезным для удовлетворения энергопотребностей поселков и деревень. Это тем более необходимо в связи с исчерпанием гидроресурсов в европейской части России и необходимостью передачи энергии из Сибири.

§ 6. Возможности получения энергии из океана

Есть несколько технических разработок получения энергии из океана, хотя его вклад в энергетический баланс даже в перспективе оценивается невысоко.

Энергия приливов

Первая возможность - это использование энергии приливов. Во время прилива уровень морской воды повышается, и этим можно воспользоваться для заполнения какого-либо резервуара. На пути потока воды можно поставить турбину, которая будет вырабатывать электроэнергию. Обратный поток воды во время отлива также может вращать турбину, если ее конструкция обеспечивает возможность прямого и обратного вращения и выработки при этом электроэнергии.

В мире эксплуатируются несколько экспериментальных приливных электростанций (ПЭС). У нас в стране на побережье Баринцева моря с 1968 г. работает Кислогубская ПЭС, на которой установлены 2 турбины по 400 кВт каждая. Большая приливная станция эксплуатируется на реке Ла-Ранс (Франция), ее мощность - 240 тыс.кВт. Имеются проекты сооружения других приливных станций. Например, в устье реки Северн (Англия), имеющей самый высокий уровень прилива на Земле, разработаны различные варианты сооружения станций. Мощность турбогенераторов этой станции составляла по проекту 7,2 млн.кВт. Правительственный комитет, рассматривающий этот проект, рекомендовал провести изучение возможного влияния ее на окружающую среду, определения ее экономической эффективности и т.д.

На схожем с приливными принципе могут работать электростанции, использующие энергию морских волн.

Один из вариантов волновой электростанции таков: морские волны периодически сжимают воздух, находящийся внутри вертикально расположенной камеры. Выходя из камеры, воздух приводит в движение лопасти турбины. Опускаясь, волна создает внутри цилиндра вакуум, в результате чего извне засасывается воздух, который продолжает вращать турбину. Главная трудность заключалась в том, чтобы обеспечить вращение турбины в одном и том же направлении при прямом и обратном токе воздуха.

В другой конструкции используется резервуар, размещаемый выше уровня моря и соединенный наклонным каналом с его поверхностью. При волнении морская вода заполняет резервуар, вытекая из него, она вращает турбину. Такая волновая электростанция небольшой мощности была сдана в эксплуатацию в Норвегии в 1985 г.

Рассматривая волновую энергию в качестве одного из возможных энергоресурсов, следует указать на значительную ее неравномерность, связанную с изменением интенсивности воздушного потока над поверхностью морских вод. Тем не менее имеющийся способ эксплуатации волновых электростанций небольшой мощности свидетельствует о полезности их применения.

В настоящее время в ряде зарубежных стран ведутся поисковые работы по изучению возможности использования тепловой энергии океана. По результатам этого изучения можно будет судить о всех достоинствах и недостатках этого вида энергоресурса.

Энергия волн

Мировые запасы волновой энергии составляют около 2,7 млрд.кВт. Проблема состоит в том, чтобы найти эффективные по стоимости способы преобразования энергии движущихся волн в механическую или пневматическую форму, которую можно использовать для привода в действие турбогенераторов. Поскольку у морских волн широкий диапазон длин и амплитуд, любое эффективное устройство либо должно быть широкополосным, либо иметь частотную регулировку. Здесь техническая задача в некотором смысле сходна с задачей использования ветровой энергии.

Интерес к проблеме использования энергии волн особенно проявился в последние 10-15 лет. Широкие исследования с "практическим выходом" создания установок не только опытных, но и для повседневной практики проводятся, например в Японии. Здесь на энергии морских волн действуют свыше 300 буев и маяков. В Англии также начата соответствующая программа. В Эдинбургском университете создана специальная лаборатория с опытным бассейном для эмитации разных видов морского волнения - от легкой зыби до 10-бального шторма, исследования и контроля за ходом процессов. Ведутся подобные работы и в России.

Каков принцип действия волновых электростанций? Каковы возможные технические решения?

1. Использование вертикальных подъемов и спадов волны для привода в действие водяных или воздушных турбин, соединенных с электрогенераторами.

2. Использование горизонтального перемещения волн с помощью устройств флюгерного типа для получения через специальную передачу вращательного движения.

3. Концентрация волн в сходящемся канале, в котором их кинетическая энергия поддерживала бы напор воды, достаточный для привода в действие турбины.

Одно из устройств первой группы представляет собой вертикальную трубу, погруженную нижним открытым концом в достаточно спокойные слои моря и закрытую сверху. Труба закреплена на поплавке. В верхней ее части, в "волновой" камере, вода имеет свободную поверхность. При подъеме волны уровень свободной поверхности в "волновой" камере поднимается и сжимает воздух, который приводит в действие воздушную турбину, соединенную с электрогенератором. При спаде волны через атмосферный

клапан в "волновую" камеру засасывается новая порция воздуха. И далее процесс повторяется. Период колебаний уровня воды - 5-6 с.

Термальная энергия океана

Идея получения энергии за счет разности температур воды в поверхностных и глубинных слоях океана была высказана учеными около 100 лет назад. Но широкие практические исследования в этом направлении развернуты лишь после 1973 г.

Подтверждена принципиальная возможность создания промышленных электростанций на основе использования температурного градиента океанской воды.

Экспериментальные установки работают на Гавайских островах, где разность температур у поверхности воды и на глубине около километра составляет 22 °С. Установка состоит из конденсатора, испарителя, насоса и турбины, работающих в замкнутом цикле. По соединяющим их трубам протекает рабочее тело - фреон. Конденсатор охлаждается поднятой с большой глубины водой при температуре +8°С. Испаритель находится при температуре поверхностной воды +30°С. Перешедший в испарителе в газообразное состояние фреон приводит во вращение турбину, после чего охлаждается в конденсаторе и снова подается на нагрев в испаритель.

Плавучие гидротермические электростанции могут располагаться там, где температурные условия в толще воды наиболее благоприятны и дают наивысший градиент, в том числе в международных водах на необъятных просторах морей и океанов. Более того, такие электростанции могут быть мигрирующими, т.е. они не привязаны к какому-то строго определенному району, а при изменении температурных условий могут перемещаться туда, где градиент температур наибольший и соответственно эффективность их работы наивысшая.

Современная техника позволяет определять наиболее перспективные в этом плане районы с помощью спутников Земли. Но здесь, естественно, возникает проблема: как быть с вырабатываемой электроэнергией? Возможность транспортировки электроэнергии на берег по линиям электропередачи - подводным кабелям - за дальностью расстояния, естественно, исключается. Со временем, конечно, будут отработаны способы передачи электроэнергии на дальние расстояния без проводов. А пока напрашивается вывод: потребители электроэнергии должны быть здесь же, на месте, т.е. сооружаться не просто электростанции, а электротехнологические комплексы, производящие на базе вырабатываемой электроэнергии различные виды вторичной продукции.

Специалисты, занимающиеся проектами использования термальной энергии океана, считают, что подобные установки имеют значительные

преимущества перед другими устройствами, реализующими энергию возобновляемых источников - ветер, солнце или морские волны. Главное из них - постоянство температурного градиента во времени и, следовательно, его надежность. Критическая температурная разность, при которой океанские электростанции становятся рентабельными, 22°С. Таких мест в Мировом океане немало. Еще один аргумент - низкие текущие затраты за счет "бесплатного топлива". Они составляют от 0,02 до 0,08 долл. за 1 кВт/ч.

Крупные океанские электростанции мощностью 200-400 Мвт, смонтированные на плавучих платформах, по мнению их проектировщиков, найдут применение в качестве фабрик по добыче полезных ископаемых из океана. Малые станции мощностью 40-50 МВт будут полезны для развивающихся стран тропического пояса, так как, помимо электроэнергии, они способны опреснять воду. С использованием процессов электролиза можно получать из воды водород и кислород.

ГЛАВА VIII. ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ

§ 1. ТЕРМОДИНАМИКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В основе работы термоэлектрогенераторов (ТЭГ) лежат три термодонамически обратимых термоэлектрических эффектов – Зеебека, Пельтье и Томсона. Термоэлектрическими явлениями принято называть эффекты возникновения в проводящих средах электродвижущих сил и электрических токов под воздействием тепловых потоков и эффекта возникновения теплот, дополнительных к джоулевой теплоте, при протекании электрического тока. Эффект Зеебека, обусловленный перераспределением носителей зарядов вследствие наличия температурного градиента, проявляется в том, что в электрической цепи (рис. 52), составленной из двух разнородных проводников (термоэлектродов А и В), если точки их спаев поддерживаются при разных температурах, возникает электродвижущая сила, называемая термоэдс (ТЭДС):

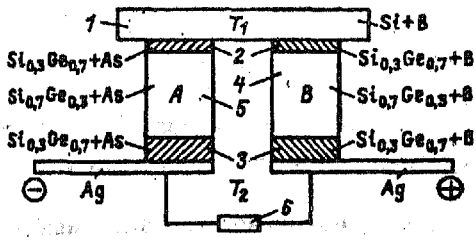


Рис. 52. Схема термоэлектрического элемента:
***1* - соединительная шина горячего спая; *2* - коммутационный припой горячего спая; *3* - коммутационный припой холодного спая; *4* - p-ветвь термоэлемента; *5* - n-ветвь термоэлемента; *6* - нагрузка**

$$\Delta E_{AB}=\alpha_{AB}(T_1-T_2)=\alpha_{AB}\Delta T, \qquad (1)$$

где T_1 и T_2 – температуры горячего и холодного спаев; α_{AB} – коэффициент Зеебека или относительный коэффициент ТЭДС, зависящий от свойств термоэлектродов и температуры. Эффект Пельтье, обусловленный различным распределением носителей зарядов по энергиям в проводниках А и В при одинаковой температуре, заключается в том, что при прохождении электрического тока I через спай А-В в этом спае выделяется или поглощается теплота $Q_п$, пропорциональная току и зависящая от типа контактирующих проводников:

$$Q_п = П_{AB}(T)\cdot I\ , \qquad (2)$$

где $П_{AB}$ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом Пельтье, зависящий от свойств материалов и температуры спая. При данной температуре выполняется условие $П_{AB} = - П_{BA}$, т.е. при изме-

нении направления тока изменяется знак теплоты Пельтье.

Эффект Томсона, обусловленный зависящим от температуры распределением носителей заряда по энергиям в проводнике с током, проявляется в том, что при прохождении электрического тока I через проводник, вдоль которого существует градиент температуры $\frac{dT}{d\ell}$, в нем выделяется или поглощается теплота, пропорциональная току и градиенту температуры:

$$d\,Q_\tau = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{d\ell}\, d\ell, \qquad (3)$$

где dQ_τ – количество теплоты, выделяемое в единицу времени на длине проводника $d\ell$ при условии, что градиент температуры на этом участке равен $\frac{dT}{d\ell}$, а ток I, τ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом Томсона: он зависит от свойств проводника и от температуры, $\tau > 0$ при одинаковом направлении тока и градиента температур.

Соотношение между тремя термоэлектрическими коэффициентами называют соотношениями Томсона:

$$\alpha_{AB} = \tau_B - \tau_A + \frac{\alpha \Pi_{AB}}{\alpha T}; \quad \Pi_{AB} = \alpha_{AB} T. \qquad (4)$$

Термоэлектрический элемент. Простейшей моделью термоэлектрического элемента является цепь, состоящая из двух различных однородных проводящих материалов, спаи которой находятся при различных температурах T_1 и T_2.

Оптимальный коэффициент добротности термоэлектрического элемента:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\left(\sqrt{\lambda_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2}\right)^2}, \qquad (5)$$

где λ – теплопроводность; ρ – удельное сопротивление.

Коэффициент полезного действия при максимальной электрической мощности во внешней цепи:

$$\eta_1 = \eta_K \frac{1}{\frac{4}{ZT_1} + 2 - \frac{1}{2}\eta_K}, \qquad (6)$$

где η_K – КПД цикла Карно.

§ 2. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СОЗДАНИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время в связи с интенсивным освоением космоса и глубин морей и океанов, отдаленных и труднодоступных районов земного шара, возрастает потребность в автономных источниках электроэнергии. Наиболее перспективным методом прямого преобразования энергии, позволяющим создавать автономные источники питания и получившим широкое практическое применение, является термоэлектрический метод.

В связи с микроминиатюризацией радиоэлектронной аппаратуры возникли потребности как в малогабаритных источниках электропитания, так и в миниатюрных охлаждающих и термостабилизирующих устройствах, способных работать при статических и динамических нагрузках, резких температурных колебаниях, в невесомости и безвоздушном пространстве. Успешное решение перечисленных проблем в определенной мере связано с совершенствованием термоэлектрических методов преобразования энергии.

Термоэлектрическая энергетика является сравнительно новой областью техники, и период ее развития насчитывает, по существу, лишь два-три десятилетия. Поэтому представляет несомненный интерес изучение накопленного опыта разработок термоэлектрических материалов (ТЭМ), являющихся основным звеном, обеспечивающим эффективность работы термоэлектрических генераторов (ТЭГ) и термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭОУ), исследование развития технических решений в этой области и выявление наиболее перспективных направлений.

Анализ имеющихся экспериментальных данных в области разработки термоэлектрических материалов свидетельствует о следующем.

1. Основную часть термоэлектрических материалов составляют системы на основе Bi, Te, Se, Sb, Cd, применяемые для создания генераторных и холодильных термоэлектрических устройств.

2. Развитие термоэлектрических материалов идет по пути разработки многокомпанентных систем с введением большого количества легирующих добавок.

3. Разработка многокомпонентных систем идет по пути экспериментального подбора компонентов, входящих в термоэлектрические материалы.

4. Исследование свойств термоэлектрических материалов основано на экспериментальном определении характеристик разработанных составов, что порождает неоправданное количество мелких научно-исследовательских работ в указанном направлении.

Для решения вопроса о выборе состава материала с необходимыми свойствами для целей термоэлектрического преобразования энергии необходимо провести анализ имеющихся в настоящее время термоэлектри-

ческих свойств материалов одно- и двухкомпонентного состава и выявить их закономерности и взаимосвязи.

К термоэлектрическим материалам с точки зрения эффективности преобразования энергии и стабильности их термоэлектрических свойств предъявляются следующие требования.

1. Высокая механическая и электрическая прочность.

2. Слабая температурная зависимость характеристик в рабочем диапазоне температур.

3. Высокая термоэффективность.

4. Высокая технологичность изготовления материалов.

5. Высокая химическая стойкость.

6. Низкая стоимость полупроводниковых термоэлектрических материалов и т.д.

Несмотря на большие достижения в рассматриваемой области, еще есть возможности улучшения термоэлектрических материалов.

Решение проблемы создания высокоэффективных термоэлектрических материалов, как и других – сверхпроводящих, пьезоэлектрических, электроэрозионностойких и т.д. – идет по двум направлениям:

1) разработка новых составов термоэлектрических материалов;

2) усовершенствование технологии их изготовления.

Большую роль здесь также играет выявление взаимосвязи между энергетическим состоянием термоэлектрических материалов и их свойствами.

§ 3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1. Основной характеристикой материалов, идущих на создание термоэлектрических приборов, является термоэлектрическая эффективность, определяемая по формуле:

$$Z=\frac{\sigma\cdot\alpha^2}{\lambda}, \qquad (1)$$

где σ – электропроводность, α – коэффициент термоэдс, λ – коэффициент теплопроводности.

2. Величина термоэдс зависит от свойств материала и диапазона температур, в котором измеряется α. Исследование величины α для различных материалов производится в паре с каким-то другим веществом, поэтому практически невозможно сопоставить величины α для различных материалов, что препятствует осуществлению научного прогноза в области развития термоэлектрических материалов, обеспечивающих эффективное преобразование тепловой энергии в электрическую и наоборот.

Делались попытки теоретически рассчитать значения термоэдс для металлов:

$$\alpha = \frac{1}{3e}\pi^2 K^2 \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\ell}\frac{d\ell}{dE}\right), \qquad (2)$$

где μ – химический потенциал электронов, ℓ – длина свободного пробега электронов с кинетической энергией E.

Выражение для определения α полупроводниковых материалов с учетом как свободных электронов n_-, так и дырок n_+ имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{K}{\sigma}\left\{U_- n_- \left[A + \ln\frac{2(2\pi m_* KT)^{3/2}}{h^3 n_-}\right] - U_+ n_+ \left[A + \ln\frac{2(2\pi m_* KT)^{3/2}}{h^3 n_+}\right]\right\}. \qquad (3)$$

Значение постоянной A зависит от механизма рассеяния электронов.

Однако теоретические формулы для расчета термоэдс как металлов, так и полупроводниковых материалов практической ценности не имели.

3. Электропроводность термоэлектрических материалов - характеристика, которая также с большим трудом поддается теоретическому расчету и до сих пор в основном определяется экспериментальным путем.

4. Теплопроводность термоэлектрических материалов - структурночувствительная характеристика, в значительной степени зависящая от содержания примесей, вида обработки, параметров состояния, также определяется экспериментальным путем.

§ 4. ПОИСКИ СОСТАВОВ, ЛЕГИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Термоэлектрические материалы принято классифицировать как низкотемпературные, среднетемпературные и высокотемпературные.

1. Низкотемпературные – рабочий интервал температур 100–600K. В диапазоне этих температур окисление, диффузия в местах контактов, улетучиваемость примесей и основного вещества идут сравнительно медленно. Исходными компонентами низкотемпературных материалов являются Bi, Sb, Se и Te.

2. Среднетемпературные – рабочий интервал температур 600 – 1000K. К среднетемпературным интервалам относятся PbTe, PbSe, GeTe.

3. Высокотемпературные – рабочий интервал температур 950 ÷2000K. Высокотемпературные термоэлектрические материалы работают в очень жестких условиях: окисляемость, летучесть примесей, давление паров, диффузия и растворимость легирующих добавок и т.д. К ним относятся наиболее изученная система Ge-Si с непрерывным рядом твердых растворов, имеющих температуру плавления от 1230 (Ge) до 1693K (Si).

По составу двухкомпонентные термоэлектрические материалы де-

лятся на:

1) Халькогениды элементов:

I группы - Cu, Ag, Au;

II группы - Zn, Cd, Hg;

III группы - B, Al, Ga, Jn и Tl;

IV группы - P, As, Sb и Bi.

2) Фосфиды: Zn - P, Cd - P.

3) Арсениды: Zn - As, Cd - As.

4) Антимониды: Zn - Sb, Cd - Sb.

Большой интерес как двухкомпонентные термоэлектрические материалы представляют жидкие полупроводниковые системы: AlSb, JnSb, PbSe, PbS, Bi_2Te_3, Bi_2Se_3, Sb_2Te_3, Mg_2Si, Mg_2Sn, Mg_2Pb.

Некоторыми уникальными термоэлектрическими свойствами обладают расплавы солей, к которым относятся: AgF, AgBr, AgJ, AgCl, LiCl, NaCl, KCl, $CdCl_2$, $PbCl_2$, ZnC_2, CuBr, CuJ.

Однако анализ свойств термоэлектрических двухкомпонентных систем свидетельствует об отсутствии функциональных зависимостей между ними. Каждая система исследуется экспериментальным путем. Взаимосвязь между составом двухкомпонентных систем, их свойствами и рабочим интервалом температур также отсутствует.

§ 5. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Технология изготовления термоэлектрических материалов оказывает значительное влияние на их свойства. В настоящее время для изготовления полупроводниковых термоэлектрических материалов применяются все передовые технологии, а именно воздействие на термоэлектрические свойства материалов:

а) температуры и давления;

б) ядерных излучений;

в) магнитных полей – технология, которая в последнее время получает широкое распространение;

г) электрических полей и т.д.

Перечисленные методы позволяют изменять в заданном направлении свойства термоэлектрических материалов, полученных путем:

а) горячего прессования порошков;

б) экструзией;

в) напылением и др.

На эффективность работы ТЭГ влияют значения α, λ, ρ, входящие в коэффициент добротности. Эти величины связаны друг с другом через концентрацию носителей зарядов и транспортные свойства.

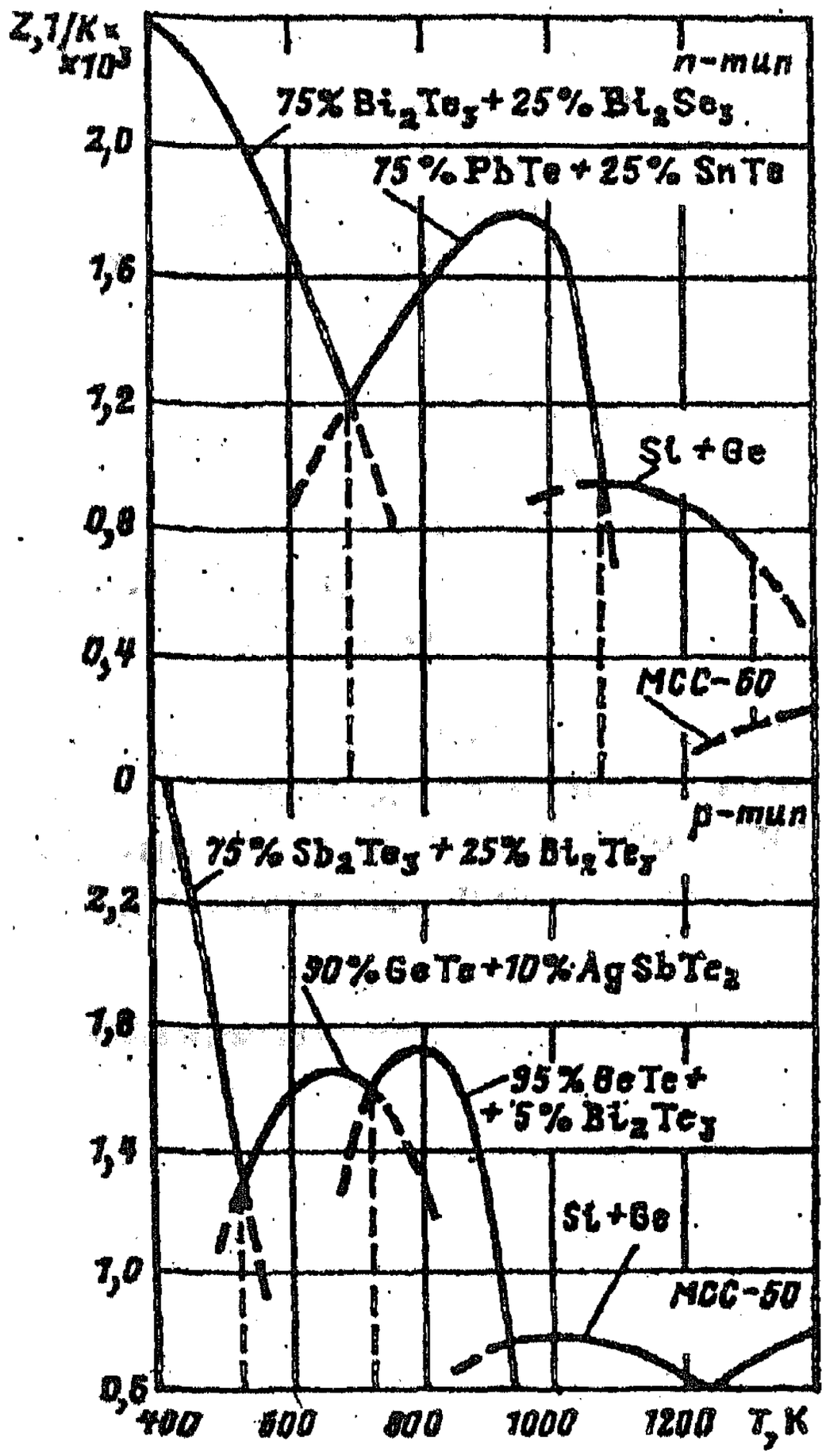


Рис. 53. Температурная зависимость добротности термоэлектрических материалов.

Электропроводимость σ и электронная часть теплопроводности $\lambda_э$ связаны между собой по закону Видемана-Франца.

$$\frac{\lambda_э}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3}\left(\frac{K}{e}\right)T = LT ,$$

где k = 1,38710-23Дж/К – постоянная Больцмана;

e – заряд электрона;

L = 2,457•10-8 Вт/(ОмК²) – число Лоренца.

В связи с этой зависимостью и малостью коэффициента термоэдс Z и η металлических ТЭГ низки и практически не могут быть улучшены независимо от применения любого сочетания металлических пар.

Значительно лучшими термоэлектрическими свойствами обладают полупроводниковые материалы, которые и используются сегодня для создания ТЭГ (рис.53).

§ 6. СХЕМЫ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

В единую электрическую цепь ветви термоэлементов соединяются специальными шинами (рис.52) с использованием коммутационных материалов.

Полупроводниковые материалы в условиях эксплуатации обладают высокой физико-химической активностью. Контактирование металлической коммутационной шины и материала ветвей термоэлементов сопровождается взаимной диффузией материалов, что ведет к отравлению и оксидированию полупроводникового материала.

В настоящее время известно довольно много коммутационных материалов и методов коммутации.

На эффективность ТЭГ существенное влияние оказывают также термические сопротивления на горячей и холодной поверхностях.

Термоэлемент, работающий в интервале температур, должен иметь переменную концентрацию носителей тока по длине. Такой термоэлемент создается из отдельных частей – каскадов с оптимальной концентрацией носителей тока, соответствующих средней температуре. Используют каскады из различных материалов, помещая каждый из них в наивыгоднейший для него температурный диапазон. Это можно сделать двумя путями – сегментированием или каскадированием.

Общий КПД ТЭГ колеблется от 2 до 10% в зависимости от типа, мощности и условий его эксплуатации. В лучших лабораторных образцах эта величина достигает 15%, и есть предположение, что она может быть увеличена до 20–25%.

Из-за высокой стоимости ТЭГ не используются в крупной стационарной энергетике. Область их применения – сравнительно мелкие автономные источники электроэнергии. По-видимому, и в перспективе они будут применяться только в автономных установках небольшой мощности.

ГЛАВА IX. ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

§ 1. КПД ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Термоэмиссионное преобразование энергии основано на использовании двух физических явлений – термоэлектронной эмиссии и контактной разности потенциалов, возникающей между поверхностями двух разнородных тел, электрически связанных друг с другом и имеющих разные работы выхода электрона.

Максимально возможная при данной температуре поверхности и отсутствии электрических полей плотность тока эмиссии определяется по уравнению Ричардсона

$$j_s = AT^2 \exp(-\varphi/KT) \ , \ (1)$$

где $A = 4\pi mek^2h^{-3} = 120{,}4$ А(см^{2}К^2) – универсальная постоянная Ричардсона;

m и e – масса и заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура поверхности; h – постоянная Планка; φ – истинная работа выхода однородной поверхности, эВ, представляющая собой разность между энергией электронов в точке минимального удаления и химическим потенциалом электронов в проводнике. Для электронного газа внутри металла химический потенциал равен энергии Ферми.

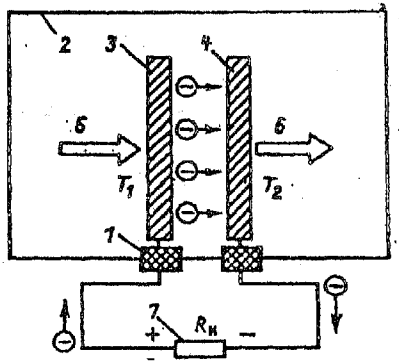


Рис. 54. Принципиальная схема термоэмиссионого преобразователя:
1 **- вакуумно-плотный узел; 2 - герметичный корпус; 3 - эмиттер; 4 - коллектор; 5 - подводимая теплота; 6 - отводимая теплота; 7 - нагрузка.**

Теоретическая формула (1) дает лишь качественно правильные значения тока эмиссии. Поэтому на практике пользуются формулой, в которой φ_R представляет ричардсоновскую работу выхода, а константа $A=A_R$ определяется экспериментально.

Принципиальная схема простейшего термоэмиссионного преобразователя энергии (ТЭП) приведена на рис. 54. Важнейшими характеристиками ТЭП являются работы выхода эмиттера и коллектора.

Идеальным ТЭП называется вакуумный диод, в котором электроны, покидающие эмиттер, беспрепятственно достигают коллектора, отсутствуют джоулевы потери энергии в электродах и токовводах, эмиттер

является изотермическим, а температура коллектора настолько низка, что эмиссионным током с его поверхности можно пренебречь.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) (рис.55) идеального диода определяется распределением электрического потенциала в межэлектронном зазоре (рис.56).

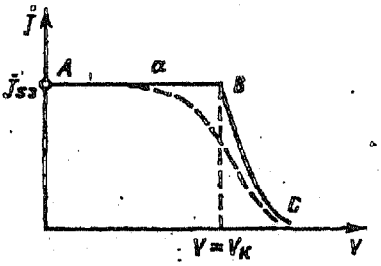


Рис. 55. Вольт-ампертная характеристика ТЭП

Увеличение сопротивления нагрузки и возрастание V (рис. 55, участок BC; рис.56, в) приводит к тому, что ток с эмиттера уменьшается в соответствии с формулой

$$j = j_{s\text{э}} \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_K)^e}{KT}\right). \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия идеального диода в режиме максимальной мощности

$$\eta_{max} = \frac{j_s(\varphi_э - \varphi_K)\frac{1}{e}}{j_s\left(\frac{\varphi_э}{e} + \frac{2KT_э}{e}\right) + \varepsilon\sigma\left(T_э^4 - T_K^4\right)}, \quad (3)$$

где ε – эффективный коэффициент излучения металла в системе эмиттер-коллектор;

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^{2}К^4) – постоянная Стефана-Больцмана;

e – заряд электрона.

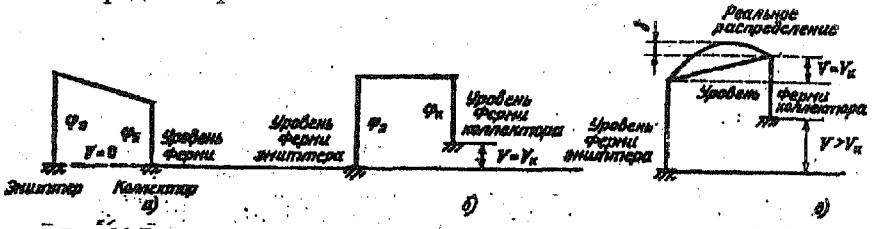


Рис. 56. Распределение электрического потенциала в межэлектродном зазоре: а - режим короткого замыкания V=0; б - режим максимальной мощности: в - режим с j<j$_{s\text{э}}$

Протекание тока через ТЭП связано с наличием в зазоре между эмиттером и коллектором большого количества электронов. Эти электроны создают в зазоре так называемый отрицательный пространственный заряд, приводящий при достаточной его плотности к возникнове-

нию в зазоре потенциального барьера высотой δ, как это показано на рис.5б,в (реальное распределение).

Для получения высокого КПД ТЭП необходимо устранить или скомпенсировать пространственный заряд в межэлектродной области, для чего используют ряд методов. Наиболее простой метод заключается в уменьшении расстояния между эмиттером и коллектором: для получения приемлемой мощности (несколько ватт на см^2) необходимо иметь зазор d не более 0,01 мм.

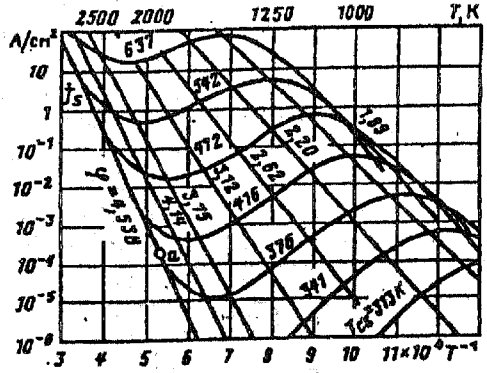


Рис. 57. Эмиссионный ток насыщения с поверхности вольфрама при различных значениях температуры эмиттера и давления паров Cs

При высоких $T_э$ вследствие коробления или разбухания поверхности выдерживать такой малый зазор в течение длительного времени очень трудно. Кроме того, в настоящее время отсутствуют материалы, пригодные для работы в вакуумном режиме достаточно длительное время. Материалы с высокой эмиссией (около 10 А/см^2) при Т ~ 2300К имеют недопустимо высокую скорость испарения. Скорость испарения металлов в вакууме пропорциональна $e^{-F_a/KT_э}$, эмиссионная способность пропорциональна $e^{-\varphi_э/KT_э}$. Поэтому чем больше отношение $F_a/\varphi_э$, тем более пригоден материал для эмиттера ТЭП.

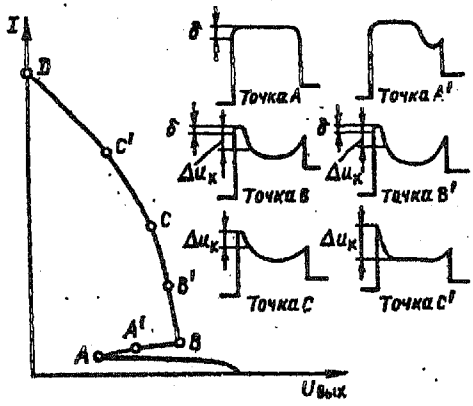


Рис. 58. Вольт-амперная характеристика дугового режима ТЭП:
$\Delta U_к$ - прикатодный скачок потенциала;
$U_{вых}$ - выходное напряжение ТЭП

Другой метод заключается в увеличении скорости частиц, движущихся между электродами. Он основан на принципе работы магнетрона в запертом режиме.

В отдельную группу выделяются методы, где используется компенсация отрицательного объемного заряда положительными ионами, каким-либо способом полученными в зазоре. В зависимости от образования ионов различаются ре-

жимы с поверхностной и объемной ионизацией. В первом случае в межэлектродном промежутке создается атмосфера паров Cs. За счет высокой работы выхода тугоплавких металлов (для w, $\varphi > 4$эВ) каждый атом цезия, попадающий на его поверхность, ионизируется. Пары цезия играют в ТЭП троякую роль. Во-первых, из атомов Cs создаются ионы Cs, компенсирующие отрицательный объемный заряд электронов. Во-вторых, атомы Cs, адсорбируясь на поверхности коллектора, понижают их работу выхода и смещают ВАХ влево (рис.57, 58). В-третьих, при больших давлениях паров Cs атомы его могут адсорбироваться и на поверхности горячего эмиттера, также снижая работу выхода.

Возможны три основных режима работы ТЭП с парами цезия: 1) квазивакуумный; 2) диффузионный; 3) дуговой.

Для практических расчетов эффективную работу выхода тугоплавких металлов в парах цезия удобно представить в виде зависимости $\varphi(T/T_{Cs})$, где T – температура поверхности. Для значения $T/T_{Cs}>2{,}7$ можно использовать эмпирическую формулу

$$\varphi=\varphi_1-\varphi_2\left\{1+exp\left[\left(\beta\frac{T_{Cs}}{T}\right)-\alpha\right]\right\}^{-1} \qquad (4)$$

Таблица 1.

Значения констант в формуле (4) для некоторых материалов эмиттеров

Константа	I_r	R_e	W	Mo	Ta
φ_1, эВ	1,99	1,57	2,08	2,15	1,86
φ_2, эВ	3,19	3,57	2,48	2,35	2,44
α	3,96	5,63	11,76	10,76	11,15
β	40,93	20,83	40,77	37,83	36,75

§ 2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЭП

Вакуумный, квазивакуумный и диффузионный режимы в настоящее время хорошо изучены, и теоретическое описание их увязывается с экспериментом. В дуговом режиме много неясных вопросов и пока отсутствует теоретическая модель, достаточно хорошо согласующаяся с экспериментом.

Хотя этот режим является одним из наиболее перспективных, при расчете генератора приходится основываться больше на экспериментальных данных, чем на теоретических характеристиках.

При разработке реального ТЭП важнейшими проблемами являются:

1) создание электродов с определенной работой выхода, минимальной испаряемостью и малым сопротивлением;

2) регулирование и поддержание необходимого вакуума и давления паров наполнителя (Cs, Cs+K, Cs+Ba);

3) разработка коррозионно-стойкой оболочки корпуса ТЭП, надежного соединения различных частей преобразователя;

4) подвод к эмиттеру теплового потока 10–20 Вт/см^2 и отвод его с коллектора ТЭП.

Эмиттерный узел ТЭП обычно состоит из эмиттера и токоввода, с помощью которого эмиттер присоединяется либо к токоведущей шине и гермовводу, либо к коллектору соседнего ТЭП.

Рабочие температуры эмиттера обычно лежат в диапазоне 1600-2100 К. Токоввод эмиттера обеспечивает перепад температур до 1500 К. Эмиттерный узел в большинстве случаев находится в среде паров цезия при P_{Cs} до $2 \cdot 10^3$ Па. Через эмиттер могут проходить токи порядка 50-100 А. Материал эмиссионного покрытия должен иметь температуру плавления 2000 К, а материал оболочки – не менее 2700 К.

Скорость испарения материала эмиттера не должна превышать 10 мкм/год, что соответствует давлению паров эмиттера не более 10^{-6} Па. В качестве материалов эмиттерного узла используются тугоплавкие металлы, сплавы, соединения: W, Re,Ta, Mo, Nb, UC, ZrC, UN.

Коллекторный узел ТЭП обычно включает в себя коллектор и защитный чехол, герметично отделяющий межэлектродную полость ТЭП от внешней полости, которая может быть вакуумирована или заполнена газами или охлаждающими жидкостями. Рабочие температуры коллекторного узла составляют обычно 700-1300К. Через коллектор и защитный чехол могут проходить электрические токи до 500А. Температура плавления материалов коллектора и защитного чехла должна быть не ниже 1300 К, работа выхода коллектора – примерно 1,6 эВ, испаряемость - около 10^{-12} м/с, давление пара-приблизительно 10^{-6}Па.

Результаты экспериментов показывают, что в качестве материалов коллектора можно использовать: нержавеющую сталь, медь и медь, покрытую Ni, Mo, Nb и сплав ниобия с 1% циркония, никель, рений.

В качестве конструкционных материалов может использоваться медь и ее сплавы, никель и его сплавы, нержавеющие стали.

Для связывания выделяющихся в процессе работы ТЭП газов во внутреннем объеме ТЭП размещаются газопоглотители – геттеры. В качестве геттеров обычно используют активные металлы, такие как Nb, Ti, Zr, Ba, а также сплавы Zr-Al, Zr-Al-Ni, Zr-Ti и др.

В качестве изоляционных материалов в ТЭП используются чаще всего материалы на основе оксидов Al_2O_3, BeO, V_2O_2, MgO.

Термоэмиссионные преобразователи удачно сочетаются с атомным реактором. Многочисленные расчеты показали, что масса и габаритные

размеры такой атомной электростанции открывают благоприятные перспективы применения ее на космических объектах для питания бортовой аппаратуры и электрических двигателей.

Первым в мире (1970) термоэмиссионным реактором-преобразователем стал российский реактор "Топаз". Аналогичные реакторы-преобразователи разрабатываются и в других странах. Так, в частности, достигнута стабильная работа ТЭП в лабораторных испытаниях с вольфрамовым эмиттером и ниобиевым коллектором (КПД 17%, удельная электрическая мощность 8 Вт/см^2) в течение 46000 ч.

Основная цель термоэмиссионного преобразования энергии состоит в генерации электричества для использования в удаленных полярных районах, под водой и в космосе. Исчисляются также возможности использования ТЭП в качестве надстройки к обычным ТЭС.

ГЛАВА X. МГД-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

§ 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МГД-ГЕНЕРАТОРА

Магнитогидродинамический генератор (рис.59) представляет собой устройство, преобразующее кинетическую энергию электропроводящего потока, движущегося в поперечном магнитном поле, в электроэнергию. В потоке индуцируется электрическое поле с напряженностью $E_{инд}$ $= [VB]$, где V – скорость потока; B – магнитная индукция.

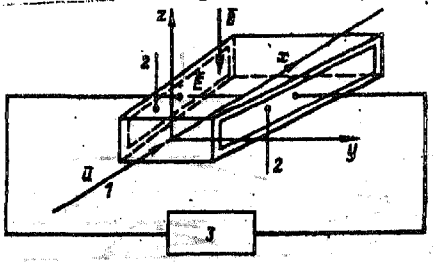


Рис. 59. Схема МГД-генегрирования энергии: 1 - вход в канал; 2 - электроды; 3 - нагрузка

Если канал имеет ширину *в*, то на стенках канала, параллельных направлению магнитного поля (электродных стенках), возникает эдс $E = V \cdot B \cdot в$. До тех пор, пока электроды не замкнуты на нагрузку, электромагнитные силы на поток не действуют. При замыкании цепи в потоке рабочего тела (жидкости или газа) потечет ток $I = E(1-k)/R_r$, где R_r – внутреннее сопротивление генератора; $k = U/E$ – коэффициент нагрузки; U – напряжение на нагрузке.

В соответствии с законами электродинамики на единицу длины проводника с током I, находящегося в поперечном магнитном поле B, действует сила $F = IB$, которая тормозит поток и преобразует его кинетическую энергию в электрическую энергию протекающего тока.

Электрическая мощность N, вырабатываемая в канале генератора, может быть определена либо как произведение тормозящей силы на скорость потока:

$$N = bIBU = U^2B^2(1-k)\sigma b\ell \quad , (1)$$

либо как произведение эдс на ток:

$$N = EI = U^2B^2(1-k)\sigma\, by\ell \quad , (2)$$

где y и ℓ – высота и длина электродной стенки, σ – коэффициент электропроводности.

Полезная, выделяемая на нагрузке удельная мощность N_v, генерируемая в единице объема канала (объем канала равен $by\ell$), определяется формулой

$$N_v = \frac{NK}{V} = U^2B^2K\,(1-K)\sigma\ . \qquad (3)$$

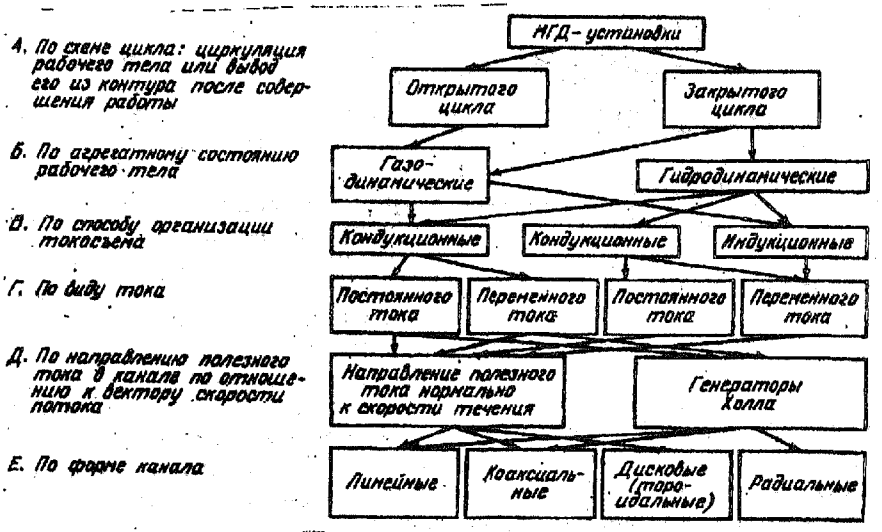


Рис. 60. Классификация МГД-установок

Классификация МГД-установок, предназначенных для разработки электроэнергии, представлена схемой на рис.60.

§ 2. ПЛАЗМЕННЫЕ МГД-ГЕНЕРАТОРЫ

Рабочим телом в МГД-установках может быть электропроводный газ-плазма, представляющая собой квазинейтральную совокупность ионов, электронов, нейтральных атомов или молекул. Газ превращается в плазму при его ионизации. Если ионизация достигается за счет высоких температур, она называется термической. Термическая ионизация подчиняется закону действующих масс подобно любой химической реакции.

Теплота реакции ионизации, выраженная в электрон-вольтах, назы-

вается потенциалом ионизации. Закон действующих масс (уравнение Саха) для термической ионизации имеет вид:

$$\frac{n_e n_i}{n_o} = \frac{(2\pi\, mekT)^{3/2}}{h^3} \cdot \frac{2g_i}{g_o} \exp\left(\frac{eV_i}{KT}\right), \quad (4)$$

где n_e, n_i, n_o – концентрация соответственно электронов, ионов, нейтральных атомов или молекул в плазме; h – постоянная планка, V_i – потенциал ионизации атома; g_i, g_o – статистические веса основного состояния иона и основного состояния нейтрального атома.

В МГД-установках открытого цикла рабочим телом является плазма продуктов сгорания органических топлив. Теоретическая температура горения большинства органических топлив в атмосферном воздухе не превышает 2300К, что явно недостаточно для термической ионизации. Поднять температуру горения позволяет предварительный подогрев воздуха и обогащения воздуха кислородом.

Для того чтобы получить плазму с электрической проводимостью не ниже 10 См/м, в продукты сгорания вводят вещества с возможно более низким потенциалом ионизации, так называемую ионизирующую присадку. Наименьший потенциал ионизации имеет цезий.

Присадка должна быть по возможности дешевой, ибо несмотря на то, что в схемах МГД-установок открытого цикла ее извлекают из продуктов сгорания, регенируют и вновь пускают в дело, некоторое количество ее неминуемо теряется. То количество присадки, которое все же выбрасывается с дымовым газом, не должно оказывать вредного воздействия на окружающую среду. Присадка не должна воздействовать на элементы конструкции МГД-установки, она должна быть технологичной - ввод и вывод ее – достаточно простыми.

Исходя из приведенных причин для МГД-установок открытого цикла чаще всего в качестве присадки применяются соединения калия: K_2CO_3, KOH.

Электрическая проводимость плазмы определяется концентрацией электронов и их рассеянием на частицах, составляющих плазму,

$$\sigma = \frac{0{,}532e^2 n_e}{(m_e KT)^{1/2}\,[\Sigma Q_{ea} n_a + \Sigma Q_{ei} n_i]}, \quad (1)$$

где Q_{ea} и Q_{ei} - сечения рассеяния электронов на атомах и ионах.

§ 3. МГД-УСТАНОВКИ ОТКРЫТОГО ЦИКЛА

МГД-генератор в установке открытого цикла может работать эффективно лишь при достаточно высокой электрической проводимости. В частности, температура на выходе из МГД-генератора не должна быть ниже 2300К.

Газы с такой температурой представляют еще большую энергетическую ценность и должны быть использованы.

Схемы МГД-генератора могут быть различными. На рис.59 изображен МГД-генератор с так называемыми сплошными электродами. Для реального плазменного МГД-генератора такая схема в большинстве случаев оказывается неприемлемой из-за наличия эффекта Холла, который возникает в проводнике с током, находящемся в магнитном поле. По законам электродинамики в таком проводнике возникает электрическое поле, вектор которого перпендикулярен вектору тока в проводнике и вектору магнитного поля. Иными словами, в случае МГД-генератора вектор этого электрического поля параллелен оси канала. В результате на всей длине канала возникает эдс Холла. Из-за большой длины канала эдс Холла может достигать нескольких, а иногда и десятков киловольт.

Наличие эффекта Холла приводит к тому, что закон Ома для канала МГД-генератора в его простейшей форме становится несправедливым. Вместо этого следует использовать уравнение обобщенного закона Ома, которое в векторной форме имеет вид

$$\mathbf{j} = \sigma\{[\overline{\mathbf{UB}}] + \overline{\mathbf{E}}\} - \frac{\beta}{B}[\mathbf{j}\overline{\mathbf{B}}] \ , \qquad (2)$$

где j - вектор плотности тока;

E - вектор напряженности электрического поля, создаваемого нагрузкой;

$\beta = e\tau B/m_e$ – параметр Холла;

m_e, e – масса и заряд электрона;

τ – время между столкновениями.

Для координатной системы, показанной на рис.59 , из уравнения (2) при некоторых упрощающих предположениях получаются следующие уравнения для проекций тока:

$$j_y = \frac{\delta}{1+\beta^2}[UB - E_y + \beta E_x] \quad ; \qquad (3)$$

$$j_x = \frac{\delta}{1+\beta^2}[\beta(UB - E_y) + E_x] \quad . \qquad (4)$$

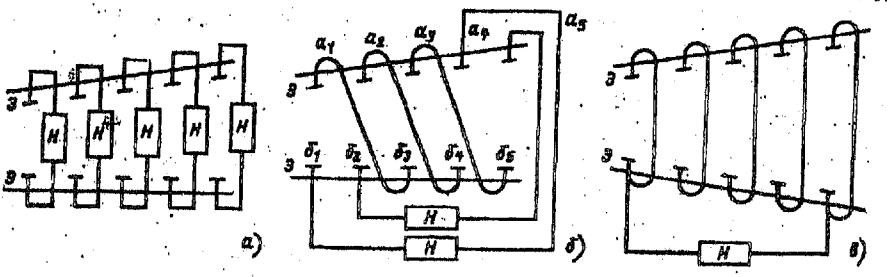


Рис. 61. Схемы включения МГД-генератора:
а - секционированный МГД-генератор; б - диагональное соединение; в - МГД- генератор Холла

Из этих уравнений следует, что наличие эффекта Холла приводит к тому, что ток в МГД-генераторе течет не только в направлении оси y, как это предполагается при элементарном рассмотрении, но и вдоль оси x. Направление результирующего тока существенно зависит от параметра Холла β. В зависимости от параметра β целесообразно применить одну из схем включения МГД-генератора, изображенных на рис. 61. При малом β лучше использовать фарадеевский МГД-генератор (рис.61.а), в котором каждая пара электродов э генератора присоединена на самостоятельную нагрузку Н. При средних значениях β используется схема с диагональным соединением электродов и с небольшим числом нагрузок Н (рис.61,б). Смысл такого диагонального соединения электродов заключается в том, что за счет существования холловской и фарадеевской эдс результирующий вектор напряженности электрического поля направлен под некоторым углом к оси канала. Направление перпендикулярное этому вектору, оказывается эквипотенциальным. Так, электроды a_1 и $б_3$, a_2 и $б_4$ и т.п. окажутся лежащими на эквипотенциалях и могут быть замкнуты накоротко.

Наконец, при больших β предпочтителен так называемый холловский канал (рис.61,в), в котором противоположные электроды лежат на эквипотенциале и могут быть попарно коротко замкнуты, а единственная нагрузка Н присоединена к крайним парам электродов.

Параметр Холла зависит от физических свойств плазмы, прежде всего от сечений взаимодействия электронов с другими частицами; кроме того, он пропорционален индукции магнитного поля В. При постоянной температуре β растет с уменьшением давления.

На основании экспериментов и расчетов размер электрода в направлении оси x следует выбирать таким, чтобы за счет холловской напряженности электрического поля разность потенциалов между соседними электродами не превышала 30–40В. При более протяженных электро-

дах эта разность возрастает, и возможен дуговой пробой промежутка между электродами.

Существенной характеристикой МГД-генератора является скорость плазмы на входе в генератор и ее изменение по длине. Увеличение скорости плазмы может быть достигнуто за счет увеличения отношения давлений в сопле. Статическое давление в самом МГД-генераторе обычно принимается близким к атмосферному. Аргументы при выборе этого давления следующие:

а) давление после диффузора должно быть достаточным для того, чтобы протолкнуть продукты сгорания через все элементы газодинамического тракта МГД-установки, во всяком случае до дымососа, стоящего перед дымовой трубой;

б) снижение статического давления в МГД-генераторе позволяет повысить электропроводимость плазмы;

в) снижение статического давления увеличивает параметр Холла.

По значению скорости в канале МГД-генераторы различаются на дозвуковые и сверхзвуковые. Однако сложности, связанные со сверхзвуковым потоком, приводят к тому, что на практике скорость плазмы в МГД-генераторе принимают околозвуковой (М ~ 0,9). При температурах, характерных для МГД-генераторов открытого цикла, эта скорость составляет около 1000 м/с на входе и 0,8 от этой величины на выходе.

§ 4. МГД-УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

В МГД-установках замкнутого цикла рабочим телом может служить либо плазма инертных газов (аргон или гелий), либо жидкие металлы.

В случае плазменных МГД-установок замкнутого цикла с ядерными реакторами начальный нагрев газа не может быть особенно высоким. Температура газов не будет превосходить 1500 К или в лучшем случае 1700-1900К. Такие температуры недостаточно высоки, чтобы обеспечить термическую ионизацию даже ионизирующейся присадки. Однако в плазме инертных газов можно обеспечить неравновесную ионизацию, при которой основной газ, состоящий из ионов и нейтральных атомов, имеет сравнительно низкую температуру, а электроны – более высокую. Эта более высокая температура электронов поддерживается за счет их разгона в электрическом поле.

Наиболее экономичным и эффективным методом повышения электронной температуры и получения неравновесной ионизации является нагрев электронного газа за счет использования индуцированного электрического поля. При протекании тока через плазму вначале электроны разгоняются и приобретают более высокую температуру, а затем отдают свою энергию в виде джоулевой теплоты при столкновениях с молекулами. Из-за большого различия в массе при каждом упругом столкнове-

нии с атомом или молекулой электрон теряет лишь небольшую часть энергии.

Для полной потери начальной энергии электрону необходимо совершить около 10^4 упругих столкновений. За это время электронам будет сообщена гораздо большая энергия, в результате чего их полная энергия возрастает, а значит температура повышается. При электрон-электронных столкновениях возможный избыток энергии расходуется при первом же столкновении, так что электроны быстро достигают между собой равновесия, вследствие чего им и можно приписывать определенную температуру. Если обозначить через $\frac{\delta m_e}{M_a}$ относительные потери энергии в столкновениях между электронами (массы m_e) и атомами (массы M_a), а другими процессами, приводящими к потерям энергии, пренебречь, то средняя кинетическая энергия электронов определяется выражением

$$KT_e = KT + \frac{2M_a}{3\delta}\frac{j}{n_e e},$$

где j - плотность тока, проходящего через плазму. Для упругих столкновений значение $\delta \sim 1 \div 2$, поэтому можно получить гораздо более высокие значения электронной температуры, плотности и электрической проводимости.

В молекулярных газах, напротив, имеют место колебательные и вращательные состояния с энергиями, более близкими к тепловым, поэтому неупругие столкновения происходят чаще и потери энергии электронов гораздо выше ($\delta \approx 50 \div 100$). При этом электронная температура увеличивается незначительно. Для того чтобы связать электронную температуру и параметры, определяемые ею, с характеристиками МГД-генератора, используются уравнения баланса энергии для электронов и джоулевой диссипации в канале МГД-генератора

$$\frac{T_e}{T} = 1 + \frac{K}{3\delta} M^2 \beta^2 \left(1 - \eta_э\right)^2,$$

где k - показатель адиабаты для газа;

T - температура плазмы;

M - число Маха;

β - параметр Холла;

$\eta_э$ - электрический КПД МГД-генератора, равный отношению полезной электрической энергии, выделенной на рабочей нагрузке, ко всей электроэнергии, вырабатываемой в МГД-генераторе.

Электрическая проводимость для неравновесной плазмы может

быть в первом приближении определена по тому же уравнению, что и для равновесной, но концентрацию электронов в это уравнение следует подставлять, определяя его из формулы Саха для электронной температуры.

В большинстве случаев неравновесная проводимость, а отсюда и энергетические показатели МГД-генераторов не столь высоки, как можно было ожидать из расчетов. Причинами этого являются разного рода неоднородности в плазме, которые приводят к неустойчивости и снижению эффективной электрической проводимости.

Жидкометаллические МГД-установки пока не вышли из стадии лабораторных исследований. Наибольшая трудность состоит в разгоне жидкого металла. Различные разгонные устройства, предложенные для этой цели – сепарационные и инжекторные, имеют КПД составляющий в лучшем случае около 10%.

§ 5. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ МГД-ГЕНЕРАТОРОВ

Главное достоинство МГД-генераторов состоит в том, что они, повышая на 10-20% коэффициент полезного действия по сравнению с тепловыми электростанциями, могут в настоящее время вырабатывать электроэнергию в промышленных масштабах.

В МГД-генераторе, как описано выше, электрический ток производится потоком ионизованного газа (плазмы), направленным поперек магнитного поля. Отрицательные и положительные заряды в магнитном поле отклоняются в разные стороны и направляются каждый на свой электрод. Между электродами образуется разность потенциалов, и при замыкании внешней цепи возникает электрический ток. Для получения ионов топливо сжигается при 3000К в специальной камере, в которой для облегчения возникновения ионов к нему добавляются соли калия или цезия. Так как большая доля энергии превращается при этом все же в тепло, то в случае МГД-генератора не вполне можно говорить о непосредственном превращении химической энергии в электрическую. Температура газа, отработанного в МГД-генераторе, составляет 2000К. Используя его по обычной схеме, турбина вырабатывает еще примерно столько же электроэнергии, сколько производит МГД-генератор. Поэтому сравнительно высокий коэффициент полезного действия всей установки (50-60%) достигается с помощью двухступенчатого процесса.

ГЛАВА XI. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

§1. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РАБОТУ

В большинстве случаев человек получает необходимые ему виды энергии и работу из энергии, освобождающейся при химических превращениях. Химическая энергия - это солнечная энергия, аккумулированная в форме, доступной для ее использования человеком.

Превращение химической энергии в тепло происходит непосредственно, без каких либо промежуточных процессов. Сжигание различных веществ - это самый древний и простой метод получения тепла из химической энергии.

Значительно сложнее из химической энергии получить работу или электрическую энергию. Известно, что теоретически переход одних видов энергии в другие возможен, однако практически непосредственное превращение химической энергии в работу или электрическую энергию в настоящее время осуществляется только в исключительных случаях. Как правило, освобождающаяся химическая энергия вначале полностью переводится в тепло, которое затем при помощи тепловых двигателей превращается в работу или электрическую энергию. Недостаточное знание механизмов непосредственного превращения химической энергии в работу или электрическую энергию вынуждает нас использовать тепло в качестве посредника.

Включение тепла как посредника между химической и электрической энергиями или работой невыгодно главным образом с двух точек зрения. Во-первых, каждый реальный процесс необратим, поэтому он протекает с рассеянием энергии. Чем больше ступеней, через которые проходит процесс, тем больше мы теряем энергии. Естественно, что в многоступенчатом последовательном процессе (химическая энергия → тепло → работа → электрическая энергия) рассеяние энергии значительно больше, чем в одноступенчатом превращении (химическая энергия→ электрическая энергия). Во-вторых, в соответствии со вторым началом термодинамики тепло не может быть полностью превращено в работу. Таким образом, если даже допустить возможность обратимого проведения всех процессов, то и тогда включение промежуточного процесса превращения в тепло привело бы к большим потерям энергии. Вот почему многоступенчатый процесс превращения химической энергии в электрическую невыгоден для нас.

Недостаток наших знаний чрезвычайно дорого обходится мировой экономике. Только глубокое знание законов движения различных видов материи дает возможность надежно и экономично проводить в нужном

направлении процессы, необходимые для превращения энергии. Пока нельзя исключить тепло из этого цикла, поскольку нет возможности создавать устройства, в которых химическая энергия надежно и с большим коэффициентом полезного действия превращалась бы в энергию упорядоченного движения молекул (при получении работы), либо в энергию упорядоченного движения электронов (при получении электрической энергии).

Возможности исключения тепла

А можно ли вообще исключить мспользование тепла как посредника? Возможно ли в принципе непосредственное превращение химической энергии в работу или электрическую энергию?

Термодинамическая теория в состоянии дать однозначный ответ на этот вопрос. Согласно двум началам термодинамики, та часть внутренней энергии, которая освобождается в любом термодинамическом процессе (к их числу относятся и химические процессы), может непосредственно превращаться в работу.

В самом благоприятном идеальном случае обратимого ведения процесса между (максимальной) работой A_m, полученной при абсолютной температуре T, и освобождающейся внутренней энергией ΔU существует следующее соотношение:

$$A_m = \Delta U + T \frac{dA_m}{dT}, \qquad (1)$$

если $dA_m/dT > 0$, энергия, равная $T(dA_m/dT)$, переходит в тепло, то есть максимальняа работа, которую может дать процесс, меньше, чем изменение внутренней энергии. Поскольку из опыта нам известно, что максимальная работа, получаемая в химических процессах, очень мало изменяется с температурой, то теоретически большая часть энергии, освобождающейся при химических процессах, может быть непосредственно превращена в работу. Эта часть энергии тем больше, чем ниже температура T. Например, в процессе горения водорода

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

при 25°C в расчете на 1 моль водяного пара (18г) освобождается химическая энергия $\Delta U = -58$ ккал/моль; которая соответствует теплоте сгорания водорода. При обратимом ведении процесса теоретически $A_m = -55$ ккал/моль. Таким образом, только 3 ккал/моль тепла Q неизбежно переходят в окружающее пространство. Менее благоприятен случай, когда вода образуется в жидком агрегатном состоянии: при этом $\Delta U = -68$

ккал/моль, A_m= -57 ккал/моль и, таким образом, в тепло превращается 11 ккал/моль. Теплота сгорания окиси углерода CO (основной составной части генераторного, а также бытового газа), употребляемой для нагревания котлов, составляет – 68 ккал/моль, а работа A_m = –61 ккал/моль. При сгорании метана (основной составной части природного газа и существенной части бытового газа) ΔU=–213 ккал/моль, а работа A_m=–196 ккал/моль. Внутренняя энергия, освобождающаяся при сгорании угля, ΔU = –94 ккал/моль теоретически может быть полностью превращена в работу.

В действительности же, поскольку необратимость неизбежна, получаемая работа существенно меньше. КПД реального процесса всегда ниже. Тем не менее КПД любого непосредственного превращения значительно больше, чем при наличии промежуточной стадии превращения в тепло.

Таким образом, в процессах, используемых для производства энергии, теоретически возможно превращение в работу большей части освобождавшейся энергии. КПД процесса превращения химической энергии непосредственно в работу в большинстве случаев тем выше, чем ниже температура, так как член TdA_m/dT в уравнении (1) тем меньше, чем меньше T. Но при низких температурах скорость процесса невелика.

Итак с точки зрения термодинамики превращение освобождающейся в химических процессах энергии в работу возможно. Но осуществимо ли оно практически в настоящее время? Для некоторых химических процессов в принципе можно сконструировать устройства, в которых химическая энергия непосредственно превращается в работу, однако при современном техническом уровне они оказываются настолько сложными, что практически не могут быть использованы.

Более реальной в настоящее время представляется возможность непосредственного превращения химической энергии в электрическую. Такое превращение осуществляется в гальванических элементах, некоторые из них уже широко применяются на практике (например батарейки для карманного фонаря или аккумуляторы).

Гальванические элементы

Известно, что электрическая энергия может быть почти полностью (за исключением потерь, обусловленных необратимостью) превращена в механическую работу или в другие формы энергии, поэтому можно считать, что гальванические элементы до некоторой степени обеспечивают возможность превращения химической энергии непосредственно в работу.

В гальванических элементах в тепло превращается лишь небольшая часть освобождающейся химической энергии. Основная же часть хи-

мической энергии непосредственно переходит в электрическую, что в корне отличается от процессов, протекающих в тепловых машинах, где освобождающаяся химическая энергия предварительно полностью превращается в тепло.

Если пользоваться языком кинетической теории, то эту мысль можно выразить следующим образом. В гальванических элементах химическую энергию (потенциальную и кинетическую энергию упорядоченного движения частиц, соответствующего данной структуре) не нужно вначале полностью превращать в энергию хаотического движения, чтобы потом и лишь ценою огромных потерь хотя бы частично упорядочить движение частиц и, следовательно, получить работу.

Электрическая энергия есть энергия направленного, то есть в основном упорядоченного движения электронов (или ионов), которая теоретически без потерь может быть переведена в работу, обусловленную упорядоченным движением других частиц.

§ 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Переход электронов как источник электрической энергии

Поскольку каждая химическая связь и каждое химическое превращение зависит от движения внешних электронов атомов, то в мире атомов и молекул каждое химическое явление сопровождается изменением состояния электрически заряженных частиц. В обычных химических процессах это изменение заключается в том, что электроны переходят от одного атома к другому, соседнему. Такие изменения, происходящие в атомных масштабах, означают либо возникновение, либо перемещение химических связей - они проявляются не как электрические феномены, а как химические превращения. Если мы, например, погрузим цинковый стержень в раствор сернокислой меди, то медь из раствора будет осаждаться на цинке, окрашивая его поверхность в красноватый цвет, а цинк в виде ионов -переходить в раствор. Сернокислая медь в водном растворе практически полностью диссоциирована, поэтому такой химический процесс описывается следующим уравнением:

$$Zn + Cu^{2+} + SO_4^{2-} \rightarrow Cu + Zn^{2+} + SO_4^{2-}.$$

Так как сульфат-ионы в этой реакции остаются неизменными, уравнение можно записать в виде:

$$Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu. \qquad (2)$$

Сущность данного процесса состоит в том, что в растворе ионы ме-

ди, оказавшиеся в результате теплового движения вблизи поверхности цинкового стержня, отнимают от близлежащих атомов цинка два электрона. Атом цинка превращается в ион и переходит с поверхности металла в раствор, в то время как ион меди становится нейтральным атомом, который не растворим в воде и поэтому осаждается на внешней поверхности цинка (рис.62). Этот процесс протекает в две фазы:

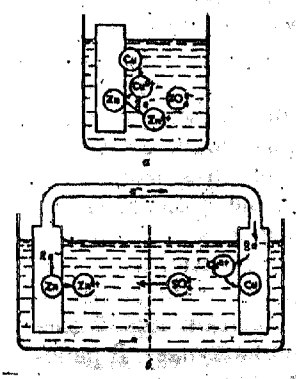


Рис. 62. Процесс взаимодействия цинка с раствором сернокислой меди:
$Zn+Cu^{2}\rightarrow Zn^{2+}+Cu$.
а - цинк погружен в сернокислую медь; б - тот же процесс в гальваническом элементе.

1. Атомы цинка отдают электроны:

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$$

2. Ионы меди забирают электроны:

$$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu \ .$$

Даже в этом простом процессе выделяется электрическая энергия, однако она проявляется только на атомарном уровне. Если мы хотим получить макроскопический электрический ток при переходе электронов от металлического цинка к ионам меди, мы должны добиться того, чтобы цинк отдавал свои электроны более отдаленным ионам меди, а не тем, которые находятся с ним в непосредственном контакте. Для этого необходимо, чтобы электроны перетекали от цинка к меди по внешнему проводнику, создавая тем самым электрический ток. Для осуществления превращения химической энергии в макроскопически используемую электрическую энергию нужно пространственно разделить процессы отдачи и приема электронов.

Элемент Даниэля

Работа гальванических элементов основана на пространственном разделении процессов приема и отдачи электронов. Рассмотрим один из наиболее старых гальванических элементов - элемент Даниэля. Он состоит из цинкового электрода, погруженного в раствор сернокислого цинка, и медного, погруженного в раствор сернокислой меди. Оба раствора разделены цилиндром из пористого материала. Схематически конструкцию этого элемента можно представить следующим образом:

(-)Zn| $ZnSO_4$ - раствор | $CuSO_4$ - раствор| Cu(+)

Действие элемента Даниэля основано на том, что с поверхности цинка в раствор переходят ионы цинка Zn^{2+}; при этом по проводнику, соединяющему цинк и медь, электроны от цинка перетекают к меди, где они взаимодействуют с ионами меди (Cu^{2+}), находящимися в соприкосновении с поверхностью меди, и нейтрализуют их. Цинк представляет собой отрицательный электрод элемента, медь - положительный.

Если, помимо указанных, не происходит никаких других процессов, то вскоре обмен электронами прекращается, так как вблизи поверхности цинка скапливаются положительно заряженные ионы Zn^{2+}, которые настолько сильно притягивают электроны из цинкового электрода и препятствуют выходу из металла готовых к растворению ионов Zn^{2+}, что процесс ионизации останавливается. То же происходит и в непосредственной близости от поверхности меди. Здесь вследствие осаждения ионов Cu^{2+} отрицательно заряженные сульфат-ионы собираются у поверхности медного электрода, и по истечении короткого времени из-за отталкивания электронов и притягивания ионов меди становится невозможным дальнейшее осаждение ионов Cu^{2+}. Если гальванический элемент бездействует, то такое состояние действительно наступает. В работающем же элементе, когда полюса его соединены проводом, условия совсем другие. Вследствие разности потенциалов между полюсами элемента, а также в растворе электролита все время течет электрический ток, причем ток в электролите обусловлен переносом свободно перемещающихся положительных ионов (катионов Zn^{2+}, Cu^{2+}) в одном направлении и отрицательных ионов (анионов SO_4^{2-}) - в противоположном. Благодаря этому процесс ионизации атомов или разряда (нейтрализации) ионов может идти непрерывно. Раствор сернокислой меди должен быть отделен от раствора сернокислого цинка, так как в противном случае сернокислая медь будет иметь прямой контакт с цинком - между ними начнется непосредственный обмен электронами, что приведет к прекращению макроскопического тока. Такое разделение, однако, не должно означать электрическую изоляцию, так как в этом случае электрический ток идти не может. Поэтому оба раствора необходимо разделить пористой стенкой, которая препятствует смешению растворов, но позволяет ионам свободно мигрировать сквозь нее.

Элемент Даниэля представляет собой прибор, который непосредственно (минуя фазу тепла), теоретически полностью, превращает освобождающуюся химическую энергию в электрическую в соответствии с реакцией (2). Следует иметь в виду, что речь идет, конечно, только о той части химической энергии, которая может быть превращена в работу. В рассматриваемом процессе при 15°С освобождается 56,1 ккал/моль химической энергии. В соответствии с уравнением (1) в электрическую энергию можно перевести (при обратимом ведении процесса) 50,4 ккал, а 5,7

ккал при всех условиях превращаются в тепло. Таким образом, коэффициент использования химической энергии в гальванических элементах может достигать почти 90%. Хотя процессы в них не являются обратимыми, но все же некоторые из этих элементов при практическом использовании работают с гораздо большей степенью обратимости, чем другие устройства, производящие энергию.

Когда-то элемент Даниэля применялся на практике для получения электрической энергии. С точки зрения современных требований он не пригоден для производства больших количеств электрической энергии, в частности потому, что используемые в нем материалы (медь и цинк) слишком дороги для этих целей. Важнейшей задачей исследований в области гальванических элементов является разработка такого элемента, в котором использовались бы дешевые и имеющиеся в достаточном количестве материалы, а процессы протекали бы возможно ближе к обратимым.

Некоторые свойства гальванических элементов

Прежде всего установлено, что принципиально нельзя создать гальванический элемент, состоящий из одних только металлов. h В месте контакта двух металлов возникает разность потенциалов, причем ее величина остается неизменной независимо от того, соприкасаются ли эти металлы непосредственно или между ними находится любое количество пластин из других металлов (правило Вольта). Например, в месте контакта медного и цинкового стержней возникает разность потенциалов ($\mathcal{E}$), но она не может вызвать электрический ток. Если бы мы соединили указанный медный стержень с цинковым при помощи медного провода (рис.63,а), то никакого электрического тока не появилось бы, так как в месте контакта медного провода с цинковым стержнем возникла бы разность потенциалов той же величины, что и в месте контакта медного и цинкового стержней, но противоположного знака ($-\mathcal{E}$). Таким образом, во всей замкнутой цепи разность потенциалов суммарно равнялась бы нулю ($\mathcal{E}-\mathcal{E}=0$). Однако ток не потечет и в том случае, если между медью и цинком мы поместим еще и другие металлы (Fe, Pb). При этом разность потенциалов между цинком и медью не изменится (рис.63,б), так как, согласно упомянутому правилу Вольта, $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = \mathcal{E}$.

Чтобы получить гальванический элемент, необходим по крайней мере один электролит, то есть такое вещество, через которое ток протекает вследствие миграции положительных и отрицательных ионов. Можно составить гальванические элементы, содержащие одни электролиты. Однако все применяемые на практике гальванические элементы состоят из электролитов и металлов. В каждом гальваническом элементе имеются два металлических электрода (полюса), между которыми возникает разность по-

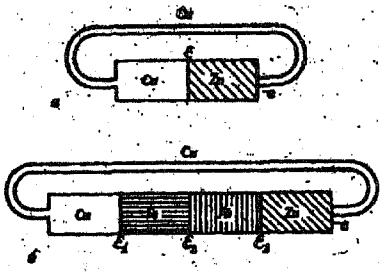


Рис. 63. Разность потенциалов (при постоянной температуре) между двумя металлами в случае непосредственного их контакта (а) и при включении между ними других металлов (б).
Величина разности потенциалов одинакова в обоих случаях..

тенциалов (напряжение). Если соединить оба электрода проводником, то в нем потечет электрический ток. Источником электрической энергии в гальванических элементах являются химические превращения, происходящие в тех местах, где электролит соприкасается с металлическими электродами.

Электродвижущая сила

Одним из важнейших показателей гальванического элемента является разность потенциалов (напряжение) между его полюсами. Это напряжение называется электродвижущей силой (эдс). С точки зрения термодинамики величина эдс зависит от свойств материалов, концентрации электролита, температуры электродов и электролита и не зависит от формы, величины, внутреннего сопротивления элемента и т.д.

Какие же факторы определяют величину работы, получаемой при помощи гальванического элемента? Если полюса гальванического элемента просто соединены проводом, то вся освобождающаяся в химическом процессе энергия полностью переходит в тепло. Если же присоединить к полюсам гальванического элемента соответствующий электродвигатель постоянного тока, то вся эта система в целом будет производить работу. С помощью системы, состоящей из гальванического элемента, электромотора и соответствующих механических приспособлений, можно, например, поднять на определенную высоту груз, причем произведенная элементом работа будет зависеть от веса груза (рис.64).

Увеличивая вес можно увеличить и эту работу, но только до определенного предела. При дальнейшем увеличении веса груза процесс может пойти в обратном напрвлении: груз начнет опускаться. Вследствие этого мотор будет вращаться в противоположную сторону и действовать уже как генератор. Ток через гальванический элемент потечет в обратном направлении, что приведет к возникновению химического процесса, противоположного первоначальному. От медного электрода ионы меди переходят в раствор:

$$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^- ,$$

в то время как на цинковом электроде ионы цинка нейтрализуются:

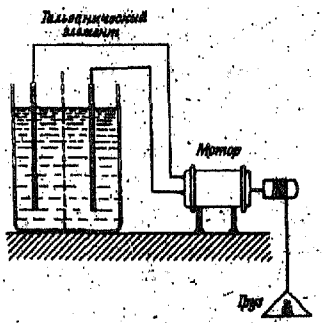


Рис. 64. Система, состоящая из гальванического элемента и груза.
Система совершает работу термодинамически обратимо.

$$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn \ .$$

Обобщая эти соотношения, можно сказать, что в процессе

$$Cu + Zn^{2+} \rightarrow Cu^{2+} + Zn$$

электрическая энергия превращается в химическую. Гальванические элементы, как и любые другие устройства, могут производить максимальную работу только в том случае, если процессы, на которых основано их действие, являются термодинамически обратимыми.

§3. ОСОБЕННОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК ИСТОЧНИКОВ ТОКА, ИХ ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

В настоящее время не стоит вопрос о получении с помощью гальванических элементов больших количеств электрической энергии и это вряд ли целесообразно, поскольку потребности современного общества в электроэнергии вполне удовлетворяются за счет сети электропередач. Однако в технике и быту постоянно растет число таких приборов, машин и сигнальных устройств, для которых требуются автономные, малогабаритные легкие и надежные источники тока. Здесь можно назвать аккумуляторы для автомобилей и самолетов, источники тока для электроинструментов, сигнальных устройств, транзисторных приемников, электрических карманных фонариков, наручных часов и т.д. и, конечно же, для искусственных спутников Земли и космических лабораторий. Гальванические элементы находят также применение в различных предохранительных устройствах.

Практика предъявляет к современным гальваническим элементам весьма разнообразные требования. Вследствие все возрастающего и весьма разнообразного спроса на гальванические элементы в последнее время вновь расширяются научные исследования, направленные на разработку новых и усовершенствование старых типов элементов.

Гальванические элементы как источники электрической энергии обладают существенными преимуществами: они могут быть различных размеров и форм, не имеют макроскопически подвижных, подверженных износу частей, относительно легки и автономны, мало чувствительны к вибрации и колебаниям температуры, работают бесшумно, хорошо ре-

гулируются. Их КПД довольно высок (до 90%), так как превращение химической энергии в электрическую совершается в них без промежуточной тепловой стадии, а электродные процессы в некоторых случаях близки к обратимым.

Важнейшие типы гальванических элементов

Гальванические элементы, применяемые на практике для получения электрической энергии, делятся на первичные и вторичные.

Первичные элементы не могут быть возвращены в рабочее состояние после того, как их наполнитель (активное вещество) был уже однажды израсходован. В этом случае говорят, что элемент истощен. У таких элементов нельзя или по меньшей мере неэкономично обращать электродный процесс, пропуская ток в обратном направлении. Этот тип обычно называют просто элементом.

Вторичные элементы или аккумуляторы можно регенерировать после истощения, если пропустить через них ток в обратном направлении (зарядить), потому что процессы генерации тока, происходящие на их электродах, с хорошим приближением электрохимически обращаемы. Принципиального же различия между первичными и вторичными элементами нет.

Основными требованиями к гальваническим элементам являются следующие: большой срок службы, высокие плотность тока и напряжение на клеммах. Желательно также, чтобы они обладали высоким КПД, использовали дешевые активные вещества, имели малые размеры и вес, были просты по устройству и долговечны.

Основные параметры гальванических элементов

Рассмотрим основные параметры гальванических элементов.

Электродвижущая сила - разность потенциалов между электродами гальванического элемента, когда между электродами и раствором существует равновесие и через элемент не проходит ток. Значение эдс не зависит ни от размеров элемента, ни от его внутреннего сопротивления, а является лишь функцией состава электродов и концентрации электролита.

Напряжение на клеммах - разность потенциалов между полюсами в процессе прохождения тока, когда полюса соединены между собой через сопротивление. Напряжение на клеммах меньше, чем эдс, причем различие между ними тем меньше, чем меньше внутреннее сопротивление элемента по сравнению с внешним и чем меньше поляризованы электроды.

Внутреннее сопротивление - выраженное в омах сопротивление электродов и находящегося между ними раствора электролита.

Емкость элемента - выраженное в кулонах или ампер-часах количество электричества, которое элемент способен отдать при соответствующих

условиях. У аккумуляторов следует отличать разрядную емкость от зарядной. Обычно емкость выражают через электрическую энергию и в большинстве случаев измеряют ватт-часах или киловатт-часах. Емкость элемента данного типа тем больше, чем большее количество электрохимически активных веществ, которые превращают химическую энергию в электрическую, он содержит и чем меньше плотность генерируемого тока.

Мощность элемента - это количество электрической энергии, получаемое за секунду, равное напряжению на клеммах, умноженному на силу тока, которую без ущерба может дать элемент. Максимальная сила тока, которую можно получить от элемента, определяется этой мощностью, деленной на напряжение на клеммах.

Существенным недостатком гальванических элементов является *саморазряд* - расходование ими электрохимически активных веществ при отсутствии внешнего тока. Причиной этого может быть например, растворение металла электродов вследствие образования так называемых локальных элементов, или протекание процесса, генерирующего ток, "непосредственным химическим" путем, или же недостаточная изолирующая способность диэлектрических деталей элемента. Саморазряд уменьшает срок службы элемента, последний со временем становится непригодным, даже если он вообще не использовался для получения энергии.

§ 4. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Одна из новых перспектив, которая сейчас интенсивно обсуждается,- это водородная энергетика. Предлагается использовать вместо бензина для автомобильных двигателей жидкий водород. Водород можно получать, разлагая воду электролитическим методом (кроме водорода получается еще и кислород). При сжигании водорода в двигателе он соединяется с кислородом атмосферного воздуха, и вновь образуется вода. Нигде не происходит никакого загрязнения среды, кроме узлов производства электроэнергии и ее передачи и преобразования.

Более подробное рассмотрение показывает, что при сжигании водорода в воздухе все же возникают токсичные окиси азота. Чтобы избежать загрязнения ими среды, вероятно, более правильным было бы заправлять автомобили также и кислородом. Тогда при сгорании в камерах, не доступных атмосферному воздуху, действительно возникла бы чистая вода. Конечно, автомобиль с двумя баками, в одном из которых водород, а в другом - кислород, является взрывоопасным.

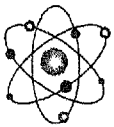
Особые свойства водорода (наилегчайший, имеющий наибольшую теплоту сгорания и др.) открывают заманчивые перспективы его применения для экологически чистого получения энергии. И только трудности его получения, хранения, эксплуатации сдерживают развитие водородной энергетики. Тем не менее "водородная проблема" привлекает сей-

час большое внимание специалистов во всем мире по многим причинам: первая - водорода на Земле много, вторая - он как топливо эффективен и экологически безупречен, третья - водород позволяет аккумулировать большие запасы энергии, четвертая - перекачка водорода к месту сжигания и получения энергии в 10-15 раз дешевле, чем транспортировка электричества.

В малых масштабах использование водорода как источника энергии уже началось, например в автомобилестроении. Уже 10 лет проходят испытания автомобили РАФ и "Волга", снабженные двигателями, работающими и на водороде, и на бензине, и на бензоводородной смеси. Создан в нашей стране и первый в мире самолет на водородном топливе - ТУ-155. При одной и той же с самолетами другого типа грузоподъемности его дальность полета в 1,5-2 раза больше, что обусловлено значительной теплотой сгорания водорода.

Для торжества "водородной идеи" нужно большое количество водорода. Один из возможных путей получения такого количества водорода - электролиз за счет энергии ветра, морских волн и Солнца. Этот способ поможет избежать перегрева Земли, поскольку при сжигании водорода выделится энергия, которая все равно поступила бы на Землю, но была израсходована на получение водорода.

Легкодоступные большие количества дешевого водорода и кислорода способствовали бы поискам и внедрению новых эффективных технологических процессов, в том числе и в деятельности, направленной на восстановление и улучшение окружающей среды. Например, можно было бы локально и в нужное время регулировать содержание кислорода в воздухе и водоемах.

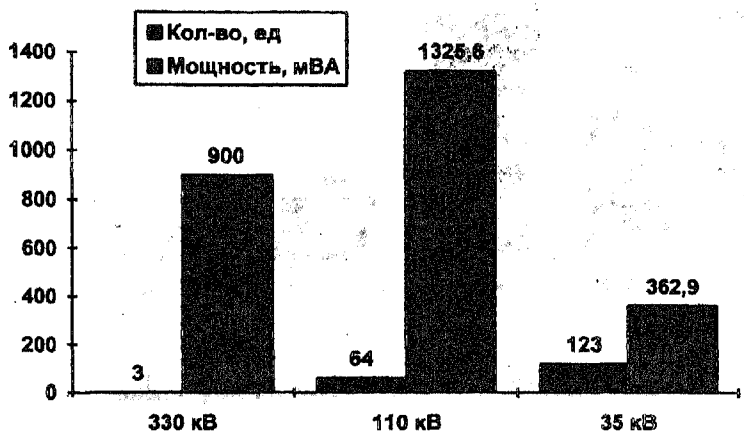


ПРИЛОЖЕНИЯ

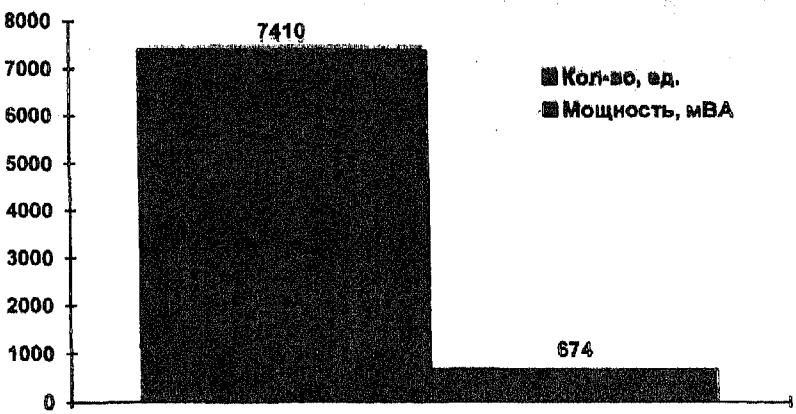
СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ О СОСТОЯНИИ ЭНЕРГЕТИКИ ДАГЕСТАНА

1. Электрические сети АО "Дагэнерго" на 1.01.94 г.

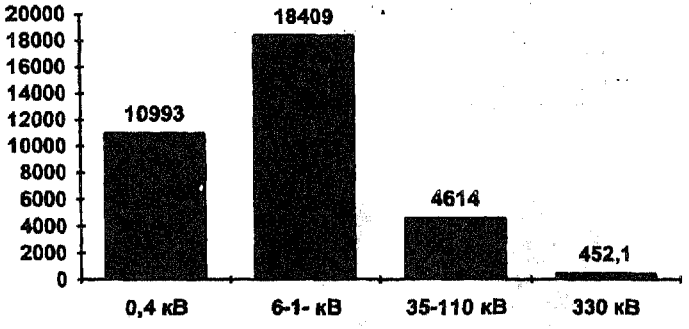
А. Понизительные 35 - 330 кв



Б. Трансформаторные пункты
6 - 35/0.4 кВ



В. Воздушные линии подстанции электропередачи, км

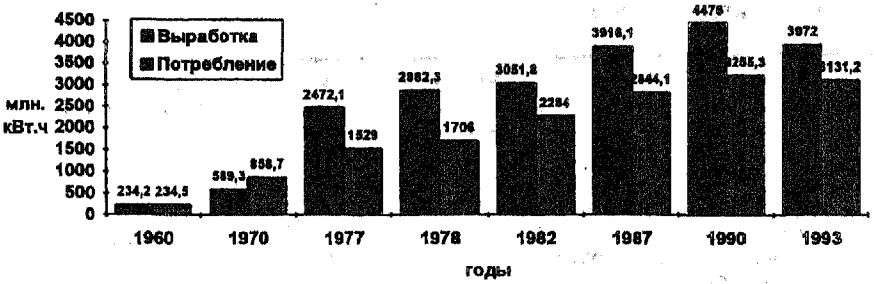


2. Малые ГЭС и нетрадиционная энергетика

АО "Дагэнерго" ведет работу по освоению гидроэнергетических ресурсов Нагорного Дагестана, осваивает нетрадиционную энергетику:

- начато строительство каскада Хновских ГЭС мощностью 7,2 МВт
- создан участок по строительству и начато строительство Ахтынской МГЭС мощностью 4,55 МВт
- заканчивается проектирование Хунзахской МГЭС мощностью 600 кВт и Каратинской МГЭС мощностью 300 кВт
- проектируется дагестанская ветроэлектростанция мощностью 6 МВт
- создается экспериментальная база нетрадиционной энергетики мощностью 5,5 МВт.

3. Выработка и потребление электроэнергии

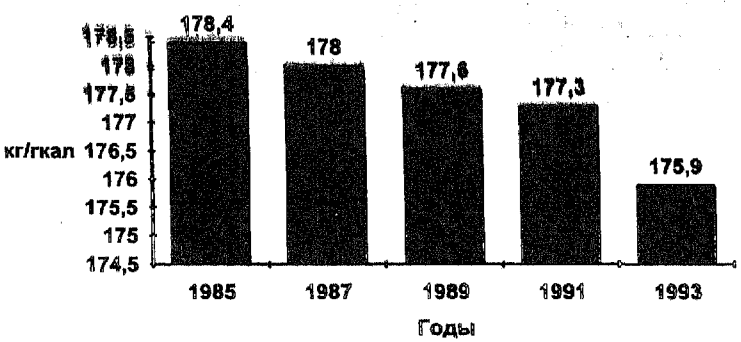


Ввод гидроагрегатов

Чиркей ГЭС:
1. 1г.-а. 22.12.1974 г.
2. 1г.-а 28.09.1975 г.
3. 1г.-а 30.12.1975 г.
4. 1г.-а 30.06.1976 г.

Миатлинская ГЭС
1. 1г.-а 31.12.1985 г.
2. 1г.-а 30.07.1986 г.

4. Удельный расход условного топлива на отпущенную тепловую энергию по АО "Дагэнерго"
(Средний показатель по РФ 173,5 кг/гкал)



5. Электростанции АО "Дагэнерго"

I Гидроэлектростанции.

№ п/п	ГЭС	Установленная мощность Мвт/ Выработка электроэнергии млн кВт/ч
1	Чиркейская	1000/2220
2	Миатлинская	220/656
3	Каскад Чирюртовских ГЭС	81/526
4	Гергебильская	17.8/61

II. Теплоэлектростанции

№ п/п	ТЭЦ	1	Уст. эл. мощн. МВт	Выраб. эл-и млн. кВтч
		2	Тепл. мощн. гка л/ч	Отпуск тепла т. Гкал
1	Каспийская		1: 14; 2: 234	1: 45; 2: 540
2	Махачкалинская		1: 6; 2: 212	1: 6; 2: 520

III. Итого

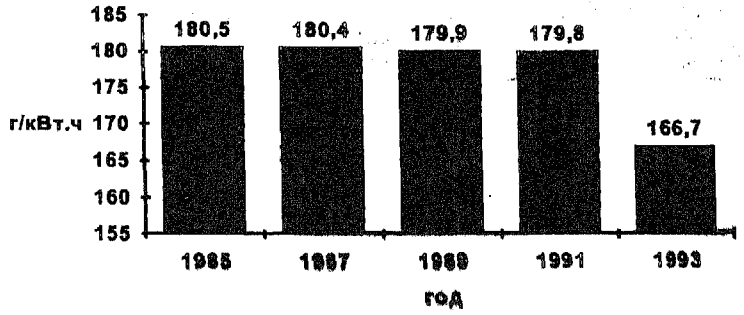
	1	Уст. эл. мощность мВт	Уст. тепл. мощн. Гкал/ч
	2	Выраб. эл-и млн. кВтч	Отпуск тепла т. Гкал
ГЭС		1: 1318,8; 2: 3463	–
ТЭЦ		1: 20; 2: 70	1: 446; 2: 1060

6. АО "Дагэнерго" - участник конверсии промышленного производства республики

Завод "ДАГЭЭТО"	- изготовление комплектных трансформаторных подстанций - изготовление разъединителей РЛНД - 10 - изготовление крюков для линий 0.4-10 кВ - изготовление кабельных наконечников - капитальный ремонт силовых трансформаторов 1-2 габаритов - изготовление колпачков для изоляторов вл 0.4-10 кВ - изготовление силовых трансформаторов 1-2 габаритов
стекольный завод "ДАГОГНИ"	- изоляторы типов ЦС-10г и НС-18 для распределительных электросетей
АО "СТРОЙИНДУСТРИЯ" г.Махачкала	- железобетонные опоры типа: СВ 110-3.5; СВ 95-2 и железобетонные приставки типа ПТ 43-2
Ремонтно механический завод г.Махачкала	- линейные автомашины со сдвоенной кабиной на шасси УАЗ-452
Завод им.М.ГАДЖИЕВА	
АО "ДАГДИЗЕЛЬ"	
	- релейные шкафы ШОН и РЩ для защиты оборудования электрических сетей
АО "ДАГЭЛЕКТРОАВТОМАТ"	- КПТ 10 / 0.4 автомат - обмотки к силовым трансформаторам
Завод ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ	- кухонные бытовые электроплиты - минипекарни - система управления гидроагрегатами малой мощности

7. Удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию по АО "Дагэнерго"

Средний показатель по РФ 330 г/кВт. час



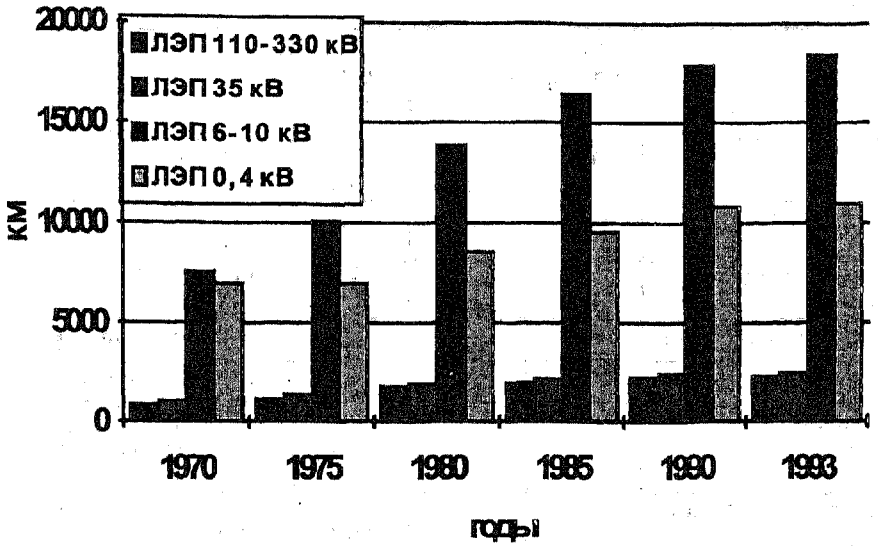
8. Трансформаторные подстанции 35-330 кВ АО "Дагэнерго"



9. Структура потребления электрической энергии, динамика доходов АО "Дагэнерго"

№ п/п		1979 г.	1993 г.	1995 г.
1	Потребление электроэнергии всего млн. кВт/ч	1679,8	2702,8	2185,6
	в том числе населением	372	1102,8	1034,1
	доля, потребляемая населением в %	21,9	40,7	47,3
2	Доходы от реализации электрической энергии всего млн. руб.	31,5	7369,2	130948
	в том числе доходы от реализации электроэнергии населению	13,6	1525,2	19796,8
	доля доходов от реализации электроэнергии населению в %	43	20,7	15,1

10. Линии электропередачи о,4-330 кВ
АО "Дагэнерго"



11. Удельный расход воды на гидроэлектростанциях
АО "Дагэнерго"

	Чиркейская ГЭС	Миатлинская ГЭС	Чирюртовская ГЭС	Гергебильская ГЭС
Расчетный напор (м)	175	54	49	44,5
Удельный расход воды ($м^3$/кВт.ч.)	2,32	7,72	9,98	10,0

12. Потенциальные гидроэнергетические ресурсы основных и малых рек Северного Кавказа

Районы	Площадь территории		Гидроэнергетический потенциал		Уд. насыщ. тыс. квт.ч.
	тыс. км^2	% от итога	млрд. квт.ч.	% от итога	км^2
Краснодарский край	83,6	23,4	21,7	16,9	259,0
Ставропольский край	80,6	22,7	22,8	17,7	285,0
Ростовская область	100;8	28,2	1,4	1,1	14,0
Дагестанская АССР	50,3	14,2	50,8	39,6	1010,5
Кабардино-Балкарская АССР	12,5	3,5	14,2	11,1	1120,0
Северо-Осетинская АССР	8,0	2,5	10,1	7,9	1250,0
Чечено-Ингушская АССР	19,8	5,5	7,4	5,7	385,0
ИТОГО	355,1	100	128,4	100	361,4

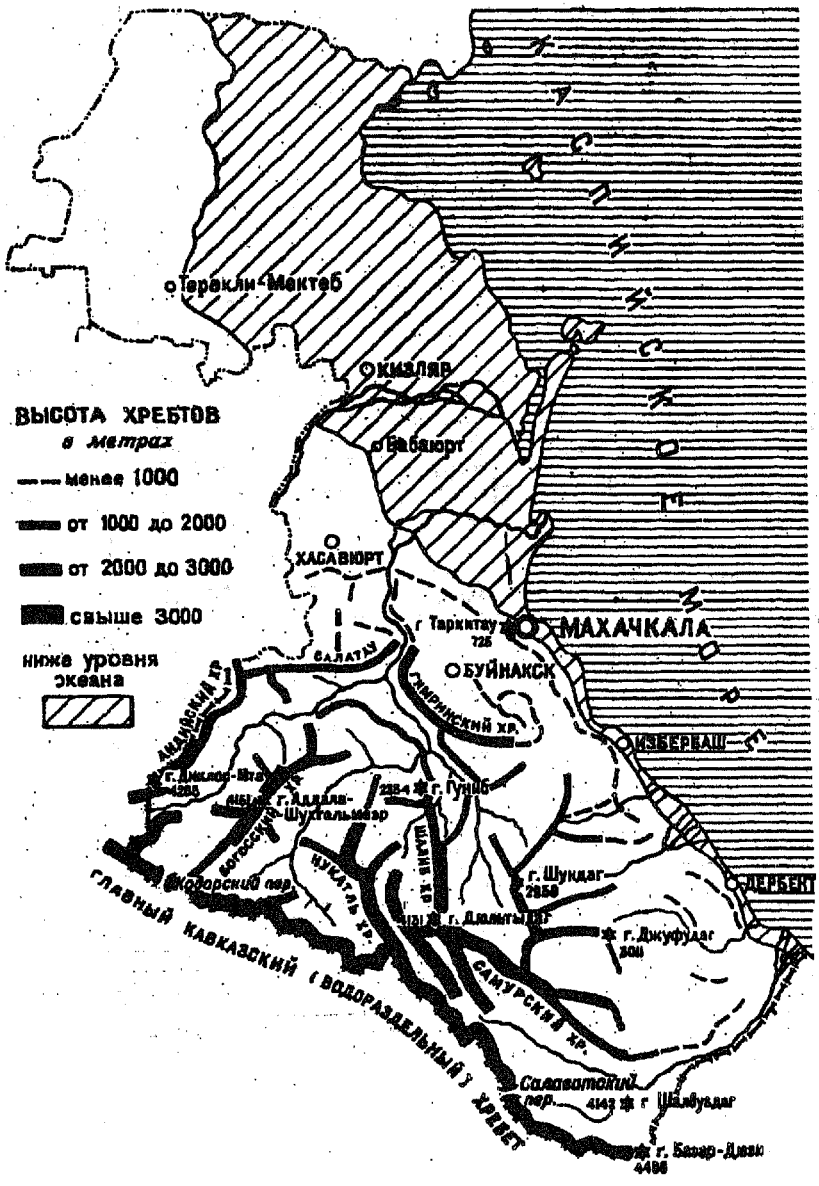
13. Распределение рек по величине расхода воды (м³/сек)

a)

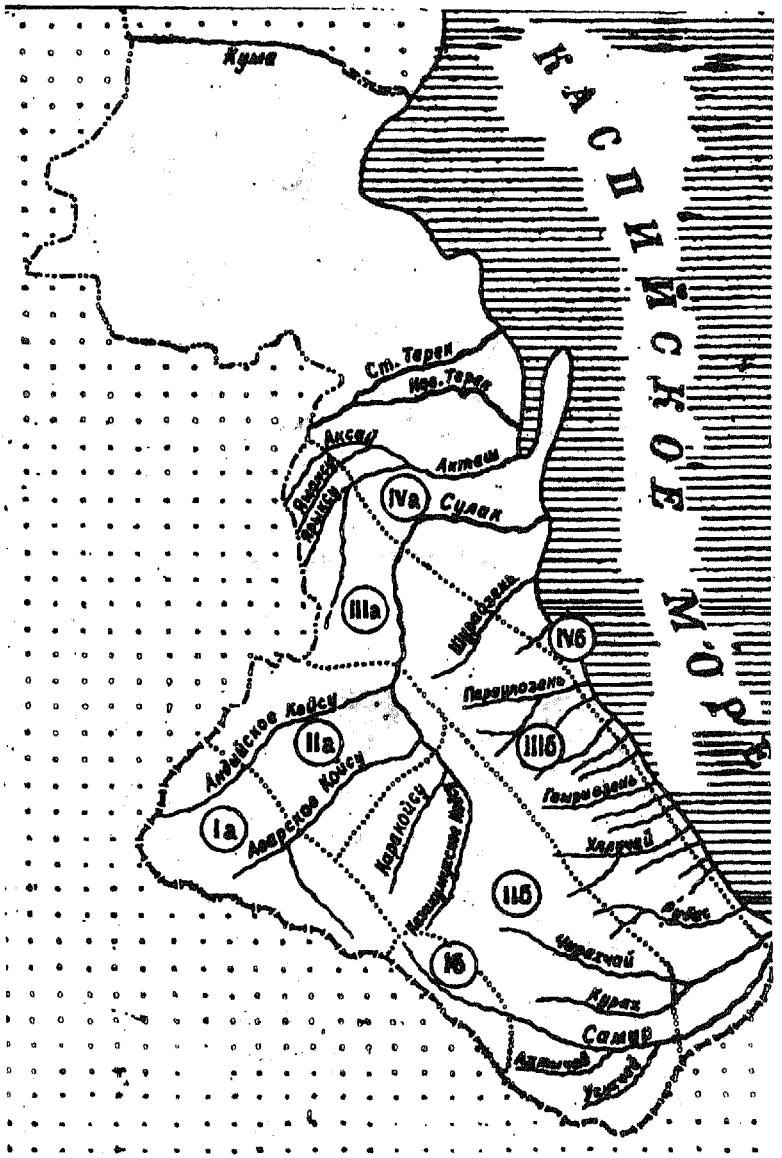
Расход воды м³/сек.	более 50,0	от 50 до 10	от 10 до 5	от 5 до 3	от 3 до 1	от 1 до 0,5	до 0,5	всего
Количество рек	5	8	13	16	53	55	135	285

b)

Наименование рек	Расход м³/сек.	Наименование рек	Расход м³/сек
Терек	360,2	Чирахчай	5,8
Сулак	176,0	Хваршинитлар	5,5
Аварское Койсу	99,2	Химрик	5,2
Самур	85,9	Курах	5,2
Андийское Койсу	72,0	Уллучай	5,0
Каракойсу	31,8	Усухчай	4,6
Джумрут	31,8	Каралазулор	4,2
Метлюта	20,2	Манасозень	4,2
Хзанор	17,8	Гакко	4,1
Акташ	16,1	Илян-хеви	4,0
Ахтычай	15,8	Рутлух	4,0
Казикумухское Койсу	13,0	Сабакунис-хеви	3,8
Гюльгерычай	11,5	Кули	3,6
Аксай	8,2	Шураозень	3,6
Карасамур	7,9	Жекода	3,5
Тлейсерух	7,6	Рубас	3,5
Цемерор	7,3	Педжиасаб	3,4
Симбирис-хеви	6,9	Курдул	3,2
Рисор	6,7	Ахвахтлар	3,2
Дюльтычай	6,5	Сараор	3,1
Кила	5,9		



Высотное положение Дагестана.



Природные области Дагестанской АССР.

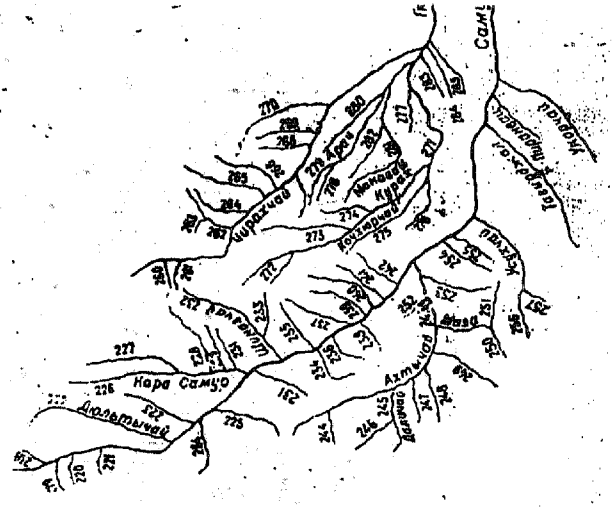

Самур
Нара Самур
Дюльтычай
Азтычай
Курах
Хонхарчай
Ширкачай
Кусарчай
Ахтычай
Ахтычай
Ахтыч



Схема речной сети Центрального Дагестана.



Схема каскада ГЭС на р. Сулак.

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ О СОСТОЯНИИ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

Рост мощности электростанций и производства электроэнэргии в СССР

Диаграмма, характеризующая рост мощности электростанций и производства электроэнергии в стране, изображена на рисунке. Производство электроэнергии выражено в ТВт.ч (млрд. кВт.ч), а мощность электростанций - в ГВт (млн. кВт).

В 1987 г. выработка электроэнергии в СССР составила 1665 ТВт.ч, что в 3300 раз больше, чем в год рождения плана ГОЭЛРО (1920 г.), а в 1988 г. выработано 1705 ТВт.ч.

К началу 1986 г. в стране находилось в эксплуатации 84 электростанции с установленной мощностью 1 ГВт и выше, из них 36 имели мощность 2 ГВт и более, в том числе 22 тепловых, 7 атомных и 7 гидроэлектростанций.

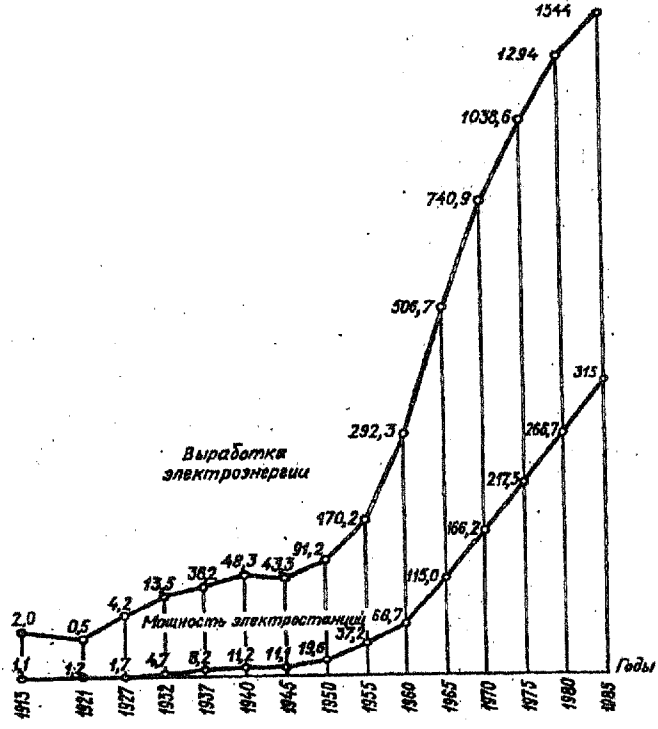


Рис. 1. Рост мощности электростанций и производства электроэнергии по годам

1. Производство электрической энергии в союзных республиках

Союзная республика	Производство электроэнергии Твт.ч (млрд. кВт.ч)					
	1913 г.	1940 г.	1950 г.	1970 г.	1980 г.	1987 г.
РСФСР	1,3	30,8	63,4	470	805	1047
Украинская ССР	0,5	12,4	14,6	138	236	282
Белорусская ССР	0,003	0,5	0,7	15,1	34,1	37,8
Узбекская ССР	0,0033	0,5	2,7	18,3	33,9	54,8
Казахская ССР	0,0013	0,6	2,6	34,7	61,5	88,5
Грузинская ССР	0,02	0,7	1,4	9,0	14,4	14,5
Азербайджанская ССР	0,11	1,8	2,9	12,0	15,0	22,9
Литовская ССР	0,0057	0,08	0,2	7,4	11,7	22,8
Молдавская ССР	0,0009	0,02	0,1	7,6	15,6	17,4
Латвийская ССР	0,015	0,25	0,5	2,7	4,7	5,9
Киргизская ССР	...	0,05	0,2	3,5	9,2	9,3
Таджикская ССР	...	0,06	0,2	3,2	13,6	15,9
Армянская ССР	0,005	0,4	0,9	6,1	13,5	15,2
Туркменская ССР	0,0025	0,08	0,2	1,8	6,7	13,3
Эстонская ССР	0,0055	0,2	0,4	11,6	18,9	17,9
Всего:	2	49	91	741	1294	1665

2. Сокращенные обозначения электростанций различного типа

ТЭС (тепловая электростанция) – электрическая станция, преобразующая химическую энергию топлива в электрическую энергию или в электрическую энергию и тепло.

ГРЭС (государственная районная электростанция) – тепловая электрическая станция, вырабатывающая только электрическую энергию. Сейчас под термином "ГРЭС" понимают конденсационную электрическую станцию (КЭС) большой мощности (более 1 ГВт, т. е. более 1 млн. кВт).

КЭС (конденсационная электростанция) – тепловая электрическая станция, оборудованная паровыми трубами, работающими по конденсационному циклу.

ТЭЦ (теплоэлектроцентраль) – тепловая электрическая станция с комбинированным производством электрической энергии и тепла.

АЭС (атомная электростанция) – электрическая станция, преобразующая энергию деления ядер атомов в электрическую энергию или в электрическую энергию и тепло.

СЭС (солнечная электростанция) – электрическая станция, преобразующая энергию солнечного излучения в электрическую энергию.

ГЭС (гидроэлектрическая станция) – электрическая станция, преобразующая энергию воды в электрическую энергию.

ГАЭС (гидроаккумулирующая электростанция) – гидроэлектростанция, преобразующая электрическую энергию, получаемую от других электростанций, в потенциальную энергию воды с последующим ее преобразованием в электрическую энергию.

ПЭС (приливная электростанция) – гидроэлектростанция, преобразующая энергию морских приливов в электрическую энергию.

АТЭЦ (атомная теплоэлектроцентраль) – атомная электрическая станция, снабжающая потребителей одновременно электрической энергией и теплом.

ВЭС (ветроэлектростанция) – ветроэлектрическая установка, преобразующая кинетическую энергию ветра в электрическую энергию.

3. Крупнейшие гидроэлектростанции СССР

Показатели	Волжская им. В.И. Ленина	Волжская им. XXII съезда КПСС	Нурекская	Усть-Илимская им. Ленинского комсомола	Братская им. 50-летия Великого Октября	Красноярская им. 50-летия СССР
Мощность станции, МВт	2300	2540	3000	4320	4500	6000
Мощность одного гидрогенератора, МВт	115	115	330	240	250	500
Мощность одной турбины, МВт	118	118	335	245	255	508
Расход воды через турбину, $м^3/с$	713	7143	155	300	257	615
Число гидроагрегатов	20	22	9	18	18	12
Выработка электроэнергии в год, Твт.ч (или млрд. кВт.ч)	11,0	11,1	11,2	21,9	22,6	20,4
Длина бетонной плотины, км	1,0	1,5	–	1,5	1,4	1,0
Высота плотины, м	40	44	315	105	125	124
Расчетный напор воды, м	20	22	233	86	96	93
Год пуска первого агрегата	1955	1958	1972	1974	1961	1967

Примечание. См. также табл. 5

4. Рост единичной мощности гидроэлектростанций

Диаграмма роста единичной мощности гидроэлектростанций страны приведена на рисунке 2. Верхние цифры показывают мощность электрос-танции в мегаваттах, нижние - год ввода электростанции на полную мощность.

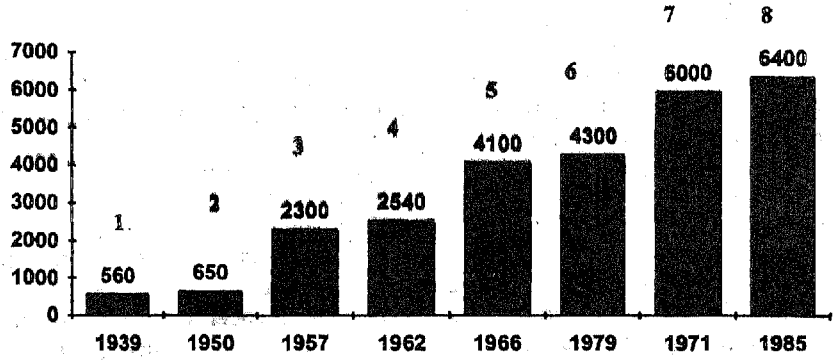


Рис. 2. Рост единичной мощности ГЭС страны.
1 - Днепрогэс им. В. И. Ленина ; 2 - Днепрогэс им. В. И. Ленина после восстановления; 3 - Волжская ГЭС им. В. И. Ленина; 4 - Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС; 5 - Братская ГЭС им. 50-летия Великого Октября; 6 - Братская ГЭС им. 50-летия Великого Октября после усовершенствования гидроагрегатов; 7 - Красноярская ГЭС им. 50-летия СССР; 8 - Саяно-Шушенская ГЭС им. В. И. Ленина.

5. Саяно-Шушенская ГЭС им. В. И. Ленина

Мощность ГЭС, ГВт (или млн. кВт)	6,4
Выработка электроэнергии в год, ТВт.ч (или млрд. кВт.ч)	23,5
Число гидроагрегатов	10
Мощность одного гидроагрегата, МВт	640
Расход воды через турбину, $м^3/с$	358
Максимальный напор воды, м	222
Расчетный напор воды, м	194
Диаметр рабочего колеса турбины, м	6,5
КПД турбины, %	95,8
КПД гидрогенератора, %	98,3
Высота плотины, м	244
Длина плотины, м	1066
Вместимость водохранилища, млрд. $м^3$	31,3

Станция сооружена в верхнем течении р. Енисея, недалеко от села Шушенское, где с мая 1897 по январь 1900 г. находился в ссылке В. И. Ленин

Первые гидроагрегаты на Саяно-Шушенской ГЭС были введены в действие в годы десятой пятилетки.

6. Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС)

Принцип действия ГАЭС состоит в преобразовании электрической энергии, получаемой от других электростанций, в потенциальную энергию воды с последующим преобразованием этой энергии вновь в электрическую, отдаваемую в энергосистему.

На гидроаккумулирующей электрической станции чаще всего устанавливаются так называемые обратимые машины - электрические и гидравлические. Обратимые электрические машины могут работать как обычные индукционные генераторы или как электрические двигатели ("генерато-ры-двигатели"), а обратимые гидравлические машины - как турбины или как водяные насосы ("турбины-насосы"). Ночью, а также в выходные дни расход электрической энергии намного снижается. На это время ГАЭС включается в работу в качестве обычной насосной станции, ее генераторы-двигатели, потребляя электроэнергию, даваемую другими электростанциями, приводят в движение турбины-насосы. Последние перекачивают воду из нижнего водохранилища (реки) в верхнее (аккумулирующее). Когда же потребление электроэнергии в энергосистеме резко возрастает (в часы "пиковых" нагрузок), ГАЭС начинает работать как обычная гидроэлектростанция и производимая на ней электрическая энергия направляется в энергосистему. Время, необходимое для пуска ГАЭС или смены режима ее работы, измеряется несколькими минутами.

В таблице приведены некоторые показатели действующей и сооружаемых гидроаккумулирующих электрических станций

Название ГАЭС	Река	Мощность, МВт	Напор, м	Длина водовода, м	Нижнее водохранилище	Год выпуска
Киевская	Днепр	225	65	270	Используется водохранилище Киевской ГЭС	1973
Загорская (Московская обл.)	Кунья	1200	113	720	Специально сооружается на р. Кунья	В течение двенадцатой пятилетки
Кайшядорская (Литовская ССР)	Неман	1600	115	840	Будет использовано водохранилище Каунасской ГЭС	

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года предусматривается введение в эксплуатацию Загорской ГАЭС, развертывание строительства Ленинградской, Днестровской, Каневской гидроаккумулирующих электростанций, введение в действие Кайшядорской ГАЭС. Разработаны проекты других ГАЭС.

7. Крупнейшие тепловые электростанции СССР (на 01.01.1988 г.)

Электростанция	Установленная мощность, МВт	Число установленных агрегатов	Единичная мощность агрегата, МВт	Топливо	Год ввода на полную мощность
Экибастузская ГРЭС-1	4000	8	500	Уголь	1984
Рефтинская ГРЭС	3800	6	300	Уголь	1980
		4	500		
Запорожская ГРЭС	3600	4	300	Уголь	1977
		3	800	мазут	
Углегорская ГРЭС	3600	4	300	Уголь,	1977
		3	800	мазут	
Костромская ГРЭС	3600	8	300	Мазут	1980
		1	1200		

8. Тепловые электростанции и охрана природы

Электроэнергия в мире в настоящее время производится в основном на тепловых электростанциях (ТЭС) различных типов (примерно 80 % всей вырабатываемой электроэнергии).

В результате сгорания органического топлива образуются газообразные и твердые продукты, которые, выходя с дымовыми газами, могут загрязнять атмосферу. В таблице приводятся примерные данные, характеризующие содержание твердых частиц в дымовых газах ТЭС мощностью 1 ГВт (1 млн. кВт).

Показатели	Топливо, используемое на ТЭС		
	уголь	мазут	природный газ
Масса топлива, сжигаемого в топках ТЭС в год	2,3 млн. т	1,6 млн. т	1,9 млрд. м^3
Масса твердых частиц (золы), образующихся при сгорании топлива, т/год	4500	730	460

Для очистки дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу, от содержащихся в них твердых частиц на тепловых электростанциях используются специальные аппараты - золоуловители. В механических (инерционных) золоуловителях отделение золы происходит в результате изменения направления движения потока дымовых газов (при этом твердые частицы, сохраняя по инерции направление движения, сталкиваются со стенками аппарата и осаждаются на них). В электрических золоуловителях уносимые дымовыми газами твердые частицы проходят через электростатическое поле большой напряженности, создаваемое металлическими пластинами (электродами), несущими разноименные заряды (напряжение между пластинами примерно 30-50 кВ). В этом поле, двигаясь вместе с дымовыми газами, частицы электризуются (обычно отрицательно) и притягиваются положительно заряженными электродами.

Электрические золоуловители получили наибольшее распространение на крупных ТЭС. Они обеспечивают степень улавливания* золы до 99, 5%. Степень улавливания механических (инерционных) золоуловителей - 82-96%.

Примечание. Для очистки дымовых газов от газообразных продуктов сгорания, загрязняющих воздушный бассейн (оксидов серы и др.) используются химические методы.

---

* Степень улавливания - отношение массы уловленной золы к поступившей.

9. Солнечная электростанция

В таблице приведены данные о первой солнечной электрической станции СССР.

Мощность, МВт	5
Высота башни, на которой установлен парогенератор (паровой котел), м	70
Число плоских зеркал, отражающих солнечное излучение на парогенератор	1600
Площадь поверхности одного зеркала, м^2	25
Площадь поверхности нагрева парогенератора, м^2	154
Общая площадь поверхности зеркал, м^2	40000
Параметры пара:	
температура, °С	250
давление, Мпа	4
Масса пара, даваемого	

парогенератором в час, т	28
Число часов (расчетное) работы станции в год	1920
Годовое производство (расчетное) вырабатываемой электроэнергии, млн. кВт.ч	5,8

Место постройки ..... пос Щелкино Крымской обл.

Примечание. Зеркала оборудуются системой слежения за положением Солнца на небосводе.

10. МГД - генератор

В таблице приведены данные о сооружаемой на Рязанской ГРЭС мощной магнитно-гидродинамической энергетической установке. Эта установка состоит из собственного МГД - генератора и из работающей вместе с ним обычной паротурбинной установки.

Топливо, подаваемое в камеру сгорания МДГ - генератора	природный газ
Окислитель, подаваемый в ту же камеру сгорания	атмосферный воздух
Температура продуктов сгорания (низкотемпературной плазмы), поступающих из камеры сгорания в канал МГД - генератора, °С	2650
Общая длина канала МГД - генератора, м	30
в том числе длина рабочего участка канала	17,7
Скорость движения продуктов сгорания в канале МГД - генератора, м/с	1300
Масса продуктов сгорания, ежесекундно поступающих в канал МГД - генератора, кг	230
Температура продуктов сгорания, покидающих канал МГД - генератора, °С	2000
Мощность магнито-гидродинамического энергоблока, МВт,	582
в том числе:	
мощность собственного МГД - генератора	270
мощность паровой турбины	312

Мощное магнитное поле в канале МГД - генератора будет создаваться сверхпроводящей магнитной системой, обмотка которой погружена в жидкий гелий. Продукты сгорания, покидающие канал МГД - генератора и имеющие температуру около 2000 °С, будут использоваться для

получения водяного пара, приводящего в работу паровую турбину, соединенную с обычным турбогенератором, вырабатывающим электрическую энергию.

11. Современные гидрогенераторы большой мощности

Показатели	Где установлен гидрогенератор		
	Волжские ГЭС им. В.И. Ленина и им. XXII съезда КПСС	Братская ГЭС им. 50-летия Великого Октября	Красноярская ГЭС им. 50-летия СССР
Мощность генератора, МВт (или тыс. кВт)	115	250	500
Напряжение, В	13800	15750	15750
Частота вращения ротора,			
$с^{-1}$ (об/с)	1,1	2,1	1,6
$мин^{-1}$ (об/мин)	68,2	125	93,8
Диаметр генератора, м	17,4	13,6	19,1
Коэффициент полезного действия генератора, %	97,3	98,2	98,25
Масса генератора, т	1650	1310	1650

12. Современные турбогенераторы

Показатели	Турбогенераторы мощностью			
	200 МВт	300 МВт	500 МВт	800 МВт
Напряжение, кВ	15,75	20	20	24
Частота вращения ротора, $с^{-1}$ (об/с)	50	50	50	50
$мин^{-1}$ (об/мин)	3000	3000	3000	3000
КПД турбогенератора, %	98,7	98,7	98,6	98,8
Охлаждение	водородное	водородное	водородно-водяное	водородно-водяное
Масса турбогенератора, т	308	350	384	526
Коэффициент мощности (cos φ)	0,85	0,85	0,85	0,9
Длина турбогенератора с возбудителем, м	13,9	15,5	17,3	20,4

13. Турбогенератор рекордной мощности

Мощность турбогенератора, Мвт 1200
Напряжение, кВ 24
Частота вращения ротора, $с^{-1}$ 50
КПД турбогенератора, % 98,9
Коэффициент мощности 0,9
Охлаждение ..... водородно-водяное
Длина турбогенератора, м 24,6
Масса ротора, т 104
Масса турбогенератора, т 610

Примечание. Турбогенератор установлен на Костромской ГРЭС и работает с паровой турбиной мощностью 1200 МВт.

14. Потребление электрической энергии в народном хозяйстве, млрд. кВт.ч

		Потреблено электрической энергии					
Годы	Произведено электроэнергии	промышленностью	сельским хозяйством	транспортом	другими отраслями	Потери в сетях	Экспорт
1913	2,0	1,6	0,001	0,02	0,4	0,07	--
1928	5,0	3,4	0,035	0,3	0,9	0,4	--
1940	48,6	34,8	0,5	2,6	7,2	3,5	--
1945	43,3	31,0	0,4	1,8	6,5	3,6	--
1950	91,2	65,2	1,5	3,7	14,5	6,3	--
1960	292,3	207,5	10,0	17,6	39,4	17,8	0,03
1970	740,9	488,4	38,6	54,4	96,0	58,3	5,2
1980	1293,9	772,9	110,9	102,8	181,3	106,9	19,1
1987	1664,9	957,1	160,4	131,3	239,5	142,0	34,6

15. "Цена" сэкономленного киловатт-часа электроэнергии

1 кВт.ч электроэнергии расходуется в среднем на:

- производство 2,7 кг газетной или 1,5 кг писчей бумаги, или 13,3 кг оконного стекла, или 39 кг сахарного песка, или 2,8 кг плавленого сыра, или 1 $м^2$ хлопчатобумажной ткани;
- выпечку 36 кг хлеба;
- добычу 30 кг нефти или 15 кг железной руды, или 40 кг угля;
- выплавку 0,5 кг электростали;
- рафинировку 0,5 кг меди;

- получение при электролизе 0,2 кг алюминия;
- изготовление 2,5 пар резиновой обуви.

На изготовление одного велосипеда расходуется 25 кВт.ч электроэнергии, а на изготовление одного автомобиля - 1000-1500 кВт.ч.

Для выработки 1 кВт.ч электроэнергии на тепловых электростанциях сжигается примерно 600 г каменного угля или 300 г мазута.

16. Электрификация сельского хозяйства

Показатели	Годы					
	1950	1960	1970	1975	1980	1987
Всего потреблено электроэнергии в сельском хозяйстве, Твт.ч (млрд. кВт.ч)	1,5	10,0	38,6	73,8	110,9	160,4
Число электродвигателей в колхозах и совхозах, тыс. шт.	105	774	4760	8837	12794	16657
Мощность электродвигателей, ГВт (млн. кВт)	...	4,4	25,1	46,2	68,1	90,4

Примечание. 1. В настоящее время почти все колхозы и совхозы, а также жилые дома сельских жителей электрифицированы.

2. В соответствии с Продовольственной программой СССР на период до 1990 года отпуск электроэнергии сельскому хозяйству в 1990 г. составит 210-235 ТВт.ч.

17. Современные электровозы

Показатели	Электровоз постоянного тока		Электровоз переменного тока	
	ВЛ8	ВЛ10	ВЛ60 К	ВЛ80 К
Напряжение контактной сети, кВ	3	3	25	25
Число тяговых электродвигателей электровоза	8	8	6	8
Мощность одного тягового электродвигателя, кВт	525	650	775	790
Тяга электровоза,				
кН	346	387	310	462
кгс	35300	39500	32000	47100
Скорость при указанной тяге, км/ч	43	47	52	52
Наибольшая скорость электровоза, км/ч	100	100	100	100

18. Рост протяженности электрифицированных железных дорог в СССР

Диаграмма роста протяженности электрифицированных железнодорожных линий (в тыс. км) приведена на рисунке 3.

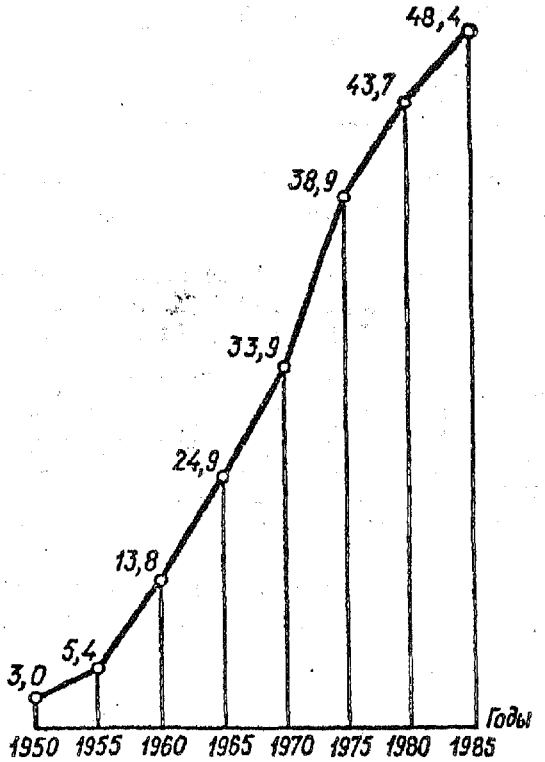


Рис. 3. Рост протяженности электрифицированных железнодорожных линий

19. Высоковольтные линии электропередачи

В таблицах приведены данные о развитии линий электропередачи в СССР и различные показатели электропередачи сверхвысокого напряжения.

Годы	Протяженность (в тыс. км) электросетей напряжением					
	35 кВ	110 кВ	154 кВ	220 и 330 кВ	400 и 500 кВ	750 и 800 кВ
1940	8,0	10,6	0,5	1,1	--	--
1950	11,9	16,5	0,5	2,5	--	--
1960	36,7	64,6	2,0	16,7	4,4	--
1965	122,3	128,1	5,1	42,5	8,3	0,5
1970	175,7	185,8	5,8	64,4	13,2	0,6
1975	241,8	244,0	7,7	89,7	19,4	2,2
1980	303,7	309,1	9,7	117,1	25,5	3,4
1987	361,8	395,2	11,5	154,3	38,6	8,1

К началу 1988 г. суммарная протяженность всех линий электропередачи напряжением 35-800 кВ составила 969,5 тыс.км.

Некоторые показатели электропередачи Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС - Москва (I) и Волжская ГЭС им. В. И. Ленина - Москва (II)

Показатели	I	II
Напряжение линий, кВ	500	500
Протяженность, км	1050	900
Число цепей линий	2	2
Передаваемая мощность, МВт	до 1500	до 1800

Опытно-промышленная линия электропередачи Конаковская ГРЭС - Москва протяженностью 90 км (1-я очередь) имеет напряжение 750 кВ и мощность 1,2 МВт.

Электропередача постоянного тока Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС - Донбасс

Напряжение линии, кВ 800
Протяженность, км 473
Передаваемая мощность, Мвт ..... до 750
КПД линии, % 94

В 1987 г. установленная мощность электростанций Единой электроэнергетической системы СССР достигла 270 ГВт (270 млн. кВт).

20. Дальность передачи электроэнергии и мощность линии передачи в зависимости от напряжения линии

Напряжение, В	Мощность линии электропередачи, МВт	Дальность передачи электроэнергии, км
127	0,002-0,01	меньше 0,1
220	0,005-0,04	» 0,2
380	0,02-0,1	» 1
660	0,05-0,5	» 2
6000	2-6	8-3
10000	3-10	15-4
35000	10-30	50-10
110000	35-50	120-20
220000	100-200	200-160
330000	300-400	300-200
500000	до 1000	1200-600
750000	1800-2500	1500-800
1150000	4000-6000	2000

21. План ГОЭЛРО

План ГОЭЛРО был первым перспективным планом восстановления и развития народного хозяйства Советской республики на основе электрификации страны. В таблице приведены основные данные, характеризующие задачи электрификации страны по плану ГОЭЛРО.

Число районных электрических станций,
намеченных планом к постройке 30
из них
тепловых электростанций 20
гидроэлектростанций 10
Мощность электрических станций,
которую намечалось ввести по
плану, ГВт (или млн. кВт) 1,75
из нее
на тепловых электростанциях 1,11
на гидроэлектростанциях 0,64
Годовое производство электроэнергии,
которое намечалось достигнуть,
ТВт.ч (или млрд. кВт.ч) 8,8

Год принятия плана ГОЭЛРО	1920
Уровень производства электроэнергии в стране в 1920 г., ТВт.ч	0,5
Мощность электростанций в 1921 г., ГВт	1,2
Уровень производства электроэнергии в 1931 г., ТВт.ч	10,7
Мощность электростанций в 1931 г., ГВт	4,0
Уровень производства электроэнергии в 1935 г., ТВт.ч	26,3
Мощность электростанций в 1935 г., ГВт	6,9
Число электростанций, построенных в стране к 1935 г.	40

План ГОЭЛРО, расчитанный на 10-15 лет, т. е. до 1931-1935 гг., в основном был выполнен уже в 1931 г.

В 1935 г. СССР по производству электроэнергии догнал и перегнал многие европейские страны и занял третье место в мире.

22. Энергетическая программа СССР

Энергетическая программа, принятая в 1983 г., основывается на расчетах развития экономики страны до 2000 г. В ней содержатся научнообоснованные принципы, главные направления и перечень важнейших мероприятий по расширению энергетической базы и качественному совершенствованию топливно-энергетического комплекса страны.

Осуществление программы расчитано на два этапа. На первом этапе, который завершается на рубеже 80-90-х гг., основное внимание уделяется увеличению объема добычи газа, ускоренному развитию ядерной энергетики в европейской части страны. Это позволило существенно уменьшить расход мазута на электростанциях. Нефть будет экономиться и замещением ее природным газом за счет перевода моторного парка на дизельное топливо и газ, а также за счет электрификации железных дорог. К концу первого этапа предусмотрено в основном решить важнейшую задачу прекращения роста потребления нефти для топлива.

Будут созданы предпосылки для интенсивного наращивания добычи угля, подготовлены условия для широкого перевода экономики на энергосберегающий путь развития. Намечено демонтировать и модернизировать на электростанциях устаревшее и малоэффективное оборудование общей мощностью 55-60 млн. кВт. Предусмотрено создать материально-техническую базу для широкого использования нетрадиционных источников энергии - солнечной, геотермальной, ветровой, приливной, биомассы (отходов сельского хозяйства и др.); увеличить использование вто-

ричных энергоресурсов; осуществлять строительство электропередач сверхвысокого напряжения.

На втором этапе, заканчивающемся на рубеже XX и XXI вв., добыча природного газа достигнет самого высокого уровня, определенного программой. Энергетические ресурсы будут расти главным образом за счет ядерной энергии, добычи угля открытым способом, вовлечения в электробаланс эффективных гидроэнергетических ресурсов. Широкое использование получат нетрадиционные энергоносители, интенсивное энергосбережение.

Намечено демонтировать и модернизировать на электростанциях устаревшее оборудование общей мощностью 70-80 млн. кВт, создать необходимый научно-технический потенциал для производства электрооборудования на основе эффекта сверхпроводимости.

На втором этапе будет завершено формирование Единой электроэнергетической системы страны.

РЕШЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА РАО "ЕЭС РОССИИ"

Рассмотрев "Предложения и программу работ по созданию солнечных фототермодинамических электростанций нового поколения", поступившие от научных, проектных, производственных организаций и фирм, секция научно - технического Совета РАО "ЕЭС России" отмечает.

1. Учитывая обращение в ЭНИН представителей энергообъединений и администраций некоторых регионов России, заинтересованных в освоении местных ресурсов солнечной энергии, в целях экономии стремительно дорожающего топлива (газа, нефти, угля и т.д.) и исключения загрязнения природы продуктами его сгорания ЭНИН совместно с конверсионными предприятиями подготовил и разослал потенциальным соисполнителям и заказчикам предложения по созданию солнечных электростанций нового поколения.

Предложенная ЭНИНом солнечная фотоэлектрическая термодинамическая электростанция, состоит из 20 отдельных модулей. В конструкции модулей предполагается использовать зеркальные параболоцилиндрические концентраторы солнечной энергии со 100-кратным концентрированием и приемники с арсенид-галлиевыми фотоэлектрическими преобразователями, рабочая температура которых составляет 100-110°С. Тепло, снимаемое при охлаждении ФЭП, утилизируется на паровом бутан-пропановом турбогенераторе.

Концепция новой СФТЭС предложена на основании выполненого ЭНИНом в 1989-93 гг. анализа 4-х ранее прорабатываемых в России и США схем СЭС: 1) фотоэлектрической с плоскими кремниевыми ФЭП без концентрирования солнечной энергии; 2) зеркальной термодинамической "башенного типа"; 3) зеркальной термодинамической с параболоцилиндрическими концентраторами типа фирмы LUZ; 4) комбинированной зеркальной термодинамической со множеством мелких двигателей Стирлинга с параболоцилиндрическими концентраторами с низкотемпературными кремниевыми ФЭП при 10 – 20-кратном концентрировании солнечной энергии.

Концепция предлагаемой СЭС основана на сравнительно недавнем открытии в России (ФТИ им.А.Ф.Иоффе), заключающемся в том, что при рабочей температуре полупроводниковых арсенид-галлиевых преобразователей около 110°С, сохраняется эффект повышенного фотоэлектрического кпд (>20%) при стократном (и выше) концентрировании солнечной энергии.

Совмещение фотоэлектрического и термодинамического процессов дает возможность получения суммарного кпд использования солнечной энергии до 40%.

2. Применение арсенид-галлиевых СЭС открывает новую возможность повышения эффективности термодинамической части и ее практической реализации к 1998 г.

В частности, целесообразно применение вместо множества мелких тепловых двигателей одного турбогенератора мощностью на уровне 1 МВт с бутан-пропановым теплоносителем в паросиловом цикле.

3. При разработке предложений по проекту арсенид-галлиевой СФТЭС ЭНИНом, в основном за счет собственных средств и кредитов, совместно с исполнителем (НТФ "БЭТ" и др.) в 1989-93 гг. был выполнен значительный объем аналитических, научно-исследовательских, технологических и опытно-конструкторских работ (НИОКР), проведен ряд семинаров, обсуждений и др. мероприятий с привлечением видных ученых и специалистов высшей квалификации.

4. Выполненный на основании работ по п.3 предварительный технико-экономический анализ ЭНИНа и ТЭП показывает, что в сравнении с чисто тепловыми электромашинными солнечными электростанциями с паросиловым циклом (типа Крымской СЭС-5, LUZ и др. указанными выше СЭС), новая СФТЭС обладает рядом положительных особенностей, в том числе:

- повышенным до 40% суммарным фототермодинамическим КПД и соответственно повышенной электрической мощностью;
- сниженной соответственно почти вдвое удельной площадью параболоцилиндрических зеркал приема солнечной энергии, стоимость которых составляет около половины стоимости солнечных электростанций;
- сниженной более чем в 10 раз площадью полупроводниковых фотопреобразователей GaAs в сравнении с кремниевыми при их работе с 10-20-кратным концентрированием и в 100 раз при работе без концентраторов;
- сниженными на 15-20% капиталовложениями в строительство солнечной электростанции и соответственно сниженной ценой на отпускаемую электроэнергию (с учетом затрат на НИОКР);
- повышенным полезным экологическим эффектом за счет снижения на 10-15% теплового загрязнения окружающей среды, связанного с выбросом паров воды через градирню турбогенератора;
- сниженным, соответственно, расходом воды при работе СФТЭС.

При разработке основного ТЭС указанные параметры должны быть уточнены (с возможным их повышением).

Поскольку схема новой СФТЭС состоит из зеркальных модулей по 50 кВт, это позволяет также наряду со строительством базового варианта с одним турбогенератором на 1 МВт в паросиловом цикле, строить малые, в т.ч. мобильные СФТЭС с мини турбоагрегатами на 25 (1/2), 50, 100 и 250 кВт по спецзаказу для удаленных поселков, ферм и т.п. объектов, не подключенных к электросетям.

Ученый Совет ЭНИН им. Г. М. Кржижановского поддерживает мнение разработчиков, что на комплектацию новой СФТЭС мощностью 1 Мвт при 100-кратном концентрировании солнечной энергии потребуется около 25 кв.м G4As ФЭП, в то время как для кремниевых ФЭП при 10-кратном концентрировании в десять раз больше.

Организация изготовления GaAs ФЭП на суммарную мощность СФТЭС более 1 МВт обеспечена научно-производственной и сырьевой базой, созданной для выполнения ракетно-космической программы в 1985-1991 гг.

5. Для начала производства и строительства СФТЭС с применением GaAs ФЭП требуется выполнить одновременно с проектированием Программу научно-исследовательских работ по решению следующих проблем:

- исключения температурной деградации GaAs ФЭП при длительной эксплуатации (до 25 лет) в режиме работы при 100-120°С;
- обеспечения стабильности оптических характеристик системы и теплового режима в паросиловом цикле;
- применения конструкционных материалов, решений для токоотводящих, повышенной мощности, электродов ФЭП, а также схем коммутации при сборке отдельных фотоэлектрических блоков;
- обеспечения теплоотвода при минимальном перепаде температур GaAs ФЭП на p-n переходе с выбором нейтрального теплоносителя в контуре теплопередачи паросилового цикла турбогенератора;
- создания альтернативного варианта GaAs ФЭП с минимально допустимой толщиной (менее 30 мкм), в том числе изготовляемых с использованием KLIFT - методики с многократно используемой подложкой с разработкой тонкопленочных защитных диодов на базе GaAs;
- проведения термодинамических исследований по оптимизации тепловой схемы СФТЭС с паросиловым циклом;
- создания и отработки оборудования для предлагаемой СФТЭС как в части фотоэлектрического преобразования солнечной энергии, так и в части турбоагрегатов и применения теплообменной аппаратуры для утилизации снимаемого тепла в паросиловом цикле из-за отсутствия необходимого опыта;
- создания и отработки оптимальных несущих конструкций зенитальной рамы и азимутальной платформы;
- выбора и создания расчетной и математической модели по оптимизации широтных вариантов СФТЭС с одноосной и двухосной системами ориентации с целью максимального использования солнечной энергии на заданной широте для выработки электроэнергии.

Для выполнения этих работ необходимо создание стендаимитатора солнечного излучения с удельной плотностью до 150 кВт/м^2, а также действующего мини-макета СФТЭС.

Заслушав и обсудив положения ЭНИНа по программе разработки солнечных фототермодинамических электростанций нового поколения с арсенид-галлиевыми фотоэлектрическими преобразователями, результаты выполненных в 1992-1994 гг. предварительных НИОКР в данном новом научно-энергетическом направлении, секция "Нетрадиционные источники энергии" НТС РАО "ЕЭС России" постановляет:

1) одобрить новое научно-энергетическое направление и программу, предложенную ЭНИНом по результатам выполненных им предварительных НИОКР с участием конверсионных предприятий для создания солнечных фототермодинамических электростанций нового поколения.

2) рекомендовать включить в отраслевую программу 09 "Нетрадиционные возобновляемые источники энергии" РАО "ЕЭС России" дополнения, изложенные в письме ЭНИНа 12-6/281 от 14.11.94 РАО "ЕЭС России" с заявленным объемом финансирования с соисполнителями: институтом "Теплоэлектропроект", НПО "Машиностроение", ЦНИИСМ, НПО "Квант", СПбФТИ, НПО "Саурн", НТФ "БЭТ", ЛОМО и др.

3) определить ЭНИН в качестве научного руководителя по программе разработки сооружения СФТЭС - 1, а институт "Теплоэлектропроект" головным разработчиком и поставщиком СФТЭС-1.

4) РАО "ЕЭС России" в 1995 г. определить место строительства СФТЭС-1 в альтернативных вариантах: Краснодарский край, Калмэнерго, Дагэнерго, Амурэнерго.

Москва 23.12.1994г..

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПЕРИОД ДО 2010 ГОДА.

Энергетическая политика Российской Федерации, определяя условия для конструктивного взаимодействия федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, предприятий, учреждений, организаций (в том числе некоммерческих) и предпринимателей в сфере энергетики, исходит из следующих приоритетов:

устойчивое обеспечение страны энергоносителями;

повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и создание необходимых условий для перевода экономики страны на энергосберегающий путь развития;

создание надежной сырьевой базы и обеспечение устойчивого развития топливно-энергетического комплекса формирования рыночных отношений;

уменьшение негативного воздействия энергетики на окружающую природную среду;

поддержание экспортного потенциала топливно-энергетического комплекса и расширение экспорта его продукции;

сохранение энергетической независимости и обеспечение безопасности Российской Федерации.

Основной задачей энергетической политики Российской федерации на этапе до 2010 года является структурная перестройка отраслей топливно – энергетического комплекса, предусматривающая:

увеличение доли природного газа в суммарном производстве энергетических ресурсов и расширение его использования в экологически неблагополучных промышленных центрах и для газификации села;

дальнейшее развитие электрификации, в том числе за счет экономически и экологически обоснованного использования атомных и гидроэлектростанций, нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

стабилизацию добычи нефти в Западной Сибири и других регионах, создание условий для формирования новых нефтегазодобывающих регионов;

увеличение производства высококачественных светлых нефтепродуктов за счет повышения эффективности переработки нефти;

обеспечение необходимых объемов добычи угля с учетом экономических, социальных и экологических факторов, дальнейшее развитие углеобогащения и комплексной переработки угля с целью получения экологически приемлемых и конкурентоспособных продуктов, в том числе высококачественного бытового топлива;

расширение использования местных топливно-энергетических ресурсов, включая нетрадиционные возобновляемые источники энергии;

реализацию потенциала энергосбережения за счет создания высокоэффективного топливо- и энергопотребляющего оборудования, теплоизоляционных материалов и строительных конструкций.

В научно-технической сфере энергетическая политика Российской Федерации предусматривает:

разработку технологий, обеспечивающих ускоренное техническое перевооружение действующих и создание новых объектов энергетики;

обеспечение безопасности действующих атомных станций, создание нового поколения безопасных ядерных энергетических установок в целях развития атомной энергетики в экономически целесообразных масштабах;

создание и организацию серийного производства установок малой энергетики, в том числе с использованием гидроэнергетических ресурсов, солнечной, ветровой, геотермальной энергии и других нетрадиционных источников энергии;

повышение эффективности работ по поиску, разведке и разработке месторождений топливно-энергетических ресурсов с учетом экологических требований;

глубокую переработку и комплексное использование топливно-энергетических ресурсов.

Осуществление энергетической политики Российской Федерации во внешнеэкономической сфере должно содействовать:

взаимовыгодному сотрудничеству Российской Федерации с государствами - участниками Содружества Независимых Государств;

созданию правовых и экономических условий выполнения обязательств, вытекающих из международных договоров Российской Федерации;

расширению взаимовыгодного сотрудничества Российской Федерации с зарубежными странами по освоению их топливно-энергетических ресурсов и продвижению российских экспортеров на новые энергетические рынки.

Энергетическая политика Российской Федерации реализуется на федеральном и региональном уровнях на основе Конституции Российской Федерации, законодательных и иных нормативных актов и предусматривает:

правовое регулирование отношений в сфере топливо- и энергообеспечения;

содействие со стороны федеральных органов исполнительной власти субъектам Российской Федерации в решении энергетических проблем;

учет интересов энергоизбыточных и энергодефицитных регионов при сохранении единства и роли федеральных энергетических систем как одного из важнейших факторов укрепления экономической и политической интеграции страны;

участие органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления в пределах их компетенции в обеспечении надежного, безопасного и эффективного энергоснабжения населения и предприятий;

сосредоточение основной работы по использованию потенциала энергосбережения в регионах .

Энергетическая политика Российской Федерации осуществляется путем:

регулирования на федеральном и региональном уровнях цен (тарифов) на энергоресурсы в порядке, определенном законодательными и иными нормативными актами;

формирования энергетического рынка и создания конкурентной среды в сфере производства и потребления энергоносителей;

совершенствования налоговой политики;

поддержки строительства важнейших объектов топливно-энергетического комплекса и реализации энергосберегающих проектов;

разработки и осуществления мероприятий, связанных с созданием сезонных запасов топлива на электростанциях и для населения, закачкой газа в подземные хранилища и завозом топлива в северные регионы страны;

селективной поддержки предприятий и объектов социальной сферы угольной промышленности;

адресной поддержки малоимущих слоев населения с целью компенсации расходов, вызванных приведением цен (тарифов) на топливо и энергию в соответствие с их реальной стоимостью;

реализации федеральной целевой программы "Топливо и энергия", инвестиционных, научно-технических и других энергетических программ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солнечная энергетика: Пер.с анг. и франц./ Под ред. Ю.Н. Маковского и М.М. Колтуна.-М.: Мир, 1979.-390с.

2. Андреев В.М., Грихлес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. - Л.: Наука, 1989.-360с.

3. Алексеев В.В. Экология и экономика энергетики. - М.: Знание, 1990. - 64 с.

4. Алексеев В.В., Чекарев К.В. Солнечная энергетика. - М.: Знание, 1991. - 64 с.

5. Киселев Г.В. Экология и экономика энергетики. - М.: Знание, 1990. - 64 с.

6. Желудев И.С. Электрические кристаллы. - М.: Наука, 1969. - 214 с.

7. Волченкова Р.Д. Термоэлектрические материалы (двухкомпонентные системы). - М., 1987. - 92с.

8. Ребанс К.К. Энергия, энтропия, среда обитания. - М.: Знание, 1985. - 64с.

9. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. - Киев: Наукова думка, 1979.

10. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. - М.: Энергоиздат, 1982.

11. Васильев А.М., Линдеман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. - М.: Советское радио, 1971.

12. Тепловые и атомные электрические станции:/Справочник Общей ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. Книга 3. - Н.: Энергоатомиздат, 1989.-590 с.

13. Ветроэнергетика/Под ред. Д. Рензо. - М.: Энергоатомиздат, 1982.

14. Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане /Под ред.А.В. Щербакова и В.И. Дворова. - М.: Наука, 1985.

15. Грихлес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б. Солнечная энергия и космические полеты. - М.: Наука, 1984.

16. Энергетика мира (Переводы докладов XIII конгресса МИРЭК). - М.: Энергоатомиздат, 1989.

17. Дворов И.М. Геотермальная энергетика. - М.: Наука, 1976.

18. Колтун М.М. Селективные оптические поверхности преобразователей солнечной энергии. - М.: Наука, 1979.

19. Коровин Н.В. Новые химические источники тока. - М.: Энергия, 1974.

20. Коровин Н.В. Электрохимические генераторы. - М.: Энергия, 1974.

21. Котырло Г.К., Лобунец Ю.Н. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов: Справочник. - Киев.: Наукова думка, 1980.

22. Лидоренко Н.С., Мучник Г.Ф. Электрохимические генераторы. - М.: Наука, 1981.

23. Мангушев К.И. Проблемы развития геоэнергетики мира. - М.: Наука, 1981.

24. Недоспасов А.В., Побережский Л.П., Чернов Ю.Г. Состав и свойства рабочих тел МГД-генераторов открытого цикла. - М.: Наука, 1977.

25. Основные положения энергетической программы СССР на длительную перспективу. - М.: Издат. полит. литературы, 1984.

26. Охотин А.С., Ефренко А.А., Пушкарский А.С. Термоэлектрические генераторы/Под ред. А.Р. Регеля. - 2-е изд. - М.: Атомиздат, 1976.

27. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики климата СССР. - Л.: Гидрометеоиздат, 1977.

28. Поздняков Е.А., Коптелов В.С. Термоэлектрическая энергетика. - М.: Атомиздат, 1974.

29. Стаханов И.П., Черковец В.Е. Физика термоэмиссионного преобразователя. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

30. Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. - М.: Атомиздат, 1974.

31. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. - М.: Энергоатомзидат, 1983.

32. Щербинин П.П. Термоэмиссионные преобразователи. - М.: ВИНИТИ, 1981.

33. Эрден-Груз Т. Химические источники энергии. - М.: "Мир", 1974. 304 с.

34. Гаджиев Г., Тарикулиев И., Абдурахманов Г., Цапиева О. Энергетика Дагестана: настоящее и будущее, Дагестанская правда, 24 сентября 1994.

35. Давудов М.К. Тепловые характеристики системы солнечного отопления в условиях Дагестана и аппроксимационный метод их расчета для южных районов СССР. Автореф. канд. дисс. 1990.

36. Н.И. Исмаилов. Претворенные заветы (очерк истории электрофикации Дагестана). - Махачкала, 1982.

37. Богуславский Э.И. Технико-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр. - Л.:Лен. ун-т, 1984.

38. Волшаник В.В. и др. Использование энергии ветра, океанских волн и течений. - М.: ВИНИТИ, 1983.

39. В.Х. Муслимов. Гидроэнергетические ресурсы Дагестанской АССР. - Махачакала, 1972.-212с.

40. Дворов И.М., Дворов В.И. Освоение внутриземного тепла. - М., Наука, 1984.

41. Курносов А.Т. Современные и перспективные теплогенераторы. Воронеж: ВГУ, 1985.
42. Мак-Кормик М. Преобразование энергии волн. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
43. Мангушев К.И. Проблемы развития геоэнергетики мира. - М., Наука, 1981.
44. Найшуллер Г.А. Первенец советской приливной энергетики.- Мурманск, 1981.
45. Энергия ветра. Оценка технического и экономического потенциала. - М.: Мир, 1982.
46. Богоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. М., Энергоиздат, 1981.
47. Куков Ф.И. Введение в специальность: электрохимическая энергетика. Учебное пособие. - Новочеркасск: НПИ, 1983.
48. Лидоренко Н.С., Мучник Г.Ф. Электрохимические генераторы. - М.: Энергоиздат, 1981.
49. Мучник Г.Ф. Новые методы преобразования энергии. М.,Знание. 1984 - № 4. Сер. "Техника". Химические источники тока. Сб. статей. - Л.: Энергоатомиздат, 1983.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	стр.4
Введение. Проблемы энергетики.	5
ГЛАВА I. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ	
§1. Состояние и тенденции развития энергетики Дагестана.	9
§2. Основные звенья и экономические проблемы ТЭК (топливно-энергетический комплекс).	10
§3. Экологические проблемы ТЭК РД.	12
§4. Бестопливная концепция энергетики - путь прогресса экономики Дагестана.	14
§5. Экономические механизмы бестопливной концепции энергетики.	16
ГЛАВА 2. ЭНЕРГИЯ.	
§1. Работа и энергия.	18
§2. Необходимые для общества формы энергии.	20
§3. Коэффициент полезного действия процессов превращения энергии.	27
§4. Происхождение природных источников энергии.	30
§5. Солнце как важнейший источник энергии.	41
§6. Химические связи как накопители энергии.	43
§7. Освобождение и превращение химической энергии.	45
§8. Почему химическая энергия не высвобождается сама собой?	47
ГЛАВА 3. ТЕПЛО	
§1. Что такое тепло?	54
§2. Превращение различных видов энергии в тепло.	56
§3. Превращение тепла в работу. Невозможность создания вечного двигателя.	59
§4. Два начала термодинамики.	62
§5. Коэффициент полезного действия процесса превращения тепла в работу.	71
§6. Охлаждение нагреванием.	73
§7. Как протекают процессы в природе?	75
§8. Хаотичность и упорядоченность в мире молекул.	79
§ Энтропия.	82
ГЛАВА 4. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА	
§1. Характеристика солнечной радиации.	86

§2. Термодинамическое преобразование солнечного излучения.	89
§3. Фотоэлектрическое преобразование солнечного излучения (ФЭП).	107
§4. Биоконверсия солнечной энергии.	117
§5. Гибридные солнечные станции.	123
§6. Солнечные печи.	126
§7. Солнечная космическая электростанция (СКЭС).	128
Заключение.	132
ГЛАВА 5. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА	
§1. Источники тепла в недрах Земли.	135
§2. Геотермальные ресурсы Земли.	135
§3. Схема действующих ГеоТЭС.	137
§4. Достоинства и недостатки геотермальной энергетики.	139
§5. Петротермальная энергия.	141
ГЛАВА 6. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА	
§1. Ресурсы ветровой энергии на территории России.	143
§2. Принципы преобразования ветровой энергии.	145
§3. Достоинства и недостатки ветроэнергетики.	149
§4. Ветроэлектрические станции	150
ГЛАВА 7. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА	
§1. Характеристика гидроэнергетики.	152
§2. Принцип преобразования гидроэнергии.	153
§3. Гидравлическая турбина.	155
§4. Гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС).	157
§5. Достоинства и недостатки гидроэнергетики.	158
§6. Возможности получения энергии из океана.	158
ГЛАВА 8. ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ	
§1. Термодинамика термоэлектрического преобразования.	163
§2. Основные направления в создании термоэлектрических материалов.	165
§3. Основные характеристики термоэлектрических материалов.	166
§4. Поиски составов, легирование термоэлектрических материалов.	167
§5. Основные технологии изготовления термоэлектрических материалов.	168
§6. Схемы термоэлектрогенераторов.	169

ГЛАВА 9. ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	
§1. КПД термоэмиссинного преобразователя.	171
§2. Режимы работы ТЭП.	174
ГЛАВА 10. МГД-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	
§1. Принцип действия МГД-генератора.	177
§2. Плазменные МГД-генераторы.	178
§3. МГД-установки открытого цикла.	180
§4. МГД-установки замкнутого цикла.	182
§5. Достоинства и недостатки МГД-генераторов.	184
ГЛАВА 11. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ	
§1. Непосредственное преобразование химической энергии в работу.	185
§2. Принцип действия гальванических элементов.	188
§3. Особенности гальванических элементов как источников тока, их преимущества и недостатки.	193
§4. Водородная энергетика.	195
Приложения	197
Справочные таблицы о состоянии энергетики Дагестана	199
Справочные таблицы о состоянии энергетики России	215
ЛИТЕРАТУРА	239

МАГОМЕДОВ
Абук Магомедович

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Редактор *М. Расулова*
Корректор *М. Расулова*
Техн. редактор *Н. Савицкая*
Художник *С. Магомедова*

ЛР 040092

Сдано в набор 20.05.96. Подписано в печать 7.08.96. Формат 60×84 1/16. бумага типографская № 2. Печать офсетная. Усл. п. л. 14,4. Уч.-изд. л. 14,0. Тираж 400. Заказ 10.

АОЗТ "Издательско-полиграфическое предприятие "Юпитер".
367012, Махачкала, ул. Пушкина, 6