

**ЛЕКЦИИ ЛАУРЕАТОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ПРЕМИИ «ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ»**

«Размышления о некоторых проблемах энергетики»

**Лауреат Международной энергетической премии
«Глобальная энергия» 2004 года,
почетный директор Института высоких температур РАН
академик Александр Ефимович ШЕЙНДЛИН**

Дамы и господа!

Позволю себе предложить Вашему вниманию размышления о некоторых важных проблемах энергетики, основанные на более чем 60-летнем опыте деятельности в области энергетической науки, ее прикладного применения и данных современного положения дел в энергетике.

Развитие и совершенствование энергетики должны проводиться на основе достижений фундаментальной и прикладной науки, разработки новых технологий, позволяющих создавать высокоэффективное энергетическое оборудование, и, наконец, с учетом огромной роли энергетики для страны и мира, возможности на основе технико-экономического анализа принимать соответствующие политические решения.

Надо сказать несколько пафосно, что энергетика и в большой степени ее электроэнергетическая составляющая во многом определяют безопасность государства.

До последнего времени отечественная электроэнергетика была одной из лучших в мире. Основанием для такого заключения является созданная на основе достижений науки вполне современная технологическая база, позволявшая нашему энергомашиностроению полностью обеспечить потребности отечественной электроэнергетики.

Важной положительной стороной нашей электроэнергетики помимо наличия хорошего обеспечения генерирующими мощностями являлось создание уникальной Единой Энергетической Системы – ЕЭС России (фиг. 1).



Фиг. 1

Начало ее создания относится ко второй половине 50-х годов прошлого века, когда с пуском Куйбышевской, а затем и Сталинградской - уникальных для того времени гидроэлектростанций (теперь Волжская ГЭС им. В.И. Ленина и Волжская ГЭС в г. Волжском соответственно) - были построены протяженные – длина одной цепи около 1000 км – системообразующие линии электропередачи напряжением 500 кВ, соединившие Московскую, Куйбышевскую (Самарскую) энергосистемы и энергосистемы Урала.

ЕЭС России – одна из самых надежных энергосистем в мире. За все годы ее существования не было крупных аварий, подобных тем, которые систематически происходят в других странах, в том числе имевших место в последнее время в США, Великобритании, Италии и др. Высокая живучесть ЕЭС России, т.е. способность противостоять развитию нарушений, возникающих в отдельных ее частях, является следствием высокой степени ее организации и оснащенной эффективной противоаварийной автоматикой. В ЕЭС России на 8 млн кВт снижается потребность в рабочей и резервной мощности за счет параллельной работы электростанций, расположенных в разных часовых поясах. В концепцию развития ЕЭС были заложены принципы концентрации мощностей и централизации энергоснабжения. В настоящее время протяженность электрических сетей всех напряжений в ЕЭС России составляет свыше 2,5 млн км, в том числе системообразующих, напряжением 220–1150 кВ, - более 150 тыс. км.

Потребность России в электроэнергетике удовлетворяется в настоящее время наличием электростанций, суммарной мощностью превышающих 215 млн кВт. Свыше 20% составляют ГЭС, более 10% – АЭС и почти 70% – тепловые электростанции (ТЭС), работающие в основном на природном газе (63%) и твердом топливе (28%). В структуре отечественной энергетики значительное

место занимают ТЭС на сверхкритические параметры пара с энергоблоками мощностью 250, 300, 500, 800 и 1200 мВт.

Необходимое количество энергии определяется, как известно, потребностями экономики в широком ее понимании, включая и социальную ее составляющую. В настоящее время эти потребности по секторам экономики распределяются примерно следующим образом:

– промышленность	– 33%
– коммунальный сектор	– 37%
– транспорт	– 19%
– сельское хозяйство	– 3%
– нетопливные нужды	– 8%

По всем прогнозам, планируется рост потребления энергии, который обычно связывают с энерговооруженностью населения (т.у.т./душу.год). Однако нельзя считать, что можно беспредельно наращивать потребление энергии.

Задача состоит в том, чтобы, используя меньшее количество энергии, получать больший результат.

Обычно эту тенденцию называют повышением энергоэффективности:

- повышение эффективности использования первичных источников энергии, т.е. увеличение КПД преобразования энергии;
- снижение прямых потерь на всех этапах;
- переход на менее энергоемкие технологии;
- использование более эффективного оборудования при конечном потреблении энергии.

Следует, однако, заметить, что в настоящее время положение дел в энергетике изменилось, и в основном не в лучшую сторону.

Рассмотрим ряд проблем, стоящих, с моей точки зрения, перед энергетикой.

Совершенствование основных технологий производства электроэнергии

Бурное развитие электроэнергетики в целом и теплоэнергетики в частности в 50–60-е и последующие годы вывело российскую энергетiku на передовые позиции в мире. Вместе с тем в последние годы обострился процесс физического и морального старения электростанций и сетей, которые сооружались по проектам 50-летней давности и в настоящее время не соответствуют ужесточившимся требованиям к энергоустановкам в области экологии, эффективности топливоиспользования, надежности и безопасности. Поэтому из всего спектра проблем, накопившихся в электроэнергетике, на первый план вышли задачи ее технического перевооружения.

Достижение высокой степени указанной выше энергетической эффективности – главная цель технического перевооружения электроэнергетики и прежде всего ее основной части – теплоэнергетики. Обновление морального ресурса, то есть переход на новый уровень энергетических технологий, обеспечивающих существенно более высокие показатели энергоэффективности и, как правило,

защиты окружающей среды и надежности - единственный способ достижения этой цели.

Если КПД по выработке электроэнергии на лучших отечественных паросиловых ТЭС, работающих на газе, не превышает 39%, то на современных парогазовых установках (ПГУ) его величина составляет 55–60%, а выбросы в атмосферу вредных веществ, например окислов азота, в расчете на 1 кВтч, на порядок ниже, чем в паросиловых установках. Основу таких ПГУ составляют газовые турбины большой мощности с КПД, приближающимся к 40%, и температурой газа на входе до 1500°С. Ежегодный ввод ПГУ в мире в последнее десятилетие составил около 85 млн. кВт, а в текущем десятилетии составит 107 млн кВт, или почти половину всех вводимых в мировой электроэнергетике мощностей. В России из установок подобного класса введен в эксплуатацию лишь один энергоблок ПГУ-450 на Северозападной ТЭЦ Ленэнерго (фиг. 2). Этого явно недостаточно.



Фиг. 2

Применительно к угольной теплоэнергетике продвижение вперед означает также совершенствование и развитие термодинамических циклов на основе повышения параметров пара – давления и температуры. Этот процесс проходил в течение всего прошлого столетия и особенно интенсивно - во второй его половине. Теплоэнергетика России последовательно прошла низкие, высокие и сверхкритические параметры пара вплоть до 240 атм. и 545/545°С, которые были освоены в 60-х годах.

В настоящее время в развитых странах освоены газовые и угольные энергоблоки на давление 300 атм. и температуру 600/620°С. Их КПД 44–45%. В ближайшие 10–12 лет в Европейском Союзе будет создан пылеугольный энергоблок с параметрами пара 350 атм. и 700–800°С. КПД таких энергоустановок составит 54–55%. В России подобные работы проводились в 60-е годы. Тогда на Каширской ГРЭС был создан уникальный предвключенный энергоблок СКР-100 мощностью 100 мВт с параметрами пара 315 атм. и 650°С. В этот период отечественная теплоэнергетика имела мировой уровень в области новых разработок. В настоящее время у нас такого оборудования нет, если не считать экспериментальный котел небольшой паропроизводительности, длительное время надежно работающий во Всероссийском Теплотехническом институте. То же можно сказать и о других технологиях и использовании полученного при переработке угля газа в высокоэффективных ПГУ, сжигании низкосортных топлив в кипящем и циркулирующем кипящем слое и т.д. Это отставание консервирует существующие устаревшие технологии и в ближайшие годы может болезненно отразиться на экономике страны.

Необходимы решительные действия по проведению указанных выше и других подобных работ в технологической области.

Исследования свойств веществ и процессов

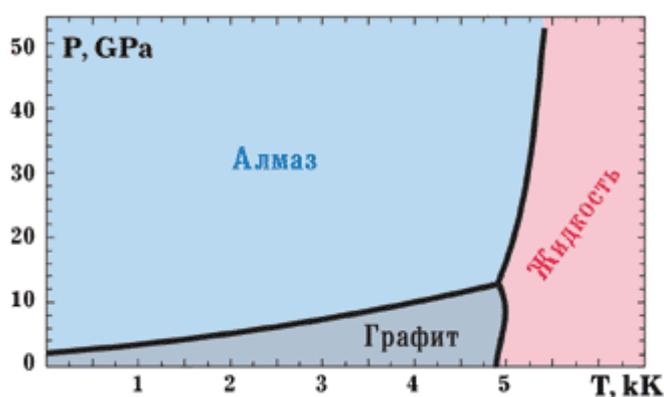
Изучение свойств веществ, применение которых может быть эффективно использовано в энергетике, представляет собой важную задачу фундаментальной науки.

Знание ряда таких свойств подчас открывает совершенно неожиданные перспективы.

Набор новых веществ для их изучения почти беспределен, если исходить из возможностей их синтеза.

Однако существует довольно широкий ряд веществ, возможности применения которых в энергетике уже сегодня представляются перспективными.

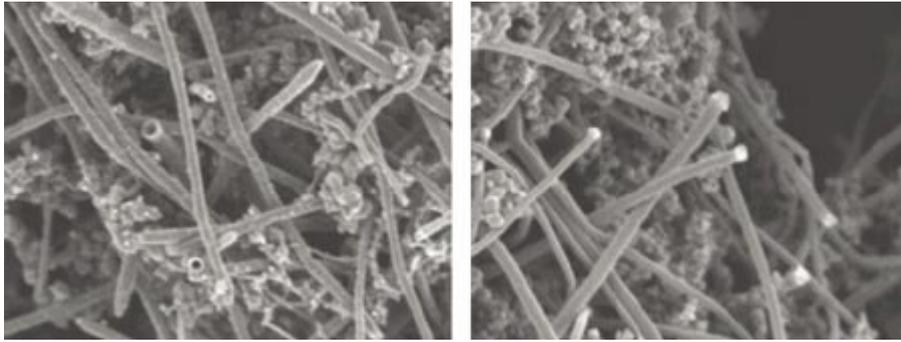
Возьмем, например, углерод. Казалось бы, мы все о нем знаем. Однако это далеко не так. Даже фазовая диаграмма углерода (фиг. 3) до сих пор не уточнена.



Фиг. 3

Нет полной ясности о характере плавления углерода, и даже величина температуры плавления не уточнена. Если такие фазы углерода, как графит и алмаз, хорошо изучены, то недавно синтезированные новые структуры углерода, как, например, фуллерены и карбин, изучены недостаточно, а по карбину вообще у ряда исследователей, по существу, имеется много неясностей.

А ведь уже сейчас новое в использовании углерода в энергетике активно просматривается. Соответствующей обработкой углерода представляется возможным достичь такой структурной его особенности, при которой образуются так называемые нанотрубки (фиг. 4), которые позволяют затем применять этот материал, например, для эффективной сорбции водорода. Это может обеспечить решение проблемы хранения водорода при использовании его в водород-воздушных топливных элементах.



Фиг. 4

Другой пример необходимости проведения широких исследований относится к весьма перспективному ядерному топливу на основе нитрида урана. Как известно, в настоящее время в ядерной энергетике широко используется ядерное топливо на основе диоксида урана.

Нитрид урана и другие нитридные соединения обладают большей, чем диоксид урана, теплопроводностью, и уже только это существенно благоприятно влияет на работу твэлов и всю активную зону реактора.

Однако если диоксид урана и его конкретное применение в ядерной энергетике хорошо изучены, то это нельзя сказать о нитриде урана. Нужны широкие исследования в этой области, в том числе и с облученным материалом в горячих камерах.

Как известно, наиболее эффективными теплоносителями для перспективных энергетических установок – в первую очередь для установок атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах – являются жидкие металлы.

Уникально высокая теплопроводность металлов определяет наилучшие теплосъемные характеристики жидкометаллического теплоносителя, а низкое давление насыщенного пара обеспечивает преимущества в конструкции оборудования и удобство в его эксплуатации.

Максимально близкой перспективой применения в качестве теплоносителей обладают щелочные металлы (литий, натрий, калий, рубидий, цезий), характеризующиеся низкими температурами плавления и плотностью.

Особенно интересными в этом плане являются двойные и тройные сплавы щелочных металлов. Варьирование компонентного состава этих сплавов дает возможность, во-первых, регулировать их свойства в зависимости от требований эксплуатации установок, а во-вторых, максимально расширить рабочий температурный диапазон жидкой фазы как в сторону высоких, так и в сторону предельно низких температур.

• $X_{Na}=0.139$, $X_K=0.435$, $X_{Cs}=0.426$

Тройная эвтектика Na-K-Cs

$T_{пл}=195\text{K}$ ($t = -78^\circ\text{C}$)



**ДИАГРАММА ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ
ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ Na-K-Cs**

Фиг. 5

В качестве примера на фиг. 5 изображена диаграмма фазового равновесия тройной системы Na–K–Cs. Эвтектическая точка этой системы (состав указан на рисунке) имеет температуру плавления $T = 195\text{ K}$ ($t = -78^\circ\text{C}$) и является самой низкотемпературной из известных на Земле металлических жидкостей, оставаясь жидкой практически в любых земных условиях. Одно из технологических преимуществ таких сплавов состоит в отсутствии необходимости расплавления теплоносителя, что крайне существенно ввиду изменения объема металла при плавлении.

Наряду с созданием теплоносителей с широким температурным интервалом существования жидкой фазы представляют интерес эвтектики многокомпонентных систем как фазопереходные аккумуляторы тепла.

На основе 3- и 4-х компонентных систем, состоящих из Li, Na, K, Mg\F, Cl, Br, So_4 , удастся создать эвтектические системы, которые плавятся в интервале температур $500\text{--}600^\circ\text{C}$, наиболее интересном для использования в солнечных электростанциях. Важно, что эти эвтектики имеют высокую теплоту плавления/затвердевания – на уровне 500 кДж/кг .

Очень интересно изучение целой группы веществ с так называемыми необычными свойствами, например вещества с сохранением памяти и другие.

Говоря об интересных задачах в области фундаментальных исследований процессов, могущих иметь большое значение для энергетики, назову для примера два таких процесса.

Как известно, прикладное значение науки в области магнитной гидродинамики для энергетики связано, в частности, с возможностями создания высокоэффективных плазменных МГД-установок. Основными трудностями при этом являются сравнительно низкая эффективная электропроводность рабочего тела (плазмы) и требуемая высокая напряженность магнитного поля.

Представляет большой интерес изучение различных процессов получения нужных высоких значений эффективной электропроводности плазмы путем создания нужной для этой цели неравновесности с минимальной затратой энергии.

Совсем другие, весьма важные для энергетики процессы, должны изучаться при применении принципиально новых рабочих тел в различных поисковых видах термодинамических циклов, а также ряда новых теплоносителей в перспективных энергетических установках. Типичным примером таких исследований является широкое изучение гидродинамики, теплообмена и коррозионных характеристик свинца с соответствующими добавками. Этот теплоноситель предлагается рядом специалистов для применения в имеющем определенные перспективы новом виде ядерного реактора - на быстрых нейтронах.

Сказанное здесь только иллюстрирует подход к проведению крайне необходимых для энергетической науки фундаментальных и соответствующих прикладных широких исследований, без которых нельзя говорить о необходимом совершенствовании энергетики.

Проблемы эффективного использования органического топлива

Природный газ

Говоря об использовании природного газа, позволю себе высказать крамольную мысль о необходимости прекратить в нашей стране ориентироваться на использование природного газа как основного топлива в электроэнергетике. В электроэнергетике должна быть разработана и осуществляться государственная программа перехода электроэнергетики прежде всего на уголь и другие сравнительно малоценные первичные источники энергии – отходы от газонефтепереработки, сланцы, бытовые отходы, топливо с выработанных и малодебитных месторождений, попутные газы при нефтедобыче и т.п.

При обсуждении разумного использования природного газа в энергетике речь должна идти не только о повышении эффективности его использования, но и о поиске новых его технико-экономически оправданных источников.

Что касается первого, то здесь необходимо прежде всего снова упомянуть о все более внедряемых парогазовых установках. Примером второго, как уже сказано выше, упомянем большое число малодебитных и выработанных неиспользуемых газовых месторождений.

Чрезмерная привлекательность природного газа для потребителей при убыточности его поставок на внутренний рынок по действующим ценам создает растущую напряженность баланса газа. Поскольку он обеспечивает почти половину внутреннего потребления энергоресурсов (в Европейской части – свыше

Из этого анализа ясно, что для выбранного малого месторождения его освоение представляется весьма перспективным и вполне технико-экономически оправданным. Таких, часто абсолютно неперспективных с точки зрения того или иного газового монополиста, месторождений много, однако в интересах страны они должны осваиваться.

Весьма эффективным может быть и более широкое применение природного газа, например, пропан-бутановых его фракций в транспортных, прежде всего автомобильных двигателях. Крайне важным для всей проблематики использования природного газа является для нашей страны задача широкого освоения технологий ожижения природного газа, что, в частности, может решить ряд кардинальных вопросов транспортировки газа в весьма перспективных экспортных направлениях.

Нефть

Использование в энергетике жидких углеводородов, полученных при переработке нефти, связано прежде всего с потребностями транспорта. Полученные при глубокой переработке нефти бензин и дизельное топливо являются таким топливом. Структура расходуемого на ТЭС топлива изменяется в сторону уменьшения доли мазута до 3–4% к 2020–2025 годам, что корреспондирует с увеличением глубины переработки нефти.

Нефть, как и природный газ, является топливом, проблемы технико-экономической обоснованности добычи и использования которого являются жизненно важными для страны вопросами самого ближайшего будущего. Так, например, для нашей страны, по некоторым данным, обеспеченность разведанными запасами сегодняшних уровней добычи составляет по нефти лишь несколько больше чем на 20 лет, по газу – на 90 лет, тогда как по углю и природному урану многие сотни лет.

Помимо интенсификации разведки месторождений нефти, так же как природного газа, следует обратить большое внимание на освоение малодобитных нефтеместорождений и разработку технологий, позволяющих достаточно эффективно осуществлять нефтедобычу на ранее выработанных месторождениях.

Уголь

Уголь, как уже отмечалось выше, должен быть основным видом органического топлива для крупной энергетики. Однако не имеющий аналогов в мире перекося цен на взаимозаменяемые энергоносители – газ, уголь и мазут – искажает мотивации потребителей, ориентируя их на завышенный спрос на природный газ.

Говоря об использовании угля, запасы которого у нас в стране исключительно велики, следует обратить особое внимание на наблюдаемое за последние 10–20 лет практически полное прекращение фундаментальных исследований и новых технологических разработок по эффективному использованию угля в энергетике. Здесь и работа по эффективному, экологически чистому сжиганию угля, энергетическому его использованию, переработке угля для получения синтетического жидкого и газообразного топлива, его обогащению вплоть до брикетирования, решение сопутствующих экологических проблем его широкого применения.

Нам представляются необходимыми решительные меры перевода тепловой электроэнергетики с преимущественной ориентировки на природный газ, на уголь. В этом отношении кардинальным фактором является правильная инвестиционная политика.

Не могу не согласиться, что аккумуляция собственных и привлечение внешних инвестиций в топливно-энергетические отрасли невозможны без радикального изменения ценовой политики. Речь идет не о ценах нефти и нефтепродуктов (они адекватны сложившимся правилам рынка) и не о ценах угля – они выйдут на разумные уровни при развитии рыночных отношений. Ценовую политику нужно в корне менять в естественных монополиях – газовой отрасли, дающей почти половину приходного топливно-энергетического баланса, и в электроэнергетике и теплоснабжении, на которые приходится 60% его расходной части.

Теплофикация

В Советском Союзе особенно успешно в широких масштабах развивалась теплофикация.

Этому были свои причины.

В конце 20-х – начале 30-х годов прошлого века по инициативе ряда отечественных энергетиков были приняты и затем осуществлены решения по массовому строительству крупных теплоэлектростанций с комбинированной выработкой электроэнергии и тепла.

Научно-техническое обоснование такого решения в те годы было вполне оправданным. КПД тогдашних электростанций, работающих с паротурбинной техникой невысоких параметров, составлял величину порядка 25%, и тем самым имели место огромные потоки не используемого низкопотенциального тепла.

Теплофикационный режим работы электростанций путем системы отборов пара в турбинах, использования турбин с противодавлением, или того и другого позволял резко увеличить эффективность использования топлива.

Теплофикация обеспечивала возможность экономически весьма эффективного теплоснабжения (отопления) соответствующих районов населенных пунктов, где размещены электростанции.

Естественно, для передачи тепла от теплофикационной электростанции к его потребителю – зданиям и сооружениям - требовалась разветвленная трубопроводная система подвода горячей воды. Такая трубопроводная система, как правило, прокладывалась под землей, нуждалась в эффективной теплоизоляции и, наконец, в соответствующем резервировании и управлении работой.

Все это с учетом особенностей тогдашней политической системы с жестким планированием и централизацией было осуществлено с большим размахом в пределах всей страны и превосходило подобное во всем мире.

Так, например, более 72% всей тепловой энергии и до настоящего времени производится централизованными источниками (мощностью более 20 Гкал/час), в том числе почти 32% тепловой энергии вырабатывается в теплофикационном (комбинированном) цикле на электростанциях.

Казалось бы, масштабную теплофикацию следует развивать и далее.

Однако ее состояние сегодня и достигнутая степень совершенства электроэнергетики и энергетического оборудования, по нашему мнению, требуют на это иного взгляда.

Во всех системах централизованного теплоснабжения вырабатывается около 1,4 млрд Гкал в год, из них порядка 0,8 млрд Гкал в год - на теплоэлектростанциях. Протяженность трубопроводных систем составляет колоссальную величину – более 250 000 км. При этом, по некоторым оценкам, около 80% сетей требуют замены или капитального ремонта и не менее 15% находится в аварийном состоянии. На каждые 100 км тепловых сетей ежегодно регистрируется в среднем 70 повреждений. Теплопотери в тепловых сетях достигают 30%, а утечки теплоносителя - более кубокилометра воды в год.

С другой стороны, достижение эффективности тепловых электростанций при применении парогазовых установок позволяет говорить о КПД, превышающем 60% (в конденсационном) режиме, что резко снижает тепловую составляющую возможного комбинированного теплофикационного цикла.

И, наконец, уровень современных технологий позволяет создавать оборудование электростанций, лишь на немного зависящее по эффективности от величины единичной мощности этого оборудования.

Тем самым напрашивается необходимость определенного пересмотра установившихся ранее взглядов на широкую теплофикацию со строительством крупных ТЭЦ.

Полагаю, что следует самым серьезным образом рассмотреть вопрос о прекращении строительства крупных теплоэлектроцентралей и обратить внимание на широкое внедрение малых электростанций, работающих по комбинированному циклу. При этом прекращается массовое строительство трудно ремонтируемых и практически незаменимых (в крупных населенных пунктах) тепловых сетей, уменьшаются теплопотери, а иногда и потери электроэнергии в распределительных сетях.

Установка такого рода малых электростанций требует, естественно, подвода топлива, в этом случае предпочтительно природного газа, что несоизмеримо проще по сравнению с проблемами прокладки и эксплуатации протяженных тепловых сетей.

О ядерной энергетике

Прежде всего следует сказать, что сегодня представляет собой в нашей стране ядерноэнергетический комплекс, включающий в себя и собственно атомные электростанции и не связанное с ними непосредственно огромное число специализированных атомных научных центров, часто в виде наукоградов, развитую атомную промышленность, в том числе атомное машиностроение, систему подготовки кадров и другое, связанное с проблемами ядерной техники.

Все это у нас в стране имеется и представляет собой огромный технико-экономический потенциал, требующий сохранения и хорошо продуманного развития.

Таким образом, иногда возникающего простого вопроса о том, надо ли продолжать строительство ядерных электростанций, быть не может.

Безусловно, следует сохранять и развивать ядерную энергетику. А вопрос лишь в том, в каких масштабах и в каких направлениях.

В настоящее время доля ядерной энергетики в электроэнергетике составляет около 10%. Тем самым ядерная электроэнергетика не определяет в нашей стране нужды электроэнергетики, но, тем не менее, является ее важной компонентой.

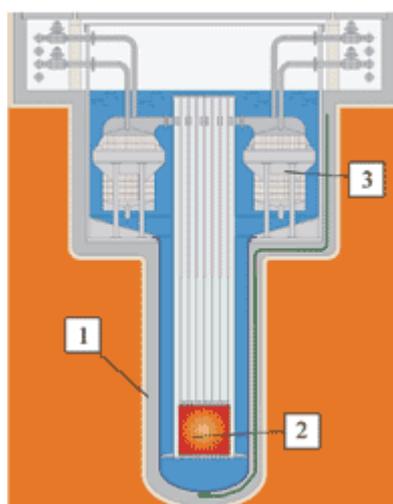
Полагаю, что в соответствии с вышеизложенным следует, безусловно, сохранять ядерную энергетику, позволяющую не только обеспечивать производство электроэнергии в заметных объемах, но и сохранить в нашей стране упомянутый выше потенциал в области ядерной энергетики.

Полагаю, однако, что масштаб строительства новых крупных ядерных электростанций должен быть ограничен. Эти ограничения касаются, прежде всего, строительства атомных электростанций с реакторами на тепловых нейтронах. Нужно сосредоточить внимание на проблеме создания эффективных ядерных реакторов на быстрых нейтронах и рассматривать это направление развития ядерной энергетики как наиболее перспективное.

В стране имеются в этом отношении большие заделы, и результаты такой целеустремленной работы могут быть весьма успешными.

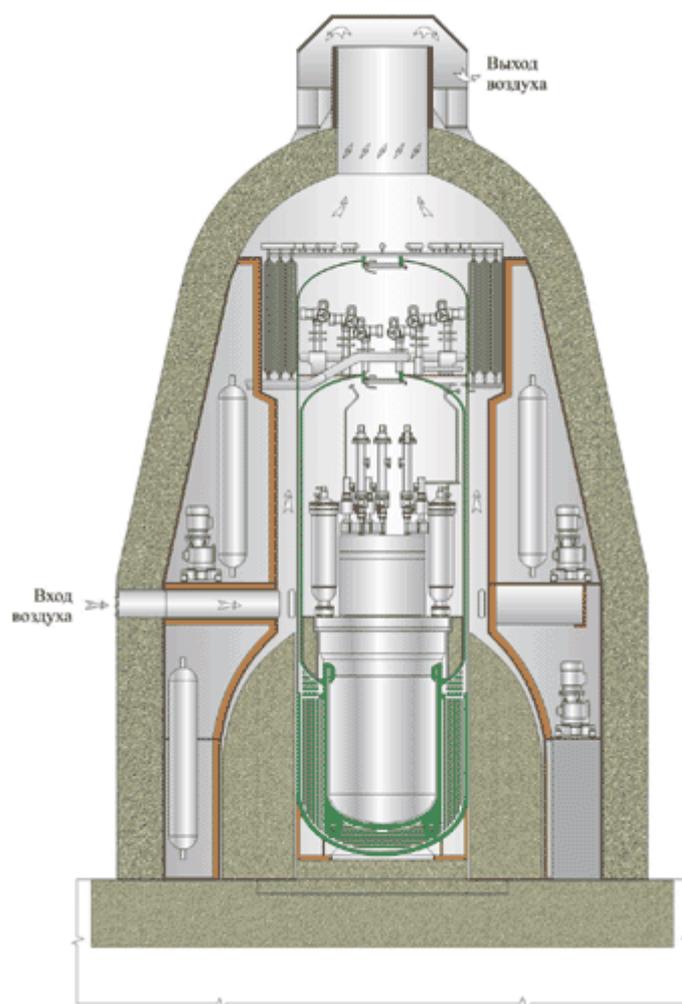
Другой задачей должно быть исполнение программы закрытия ядерных реакторов, исчерпавших ресурс работы.

Наконец, для ряда труднодоступных районов нашей обширной страны весьма важным могло бы быть строительство малых ядерных электростанций, работающих порой в автоматическом режиме, а также плавучих атомных электростанций.



Фиг. 8

На фиг. 8 и 9 для примера представлены данные по отечественной малой атомной установке теплоснабжения РУТА и АЭС малой мощности УНИТЕРМ.



Фиг. 9

О возобновляемых источниках энергии

Понятие “Возобновляемые источники энергии” (ВИЭ) объединяет очень широкий круг потенциальных источников энергии:

- солнечная энергия;
- энергия ветра;
- энергия биомассы, включая различные отходы;
- геотермальная энергия;
- энергия малых рек;
- энергия приливов;
- волновая энергия;
- энергия, определяемая разностью температур по глубине океана.

В производстве электроэнергии доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) мала. Без крупных ГЭС в целом по миру она составляет всего около 1,6%. Однако в ряде развитых стран доля ВИЭ в производстве электроэнергии значительно больше: Дания – более 12%; Италия – 2,8%; Испания – 2,7%; Германия – 2,7%; Чили – 2,7%; Швеция – 2,5%; Великобритания – 2,4%; США – 2,2%.

Использование возобновляемых источников энергии имеет различные историю и масштабы. Установленная мощность различных ВИЭ для производства электроэнергии и тепла по состоянию к 2000 году приведена в фиг. 10.

Источник энергии	Установленная мощность по производству электроэнергии, ГВт (эл)	Установленная мощность по производству тепла, ГВт (тепл)
Малые реки	70	—
Тепловые электростанции и котельные на биомассе*	30	200
Ветроэнергетические установки (сетевые)	31	—
Геотермальные электростанции и станции теплоснабжения	8	17
Фотоэлектрические установки	0,94	—
Солнечные тепловые электростанции	0,4	—
Солнечные коллекторы	—	13

*В том числе, использующие биомассу в сочетании с традиционными топливами.

Фиг. 10

Недостатком, присущим большинству ВИЭ, является непостоянство поступающей энергии во времени. Автономная энергоустановка с ВИЭ должна иметь либо аккумуляторы, либо установку-дублер, работающую на традиционном топливе. Если установка с ВИЭ присоединена к сети, то сеть должна взять на себя компенсацию непостоянства поступления энергии, для чего она должна иметь достаточные емкость и маневренность.

Энергия, получаемая от ВИЭ, как правило, дороже традиционной, что существенно влияет на сегодняшнее отношение к ним. Поэтому если в 70-е – 80-е годы прошлого века для развитых стран стимулом применения ВИЭ явились известные нефтяные кризисы и опасение, что век дешевых традиционных топлив закончился, то сегодня основным аргументом в пользу применения ВИЭ в этих странах является их экологическая чистота. Для развивающихся стран ВИЭ имеют прежде всего социальное значение.

Для России сегодня, несмотря на высокую стоимость энергии, использование ВИЭ в особо благоприятных случаях может оказаться экономически конкурентоспособным. Это относится к территориям страны, не обеспеченным централизованным энергоснабжением и использующим дорогое привозное топливо.

Ветровая энергетика

Использование энергии ветра - сегодня динамично развивающаяся отрасль мировой энергетики. Если суммарная установленная мощность ВЭУ в мире в 2000 году составляла 17,8 ГВт, то в 2002 году она достигла уже 31,1 ГВт.

Тенденцией последних десятилетий является непрерывный рост единичной мощности сетевых ВЭУ. Еще 10 лет назад типичной ВЭУ в составе ветровых ферм была установка мощностью 300–500 кВт. В 2000–2002 годах серийной стала ВЭУ мощностью 1 ÷ 1,2 МВт. Это приводит к снижению стоимости установленного киловатта, которая сегодня находится на уровне 1000 долл. за кВт. При благоприятных характеристиках ветра стоимость электроэнергии, вырабатываемой крупной ветровой установкой, приближается к стоимости на топливных электростанциях. В России до недавнего времени развитию ветроэнергетики не уделялось должного внимания. Разрабатывавшиеся в конце прошлого века ВЭУ мощностью в 250 кВт не были доведены до необходимых требований по надежности и эффективности. Аналогичной оказалась судьба разработки ОКБ “Радуга” ВЭУ мощностью в 1 МВт. Поэтому практически все крупные ВЭУ, действующие сегодня в России, укомплектованы импортными агрегатами.

Малая гидроэнергетика

К малым ГЭС условно относят гидроэнергетические агрегаты мощностью от 100 кВт до 10 МВт. Меньшие агрегаты относятся к категории микро-ГЭС. Суммарная мощность малых ГЭС в мире сегодня превышает 70 ГВт.

Малая гидроэнергетика за последние десятилетия заняла устойчивое положение в электроэнергетике многих стран мира. В ряде развитых стран установленная мощность малых ГЭС превышает 1 млн. кВт (США, Канада, Швеция, Испания, Франция, Италия). Лидирующая роль в развитии малой гидроэнергетики принадлежит КНР, где суммарная установленная мощность малых ГЭС превышает 13 млн кВт. В развивающихся странах создание малых ГЭС как автономных источников электроэнергии в сельской местности имеет огромное социальное значение. При сравнительно низкой стоимости установленного киловатта и коротком инвестиционном цикле малые ГЭС позволяют производить электроэнергию в удаленных от сетей поселениях.

В России энергетический потенциал малых рек очень велик. Число малых рек превышает 2,5 млн, их суммарный сток превышает 1000 км³ в год. Сегодняшними доступными средствами на малых ГЭС в России можно производить около 500 млрд. кВт.ч электроэнергии в год. В 90-е годы в России проблема производства оборудования для малых и микро-ГЭС в основном была решена. Особенно привлекательно создание малых ГЭС на базе ранее существовавших, где сохранились гидротехнические сооружения. Сегодня их можно реконструировать и технически перевооружить. Целесообразно использовать в энергетических целях существующие малые водохранилища, которых в России более 1000.

Солнечная энергия

Наиболее просто использовать солнечную энергию для получения тепла для горячего водоснабжения. Основным элементом солнечных водонагревательных установок (СВУ) является плоский солнечный коллектор, воспринимающий солнечную радиацию и преобразующий ее в полезное тепло. Поэтому обычно масштаб использования СВУ оценивают площадью установленных солнечных коллекторов. Суммарная площадь коллекторов, установленных сегодня в мире, оценивается в 50–60 млн. м², что обеспечивает получение тепловой энергии, эквивалентной 5–7 млн т.у.т. в год.

В России СВУ на сегодня не нашли сколько-нибудь значительного распространения, что, с одной стороны, связано с относительно низкой стоимостью традиционных топлив, а с другой – бытующим мнением о недостаточной инсоляции в большинстве регионов России.

Для преобразования солнечной энергии в электроэнергию могут быть использованы как термодинамические методы, так и прямое преобразование с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

Сегодня в США работают 7 электростанций общей мощностью 354 МВт(э), использующие параболоцилиндрические концентраторы солнечной радиации и термодинамический метод преобразования. Известны проекты сооружения подобных СЭС в ряде стран так называемого солнечного пояса (Мексика, Египет и др.). Для России - с учетом характеристик солнечной радиации - подобные СЭС сегодня не представляют сколько-нибудь значительного интереса.

Фотоэлектрические преобразователи, напротив, находят все большее применение в самых разных регионах. В отличие от СЭС с концентраторами ФЭП используют не только прямое, но и рассеянное излучение и не требуют дорогостоящих устройств для слежения за солнцем.

Рынок ФЭП развивается весьма динамично. Суммарная мощность установленных в мире ФЭП превысила 500 МВт. Это обусловлено принятием в ряде стран национальных программ, предусматривающих широкое внедрение ФЭП (“100 тысяч солнечных крыш” в Германии, “100 тысяч солнечных крыш” в Японии, “1 млн. солнечных крыш” в США). Быстрыми темпами растет и производство ФЭП, достигшее 1 ГВт в год. Япония и Германия прогнозируют в ближайшие годы выход на годовые объемы производства до 500 МВт каждая. Массовое производство ФЭП ведет к их удешевлению. Сегодня модули ФЭП на мировом рынке стоят около 4 долл. за пиковый ватт, что при хорошей инсоляции приводит к стоимости электроэнергии в 15–20 цент/кВт. Особенно велик рынок ФЭП в развивающихся странах. Установки сравнительно небольшой мощности, в единицы кВт, представляют сегодня практически единственную возможность приобщить сельское население этих стран к современной цивилизации.

Несмотря на положительные тенденции мирового рынка, высокая стоимость электроэнергии от ФЭП сдерживает их более широкое применение. Эта высокая стоимость обусловлена дороговизной основного материала (как правило, кремния высокой чистоты) и дороговизной технологического процесса. Поэтому в мире и в России ведутся интенсивные исследования и разработки, направленные на удешевление ФЭП. Одним из перспективных направлений является создание

высокоэффективных ФЭП с концентраторами солнечного излучения. Наиболее интенсивно исследования в этой области проводятся в США и России. КПД разработанных в США солнечных элементов (СЭ) на основе монокристаллического кремния достигает 20–25% при концентрации в 10–100 солнц и рабочей температуре 25°C. Для работы при концентрации в 300–1000 солнц более перспективны СЭ на основе системы арсенид галлия–арсенид алюминия, впервые разработанной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Значения КПД каскадных СЭ на основе GaAs, достигнутые в США и России (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), составляют около 30% при концентрации в 500–1000 солнц и при реальных рабочих температурах 60–80°C. Поэтому, несмотря на более высокую стоимость арсенида галлия, цены на энергоустановки с концентрацией, по оценкам, окажутся приблизительно в 2 раза ниже плоских кремниевых.

Энергия биомассы

По некоторым данным, вклад биомассы в мировой энергетический баланс составляет около 12%, хотя значительная доля биомассы, используемой для энергетических нужд, не является коммерческим продуктом и, как результат, не учитывается официальной статистикой.

Первичной биомассой являются растения, произрастающие на суше и в воде. Биомасса образуется в результате фотосинтеза, за счет которого солнечная энергия аккумулируется в растущей массе растений. Энергетический КПД собственно фотосинтеза составляет около 5%. В зависимости от рода растений и климатической зоны произрастания это приводит к различной продуктивности в расчете на единицу площади, занятой растениями. Для северных медленно растущих лесов продуктивность составляет 1 т прироста древесины в год на 1 га. Для сравнения: урожай кукурузы (вся зеленая масса) в штате Айова, США, в 1999 году составил около 50 т/га.

Для энергетических целей первичная биомасса используется в основном как топливо, замещающее традиционное ископаемое топливо. Причем речь, как правило, идет об отходах лесной и деревоперерабатывающей промышленности, а также об отходах полеводства (солома, сено). Сжигание биомассы обычно требует либо ее предварительной подготовки, либо специальных топочных устройств.

В России использование отходов лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности для коммерческого производства электроэнергии и тепла пока незначительно. По некоторым данным, в стране еще недавно имелось 27 малых ТЭЦ с общей установленной мощностью 1,4 ГВт, использовавших биомассу совместно с традиционными топливами (мазут, уголь, газ). При этом собственно на биомассе выработано 2,2 млрд кВт.ч электроэнергии и 9,7 млн Гкал тепла.

Значительный энергетический потенциал содержится в отходах животноводства, твердых бытовых отходах (ТБО) и отходах различных отраслей промышленности. Использование этого потенциала возможно термохимическими или биохимическими методами. В первом случае речь идет в основном о твердых бытовых отходах, которые либо сжигаются, либо газифицируются на мусороперерабатывающих фабриках. Во втором случае сырьем является навоз или жидкие бытовые стоки, которые перерабатываются в биогаз.

В России ежегодно образуется около 60 млн т ТБО; около 130 млн т в год - отходов животноводства и птицеводства и 10 млн т в год осадков сточных вод. Их энергетический потенциал - 190 млн т.у.т. Этот потенциал используется пока совершенно недостаточно.

В основе биохимической переработки отходов животноводства и птицеводства лежит анаэробное сбраживание. В результате этого процесса органическая масса отходов определенными штаммами бактерий превращается в биогаз. Обычный состав биогаза: до 70% метана и 30% диоксида углерода.

Геотермальная энергия

Из недр Земли на ее поверхность постоянно поступает тепловой поток, интенсивность которого в среднем по земной поверхности составляет около 0,03 Вт/м². Под воздействием этого потока, в зависимости от свойств горных пород, возникает вертикальный градиент температуры – так называемая геотермальная ступень. В большинстве мест она составляет не более 2–3 К/100 м. Однако в местах молодого вулканизма, вблизи разломов земной коры геотермальная ступень повышается в несколько раз, и уже на глубинах в несколько сот метров, а иногда нескольких километров находятся либо сухие горные породы, нагретые до 100°С и более, либо запасы воды или пароводяной смеси с такими температурами.

Принято считать, что, если температура в геотермальном месторождении превышает 100°С, оно пригодно для создания геотермальной электростанции (ГеоЭС). При более низкой температуре геотермальный флюид целесообразно использовать для теплоснабжения. Если температура флюида для непосредственного теплоиспользования слишком низка, ее можно поднять, применяя тепловые насосы (ТН).

В настоящее время в мире суммарная мощность действующих ГеоЭС составляет около 10 ГВт(э). Суммарная мощность существующих геотермальных систем теплоснабжения оценивается в 17 ГВт(т).

Запасы геотермальной энергии в России чрезвычайно велики. Практически на всей территории страны есть запасы геотермального тепла с температурами в диапазоне от 30 до 200°С. Сегодня на территории России пробурено около 4000 скважин на глубину до 5000 м, которые позволяют перейти к широкомасштабному внедрению самых современных технологий для локального теплоснабжения на всей территории нашей страны. С учетом того, что скважины уже существуют, энергия, получаемая из них, в большинстве случаев может быть экономически выгодной.

В последнее десятилетие АО “Геотерм” и АО “Наука” совместно с Калужским турбинным заводом внесли существенный вклад в использование геотермальной энергии на Камчатке и Курильских островах. Построена Верхнемутновская ГеоЭС мощностью 12 МВт. В 2002 году пущен в эксплуатацию первый блок Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт. На Курильских островах сооружены геотермальные станции теплоснабжения.

Особенно велики и практически повсеместно распространены запасы термальных вод со сравнительно невысокой температурой, недостаточной для непосредственного теплоиспользования. Интерес представляет и использование

тепла поверхностных слоев грунта, температура которых на глубине в несколько десятков метров круглый год практически постоянна и равна среднегодовой температуре воздуха в этом месте. Зимой грунт может служить низкопотенциальным источником тепла для отопления с помощью тепловых насосов.

Использование низкопотенциального тепла в сочетании с тепловыми насосами

В настоящее время отопление и горячее водоснабжение (ГВС) городских объектов осуществляется, как правило, от городских ТЭЦ или районных котельных, работающих на традиционных топливах. Автономные потребители (коттеджи, дачи, садовые домики) используют для отопления и горячего водоснабжения либо углеводороды, либо электроэнергию.

Вместе с тем имеется множество источников низкопотенциального тепла, как природных, так и искусственных, которые в сочетании с тепловыми насосами (ТН) могут составить конкуренцию традиционным топливам. ТН нашли широкое применение для теплоснабжения жилых и административных зданий в США, Швеции, Канаде и других странах со сходными с Россией климатическими условиями. Расширяется опыт применения тепловых насосов и в нашей стране.

В качестве природных низкопотенциальных источников тепла наибольший интерес представляют незамерзающие водоемы или источники геотермального тепла. В большом количестве регионов на умеренных глубинах имеются геотермальные флюиды с температурой не ниже 20–30°C. Представляет интерес использование тепла грунта, для чего могут создаваться неглубокие (в несколько десятков метров, иногда до 100–150 м) вертикальные скважины, служащие подземными теплообменниками, через которые циркулирует теплоноситель ТН. В зависимости от условий с 1 м длины теплообменника можно получить от 70 до 300 Вт тепла.

Потенциал искусственных низкопотенциальных источников (теплые сбросы предприятий, вентиляционные выбросы, канализационные системы) достаточно велик, но в каждом случае требует разработки оптимальных систем для его использования.

Представляют интерес комбинированные схемы, в которых наряду с использованием тепла грунта с помощью ТН утилизируются тепло вентиляционных выбросов, солнечная энергия, преобразуемая посредством простейшего солнечного коллектора.

Для анализа эффективности применения различных схем с ТН используются два подхода. Во-первых, выясняется, приводит ли применение ТН к экономии первичной энергии (топлива). Как известно, для получения потребителем с помощью ТН тепловой мощности Q на привод ТН надо затратить электрическую мощность N , определяемую соотношением $N=Q/\eta$, где η – коэффициент преобразования ТН. В свою очередь, для получения электрической мощности N на тепловой электростанции надо затратить $Q_1 = N/h$ тепла, где h – КПД электростанции. В результате Q_1 и Q связаны соотношением $Q_1 = Q/h \eta$. Ясно, что если произведение $h \eta > 1$, то $Q_1 < Q$, т.е. схема с ТН приводит к экономии первичной энергии. Если принять КПД тепловой электростанции за 40%, то ТН выгодны при $h \eta > 2,5$, что для большинства приложений выполняется с запасом.

Однако сама по себе экономия первичной энергии еще не является решающим экономическим критерием. Важно, дает ли схема с применением ТН денежную экономию по сравнению, например, с получением тепла от котельной, работающей на том или ином топливе. Этот показатель помимо коэффициента преобразования ТН зависит от его стоимости, которая сегодня все еще высока. Для снижения стоимости важен масштаб производства. Сегодня в России производятся в основном компрессионные ТН тепловой мощностью от 10 кВт до 5 МВт. Производственная мощность существующей машиностроительной базы по выпуску ТН средней и большой мощности может считаться достаточной при малом масштабе производства. Для удовлетворения рынка ТН с тепловой мощностью менее 200 кВт (средняя мощность 20 кВт) требуется, по оценкам, выпуск до 10 000 агрегатов в год, а для этого необходимо значительное развитие производственной базы. Особенно это касается производства компрессоров для ТН, которые в настоящее время в основном закупаются за рубежом.

О широком применении тепловых насосов речь идет уже давно, однако их использование весьма ограничено. Необходима большая работа по совершенствованию этой технологии, которая должна привести к уменьшению стоимости тепловых насосов и расходов на их эксплуатацию, и ознакомление широких кругов потенциальных потребителей этого во многих случаях весьма перспективного метода теплоснабжения.

Сверхпроводимость

Использование в энергетике явления сверхпроводимости сразу же после его сравнительно недавнего открытия всегда казалось весьма перспективным.

Даже при первоначальном применении сверхпроводников, работающих при гелиевых температурах, были созданы - помимо их приборного применения - вполне успешно работающие крупные магнитные системы для создания высоконапряженных магнитных систем, индукционные накопители энергии с запасенной энергией порядка 10^8 и даже 10^9 джоулей, поисковые разработки линий электропередачи и электрических машин.

Однако особых перспектив в использовании сверхпроводимости следует ожидать в результате открытия и последующей разработки так называемых высокотемпературных сверхпроводников, работающих при водородных температурах и, возможно, в ближайшем будущем и при азотных температурах.

Уверенное достижение возможности работы таких особенно важных для энергетике силовых сверхпроводников с большими плотностями тока при азотных температурах является многообещающим.

Позволю себе, однако, высказать определенную точку зрения об области, где такая сверхпроводимость могла бы иметь особо важное значение для энергетике. Полагаю, что использование сверхпроводимости уже в достаточно близкой перспективе целесообразно в линиях электропередач так называемого их ввода в крупные мегаполисы и другим потребителям электроэнергии. Естественно, в более далекой перспективе может оказаться технико-экономически оправданным создание и подобного рода протяженных линий электропередач.

Вторым весьма эффективным способом использования высокотемпературных силовых сверхпроводников может быть создание на их основе крупных

накопителей энергии для хранения и борьбы с нежелательными флуктуациями в протяженных линиях электропередач. Здесь свое слово должна сказать электротехническая наука, объединяющая проблематику работы самого накопителя энергии, соответствующих преобразовательных систем, линий электропередач, устройств, генерирующих и потребляющих электроэнергию.

Думаю, что использование очень непростого в техническом плане явления сверхпроводимости, даже при азотных температурах, в электрических машинах, совершенство которых в настоящее время достигает значений, близких к 99%, как правило, излишне. Результатом такого применения будет ничтожный технико-экономический эффект.

Водородная энергетика

Термин «водородная энергетика», который иногда заменяют более общим понятием «водородная экономика», предполагает широкое использование водорода в энергетических системах и во многих других секторах экономики. Сегодня водород для целей энергетики практически не применяется.

Действительно важным аргументом для внедрения водорода в энергетику является охрана окружающей среды – при энергетическом использовании водорода в атмосферу сбрасывается только водяной пар. Особенно активно в последнее время водород предлагается как идеальное топливо для автомобилей. Сторонники использования водорода в сочетании с топливными элементами (ТЭ) для автомобилей отмечают, что водородный автомобиль в отличие от автомобилей с бензиновыми или дизельными двигателями не только не загрязняет атмосферу городов, но и приводит к экономии первичного топлива.

Водород нельзя называть источником энергии. В природе он находится в связанном виде, входя в состав воды, тех или иных природных углеводородов, биомассы, различных органических отходов. Получение водорода из этих химических соединений требует затрат энергии. Поэтому водород следует рассматривать как искусственный промежуточный энергоноситель, и для его широкого использования в энергетике должны быть решены проблемы:

- эффективного производства водорода;
- методов его хранения и транспортировки;
- высокоэкономичного использования водорода в электрохимических процессах и термодинамических циклах для конечного получения электрической, механической энергии и тепла (фиг. 11).



Фиг. 11

Производство водорода

Фундаментальные физико-химические и физико-технические проблемы, связанные с широким внедрением водородной энергетики, в основном определяются необходимостью разработки новых методов эффективного и экологически чистого производства водорода из углеводородного сырья, органических отходов, а также из воды с использованием ядерной энергии, энергии возобновляемых источников, угля, в том числе с использованием промежуточных энергоносителей.

Производство водорода из углеводородов и органических отходов чаще всего осуществляется термохимическими методами; при производстве из воды традиционно используется электролиз, а также рассматриваются различные высокотемпературные термохимические циклы. Для целей водородной энергетики необходима разработка новых экономичных, экологически чистых методов получения водорода.

Аккумуляция и хранение водорода в твердофазном связанном состоянии: в металлгидридах и композитных наноконструктурных материалах, в том числе на

основе металлуглеродных и каталитических наноструктур, – наиболее безопасно и для многих приложений наиболее эффективно. Исследования и разработки таких новых технологий охватывают как создание и исследование новых металлгидридных систем, так и систем на основе новых водородпоглощающих материалов.

В созданных к настоящему времени низкотемпературных обратимых MeH системах хранения весовое содержание доступного водорода не превышает 2% при его объемной плотности, превышающей плотность жидкого водорода. Для использования в крупномасштабных и транспортных системах аккумулирования такое низкое массовое содержание H₂ является серьезным барьером. Существенно большего весового содержания H₂ (до 5% веса) удается достичь для высокотемпературных обратимых металлгидридных систем. Однако для их функционирования необходимы источники высокопотенциального тепла, что снижает экономическую эффективность таких систем аккумулирования.

В этой связи важнейшими задачами при создании эффективных устройств для хранения водорода в твердофазном связанном состоянии являются разработки новых поглощающих материалов (в том числе композитных, каталитических и наноструктурных) с улучшенной кинетикой сорбции и повышенной емкостью по водороду.

Решение указанных проблем может привести к радикальному расширению практического использования аккумулирующих устройств с применением водородпоглощающих материалов в автотранспорте и автономной энергетике. Это имеет особое значение для целей безопасного хранения H₂ на борту транспортных средств, использующих энергоустановки на базе топливных элементов.

Хранение водорода возможно в ограниченных количествах и в сосудах баллонного вида при соответствующем высоком давлении. Использование водорода как экологически чистого энергоносителя для производства электроэнергии возможно как в топливных элементах (фиг. 12), так и в водородосжигающих энергетических установках (фиг. 13).

разомкнутый процесс (близкий к изотермическому), а не цикл, и ограничения, связанные с КПД цикла, здесь неприменимы. Теоретически вся химическая энергия топлива (убыль энергии Гиббса соответствующей реакции топлива с окислителем) может быть превращена в ТЭ в электроэнергию.

Теоретический КПД водород-кислородного ТЭ, рассчитанный как отношение произведенной электроэнергии к теплоте реакции близок к единице. При всей заманчивости идеи использования ТЭ в энергетике, ее реализация наталкивается на серьезные трудности. Именно поэтому, несмотря на то что принцип ТЭ известен уже более 150 лет, практическое применение ТЭ и по сей день весьма ограничено.

Основная трудность реализации ТЭ состоит в необходимости осуществить реакцию топлива с окислителем электрохимическим путем, для чего в общем случае оба компонента реакции должны быть вначале превращены в ионы. В ТЭ ионизация топлива и окислителя осуществляется при умеренных температурах за счет применения активных катализаторов, включающих металлы платиновой группы.

Сегодня для энергетических приложений рассматривается несколько типов ТЭ с КПД от 40% до 70%, различающихся прежде всего типом электролита – переносчика ионов, и наличием промежуточных реакций:

1. ТЭ со щелочным электролитом (ЩТЭ);
2. ТЭ с фосфорной кислотой (ФТЭ);
3. ТЭ с твердо-полимерными мембранами (ТПТЭ);
4. ТЭ с расплавом карбонатов (РКТЭ);
5. ТЭ с твердооксидным электролитом (ТОТЭ).

Топливом для этих ТЭ служит водород, а окислителем - либо кислород, либо воздух. Принципиальная схема каждого из перечисленных ТЭ включает водородный (анод) и кислородный (катод) электроды и электролит, проводящий те или иные ионы. Теоретическая ЭДС ТЭ при стандартных условиях составляет 1,23 В.

Принцип действия ТЭ проще всего проиллюстрировать на примере ЩТЭ, который являлся первым типом ТЭ, примененным как источник энергии для космических аппаратов. На аноде такого ТЭ, к которому подводится газообразный молекулярный водород, происходят его диссоциация и ионизация:

В качестве электролита обычно используется раствор щелочи КОН с концентрацией 30–50% (масс.). ЩТЭ работает при температуре 100–250°C. При высоких температурах концентрацию щелочи доводят до 85% (масс.). Образовавшиеся ионы водорода за счет разности потенциалов анода и катода диффундируют через слой электролита к катоду. Электроны, образовавшиеся на аноде, при замыкании внешней электрической цепи перетекают к катоду, совершая полезную работу. На катоде происходит реакция:

т.е. единственным продуктом при работе ЩТЭ является вода (водяной пар).

Эффективность реального ТЭ во многом зависит от каталитических свойств электродов, обеспечивающих ионизацию реагентов. Для ЩТЭ в качестве катализаторов используются никель, серебро, металлы платиновой группы и др. Раствор электролита в ЩТЭ обычно содержится в матрице из, например, асбеста, плотно прилегающего и смачивающего электроды. Водород для питания ЩТЭ должен быть весьма чистым и, в частности, не содержать даже малых количеств СО, отравляющего катализаторы, и СО₂, образующего с электролитом карбонат калия K₂СО₃.

Для транспортной энергетики наибольший интерес представляет ТПТЭ, в котором проводником ионов водорода служит тонкая твердая полимерная мембрана (рис. 12). Рабочая температура ТПТЭ существенно ниже, чем для других ТЭ и составляет 60–80°С. Так же, как у ЩТЭ, примеси СО в газах отравляют катализаторы электродов. Одной из проблем для ТПТЭ является организация отвода воды, образующейся при реакции водорода с кислородом.

Для стационарной энергетики рассматривается высокотемпературный твердооксидный ТЭ, в котором перенос заряда осуществляется отрицательным ионом кислорода, а электролитом служит твердая двуокись циркония ZrO₂, стабилизированная окисью иттрия Y₂O₃. Рабочая температура ТОТЭ лежит в интервале 800–1000°С, что позволяет рассматривать схемы с внутренним риформингом природного газа и комбинированные циклы. Электродом для анода служит цирконат кобальта Co–ZrO₂ или никеля Ni–ZrO₂, а для катода - манганит лантана LaMnO₃, легированный стронцием. В последние годы рядом фирм были созданы демонстрационные установки на базе ТОТЭ мощностью от 1 до 200 кВт.

Каждый из описанных выше типов ТЭ имеет свою предпочтительную нишу применения. Однако для широкого применения ТЭ требуется, во всяком случае, не меньше чем на порядок снизить их сегодняшнюю стоимость. Именно в этом направлении, по-видимому, будут развиваться в ближайшие годы научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области ТЭ.

В настоящее время водород-кислородные (воздушные) ТЭ применяются в качестве бортовых источников электроэнергии для космических аппаратов, разрабатываются опытные и демонстрационные образцы наземных транспортных средств с такими ТЭ и электродвигателями. Делаются попытки применить ТЭ в стационарной энергетике.

Водородсжигающие установки

Многими исследованиями показано, что при уровне мощностей энергоустановок более 1–10 МВт термодинамическая эффективность водородсжигающих установок паротурбинного и парогазового циклов близка к эффективности топливных элементов, а их удельная мощность (на единицу реакционного объема) превышает таковую в топливных элементах, что приводит к более низким удельным капиталовложениям. В этой связи ожидаемая экономическая эффективность водородных энергоустановок различных типов в значительной степени будет определяться уровнем их мощностей. При относительно низких мощностях до 0,1–1,0 МВт для автономных потребителей более эффективными

могут оказаться топливные элементы, при более высоких – водородсжигающие: паротурбинного, газотурбинного и парогазового циклов, а также водородные дизель-генераторы.

Как показал технико-экономический анализ различных вариантов использования водорода в стационарных и мобильных энергоустановках, наиболее оправданным, в том числе и с точки зрения безопасности, является регулируемое производство водорода в одном агрегате с электрохимическим генератором, что исключает большие затраты на его аккумуляцию и транспортировку и существенно улучшает массо-габаритные характеристики ЭХГ. В этом случае в качестве источника для производства водорода можно использовать такие промежуточные энергоносители, как алюминий и его сплавы, боро-, алюмогидриды и т.д., которые при химическом и электрохимическом окислении имеют наибольший выход водорода.