

Энергетика и Безопасность

№ 11 1999

Издание IEER

Ветер в сравнении с плутонием

Аржун МАКХИДЖАНИ¹

По материалам Отчета IEER 1999,

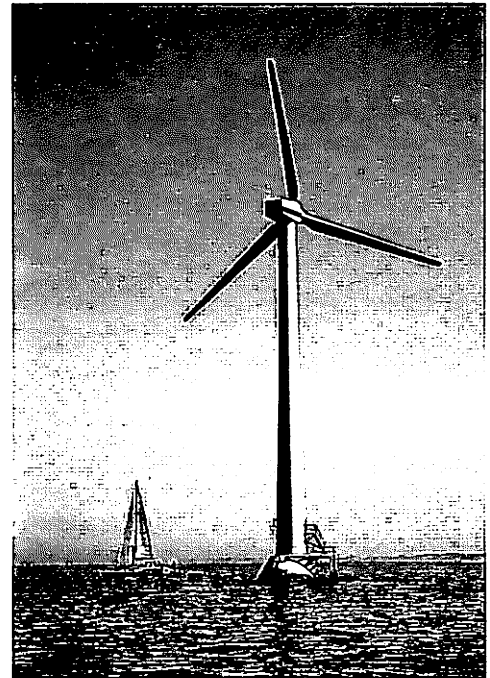
подготовленного Марком Фиораванти

"Ветер в сравнении с плутонием"¹

Теоретически и ветер, и плутоний могут обеспечить человечество источником энергии на долгосрочную перспективу. С плутонием, однако, связаны определенные сложности в отношении принципов нераспространения и экологии, что было документально показано во многих публикациях IEER². По-видимому, только долгосрочный экономический прогноз может оказаться решающим аргументом в пользу плутония. Для того чтобы подробнее рассмотреть этот аргумент, IEER провело исследование сравнительных характеристик плутония и ветра как источников энергии, в котором использовался пример Японии. Мы выбрали Японию потому, что эта страна обладает относительно низким потенциалом развития наземной ветровой энергетики и высокой плотностью населения. Если мы оставим в стороне проблему аварий и их последствий, требования в отношении земельных площадей для развития ветровой энергетики значительно выше, чем при использовании плутония. Следовательно, если сравнение экономических показателей окажется в пользу ветра, то этот вывод можно будет относительно легко обобщить на многие другие страны и районы.

IEER в своем сравнительном анализе использовал технологию шельфовой ветровой энергетики, поскольку практика размещения турбин в прибрежной зоне может решить многие экологические вопросы, которые поднимаются в связи с ветровой энергетикой. В частности, этот вариант может быть использован в странах и районах с жесткими ограничениями по земельным площадям, такими как Япония. Шельфовые ветроэлектростанции успешно работают в Дании, Германии и Швеции, начиная с 1991 г.

За последние полвека во всем мире было потрачено огромное количество ресурсов на развитие технологий использования плутония в качестве источника энергии, тогда как на разработку технологий использования энергии ветра отводились скудные гроши. Десятки миллиардов долларов были потрачены на одни только реакторы-размножители. Эти реакторы преобразуют неделящийся уран-238, которого довольно много в природе, но который не годится в качестве реакторного топлива, в делящийся плутоний-239 с такой скоростью, что при работе реактора количество делящегося материала увеличивается. Еще десятки миллиардов долларов были потрачены на репроцессинг – технологию, используемую для выделения плутония из



VESTAS WIND SYSTEMS

Ветровая турбина в Туно Ноб. Вторая ветро-энергетическая установка, созданная в Дании. Туно Ноб, сданная в эксплуатацию в 1995 г., была построена на бывшем военно-морском полигоне (Greenpeace International).

облученного реакторного топлива. Тем не менее, плутоний далек от того, чтобы стать источником коммерческой выгоды. Даже французская компания, Electric

См.: Ветер в сравнении с плутонием, с. 2
Примечания, с. 20

В БЮЛЛЕТЕНЕ

Письмо в BEIR VII.....	3
Конец программ по плутониевому топливу.....	7
Устойчивые технологии: топливные элементы.....	11
Что такое линейная беспороговая гипотеза.....	18

соте de France, самый большой потребитель плутониевого (MOX) топлива, и британская компания British Nuclear Fuels Limited, занимающаяся репроцессингом, приписывают нулевое значение своим запасам плутония.

Ни в одной стране нет коммерчески жизнеспособной программы по плутониевым реакторам-размножителям. Два самых больших действующих реактора-размножителя в мире находятся в бывшем СССР, и они используют не плутониевое, а урановое топливо. Программа по реакторам-размножителям была прекращена во многих странах мира, включая США, вследствие технических проблем, высокой стоимости, а также проблем с угрозой распространения.

Одним из драматических примеров выхода из строя реактора-размножителя является авария в декабре 1995 г. на реакторе-размножителе Монжу в Японии, который был остановлен из-за крупной утечки жидкого натрия и пожара. Реактор был впервые запущен в апреле 1994 г. Другой важный пример с Суперфениксом, который одно время был самым большим в мире реактором-размножителем на быстрых нейтронах. Девятнадцатого июня 1997 г. предприятие-владелец Суперфеникса объявило, что эта установка, расположенная во Франции, будет навсегда закрыта. Суперфеникс проработал только 278 дней (в пересчете работы на полную мощность) в период с 1986 по 1997 г. Общие затраты по проекту Суперфеникса к 1996 г. (до того как было объявлено о закрытии) оценивались в 60 млрд франков (в ценах 1994 г.) или около 9,1 млрд долл³. Демонтаж и послезексплуатационные затраты, связанные только с одним Суперфениксом, оценивались в 9,5 млрд франков (около 1,4 млрд долл.); этого хватило бы на покрытие капитальных затрат, связанных с 825 МВт энергии от шельфовых ветровых силовых установок. Если бы деньги, отведенные на Суперфеникс, были потрачены на ветровую энергетику, то, учитывая предысторию рассматриваемых двух источников энергии, к настоящему времени общая мощность выработанного электричества превысила бы объем, произведенный этим реактором, раз в десять или более.

Развитие шельфовых ветровых энергоресурсов открывает перспективы решения наиболее серьезной проблемы, связанной с наземной ветроэнергетикой: использование больших участков земли для размещения ветровых турбин. Хотя строительство в прибрежной зоне требует дополнительных затрат, они, по крайней мере, частично компенсируются такими положительными факторами, как более высокая скорость и постоянство ветра, и, кроме того, исключаются затраты, связанные с приобретением земли. Менее турбулентный ветер снижает износ турбин, продлевая, таким образом, период эксплуатации установки. Визуальное загрязнение может быть снижено или устранено соответствующим выбором площадки для размещения шельфовых ветровых турбин. Однако при выборе площадки могут возникнуть проблемы такого рода, как помехи движению судов и возможное воздействие на морские экосистемы. Оценки таких воздействий должны стать неотъемлемой частью демонстрационных проектов.

ЭНЕРГЕТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ

"Энергетика и безопасность" — журнал, посвященный вопросам ядерного нераспространения, разоружения и энергетической безопасности. Публикуется четыре раза в год Институтом исследований энергетики и окружающей среды, находящимся по адресу:

Institute for Energy and Environmental Research
6935 Laurel Avenue, Suite 204
Takoma Park, MD 20912 USA
Тел. 1-301-270-5500; факс 1-301-270-3029
Электронная почта: michele@ieer.org
Адрес в Интернете: <http://www.ieer.org>

Институт исследований энергетики и окружающей среды (IEER) обеспечивает общественность и официальные лица надежными, ясными и глубокими исследованиями по широкому кругу вопросов. Целью IEER является проведение научного анализа в деятельности общественности для демократизации и создания более здоровой окружающей среды.

Сотрудники IEER:

Аржун Макхиджани — президент
Лиза Ледуидж — координатор по внешним связям
Мишель Бойд — координатор по международным связям
Энни Макхиджани — научный сотрудник
Хишам Зерриффи — научный сотрудник
Луис Чалмерс — заведующий библиотечной
Дайана Кои — бухгалтер
Бетси Турло-Шилдс — администратор

Благодарим наших спонсоров:

Выражаем благодарность нашим спонсорам, благодаря поддержке которых стало возможным осуществление нашего международного проекта:

W. Alton Jones Foundation, John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, C.S. Fund

Мы также благодарим других спонсоров IEER:

Public Welfare Foundation, John Merck Fund, Ploughshares Fund, Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock, Town Creek Foundation, Beldon II Fund, Turner Foundation, CarEth Foundation, Janelia Foundation, Stewart R. Mott Charitable Trust, Rockefeller Financial Services

Мы также благодарим наших читателей, помогающих нашему Институту. Мы высоко ценим Вашу поддержку.

Дизайн: *Cutting Edge Graphics*
Редактор английского издания:
Лиза Ледуидж

Русское издание:
Ответственный: *Елена Катювалова*
Научный консультант: *Олег Бухарин*

Весь тираж "Энергетики и безопасности" распространяется бесплатно

Мы приветствуем перепечатку материалов из этого журнала с соответствующими ссылками. Мы будем признательны за копии тех изданий, в которых воспроизводятся наши статьи.

Выпуск 11 английского издания вышел в свет в ноябре 1999 г.

Адрес издательства:
Издательство СО РАН
Лицензия ЛР 020909 от 01.09.99
630090, Новосибирск, 90, Морской пр., 2
Тираж: 2500

Это письмо, подписанное 75 организациями и отдельными лицами из 17 стран, было передано Комиссии по биологическому действию ионизирующей радиации (BEIR VII) Национальной академии наук на заседании, которое состоялось 3 сентября 1999 г. в Вашингтоне. Это заседание ознаменовало начало трехлетнего проекта, предпринятого Комиссией BEIR VII, по переоценке медицинских рисков в результате воздействия малых доз ионизирующего излучения. Работа Комиссии, финансируемая Министерством энергетики США, Управлением по охране окружающей среды США и Комиссией по ядерному регулированию, по всей вероятности, окажет влияние на регламентацию норм радиационной защиты во всем мире.

ieer

ИНСТИТУТ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЭНЕРГЕТИКИ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

3 сентября 1999

Ричард Р. Монсон Д.М. Председатель
для передачи: Риду Джостесу, сотруднику
Комиссии по проблемам медицинских рисков в
результате действия малых доз ионизирующего
излучения (BEIR VII)
Национальная академия наук
2101 Конститушн Авеню, С3
Вашингтон, О.К. 20418

Дорогой док. Монсон,

Мы пишем Вам в связи с работой Вашей Комиссии по оценке действия малых доз излучения "Отчет по биологическому действию ионизирующего излучения (BEIR) VII".

Мы рады, что Комиссия BEIR VII выразила намерение "рассмотреть большой объем опубликованных данных... относительно рисков для здоровья людей, возникающих в результате воздействия малых доз излучения" (Описание проекта BEIR VII). Мы надеемся, что в процессе определения биологических эффектов и факторов риска Комиссия изучит противоречивые данные и интерпретации. Мы с нетерпением ждем обсуждений и дискуссий Комиссии в ходе выполнения этой важной работы, за которыми мы будем внимательно следить и в которых мы надеемся принять участие.

Результаты работы предыдущих Комиссий BEIR оказали большое влияние на характер и уровень научных дебатов по этому вопросу, а также на процесс установления норм радиационного излучения. Поэтому мы считаем, что необходимо рассмотреть весь объем информации и вопросов, связанных с действием ионизирующего излучения на здоровье человека. В отчете BEIR V рассматривались только риски заболеть раком, некоторые аспекты генетических нарушений (хотя там не давалась оценка рисков "болезней сложного генетического происхождения, к которым, как считают, относится самая большая категория болезней, связанных с генетическими отклонениями", с. 4) и задержка умственного развития в результате внутриутробного облучения.

Важно, чтобы в работе BEIR VII был рассмотрен весь диапазон рисков, которые до сих пор не были оценены исчерпывающим образом. Сюда необходимо включить риски, о которых стало известно после опубликования отчета BEIR V (такие как совместные эффекты радиационного излучения и гормонально-активных веществ, также называемых эндокринными разрушителями), а также вопросы, которые могли бы быть, но так и не были рассмотрены BEIR V. Мы составили список наиболее важных вопросов, которые, как мы считаем, вам следует рассмотреть. Сюда вошли следующие темы:

См.: Письмо в BEIR VII, с. 4

- У **Воздействие радионуклидов, проходящих через плаценту:** Здесь необходимо рассмотреть воздействие на сам развивающийся плод (например, выкидыши, уродства и влияние на развитие, кроме задержки умственного развития), а также на соответствующие органы в критические периоды развития плода. В этом исследовании медицинских последствий воздействия на развивающийся плод особым образом должно быть рассмотрено влияние на развитие специфических органов, а также косвенные отрицательные последствия воздействия на такие органы, как щитовидная железа. Мы выражаем особую обеспокоенность по поводу следующих радионуклидов: йод-131, углерод-14 и тритий, способных накопиться внутри плода таким образом, что это может серьезно отразиться на его здоровье. Например, тритий, являясь одной из форм водорода, соединяется с кислородом с образованием воды. Вода, содержащая тритий, химически ведет себя так же, как и простая вода. Но при попадании внутрь часть ее встраивается в клетки организма, в том числе и в генетический материал. Такая радиоактивная вода также проникает через плаценту. Необходимо изучить, насколько внутриутробное облучение может отвечать за родовые дефекты, выкидыши и другие осложнения. При оценке рисков, вызванных малыми дозами излучения, Комиссии BEIR VII следует рассмотреть все эти радионуклиды, а также последствия их воздействия. Если в наших знаниях по этому вопросу есть пробелы, их необходимо четко определить ясно объяснить их значение.
- У **Воздействие радиации на женский эмбрион:** Учитывая тот факт, что яичники формируются один раз на протяжении всей жизни во время эмбрионального развития ребенка женского пола, Комиссия должна оценить влияние радиации на репродуктивную систему эмбриона женского пола и возможные результаты воздействия такой радиации на детей женского пола.
- У **Воздействие биологически связанных радионуклидов:** Радионуклиды, такие как тритий и углерод-14, могут стать частью ДНК. При радиоактивном распаде они трансмутируют в другие элементы. (Тритий становится гелием-3, а углерод-14 — азотом-14). Такие трансмутации могут оказать серьезное воздействие на ДНК. Необходимо оценить потенциальный эффект воздействия этих трансмутаций на здоровье людей.
- У **Синергетические эффекты:** Воздействие радиации иногда происходит одновременно с воздействием других вредных веществ. Комиссии следует рассмотреть эффекты совместного воздействия радиоактивных и нерадиоактивных веществ на здоровье людей. Особое внимание необходимо уделить гормонально-активным веществам, оказывающим влияние на гормональную систему, а также возможности того, что эти нарушения могут увеличить риск возникновения рака или других болезней, являющихся результатом радиоактивного облучения. И наоборот, радиоактивное облучение может вызвать нарушения эндокринной системы, увеличив таким образом уязвимость по отношению к присутствующим в окружающей среде болезнетворным веществам. При этом необходимо учитывать возможность того, что эти риски могут меняться в зависимости от давности облучения (и имело ли место облучение на внутриутробной стадии развития).
- У **Качество и целостность данных:** В учетных записях по профессиональным дозам облучения на рабочих местах Министерства энергетики и его предшественника в США, Комиссии по атомной энергии, много упущений и ошибок, так же, как и в данных по загрязнению окружающей среды. Мы знаем это по США, поскольку большая часть исходных данных стала достоянием общественности через судебные разбирательства, запросы в соответствии с Законом о свободе информации и т.д. Польза от исследований, в которых принимаются официальные оценки доз облучения на рабочих местах и вне рабочих мест без анализа исходных данных, в высшей степени сомнительна, если не сказать сильнее. Поскольку исходные данные в других странах все еще остаются в большей степени секретной информацией, принятие их всерьез еще менее обосновано. Например, есть доказательства того, что медицинские данные в бывшем Советском Союзе ненадежны. Комиссии следует рассмотреть эти и связанные с ними принципиальные вопросы о целостности данных и выступить с заключением, пригодны ли эти данные вообще

для оценки рисков при малых дозах радиации, и если да, как они должны использоваться. Комиссии следует также поставить вопрос о критериях качества данных, которыми она будет руководствоваться при рассмотрении информации, содержащейся в исследованиях. В этом контексте мы не считаем, что будет достаточным просто принять исследования с рецензией независимых экспертов как верные, если только в них не проанализирована правильность официальных доз и медицинских данных, на которых они основаны. Наконец, при интерпретации всех эпидемиологических исследований, включая и работы по людям, пережившим атомные бомбардировки, необходимо рассмотреть к каким последствиям приводит неправильная классификация радиационного облучения и последствий для здоровья, а также факторы отбора медицинской информации.

- **Эффекты воздействия радиации на различные группы населения:** Часто для установления норм по радиационной защите используется понятие “стандартный человек” или “среднее”. Учитывая потенциально большое разнообразие фактических эффектов воздействия радиации на различные группы населения, Комиссии следует оценить ошибки в оценках рисков, полученных в результате использования этого понятия. Например, следует четко объяснить зависимость чувствительности к дозе облучения от возраста при различных воздействиях на организм, и не только для детей, но и для более старших возрастов. Другим примером являются возможные вариации чувствительности к малым дозам излучения людей с различными демографическими показателями.

Может оказаться, что во многих этих областях мы просто не обладаем знаниями, достаточными для научных выводов, заслуживающих доверия. В таких случаях Комиссии следует откровенно и четко заявить об этом и рекомендовать поставить вопрос о проведении соответствующих исследований. По возможности, желательно, чтобы это сопровождалось авторитетным обсуждением механизмов возможных воздействий на здоровье человека. Для нас представляется чрезвычайно важным, чтобы все области, где нельзя надежно определить риск заболевания, были четко определены. Если тип риска может быть качественно установлен, тогда необходимо точно и определенно заявить о нем. Если риски не могут быть определены даже качественно, этот вывод также может быть весьма существенным.

Здесь мы не стали обсуждать вопросы, связанные с раком, поскольку мы полагаем, что Комиссия рассмотрит соответствующие материалы по канцерогенным эффектам в полном объеме. Было бы полезно, если бы Комиссия опубликовала и затем регулярно обновляла список публикаций, которые она рассматривает, с тем чтобы мы могли следить за анализом и расширять этот список в случае, если это представится необходимым или желательным.

Мы с удовольствием готовы внести свой научный вклад в работу Комиссии BEIR VII и надеемся, что Комиссия рассмотрит вопросы, которые мы здесь подняли, в полном объеме и со всей серьезностью, как если бы эти темы были предложены одним из членов Комиссии.

Мы признательны за предоставленную общественности возможность выступить со своими комментариями и просим, чтобы по необходимости эта возможность была расширена и стало возможным включить в рассмотрение все вопросы и данные, которые мы хотим предложить. Мы ждем Вашего ответа и готовы ответить на все ваши вопросы, а также предоставить дополнительно информацию, если Вам это потребуется. Пожалуйста, направляйте Ваши вопросы или ответы Лизе Ледуидж или Аржуну Макхиджани. Большое Вам спасибо.

Искренне ваши,

Лиза Ледуидж, координатор по внешним связям, ieer@ieer.org
Аржун Макхиджани, Ph.D., Президент, arjun@ieer.org

ДРУГИЕ ПОДПИСАВШИЕСЯ:

Давид Е. Адельман, Совет по защите природных ресурсов, Вашингтон, США

Глен Алкалей, сопредседатель, Национальный комитет по жертвам радиации, Нью-Йорк, США

Дженнифер Алдрих, исполнительный директор, Врачи за социальную ответственность, Портленд, Орегон, США

Дэйв Андриус, вице-председатель, Кампания за ядерное разоружение, Уэльс, Великобритания

Дидье Анже, CRILAN, Франция

Полет Анже, CRILAN, Франция

Карон Балкани, Озабоченные граждане за ядерную безопасность*, Санта-Фе, Нью-Мексико, США

Дан Беккер, директор, Глобальное потепление и энергетические программы, Клуб Сьерра, Вашингтон, США

Розали Бертель, президент, Международный институт проблем здравоохранения, Торонто, Онтарио, Канада

Патриция Т. Берни, Председатель экологического комитета Женской международной лиги за мир и свободу, Аризона, США

Филипп Брос, секретарь по исследованиям, Sortir du nucléaire, Лион, Франция

Элизабет Браун, Мирное действие, Калифорния, США

Вина Коллей, Местные жители за экологическую надежность и безопасность, Огайо, США

Дэвид Клоз, профессор, физическое отделение Государственного университета Восточного Теннесси, США

Мэри Берд Дэвис, Проект по обогащению урана Института земли, Кентукки, США

Синди де Брюлер, исполнительный директор, Объединенная река Колумбия, Орегон, США

Грег де Брюлер, Белая семга, штат Вашингтон, США

Анужка Дрешер, Беркли, Калифорния, США

Гордон Эдвардс, президент, Канадская коалиция за ядерную ответственность, Монреаль, Канада

Надер Энтессар, профессор политических наук и международных исследований, Спринг Хилл Колледж*, Алабама, США

Кати Е. Фалво, Медицинский колледж Нью-Йорка*, США

Ансар Фаязудин, профессор физики, Стокгольмский университет, Швеция

Мартин Форвуд и Жанин Аллис-Смит, CORE, Камбрия, Великобритания

Мишель Фримонт, CRILAN, Франция

Сурендра Гадекар, ANUMUKTI, Индия
Сангхамитра Гадекар, ANUMUKTI, Индия

Энн Харрис, директор, "Мы-люди", и исполнительный директор, Альянс за здравоохранение и безопасность, Теннесси, США

Рут М. Хейфитс, старший преподаватель, факультет семьи и профилактики, Школа медицины, Университет Калифорнии Сан-Диего*, Калифорния, США

Ира Хелфанд, соучредитель и бывший президент, Врачи за социальную ответственность, США

Фелисити Хилл, директор, ООН, офис Женской международной лиги за мир и свободу, Нью-Йорк, США

Лора Хантер, Коалиция по санитарному состоянию окружающей среды, Сан-Диего, Калифорния, США

Джо Джафи, врач на пенсии, Сан-Диего, Калифорния, США

Карол Яхнков, исполнительный директор, Центр мира, Сан-Диего, Калифорния, США

Чак Джонсон, директор, Центр по энергетическим исследованиям, Орегон, США

Джудит Джонсрад, директор, Экологическая коалиция по атомной энергии, Государственный колледж, Пенсильвания, США

Деб Катс, Сеть осведомленности граждан, Массачусетс, США

Роберт Клеин, президент, Действие Хэнфорда штата Орегон, Портленд, Орегон, США

Вольфганг Кохнлеин, президент, Германское общество за радиационную защиту и Institut fuer Strahlenbiologie, Westfaelische Wilhelms-Universitaet, Мюнстер, Германия

Кати Лемар, Проект по военным токсическим веществам, Льюик Тон, Мэн, США

Бернар Линдберг, председатель, Экологи района Манкато, Миннесота, США

Майкл Дж. Манетас, факультет инженерных средств и методов охраны ресурсов окружающей среды, Гумбольдтский государственный университет, Калифорния, США

Роберт А. МакФарлин, заслуженный профессор хирургии, Орегонский университет здравоохранения, Орегон, США

Жанот Мендлер, директор GEF/UNDP Международные воды: LEARN*, Бостон, Массачусетс, США

Робин Миллс, Директор, Коалиция по безопасной энергетике Мэриленда, Балтимор, Мэриленд, США

Джоржио Неббиа, заслуженный профессор факультета экономики Университета Барн*, Италия

Дэйл Д. Несбитт, научный сотрудник на пенсии, Национальная лаборатория Лоуренс Беркли, Калифорния, США

Анди Нидеккер, адъюнкт-профессор, Университет Базеля, исполнительный советник Швейцарского отделения Врачи за социальную ответственность и Врачи во всем мире за предотвращение ядерной войны, Швейцария

Баку Нишио и Хидеюки Бан, содиректоры, Гражданский ядерный информационный центр, Токио, Япония

Руди Х. Нуссбаум, заслуженный профессор, Портлендский государственный университет, Северо-западный радиологический альянс за охрану здоровья, Портленд, Орегон, США

Соня Остром, Мирное действие, Нью-Йорк, США

Давид Озонофф, профессор и председатель, отделение Санитарного состояния окружающей среды, Бостонский университет здравоохранения, Бостон, Массачусетс, США

Перлин, инженер и физик, Париж, Франция

Каролин Раффенспергер, Сеть информации по санитарному состоянию окружающей среды и научным исследованиям, Виндзор, Северная Дакота, США

Брюс Резник, исполнительный директор, Защитники залива Сан-Диего, Калифорния, США

Норман Рубин, директор по ядерным исследованиям и старший аналитик по политике, Energy Probe, Торонто, Онтарио, Канада

Гладис Шмитс, вице-председатель, Экологи района Манкато, Миннесота, США

Бетти Шрейдер, сопредседатель, Аризонская коалиция за безопасную энергетику, Аризона, США

Моник Сене, GSIEN, Орсей, Франция

Виктор В. Сидел, профессор социальной медицины, Медицинский колледж Альберта Эйнштейна, Бронкс, Нью-Йорк, США

Памела Сихвола, сопредседатель, Комитет по минимизации токсических отходов, Калифорния, США

Норма Салливан, профессор лингвистики на пенсии, Сан-Диего, Калифорния, США

Жинзабуро Такаги, Гражданский ядерный информационный центр, Токио, Япония

Тим Такаро, председатель, Hanford Task Force, Врачи за социальную ответственность, Сиэтл, Вашингтон, США

Алин Вэир, консультант, Комитет юристов по ядерной политике, Нью-Йорк, США

Харвей Вассерман, Граждане в защиту Огайо, Огайо, США

Давид Кроккетт Вильямс, координатор, Глобальный проект мира; инициатор, Отклик на глобальную тревогу, Калифорния, США

Стив Винг, факультет эпидемиологии, Школа здравоохранения, Университет Северная Каролина*, США

Алексей Яблоков, Центр экологической политики России и Программа по радиационной и ядерной безопасности, Международный социо-экологический союз, Москва, Россия

Алла Ярошинская, Экологический благотворительный фонд Ярошинской, Москва, Россия

* Членство указано исключительно в ознакомительных целях.

Конец программ по плутониевому топливу

Аржун МАКХИДЖАНИ¹

Уже более полувека ядерный истеблишмент обещает миру энергию от плутония. Ее должно было быть в изобилии и хватить на бесконечно долгое время, и даже, как говорили в 50-х годах, она должна была быть «слишком дешевой, чтобы ее измерять». Потом были потрачены миллиарды долларов на научные исследования и разработки, но в результате показать почти нечего, и программы по использованию плутония должны рассматриваться как несостоявшиеся.

Сейчас уже общепризнано, что плутоний является незаконным топливом. Он не конкурентоспособен по сравнению с ураном, и маловероятно, что когда-нибудь будет таковым. В соответствии с ключевой технологией производства плутониевого топлива, уран-238, не могущий служить топливом для ядерного реактора, преобразуется в реакторе-размножителе в плутоний-239, который таковым является. Однако история развития реакторов-размножителей безрадостна, особенно учитывая те огромные ресурсы, которые были вложены в них. Из 26 000 МВт установленной мощности реакторов-размножителей в середине 90-х годов почти половина приходилась на один единственный реактор во Франции, Суперфеникс, который с тех пор был закрыт (см. статью по ветровой энергетике на с. 1).

Более того, процесс, который используется для выделения плутония из облученного реакторного топлива, так называемый репроцессинг, является во многих отношениях самой грязной частью ядерного топливного цикла. Он виновник обширного загрязнения морей, рек и почвы. Он приводит к разработке высокорadioактивных жидких отходов, которые должны храниться в специальных емкостях. Одной из проблем, возникающих в связи с этими емкостями, является риск катастрофических взрывов, таких как взрыв емкости с военными высокоактивными отходами в Советском Союзе в 1957 г. Полное нарушение электроснабжения на французском предприятии по репроцессингу в Ла Хаге в апреле 1980 г. могло привести к такой же катастрофе. К счастью, этого не произошло, потому что был изыскан запасной генератор.

Недавняя авария на предприятии Токаимур при переработке среднеобогащенного урана для японского экспериментального реактора-размно-

жителя является еще одним примером (если бы в этом была необходимость) незрелости программы, несмотря на усилия, вкладывавшиеся в нее в течение десятков лет. Институциональная система в Японии оказалась явно не на высоте в этой ситуации ни в смысле обеспечения соответствующими приборами измерения радиации, ни в смысле обеспечения планами эвакуации, или обучения рабочих. Они явно не готовы к дополнительному бремени — обеспечению безопасности коммерческих реакторов, работающих на плутониевом топливе в смеси с ураном-238. (В настоящее время используется ядерное топливо, которое содержит уран-235 и уран-238). Крупная авария на таком реакторе подвергла бы опасности не только местное население в результате выпадения радиоактивных осадков, но и большую часть Восточной Азии.

Использование плутониевого топлива приводит также к тому, что в коммерческой экономике вводится в обращение плутоний, что увеличивает риск нарушения принципа нераспространения. В настоящее время на многих площадках хранятся огромные количества плутония. Например, тридцать тонн выделенного коммерческого плутония содержится неиспользованным примерно в 12 000 стальных контейнерах на предприятии «Маяк» в России, порождая опасения, что некоторая его часть может попасть на черный рынок. Двух таких контейнеров с плутонием было бы достаточно, чтобы сделать ядерную бомбу. Сейчас, когда экономика России находится в бедственном положении, а терроризм достиг сердца Москвы, пришло время быстро перевести плутоний в формы, не пригодные для производства ядерного оружия (см. *Энергетика и безопасность*, № 3 и *Science for Democratic Action*, V. 5, N 4), и продвигаться к созданию безопасного энергетического будущего.

Хотя ядерный истеблишмент в некоторых странах продолжает оставаться достаточно сильным, чтобы гарантировать непрекращающееся финансирование программ по плутонию как источнику энергии, не обращая внимания на его мрачное прошлое и безрадостные перспективы на будущее, необходимо рассматривать и альтернативные источники энергии. Ключевой момент для альтернативных источников энергии состоит в их экономич-

См.: Конец программ, с. 8
Примечания, с. 8

ности. Наши исследования в области ветровой энергетики показывают, что усовершенствования технологий уже сделали энергию ветра более экономичной, чем энергия плутония. При этом имеются все основания полагать, что в будущем относительные показатели экономического преимущества ветровой энергетики будут продолжать расти.

Развитие других энергетических технологий, особенно быстрое развитие топливных элементов как для стационарных источников электричества, так и для транспорта, внушает надежду, что мир может одновременно решить и экономическую, и экологическую задачу, если только цели, поставленные в обоих случаях, будут достигаться энергично и разумно. Двумя из таких ключевых технологий являются ветровая энергетика и топливные элементы. Когда они рассматриваются в контексте существующих высокоэффективных технологий, таких как совместное производство тепловой и электрической энергии (когенерация) или станции с комбинированным циклом, работающие на природном газе (см. *Энергетика и безопасность* № 5, 1998), или гибридные машины, работающие как на бензине, так и от электрических батарей (см. вставку на с. 15), то видно, что можно и удовлетворить достаточно высокий уровень потребностей в энергии, и снизить выбросы парниковых газов и уровень загрязнения воздуха в городах, и ликвидировать угрозу дальнейшего распространения, а также решить другие проблемы безопасности, связанные с современной мировой энергетической системой. Хорошо продуманная энергетическая политика, способная помочь достигнуть пусть и небольшого снижения затрат в ключевых технологиях, является тем решающим недостающим звеном, которое помогло бы нам достичь этого желанного будущего.

В 1952 г. Комиссия Палей, назначенная Президентом Трумэнном, пришла к выводу, что в отношении удовлетворения энергетических потребностей и предотвращения сбоев в экономике в результате срывов поставок нефти из-за рубежа перспективы у возобновляемых источников выше, чем у ядерной энергетики. Но вскоре после этого правительство США решило проигнорировать эти рекомендации в пользу развития атомной энергетики. Это решение в значительной степени было частью пропагандистской компании в годы холодной войны.

Давно уже пришло время отказаться от мечты времен холодной войны о плутонии, как о "волшебном" источнике энергии, и развернуться в сторону возобновляемых источников энергии и технологий, которые решительным образом изменят эффективность преобразования и использования энергии. Эти технологии необходимо продолжать развивать

с таким же упорством, с каким развивали атомную энергетику в первые десятилетия холодной войны. Но теперь это гонка на время. Есть много указаний, таких как увеличившаяся частота серьезных климатических явлений, на то, что мир еще не встал на путь предотвращения глобального потепления.

Необходимо, чтобы сильные правительства отказались от проектов, ориентированных на плутоний, этих "кормушек", из которых они так долго кормили ядерный истеблишмент. Страны с большими программами по ископаемому топливу и/или атомной энергетике должны взять твердое обязательство направлять государственные ресурсы на покупку ветровой энергии, транспортных средств и стационарных установок на топливных элементах, а также использование технологии когенерации на обогрев и электрификацию общественных зданий. Наилучшим институциональным инструментом для овладения этими технологиями является следующее: правительства должны принять политику "контрактов на поставку", которые обеспечат им стабильный рынок, стимулируя при этом конкуренцию, которая со временем сделает возможным снизить затраты.

Правительство США должно проявить в этом деле большую инициативу, чем они проявляют на сегодня, поскольку к настоящему времени США являются самым большим источником выбросов двуокиси углерода, самым крупным производителем атомной энергии и обладают наибольшим дипломатическим и финансовым влиянием в мире. Тем не менее до сих пор правительство США так и не выполнило своих обязательств по снижению выбросов двуокиси углерода, которые оно взяло на всемирном саммите по окружающей среде в 1992 г., и не приступило к выполнению своих обязательств по Протоколу в Киото (всемирный договор о снижении выбросов двуокиси углерода, см. *Энергетика и безопасность*, № 5), который еще предстоит ратифицировать Сенату США. Учитывая те перспективы, которые обещают эти технологии, а также необходимость наверстать упущенное из-за невыполнения вышеуказанных обязательств, капиталовложения в технологии возобновляемых источников энергии, включая эффективное преобразование энергии с использованием топливных элементов, в размере 5—10 миллиардов долларов в год полностью оправданы. Большая часть этих денег вернется очень скоро в виде снижения затрат на выработку энергии.



1. Частично основано на Предисловии Аржуна Макхиджани к Отчету IEER по ветровой энергетике Марка Фиораванти (см. статью на с. 1).

Стоимость электроэнергии от ветровых установок снижается по мере развития технологии от примерно, 8,8—9,9 центов за 1 кВт·ч по первым проектам до 5,5 центов за 1 кВт·ч по проекту Бокстиген в Швеции в 1997 г. Шельфовые ветровые турбины работают хорошо, и их стоимость существенно снизилась за 90-е годы. Кроме того, они доказали свою надежность.

Сравнительно с этим стоимость реакторов-размножителей не снижается с течением времени или по мере накопления опыта — несмотря на то, что первое электричество, когда-либо выработанное атомным реактором, было получено именно от реактора-размножителя (Экспериментальный реактор-размножитель в Национальной технической лаборатории в Айдахо в 1951 г.). В приведенной ниже таблице даны сравнительные характеристики затрат на выработку электричества с использованием энергии ветра и с использованием плутониевого топлива в легководных реакторах и в реакторах-размножителях. Подробнее об исходных положениях, на которых основаны эти вычисления, можно узнать в отчете IEER <http://www.ieer.org/reports/wind/index.html>.

Один из недостатков ветровой энергетики заключается в непостоянстве режима ее выработки. Несмотря на то, что более низкое использование мощности (т.е. меньшее количество часов работы из расчета работы на полную мощность) учтено в

затратах, приведенных выше, энергия ветра не может быть использована как единственный или основной источник энергии без применения устройств накопления энергии или дополнительного энергоснабжения от других источников (таких, как солнечная энергия и топливо из биомассы). Далее, энергия ветра не может быть использована в дорожно-транспортных средствах без дополнительных капиталовложений, но то же самое относится и к плутонию.

Предположим, в порядке дискуссии, что разумной целью энергетической политики страны является энергетическая самодостаточность и что ключевым аспектом при этом является обеспечение достаточного объема топлива для транспорта. Последнее объясняется тем, что одним из самых уязвимых свойств нефти является то, что цены на нее колеблются и поставки нестабильны и вместе с тем ее очень трудно чем-либо заменить в ближайшем и среднесрочном будущем. Однако, для того чтобы заменить нефть ветром или плутонием, необходимо провести крупные изменения в транспортной системе, и поэтому ни один из этих источников энергии не обладает преимуществом перед другим в отношении поставленной цели — энергетической самодостаточности в автомобильном секторе.

В автомобильном транспорте электричество — независимо от того используется ли ветер, плутоний или какой-либо другой источник энергии — применяется в двух видах. Оно используется либо для приведения в действие электрическое транспортное средство, либо для получения водорода с последующим его использованием в транспортных средствах, работающих на топливных элементах (см. с. 11).

Очевидно, что применение как плутония, так и энергии ветра в транспортных средствах потребовало бы одинаковых крупных изменений: либо перехода к электрическим транспортным средствам, либо использования топливных элементов. Такие изменения, вероятно, будут необходимы в любом случае, чтобы повысить эффективность использования

См.: Ветер в сравнении с плутонием, с. 10

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ

ВАТТ — метрическая единица, используемая для измерения мощности произведенной или потребленной энергии. Одна лошадиная сила равна 746 ватт.

МЕГАВАТТ — обычная единица измерения генерирующей мощности электростанции; равна одному миллиону ватт.

ДЖОУЛЬ — метрическая единица энергии, равная одному ватту мощности, произведенной за одну секунду.

КИЛОВАТТ-ЧАС (кВт·ч) — единица энергии, равная 3,6 миллионам джоулей. Это количество энергии, производимое источником мощностью один киловатт за один час.

ВЕТЕР В СРАВНЕНИИ С ПЛУТОНИЕМ: ЗАТРАТЫ НА ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Составляющая затрат	Шельфовый ветер	МОХ-топливо — легководные реакторы	Реакторы-размножители
Капитальные затраты	4,2 цента/(кВт·ч)	3,8 цента/(кВт·ч)	7,6 цента/(кВт·ч)
Стоимость топлива (не включая репроцессинг)	Неприменимо	0,9 цента/(кВт·ч)	0,9 цента/(кВт·ч)
Стоимость репроцессинга	Неприменимо	0,7 цента/(кВт·ч)	1,0 цента/(кВт·ч)
Стоимость эксплуатационных и ремонтных работ	1,2 цента/(кВт·ч)	1,5 цента/(кВт·ч)	1,5 цента/(кВт·ч)
Затраты на утилизацию ядерных отходов для МОХ отработанного топлива	Неприменимо	0,2 цента/(кВт·ч)	0,2 цента/(кВт·ч)
Стоимость вывода из эксплуатации	0,14 цента/(кВт·ч)	0,1 цента/(кВт·ч)	0,1 цента/(кВт·ч)
Всего	5,54 цента/(кВт·ч)	7,2 цента/(кВт·ч)	11,3 цента/(кВт·ч)

энергии, снизить загрязнение воздуха в городах и/или снизить выбросы парниковых газов. По-видимому, в настоящее время использование топливных элементов, в которых в качестве топлива используют водород, является наиболее эффективным и наименее загрязняющим способом преобразования энергии в автомобильном транспорте (см. табл. на с. 13). Следовательно, мы сравнили стоимость использования ветра и плутона в качестве энергоносителей в секторе дорожного транспорта, работающего на топливных элементах.

Стоимость водорода, полученного с использованием энергии ветра, исходя из 5 центов за 1 кВт·час электроэнергии, была бы около 33 долларов за гигаджоуль (GJ) для транспортного средства, работающего на топливных элементах, что эквивалентно 1,66 долларов за галлон для транспортного средства, работающего на бензине. Сравнительная стоимость водорода, полученного с использованием реактора-размножителя, была бы почти в два раза больше (60 долларов за 1 GJ), а возможно, и больше.

Наша оценка долгосрочных аспектов, связанных как с ветровой энергетикой, так и с технологией реактора-размножителя, говорит о том, что, даже учитывая дополнительные затраты на накопители энергии, с тем чтобы компенсировать непостоянную во времени природу ветра, ветровая энергетика представляется более привлекательной, чем реакторы-размножители.

Рекомендации

Давно уже надо было отказаться от плутона как от источника энергии в пользу возобновляемых источников. Комиссия Палей, назначенная Президентом Трумэнном, еще до того, как началась эра коммерческого использования атомной энергии, в 1952 г. пришла к выводу, что возобновляемые источники энергии более перспективны, чем атомная энергетика. Плутониевое топливо и реакторы-размножители сыграли серьезную роль в крушении мечты об атомной энергетике со всех точек зрения. Сейчас, когда стало возможным и экономичным использовать энергию ветра и, особенно, энергию прибрежного ветра, нет разумного обоснования для продолжения государственных инвестиций в плутониевую энергетическую технологию. Их надо немедленно прекратить.

Что касается энергетических технологий, которые близки к коммерческому использованию и подходят с точки зрения экологической и/или энергетической безопасности, государственные деньги должны быть инвестированы таким образом, чтобы это способствовало прогрессу в исследованиях и

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ: ЯПОНИЯ

В феврале 1999 г., почти месяц спустя после выхода в свет отчета IEEF *Ветер в сравнении с плутонием*, правительство Японии объявило, что оно начинает разработку программы изучения проблем выработки электричества установками морского базирования, включая шельфовую ветровую энергетику. Японское Министерство международной торговли и промышленности, а также Министерство транспорта рассматривают возможность развития шельфовых ветродвигателей, а также установок, использующих для выработки электроэнергии как энергию ветра, так и энергию волн. Министерства планируют провести исследовательскую работу по определению нескольких участков под такие электрогенераторные установки морского базирования и надаются начать строительство около 2002 г. В критерии, в соответствии с которыми будет проводиться отбор участков, включены такие параметры, как сила ветра, права рыбаков и изменение ландшафта. Япония планирует увеличить объем производства ветровой электроэнергии с 14 000 кВт в 1996 финансовом году до 300 000 киловатт в 2001 финансовом году.

Источник: Jiji Press Ticker Service, February 6, 1999.

разработках с целью снижения затрат, а также инвестированию частного капитала в этой области. В качестве одного из способов снижения выбросов парниковых газов, а также для решения других экологических задач и достижения целей нераспространения крайне желательно в ближайшее время и в среднесрочной перспективе установить достаточно большое количество ветроэлектростанций. Вопрос состоит в том, каким образом нужно использовать ресурсы налогоплательщиков, чтобы минимизировать стоимость достижения этих целей.

Анализ государственной политики в отношении поощрения развития ветровой энергетике за прошедшие годы показывает, что ежегодная покупка государственными властями и/или энергетическими компаниями заранее оговоренных объемов электроэнергии путем открытых торгов позволила бы достигнуть желаемых целей по стимулированию перехода к такому энергетическому будущему, которое было бы экологически продуманным и не создавало бы угрозы распространения. Правительство могло бы заранее указывать области, включая шельфовые районы, а частные компании участвовали бы в конкурсе на электроснабжение на период от 15 до 20 лет по установленным ценам.

См.: Ветер в сравнении с плутонием, с. 17

ТАБЛИЦА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЕДИНИЦ ЭНЕРГИИ

Если у вас есть	А вы хотите	Умножьте
БТЕ	Джоули	1055
Джоули/с	Ватты	1
Ватты	БТЕ/ч	3,413
Мощность	Энергия	Время

Представляем устойчивые технологии: топливные элементы

На них работают космические корабли Национального управления по авиации и космическому пространству США (НАСА). Они обеспечивают электроэнергией компьютеры Первого национального банка в Омахе. Они используются на некоторых общественных городских автобусах в Чикаго.

Это все — топливные элементы. Топливные элементы представляют собой электрохимические устройства, вырабатывающие электроэнергию без процесса горения — химическим путем, почти так же, как батарейки. Разница лишь в том, что в них используются другие химические вещества, водород и кислород, а продуктом химической реакции является вода. Можно использовать и природный газ, однако при использовании углеводородного топ-

лива, конечно же, неизбежен определенный уровень выбросов двуокиси углерода.

Поскольку топливные элементы могут работать с высоким КПД и без вредных выбросов, с ними связаны большие перспективы в отношении экологически рационального источника энергии, который будет способствовать снижению выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ. Основное препятствие на пути широкомасштабного использования топливных элементов это их высокая стоимость по сравнению с другими устройствами, вырабатывающими электричество или приводящими в движение транспортные средства.

См.: Устойчивые технологии, с. 12
Примечания, с. 17

ТИПЫ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Фосфорная кислота. Это — наиболее коммерчески развитый тип топливного элемента. Он нашел широкое применение во многих областях: больницах, пансионатах для престарелых, гостиницах, офисных зданиях, школах, вспомогательных электростанциях и терминалах аэропортов. Топливные элементы на фосфорной кислоте вырабатывают электричество с КПД более 40% или около 85% (если пар, который производит этот топливный элемент, используется для совместного производства тепла и электричества) в сравнении с 30% КПД наиболее эффективного двигателя внутреннего сгорания. Рабочие температуры находятся в пределах 400 °F ($t_c = (t_p - 32)/1,8$). Топливные элементы могут также использоваться и на больших транспортных средствах, таких как автобусы и локомотивы.

Протонообменная мембрана (ПОМ). Эти элементы работают при относительно низкой температуре (около 200 °F), имеют высокую плотность энерговыделения, могут быстро изменять выходную мощность для удовлетворения меняющейся потребности в энергии и подходят для работы в таких условиях, где требуется быстрый запуск, например, автомобили. Согласно заявлению Министерства энергетики США, "они являются первыми кандидатами на использование в транспортных средствах малой грузоподъемности, для обеспечения зданий электроэнергией и теплом и, возможно, в значительно меньших приложениях, таких как замена аккумуляторных батарей в видеокамерах".

Расплавленный карбонат. Топливные элементы на расплавленном карбонате обещают быть высокоэффективными в отношении КПД преобразования топлива в электричество, а также обладать возможностью потребления топлива на основе угля. Эти элементы работают при температуре около 1 200 °F.

Твердые оксиды. Другим многообещающим топливным элементом является твердоокисный элемент, который может быть использован на больших мощных установках, включая промышленные и крупные центральные станции, вырабатывающие электричество. Некоторые разработчики считают, что твердоокисные топливные элементы могут также использоваться в автомобильном транспорте. В Европе готовится испытание установки в автотранспорте мощностью 100 кВт. В Японии уже вступили в строй

два небольших блока мощностью 25 кВт. В системах на твердых оксидах вместо жидкого электролита обычно используется твердый керамический материал, что позволяет достичь рабочих температур до 1 800 °F. КПД при выработке энергии может достигнуть 60%. Один тип твердоокисных топливных элементов использует в своей конструкции массив метровых труб, другие варианты — сжатый диск, который напоминает крышку от жестяной банки из-под супа.

Щелочные элементы. Уже давно используемые НАСА в космических полетах, эти топливные элементы работают с КПД до 70%. В качестве электролита в них используется щелочной гидроксид калия. До недавнего времени они были слишком дорогими для коммерческого использования, но несколько компаний взялись за изучение проблемы снижения стоимости и повышения гибкости эксплуатационных характеристик.

Другие топливные элементы. *Прямые метаноловые топливные элементы (ПМТЭ)* являются относительно новыми членами семейства топливных элементов. Эти элементы похожи на ПОМ-элементы в том, что и в тех, и в других в качестве электролита используется полимерная мембрана. Однако в ПМТЭ анодный катализатор сам извлекает водород из жидкого метанола, при этом отпадает необходимость в топливном реформаторе. Ожидается, что КПД этого топливного элемента составит 40% и они будут, как правило, работать при температурах от 120 до 190 °F. При более высоких температурах КПД будет выше. *Регенеративные топливные элементы*, также недавно вошедшие в семейство топливных элементов, привлекательны тем, что обеспечивают выработку электроэнергии в замкнутом цикле. Вода разлагается на водород и кислород с помощью установки для электролиза с питанием от солнечной батареи. Водород и кислород подаются в топливный элемент, который вырабатывает электричество, тепло и воду. Вода затем возвращается назад в установку для электролиза на солнечных батареях, и процесс начинается снова. В настоящее время НАСА и другие организации во всем мире проводят исследования с этими типами топливных элементов.

Перепечатано с разрешения Fuel Cell 2000, сайт в Интернете <http://216.51.18.233/fctypes.html> на 15 сентября 1999.

Устойчивые технологии
со с. 11

История развития

Первые топливные элементы были продемонстрированы сэром Вильямом Гровзом в 1839 г. Гровз показал, что процесс электролиза — расщепление воды на водород и кислород под действием электрического тока — обратим. То есть водород и кислород могут быть соединены химическим путем с образованием электричества.

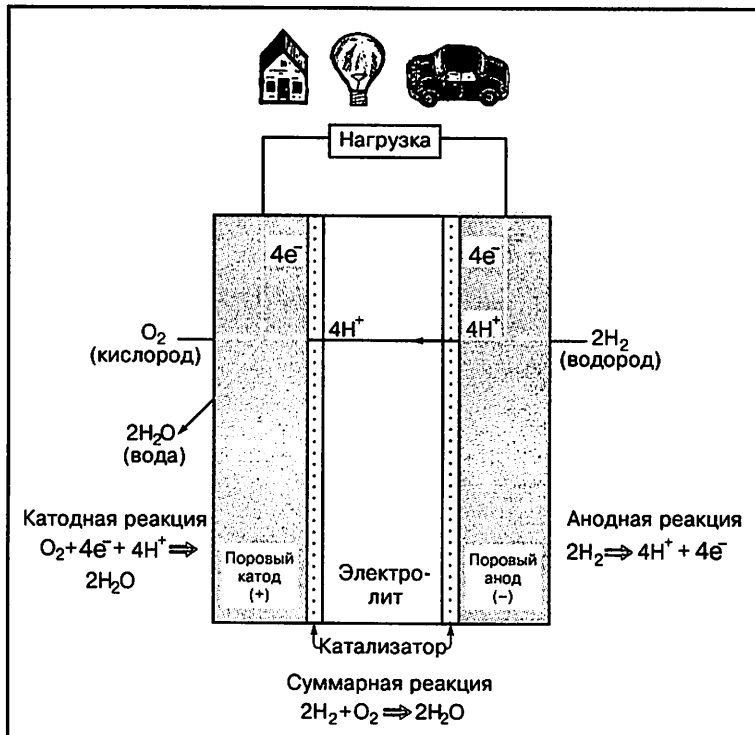
После того, как это было продемонстрировано, многие ученые бросились с усердием изучать топливные элементы, но изобретение двигателя внутреннего сгорания и развитие инфраструктуры добычи запасов нефти во второй половине девятнадцатого века оставило развитие топливных элементов далеко позади. Еще больше сдерживала развитие топливных элементов их высокая стоимость.

Всплеск развития топливных элементов пришелся на 50-е годы, когда НАСА обратилась к ним в связи с возникшей потребностью в компактном электрогенераторе для космических полетов. Были вложены соответствующие средства, и в результате полеты Apollo и Gemini были осуществлены на топливных элементах. Космические корабли также работают на топливных элементах.

Топливные элементы до сих пор в значительной степени являются экспериментальной технологией, но уже несколько компаний продают их на коммерческом рынке! Только за последние почти десять лет были достигнуты значительные успехи в области коммерческой технологии топливных элементов. О некоторых из них вы можете прочитать на с. 16.

Как работает топливный элемент

Топливные элементы похожи на аккумуляторные батареи — они вырабатывают электричество в результате химической реакции. В отличие от этого, двигатели внутреннего сго-



рания сжигают топливо и таким образом вырабатывают тепло, которое затем преобразуется в механическую энергию. Если только тепло от выхлопных газов не используется каким-либо образом (например, для обогрева или кондиционирования воздуха), то можно сказать, что КПД двигателя внутреннего сгорания довольно низкий. Например, ожидается, что КПД топливных элементов при использовании в транспортном средстве — проект, который сейчас находится в стадии разработки, — будет выше КПД современных типичных двигателей на бензине, используемых в автомобилях, более чем в два раза.

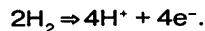
Хотя и аккумуляторные батареи, и топливные элементы вырабатывают электричество химическим путем, они выполняют две совершенно разные функции. Батареи — устройства с накопленной энергией: электричество, которое они вырабатывают, является результатом химической реакции вещества, которое уже находится внутри них. Топливные элементы не хранят энергию, а преобразуют часть энергии топлива, поставляемого извне, в электричество. В этом отношении топливный элемент скорее похож на обычную электростанцию.

Существует несколько различных типов топливных элементов (см. вставку на с. 11). Наипростейший топливный элемент состоит из специальной мембраны, известной как электролит. По обе стороны мембраны нанесены порошкообразные электроды. Такая конструкция — электролит, окруженный двумя электродами, — представляет собой отдельный элемент. Водород поступает на одну сторону (анод), а кислород (воздух) на другую (катод). На каждом электроде происходят разные химические реакции (см. схему на этой странице).

См.: Устойчивые технологии, с. 13

Устойчивые технологии
со с. 12

На аноде водород распадается на смесь протонов и электронов. В некоторых топливных элементах электроды окружены катализатором, обычно выполненным из платины или других благородных металлов, которые способствуют протекающей реакции диссоциации:



Здесь H_2 — двуатомная молекула водорода, форма, в которой водород присутствует в виде газа;

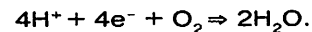
H^+ — ионизированный водород, т.е. протон;

e^- — электрон.

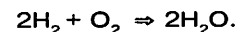
Работа топливного элемента основана на том, что электролит пропускает через себя протоны (по направлению к катоду), а электроны — нет. Электроны движутся к катоду по внешнему проводящему контуру. Это движение электронов и есть электрический ток, который может быть использован для приведения в действие внешнего устройства,

подсоединенного к топливному элементу, такого как электродвигатель или лампочка. Это устройство обычно называется “нагрузкой”.

С катодной стороны топливного элемента протоны (которые прошли через электролит) и электроны (которые прошли через внешнюю нагрузку) “воссоединяются” и вступают в реакцию с подаваемым на катод кислородом с образованием воды, H_2O :



Суммарная реакция в топливном элементе записывается так:



В своей работе топливные элементы используют водородное топливо и кислород из воздуха. Водород может подаваться непосредственно или путем выделения его из внешнего источника топлива, такого как природный газ, бензин или метанол. В случае внешнего источника его необходимо химически преобразовать, чтобы извлечь водород. Этот процесс

См.: Устойчивые технологии, с. 14

ВЫБРОСЫ ОТ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, РАБОТАЮЩИХ НА ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЯХ, ПО СРАВНЕНИЮ С ВЫБРОСАМИ ОТ ТРАДИЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Расчетное процентное изменение содержания контролируемых загрязняющих веществ и парниковых газов относительно базового уровня, прогнозируемого на 2000 год^a

Транспортное средство	Контролируемые загрязнители ^b					Парниковые газы
	Неметановые органические газы ^c	Оксид углерода (CO)	Окиси азота (NOx)	Окиси серы (SOx)	Твердые частицы	
Базовый уровень: Двигатели внутреннего сгорания на бензине (грамм на километр)	0,48	3,81	0,28	0,035	0,01	282,5
Электрические транспортные средства на аккумуляторных батареях	-95	-99	-56	+321	+153	-37
Электрические транспортные средства на топливных элементах (сжатый водород, образуемый за счет природного газа)	-100	-100	-100	-100	-100	-65
Электрические транспортные средства на топливных элементах (сжатый водород, образуемый за счет солнечной энергии)	-100	-100	-100	-100	-100	-94
Электрические транспортные средства на топливных элементах или аккумуляторных батареях (водород, образуемый непосредственно за счет солнечной энергии)	-100	-100	-100	-100	-100	-100

Источник: *Hydrogen Fuel Cell Vehicles*, Briefing Paper, Union of Concerned Scientists, Cambridge, Mass., February 1995.

^a Данные включают в себя прямые выбросы от транспортных средств и косвенные выбросы, связанные с производством, хранением и распределением топлива.

^b Содержания загрязняющих веществ регулируются Законом о чистом воздухе: углеводороды, оксид углерода, оксиды азота, оксиды серы и твердые частицы. Эти загрязняющие вещества оказывают воздействие на здоровье человека, что приводит к головным болям, физиологическим стрессам и нарушениям дыхательной системы.

^c Сюда входят все углеводороды, кроме метана.

Устойчивые технологии
со с. 13

называется “реформингом”². Водород можно также получить из аммиака, альтернативных ресурсов, таких как газ из городских свалок и от станций очистки сточных вод, а также путем электролиза воды, при котором для разложения воды на водород и кислород используется электричество³. В настоящее время большинство технологий топливных элементов, применяемых на транспорте, используют метанол.

Для реформинга топлива с целью получения водорода для топливных элементов были разработаны разные средства. Министерство энергетики США разработало топливную установку внутри машины для реформинга бензина с тем, чтобы обеспечивать подачу водорода на автономный топливный элемент⁴. Исследователи из Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории в США продемонстрировали компактную топливную установку по реформингу величиной в одну десятую размеров блока питания. Американская энергокомпания, Northwest Power Systems, и Национальная лаборатория Сандия продемонстрировали топливную реформинговую установку, которая преобразует дизельное топливо в водород для топливных элементов⁵.

По отдельности топливные элементы производят около 0,7—1,0 В каждый. Чтобы увеличить напряжение, элементы собираются в “каскад”, т.е. последовательное соединение. Чтобы создать большой ток, наборы каскадных элементов соединяются параллельно. Если объединить каскады топливных элементов с топливной установкой, системой подачи воздуха и охлаждения, а также с системой управления, то получится двигатель на топливных элементах. Этот двигатель может приводить в действие транспортное средство, стационарную электростанцию или переносной электрический генератор⁶. Двигатели на топливных элементах бывают разных размеров в зависимости от назначения, типа топливного элемента и используемого топлива. Например, размер каждой из четырех отдельных стационарных электростанций мощностью 200 кВт, установленных в банке в Омахе, приблизительно равен размеру прицепа грузовика⁷.

Применения

Топливные элементы могут использоваться как в стационарных, так и в передвижных устройствах. В ответ на ужесточающиеся требования по нормам выбросов в США производители автомобилей, включая DaimlerChrysler, Toyota, Ford, General Motors, Volkswagen, Honda и Nissan стали проводить



Компания Ballard Power выбрала городские автобусы, для опробования своей технологии топливных элементов на транспорте. Первый городской автобус этой компании, работающий на топливных элементах (а также и первый в мире), появился на дорогах в июне 1993 г. Это был 32-футовый городской автобус с двигателем Ballard[®] на топливных элементах мощностью 125 лошадиных сил (90 кВт), работающий на водороде.

эксперименты и демонстрировать машины, работающие на топливных элементах. Ожидается, что первые коммерческие автомобили на топливных элементах появятся на дорогах в 2004 или 2005 г.⁸

Серьезной вехой в истории развития технологии топливных элементов стала демонстрация в июне 1993 г. экспериментального 32-футового городского автобуса компании Ballard Power System с двигателем на водородных топливных элементах мощностью 90 киловатт (см. фотографию). С тех пор было разработано и запущено в эксплуатацию много разных типов и разных поколений пассажирских транспортных средств на топливных элементах, работающих на разных видах топлива. С конца 1996 г. в Палм Дезерт в Калифорнии стали использоваться три мототележки для гольфа на водородных топливных элементах. На дорогах Чикаго, Иллинойс; Ванкувера, Британская Колумбия; и Осло, Норвегия проводятся испытания городских автобусов, работающих на топливных элементах. На улицах Лондона проходят проверку такси, работающие на щелочных топливных элементах⁹.

Демонстрируются также и стационарные установки, использующие технологию топливных элементов, но они пока не имеют широкого коммерческого применения. Первый национальный банк Омаха в Небраске использует систему на топливных элементах для питания компьютеров, поскольку эта система более надежна, чем старая система, работавшая от основной сети с аварийным аккумуляторным питанием¹⁰. Самая большая в мире коммерческая система на топливных элементах мощностью 1,2 МВт будет скоро установлена в центре по обра-

См.: Устойчивые технологии, с. 15

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА,
ГИБРИДНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА И ТОПЛИВНЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ**

В качестве источника механической энергии в большей части электрических транспортных средств используются электрический двигатель, работающий на аккумуляторных батареях. Основное преимущество транспортных средств на электрической аккумуляторной тяге — это нулевые выбросы из выхлопной трубы. Однако и у них есть выбросы, правда, в несколько другом виде — при перезарядке на электростанции и при производстве батарей, многие из которых содержат токсические материалы. Кроме того, батареи тяжелы, они должны меняться раз в несколько лет, и на их перезарядку уходит несколько часов. Производительность транспортных средств на электрических батареях существенно улучшилась, но им еще далеко до того, чтобы стать широко признанными.

Электрические транспортные средства с комбинированной силовой установкой (гибридные транспортные средства) сочетают в себе два источника энергии — электродвигатель на батареях и традиционный двигатель внутреннего сгорания. Компьютерная система управления оптимизирует комбиниро-

вание энергии от электродвигателя и традиционного двигателя в зависимости от условий езды. Гибридные транспортные средства значительно эффективнее, чем традиционные автомобили на бензине.

Основные производители автомобилей в Америке сейчас разрабатывают гибридные электрические транспортные средства. Некоторые компании совместно работают над прототипом машины, в которой для приведения в действие электродвигателя автомобиля использовалась бы энергия, вырабатываемая топливными элементами.

Источники:

Humboldt State University, Schatz Energy Research Center, <http://www.humboldt.edu/~serc/faq.html>, на 1 октября, 1999; *Information Please*, <http://www.infoplease.com/ipa/A0004678.html>, на 1 октября, 1999; *Frequently Asked Questions (FAQ): Hypercars*, Rocky Mountain Institute, <http://www.rmi.org/faq/hyperq.html>, на 1 октября, 1999; *Hybrid Car*, Toyota, <http://www.toyota.com>, на 13 октября, 1999.

Устойчивые технологии
со с. 14

ботке почтовой корреспонденции на Аляске¹¹. Проходят испытания и демонстрируются также работающие на топливных элементах портативные компьютеры-лаптопы, системы управления, используемые на станциях очистки сточных вод и торговые автоматы¹².

"За" и "против"

Топливные элементы имеют ряд преимуществ. В то время как КПД современных двигателей внутреннего сгорания составляет только 12—15%, у топливных элементов этот коэффициент составляет 50%¹³. КПД топливных элементов может оставаться на довольно высоком уровне, даже когда они используются не на полную номинальную мощность, что является серьезным преимуществом по сравнению с двигателями на бензине.

Модульный принцип устройства топливных элементов означает, что мощность электростанции на топливных элементах можно увеличить, просто добавив еще несколько каскадов. Это обеспечивает минимизацию коэффициента недоиспользования мощности, что позволяет лучше приводить в соответствие спрос и предложение. Поскольку КПД

блока топливных элементов определяется производительностью отдельных элементов, небольшие электростанции на топливных элементах работают также эффективно, как и большие. Кроме того, сбросное тепло от стационарных систем на топливных элементах может быть использовано на обогрев воды и помещений, еще более увеличивая эффективность использования энергии.

При использовании топливных элементов практически не бывает вредных выбросов. При работе двигателя на чистом водороде в качестве побочных продуктов образуются только тепло и чистый водяной пар. Так на космических кораблях астронавты пьют воду, которая образуется в результате работы бортовых топливных элементов¹⁴. Состав выбросов зависит от природы источника водорода. При использовании метанола образуются нулевые выбросы оксидов азота и оксида углерода и только небольшие выбросы углеводорода. Выбросы увеличиваются по мере перехода от водорода к метанолу и бензину, хотя даже при использовании бензина уровень выбросов будет оставаться достаточно низким¹⁵. В любом случае замена сегодняшних традиционных двигателей внутреннего сгорания на топливные элементы

См.: Устойчивые технологии, с. 16

РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТА: ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

American Methanol Institute — <http://www.methanol.org>
Ballard Power Systems — <http://www.ballard.com>
California Fuel Cell Partnership — <http://www.drivingthefuture.org>
Distributed Power Coalition of America — <http://www.dpc.org>
Energy Efficiency and Renewable Energy Network, US Department of Energy — <http://www.eren.doe.gov/RE/hydrogen/>
Европейский форум по топливным элементам — <http://www.efcf.com/>

Fuel Cells 2000 — <http://www.fuelcells.org>
Hydrogen & Fuel Cell Letter — <http://www.hfcletter.com>
Корпорация ONSI — <http://www.onscorp.com>
Министерство обороны США, Демонстрационные программы по топливным элементам — <http://www.dodfuelcell.com>
Министерство энергетики США, Программы по топливным элементам — <http://www.ott.doe.gov/oaat/fuelcell.html>
Всемирный совет по топливным элементам — <http://members.aol.com/fuelcells/1.htm>

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- Компания Ballard Power System в Бернаби, Британская Колумбия, Канада, разработала комплект топливных элементов, которые развивают мощность 25 кВт (трех таких комплектов достаточно, чтобы привести в действие Седан) и работают при 85 °С. У Ballard есть контракты на научные исследования, а также на инвестиции, с основными производителями автомобилей на общую сумму более 1 млрд долл. Ballard объединил свои усилия с филиалом электрической компании Нью-Джерси с тем, чтобы осуществить запуск в серийное производство стационарных блоков по выработке тепловой и электрической энергии на топливных элементах.
- California Fuel Cell Partnership — совместный проект автомобилестроителей, нефтяных компаний, компаний, специализирующейся на топливных элементах, и штата Калифорнии — планирует в 2000—2003 годах выпустить на дороги 50 пассажирских автомобилей и автобусов на топливных элементах. Это Партнерство также планирует построить в Калифорнии две водородных заправочных станции.
- Правительство США владеет (и эксплуатирует) 30 блоками совместного производства тепловой и электрической энергии на топливных элементах — самый большой парк топливных элементов. Из пяти департаментов на уровне кабинета министров, инвестирующих более 100 млн долл. в год на исследование топливных элементов и демонстрационные программы, более всего приходится на Министерство энергетики США — около 80 млн долл. Правительство Канады, Японии и Германии способствуют развитию топливных элементов путем введения налоговых льгот, займов под низкий процент и дотаций.
- Начиная с 1993 г. компания DaimlerChrysler (бывший Daimler-Benz) проводит испытания двигателя на топливных элементах NECAR (New Electric Car). Используя различные

виды топлива, компания уже представила четыре поколения транспортных средств, причем последним явилось пассажирское транспортное средство на топливных элементах, базирующееся на автомобиле класса "А" этой компании.

- Города Чикаго, Ванкувер и Осло проводят натурные испытания городских автобусов, работающих на топливных элементах. На улицах Лондона проходят испытания такси, работающие на щелочных топливных элементах.
- Космические корабли НАСА используют щелочные топливные элементы для производства приблизительно 45 кВт энергии. Данные элементы — очень дорогие.
- Компания Toshiba разработала торговый автомат, работающий на 10-киловаттном топливном элементе, использующем сжиженный нефтяной газ.
- Исследователи Северо-западного университета, Иллинойс, разработали экспериментальные топливные элементы, работающие непосредственно на природном газе.
- Ученые Когакунского университета в Токио разработали жидкое топливо, которое, как сообщается, состоит из металлов и водорода; оно может снабжать топливные элементы водородом без применения топливного реформатора.
- Две компании FuelCell Energy (ранее Energy Research Corporation) и Bath Iron Works объединили свои усилия в разработке электростанции на топливных элементах для военно-морского флота.

Источники: Сайт в Интернет Fuel Cells 2000, <http://www.fuelcells.org>, на 15 сентября, 1999; California Fuel Cell Partnership, <http://www.drivingthefuture.org>, на 15 сентября, 1999; Fuel Cells 2000 press-pack, 17 марта, 1999; Fuel Cell Technology Update, Fuel Cells 2000, сентябрь 1999, <http://www.fuelcells.org>; Robert F. Service, "Bringing Fuel Cells Down to Earth", Science, Vol. 285, No. 5427, July 30, 1999, p. 684.

Устойчивые технологии
со с. 15

привела бы к общему снижению выбросов CO₂ и оксидов азота. (См. таблицу по выбросам на с. 13)

Использование топливных элементов обеспечивает гибкость энергетической инфраструктуры, создавая дополнительные возможности для децентрализованного производства электроэнергии. Множественность децентрализованных источников энергии позволяет снизить потери при передаче электроэнергии и развить рынки сбыта энергии (что особенно важно для отдаленных и сельских районов, при отсутствии доступа к линиям электропередач). С помощью топливных элементов отдельные жители или кварталы могут сами обеспечить себя большей частью электроэнергии и таким образом значительно повысить эффективность ее использования.

Топливные элементы предлагают энергию высокого качества и повышенной надежности. Они долговечны, у них нет подвижных частей, и они производят постоянный объем энергии.

Однако технология топливных элементов нуждается в дальнейшем совершенствовании с тем, чтобы повысить их производительность, снизить затраты и, таким образом, сделать топливные элементы конкурентноспособными относительно других энергетических технологий. Следует отметить, что когда рассматриваются затратные характеристики энергетических технологий, сравнения

должны проводиться на основе всех составляющих технологических характеристик, включая капитальные эксплуатационные расходы, выбросы загрязняющих веществ, качество энергии, долговечность, вывод из эксплуатации и гибкость.

Хотя водородный газ является наилучшим топливом, инфраструктуры или транспортной базы для него еще не существует. В ближайшей перспективе для обеспечения энергоустановок источниками водорода в виде бензина, метанола или природного газа могли бы использоваться существующие системы снабжения ископаемым топливом (газовые станции и т.д.). Это исключило бы необходимость создания специальных водородозаправочных станций, но потребовало бы, чтобы на каждом транспортном средстве был установлен преобразователь ("реформатор") ископаемого топлива в водород. Недостаток этого подхода состоит в том, что он использует ископаемое топливо и, таким образом, приводит к выбросам двуокиси углерода. Метанол, являющийся в настоящее время ведущим кандидатом, создает меньше выбросов, чем бензин, но он бы потребовал установки на автомобиле емкости большего объема, поскольку он занимает в два раза больше места при одинаковом энерго-содержании¹⁶.

В отличие от систем снабжения ископаемым топливом, солнечные и ветровые системы (использую-

См.: Устойчивые технологии, с. 17

Устойчивые технологии со с. 16

щие электричество для создания водорода и кислорода из воды) и системы прямого фотообразования энергии (использующие полупроводниковые материалы или ферменты для производства водорода) могли бы обеспечивать снабжение водородом без этапа реформинга, и, таким образом, можно было бы избежать выбросов вредных веществ, что наблюдается при использовании метаноловых или бензиновых топливных элементов. Водород мог бы накапливаться и преобразовываться в электричество в топливном элементе по мере необходимости. В перспективе соединение топливных элементов с такого рода возобновляемыми источниками энергии, скорее всего, будет эффективной стратегией обеспечения продуктивным, экологически продуманным и универсальным источником энергии.

Рекомендации IEER заключаются в том, чтобы местные и федеральные власти, а также власти штатов часть своих закупочных бюджетов по транспортному хозяйству направляли на транспортные средства на топливных элементах, а также на стационарные системы на топливных элементах для обеспечения теплом и электричеством некоторых из своих существенных или новых зданий. Это будет способствовать развитию жизненно важной технологии и снижению выбросов парниковых газов.



1. Сайт Schatz Energy Research Center в Интернете, Humboldt State University, <http://www.humboldt.edu/~serc/faq.html>, по состоянию на 1 октября 1999.
2. Экспериментальный топливный элемент, который работает непосредственно на природном газе, был недавно разработан группой исследователей Северо-западного университета около Чикаго, Иллинойс (Источник: *Fuels Cell Technology Update*, Fuel Cells 2000, September 1999, <http://www.fuelcells.org>).
3. Сайт Ballard Power Systems в Интернете, <http://www.ballard.com/faq.asp>, по состоянию на 17 сентября 1999.
4. *Compact Fuel Processors for Automotive Fuel Cells*, U.S. Department of Energy Pacific Northwest National Laboratory, April 1, 1999, <http://www.pnl.gov/microcats/fullmenu/compfuelproc.html>, по состоянию на 13 октября 1999.
5. *Fuels Cell Technology Update*, Fuel Cells 2000, September 1999, <http://www.fuelcells.org>.
6. Сайт Ballard Power Systems в Интернете на 17 сентября 1999.
7. Matthew L. Wald, "Energy to Count On", *New York Times*, August 17, 1999, p. C1, C7.
8. Сайт Ballard Power Systems в Интернете на 17 сентября 1999.
9. Сайт Fuel Cells 2000 в Интернете на 15 сентября 1999.
10. Wald, 1999.
11. *Fuels Cell Technology Update*, September 1999.
12. Wald, 1999; *Fuel Cell Technology Update*, September 1999.
13. Сайт Schatz Energy Research Center в Интернете на 1 октября 1999.
14. Joe Schwarcz, "Hydrogen, the First Element: What a Blast!", *Washington Post*, September 8, 1999, p. H1, H6.
15. Сайт California Fuel Cell Partnership в Интернете, <http://www.drivingthefuture.org>, на 15 сентября 1999; Robert F. Service, "Bringing Fuel Cells Down to Earth", *Science*, Vol. 285, No 5427, 30 July 1999, p. 684.
16. Телефонный разговор с Бернадетт Гьер, Fuel Cells 2000, 8 октября 1999.

Ветер в сравнении с плутонием со с. 10

Это способствовало бы развитию частных программ исследований и разработок, а также выбору энергопроизводителей, проведению торгов на конкурсной основе в соответствии с их производственными показателями. Это, в свою очередь, способствовало бы эффективному использованию государственных ресурсов и систематическому снижению затрат.

В отношении США мы предлагаем, чтобы государство покупало 1 000 мегаватт электроэнергии ветра в год по крайней мере до 2010 г., когда должны будут завершиться основные работы по оценке контрактов. Площадки могли бы выбираться на основе нескольких критериев, таких как наличие и качество ветровых ресурсов, энергетические потребности в регионе, минимальное воздействие на земельные площади и на экосистемы. В условиях конкурса должен быть указан определенный период, в течение которого должно быть обеспечено гарантированное исполнение проекта.

Это в некоторой степени напоминало бы то, как в США выставляются на конкурс контракты на аренду для разведки нефтяных месторождений, с той лишь разницей, что в случае с ветровой энергией приблизительный размер ресурса уже известен. Следовательно, контракты были бы нацелены на фактическое снабжение электричеством от ветроэлектростанций (а не на разведку, что является целью аренды в случае нефтяных месторождений).

Министерство энергетики США объявило, что поставлена цель к 2010 г. подключить в энергосистему страны 10 000 мегаватт ветровой энергии. Это может быть достигнуто, в основном, благодаря снижению налоговых ставок и проведению федеральной программы по закупке ветровой электроэнергии в таком объеме, чтобы ее хватило на покрытие 5% потребления электричества по федеральным правительственным программам к 2010 г. Хотя цель — значительное увеличение объема выработ-

См.: Ветер в сравнении с плутонием, с. 20

Что такое линейная беспороговая гипотеза?

АРЖУН МАКХИДЖАНИ

Линейная беспороговая гипотеза (ЛБПГ) — это гипотеза, которая используется в нормативно-правовой практике для оценки риска заболевания раком при малых дозах облучения. Малая доза излучения определяется как уровень дозы излучения, при котором не возникает кратковременных наблюдаемых эффектов, таких как покраснение и сыпь на коже, рвота или высокое содержание белых кровяных телец в крови. Такие наблюдаемые (или соматические) эффекты появляются, когда человек получает сравнительно высокую дозу облучения за короткий промежуток времени. Большинство соматических эффектов появляются при дозах 100 бэр или более, однако уровень белых кровяных телец изменяется при значительно более низких дозах. Такая же доза облучения, но полученная в течение нескольких недель или месяцев, не вызывает заметных эффектов, разве что на клеточном уровне. Однако она может увеличить риск заболевания различными болезнями (стохастические эффекты), из которых наиболее изученной является рак¹.

Были проведены интенсивные исследования людей, выживших после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, на предмет оценки степени риска заболевания раком. Был выполнен огромный объем работ — под наблюдением в течение более 50 лет находились более 75 000 человек — причем исследование продолжается до сих пор. Оценки риска заболевания раком, используемые в нормативно-правовой практике, большей частью основаны на результатах этих исследований. Однако, поскольку выжившие люди получили сравнительно большие дозы, и поскольку эти дозы облучения они получили за очень короткий промежуток времени, экстраполяция рисков при малых дозах, полученных за длительное время, трудна и противоречива. Более того, некоторые исследователи, особенно британский врач Алис Стюарт и ее коллеги, указывают на то, что те, кто оставались живы длительное время, относились, по-видимому, преимущественно к числу самых здоровых людей. Это осложняет экстраполяцию результатов (по определению риска заболевания раком выживших) на все население.

Есть другие выборки облученного населения. В первых, все люди подвергаются воздействию естественного фоновое облучения. Кроме того, есть разные уровни облучения бытовым радоном, уровень которого зависит от конструкции дома и от района, где этот дом расположен. Трудность состоит в том, что в то же время все подвергаются воздействию со стороны и многих других факторов риска, включая естественные и произведенные человеком экологические риски, пищевой режим и наследственные факторы. Поскольку действием этих факторов обусловлен сравнительно высокий уровень заболевания раком, очень трудно определить степень рис-

ка заболевания именно вследствие воздействия малых доз излучения антропогенного характера — таких, как радиоактивные осадки после взрыва атомной бомбы или радиоактивное облучение на рабочем месте.

В данной дискуссии мы определяем риск заболевания раком (R) как ожидаемое число случаев заболевания раком при определенной дозе облучения (D). Отметим, что риск заболеваемости раком примерно на 50 % выше, чем риск заболевания раком со смертельным исходом. В различных гипотезах, обсуждаемых здесь, уровень риска не указывается; в них только рассматривают форму изгиба, показывающего зависимость риска заболевания от дозы² (см. уравнение в примечании). Кроме этого существуют другие факторы, которые учитываются при определении риска возникновения заболевания, такие как возраст и пол облученного человека. Риск заболевания также варьирует в зависимости от типа рака. Конкретно факторы риска возникновения лейкемии рассчитываются отдельно от рисков возникновения таких инфильтратов, как рак легких или рак груди.

Гипотеза ЛБПГ является широко принятым (но не повсеместно) способом экстраполяции рисков облучения при относительно высоких дозах на случаи с низкими дозами. Гипотеза утверждает, что каким бы малым ни было увеличение дозы радиоактивного облучения, степень риска заболевания раком увеличится на столько же. Таким образом, если человек подвергается определенному риску заболевания раком при получении экспозиционной дозы в 1 бэр, то при дозе в 2 бэр степень риска повысится в два раза, а при дозе в 0,5 бэра — уменьшится вдвое. Далее, если десять людей вместе получили дозу облучения в 1 бэр, их коллективный риск будет таким же, как если бы один человек получил экспозиционную дозу в 1 бэр.

Коллективная доза облучения выражается в человекобэрах, что является суммой всех индивидуальных доз данной группы населения. Исходя из оценки коллективной дозы и используя постоянный коэффициент риска, можно получить статистическую оценку числа дополнительных случаев заболевания раком при данной дозе облучения. В нормативно-правовой практике США обычно принимается, что риск заболевания раком со смертельным исходом среди некоторой совокупности людей составляет около одного дополнительного случая на каждую дозу в 2 500 человекобэр. ЛБП-гипотеза представлена на рис. 1.

Существуют другие гипотезы относительно вида зависимости чувствительности к мощности дозы излучения. Одна из них, наиболее часто встречающаяся, называется линейно-квадратичной гипотезой. Согласно ей, уравнение риска содержит как член, пропорциональный дозе облучения (линейный член), так и член, пропорциональный квадрату дозы (квадратичный член). На рис. 2 показана квадратичная зависимость риска от дозы (при нулевом линейном члене).

См.: ЛБПГ, с. 19
Примечания, с. 20

Есть люди, которые считают, что существует некоторое пороговое значение дозы, ниже которого не происходит увеличение риска заболевания раком. Они утверждают, что такие пороговые значения обнаруживаются у некоторых токсичных материалов и что у радиации они тоже есть. Существование таких пороговых значений можно вывести, например, из способности организма восстанавливаться после повреждений, вызванных малыми дозами радиации. На рис. 3 показана пороговая гипотеза с линейной характеристикой зависимости риска от дозы, начиная с некоторого порогового значения T бэр. Однако также указывается, что поскольку люди уже подвергнуты естественному облучению, а также другим природным и искусственным внешним воздействиям, угнетающим восстановительную систему организма, линейная беспороговая гипотеза может в любом случае применяться к дозам облучения, вызванным человеческой деятельностью, поскольку они представляют собой некоторое приращение к другим внешним воздействиям. Следовательно, для оценки антропогенных рисков заболевания ЛБП-гипотеза может оставаться правомерной и является разумной базой в деле охраны здоровья населения.

Имеются также данные, полученные благодаря недавно проведенным экспериментам, указывающие на то, что малые дозы могут приводить к высоким уровням риска на единицу дозы³. Это явление известно под названием надлинейная гипотеза и показано на рис. 4.

Существует, наконец, гипотеза "благоприятного действия", согласно которой малые дозы радиации могут оказывать благоприятное воздействие, например, стимулировать иммунную систему. Основные доказательства в пользу этого утверждения получены из экспериментов на мышах. Согласно Чарльзу Уолдрену, который обобщил данные по "благоприятному эффекту", в некоторых обстоятельствах высокая доза радиации порождает меньшее количество мутаций, если ей предшествовала доза в диапазоне от 1 до 20 бэр. Однако этот предполагаемый защитный эффект не появляется при более низких или более высоких дозах и наблюдается только в течение примерно одного дня, после чего исчезает. Такой "благоприятный эффект", даже если он и существует для людей, не имеет санитарного значения, особенно с учетом других данных по отдаленным рискам, сопряженным с дозами облучения в несколько бэр⁴.

Большая часть работ по изучению риска, обусловленного радиационным облучением, была посвящена раку. Существует ряд других потенциальных рисков (см. письмо на с. 3). Возможно, по крайней мере, для некоторых людей и при определенных обстоятельствах, что риски, не связанные с раком, могут оказаться более серьезными, чем риск заболевания раком.

Многие из тех, кто выдвигают аргументы в пользу пороговой гипотезы или гипотезы "благоприятного влияния", выступают за то, чтобы ослабить требования в отношении текущих норм по радиационной защите⁵. Это было бы крайне нецелесообразно по нескольким причинам. Во-первых, существует значительная неопределенность в отношении медицинских последствий воздействия малых доз излучения. В таких обстоятельствах хорошей практикой в здравоохранении является перестраховаться и ввести более строгие требования. Во-вторых, исторически происходило повышение уровня риска в отношении к заданому уровню радиации. Хотя такое и не может продолжаться бесконечно, этого основания достаточно, чтобы не ослаблять нормы и не отбрасывать ЛБП-гипотезу. В-третьих, есть данные, свидетельствующие о том, что реакция на облучение у разных людей разная. Стандарты должны быть направлены на то, чтобы защитить наиболее уязвимые группы населения. В-четвертых, даже если и есть пороговое значение, важно помнить, что нормативы касаются дополнительных

Коэффициент эффективности мощности дозы

Есть данные, в основном по экспериментам на животных, которые говорят о том, что малые дозы облучения, получаемые с низкой интенсивностью излучения, вызывают более низкий уровень риска, чем такие же дозы, но полученные интенсивно. Это предполагает снижение эффекта низкоинтенсивной дозы облучения, выражаемое коэффициентом, называемым Коэффициентом эффективности мощности дозы (КЭМД). Уточненный риск на единицу дозы для низкоинтенсивной дозы получается путем деления неуточненного риска на КЭМД. Обычно в нормативно-правовой практике принимают, что риск от низкоинтенсивной дозы ниже неуточненного риска в два раза. Таким образом, Управление по охране окружающей среды США применяет КЭМД, равный 2, к нескорректированному коэффициенту риска заболевания раком BEIR, равному 0,08 случаев рака со смертельным исходом на человекозиверт, и получает скорректированный риск, равный 0,04 случаев рака со смертельным исходом на человекозиверт. Эта величина является коэффициентом риска, используемого в текущих нормативных документах по радиационной защите в США (1 зиверт = 100 бэр).

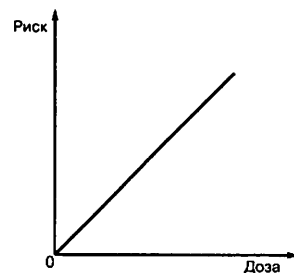


Рис. 1. Линейная беспороговая гипотеза.

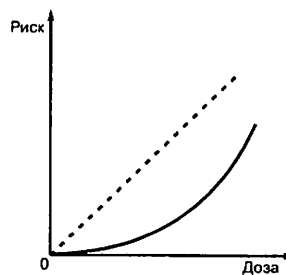


Рис. 2. Квадратичная зависимость.

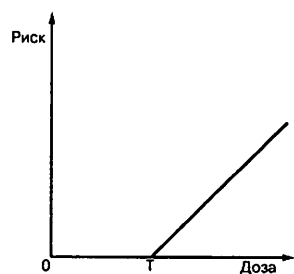


Рис. 3. Пороговая гипотеза.

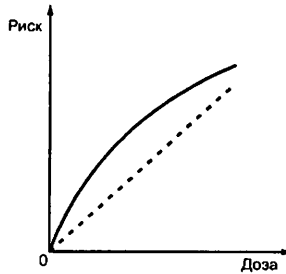


Рис. 4. Надлинейная гипотеза.

См.: ЛБПГ, с. 20



Вам предлагается решить несколько задач, используя при этом линейную беспороговую гипотезу.

Коллективные дозы:

Вспомним, что коллективная доза — это сумма индивидуальных доз излучения, полученных некоторой группой населения. Она измеряется в человекобэрах или человекозивертах (1бэр = 0,01 зиверт (Зв); человекозиверт = (размер группы населения) · (доза (Зв) на человека)).

1. Люди в городе с населением 100 000 получают дозу радиации в 1 бэр на каждого человека. Какова коллективная доза?
2. Люди в городе с напряженной жизнью, население которого составляет 1 миллион, получают дозу облучения в 1 бэр каждый. Какова коллективная доза?
3. а) коллективная доза, получаемая гражданами города с населением 10 000 человек, составляла 100 000 человекобэр. Какова была средняя доза на человека?
б) может ли оказаться так, что некоторые люди в городе получили дозу выше или ниже средней дозы?

Риск заболеть раком в результате облучения:

Вспомним, что человекозиверт является сигналом для читателя, говорящим о том, что речь идет более чем об одном человеке. Если бы группа населения в

100 человек получила дозу облучения 0,05 Зв, тогда коллективная доза была бы 5 человеко-зиверт.

4. В докладе BEIR дается значение риска при одноразовом облучении, равное 0,08 случаев заболевания раком со смертельным исходом.
 - а) какой член уравнения используется для описания значения 0,08?
 - б) сколько зивертов понадобилось бы для получения одного случая заболевания раком со смертельным исходом в некоторой группе населения?
 - в) если группа населения составляет 100 000 человек, а число случаев заболевания раком со смертельным исходом в результате воздействия техногенной радиации оценивается в 20, какова средняя доза на человека?
 - г) если группа населения в 100 000 человек подвергается облучению в 0,1 Зв на человека, какова оценка числа смертельных исходов при заболевании раком? (Годовая предельно допустимая доза не медицинского облучения для простых людей составляет 0,001 Зв).
5. Если коэффициент эффективности мощности дозы (BEIR, см. вставку с. 19) для низких мощностей доз принимается равным 2, а неуточненный риск заболевания раком равен 0,08 случаев заболевания раком со смертельным исходом/чел-Зв, определите значение уточненного риска.

Ветер в сравнении с плутонием
со с. 17

ки ветровой электроэнергии к 2010 г. — вполне обоснована, выбранный метод может не привести к такому же снижению стоимости, что и метод, предлагаемый IEER (подробнее см. Отчет IEER).



ЛБПГ
со с. 19

к получаемому объему радиации. Линейная беспороговая гипотеза все равно будет адекватна для оценки дополнительного риска заболевания раком — то есть риска, вызванного *приращением* доз радиации. В-пятых, существует много эффектов, не связанных с раком, а также эффектов совместного воздействия, которые еще не очень хорошо изучены, а некоторые из них не изучены совсем. Наконец, некоторые потенциально подверженные облучению группы населения включают в себя людей, наиболее уязвимых к поражающим последствиям облучения (см. письмо на с. 3). Строгие нормы, основанные на линейной беспороговой гипотезе, обеспечивают минимальный уровень защиты людей от нераковых рисков, а также наиболее уязвимых групп населения, до тех пор, пока эти эффекты не будут тщательно изучены.

Таким образом, есть веские основания продолжать использовать линейную беспороговую гипотезу в нормативно-правовой практике. Когда на вопросы типа тех, которые мы подняли, будут получены должные ответы, будет достаточно времени для обсуждения о пересмотре стандартов.



1. Низкоуровневое излучение альфа-частиц называется "излучением с линейной передачей большой энергии" (высокое ЛПЭ-излучение). Этот вид облучения оказывает более тяжелое воздействие при той же дозе излучения, чем гамма-лучи или бета-излучение (которые являются низким ЛПЭ-излу-

1. *Wind Power Versus Plutonium: An Examination of Wind Energy Potential and A Comparison of Offshore Wind Energy to Plutonium Use in Japan* (IEER January, 1999), можно познакомиться на <http://www.ieer.org/ieer/reports/wind/index.htm>. Если особенно не оговорено, все ссылки могут быть найдены в этом отчете.
2. По публикациям, связанных с плутонием, см. страницу IEER в Интернете <http://www.ieer.org>.
3. Экономические данные в других валютах были переведены в доллары США исходя из обменных курсов с учетом паритетной покупательной силы.

2. Различные гипотезы по риску заболевания раком могут быть математически представлены следующим образом:

ЛБПГ: $R = k \cdot D$, где R — риск заболевания раком, k — некоторый коэффициент пропорциональности, D — доза облучения в бэр.

Линейный риск с пороговой дозой T : $R = 0$ для $D < T$ и $R = k(D - T)$ для $D > T$.

Линейно-квадратичная модель (без порогового значения): $R = k_1 D + k_2 D^2$, где k_1 и k_2 являются линейными и квадратичными коэффициентами риска.

Надлиннейная гипотеза (без порогового значения): $R = k \cdot D^n$, где $0 < n < 1$.

Вид изгибов определяется этими общими уравнениями. Значения рисков при различных дозах зависят от значения параметров k , T и n (в соответствии с моделью). Более подробно о ЛБПГ вы можете узнать в *Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation, Health Effects of Exposure to Low-levels of Ionizing Radiation (BEIR V)*, National Research Council, Washington DC, 1990, Chapter 4.

3. Brenner D., "Did Radiobiology Play a Useful Role in the Recent BEIR VI Report?", Abstract in *Radiation Research*, Vol. 161, January, 1999, pp. 95—96.
4. Waldren C., "Adaptive Response, Genomic Instability, and By-stander Effects," доклад на заседании Комиссии BEIR VII, Национальная академия наук, Вашингтон, 3 сентября 1999.
5. Jaworowski A., "Radiation Risk and Ethics", *Physics Today*, Vol. 52, № 9, September 1999, pp. 24—29. Яворовский предложил увеличить разрешенные дозы излучения в 10 раз (с 100 миллибэр до 1 бэр в год) до того, как "потребуется вмешательство властей по радиационной защите" (с. 29).