

Энергетика и Безопасность

№ 13 2000

Издание IEEER

Трансмутация отходов: авантюра ядерной алхимии

Анни МАКХИДЖАНИ
и Хишам ЗЕРРИФФИ

“Исследования по вопросам отделения и трансмутации представляются всем нам довольно заманчивыми. Здесь требуются новые методики репроцессинга, новые разработки по топливу, дополнительные данные по ядерным вопросам, новые реакторы и установки по облучению топлива, новые идеи по переработке и захоронению отходов и специальные исследования по вопросам безопасности. Такая возможность бросает вызов всему мировому сообществу ученых и инженеров-ядерщиков.

Однако все понимают, что путь к земле обетованной лежит через пустыню со множеством гор, и что отнюдь нет уверенности, что горизонт будет таким безоблачным, каким мы и ожидаем увидеть его”.

— Пол Говерц, SCK-CEN (Belgian Nuclear Research Center). “Приветственная речь на 5-й международной информационной встрече по актинидам и продуктам расщепления и трансмутации”, Бельгия, 25—27 ноября 1998 г.

“Предполагается, что программа [по трансмутации] призвана оживить положение дел в области ядерных исследований и разработок в целом, а также будет способствовать привлечению способных молодых людей, ориентированных на то, чтобы перевести “ядерный вариант” в XXI век в хорошем состоянии”.

— “Программа ОМЕГА: Отделение и трансмутация. Исследовательская программа Японии”, Организация за экономическое сотрудничество и развитие/ Агентство по атомной энергии, *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation: Status and Assessment Report*, Paris: OECD/NEA 1999, page 253.

См.: Трансмутация, с. 2
Примечания, с. 8

В БЮЛЛЕТЕНЕ

Радиоактивные отходы
атомной энергетики..... 9



US DEPARTMENT OF ENERGY

Передвижная экспедиция Комиссии по атомной энергии США по программе “Атом в мирных целях”. В рамках этой программы, начатой администрацией Эйзенхауэра, Соединенные Штаты поставляли высокообогащенный уран для зарубежных исследовательских реакторов в 41 страну мира.

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Ядерная энергия: средство пропаганды ХОЛОДНОЙ ВОЙНЫ

Аржун МАКХИДЖАНИ и Мишель БОЙД

По книге “Обманы атомной энергии” Аржуна Макхиджани и Скотта Салески!

Можно ожидать, что наши дети будут пользоваться в своих домах электричеством, которое будет слишком дешевым, чтобы измерять его стоимость...

— Льюис Страус, Председатель Комиссии по атомной энергии, 1954

Тепла будет вырабатываться так много, что его будут использовать даже для растапливания выпадающего снега... Все тепло, свет и энергия будут поступать в населенные пункты от головной атомной электростанции; эти коммунальные услуги будут настолько дешевы, что за них вряд ли будут взимать плату.

— Роберт М. Хатчинс, ректор Чикагского университета (где в 1946 г. была получена первая ядерная цепная реакция)

См.: Атом и пропаганда, с. 12
Примечания, с. 15

Одно из самых больших препятствий, стоящих на пути атомной индустрии, это проблема утилизации ядерных отходов, накапливающихся в виде отработанного топлива, извлекаемого из коммерческих реакторов, или в виде высокоактивных отходов, получаемых в результате выделения плутония из отработанного топлива. Большинство стран считают наиболее предпочтительным вариантом изоляции ядерных отходов от людей и окружающей среды захоронение их в глубоких подземных хранилищах в геологических формациях.

Однако, поскольку отработанное топливо и высокоактивные отходы содержат ряд радионуклидов с очень долгим периодом полураспада (от нескольких тысяч до миллионов лет), все признают, что невозможно гарантировать изоляцию отходов на столь долгий срок. Помимо вероятности утечки некоторых долгоживущих радионуклидов, нельзя исключить и возможность несанкционированного — случайного или преднамеренного — доступа человека. В табл. 1 на стр. 4 приведены основные вызывающие беспокойство долгоживущие радионуклиды.

Крайне сложные вопросы, связанные с обеспечением достаточной степени изоляции отходов, при которой не происходило бы серьезного загрязнения ресурсов, особенно водных ресурсов, сделали выбор участков под хранилища научной и политической проблемой. Они также стали главным предметом обеспокоенности общественности и поводом ее сопротивления против долговременных хранилищ. Это сопротивление стало усиливаться еще и в результате того, что при выборе площадки для исследования часто руководствуются политической целесообразностью. Поскольку в разных странах программы по выбору площадки под хранилище для отработанного топлива и высокоактивных отходов находятся на разных этапах развития, они все еще сталкиваются с огромными научными трудностями и сильной оппозицией со стороны общественности. В США, где объявлен срок открытия хранилища и это может произойти уже в 2010 г., все еще нет окончательных экологических норм по охране здоровья будущих поколений и защите окружающей среды от предлагаемого захоронения в Якка-Маунтин¹.

Трудности и вопросы, связанные с выбором участка для захоронения, особенно когда требуется обеспечить изоляцию отходов на крайне долгий срок, побудили некоторых обратиться к технологии трансмутации долгоживущих радионуклидов в короткоживущие как к возможному решению проблемы обращения с радиоактивными отходами. Трансмутация осуществляется путем инициализации различных видов ядерных реакций в ядрах долгоживущих радионуклидов. Предполагается, что программа по трансмутации переведет проблему долгосрочной изоляции отходов в разряд значительно более простых задач — хранение отходов в течение нескольких десятилетий или сотен лет.

Эта теоретическая перспектива дала основания сторонникам трансмутации заявлять, что она существенно упростит проблемы, связанные с долговременным хранением отходов. Порой даже звучит, что она может устранить потребность в долговременном захоронении, однако по мере того, как продвигаются исследования по практическим аспектам трансмутации, подобных заявлений стано-

См.: Трансмутация, с. 3

ЭНЕРГЕТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ

"Энергетика и безопасность" — бюллетень, 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 привлечение научного анализа в деятельность общественности для демократизации и создания более здоровой окружающей среды.

Сотрудники IEER:

Аржун Махиджани — президент
Лиза Ледудж — координатор по внешним связям
Мишель Бойд — координатор по международным связям
Энни Махиджани — научный сотрудник
Хишам Зирриффи — старший научный сотрудник
Луис Чалмерс — заведующий библиотекой
Дайана Кон — 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, Ford Foundation

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, 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 Ледудж

Русское издание:
Ответственный: Елена Коновалова
Научный консультант: Олег Бухарин

Весь тираж "Энергетики и безопасности" распространяется бесплатно

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

Выпуск 13 английского издания вышел в свет в мае 2000 г.

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

вится все меньше. Вместе с тем возрастает озабоченность относительно таких вопросов, как безопасность для окружающей среды, обращение с отходами, затраты, а также принципов нераспространения. В настоящей статье кратко излагаются результаты наших исследований и наши рекомендации².

Принципы трансмутации

Трансмутация — это процесс преобразования одного радионуклидов в другой (или другие). Трансмутация включает в себя ядерные реакции, способные идти в ядерных реакторах некоторых типов. Предлагались различные схемы реакторов, но общим у них было то, что для того, чтобы вызвать ядерную реакцию, необходимую для превращения долгоживущего радионуклида в короткоживущий радионуклид или устойчивый элемент, к ядру долгоживущего радионуклида прилагается большое количество энергии.

На рисунке (см. ниже) показаны основные компоненты идеальной трансмутационной системы. Чтобы отсортировать радионуклиды, подлежащие трансмутации, и отделить определенные долгоживущие радионуклиды от других, требуется предприятие по репрессингу. (В контексте трансмутации репроцессинг также называется “выделением” или “отделением”). Это позволит провести выборочное преобразование долгоживущих радионуклидов в короткоживущие при облучении их в реакторе. Без репроцессинга ядерные реакции противоположного типа могли бы вызвать обратного вида преобразования — короткоживущих радионуклидов в долгоживущие. На обрабатывающей установке из долгоживущих радионуклидов изготавливаются топливо и/или мишени, которые затем на-

правляются в трансмутационную установку, которая может состоять из реактора или комбинации из ускорителя, тяжелометаллической мишени и подкритического реактора. Реакции, вызванные нейтронным облучением в реакторе, превращают (трансмутуют) долгоживущие продукты деления в короткоживущие; кроме того, они расщепляют актиниды, такие как плутоний, образуя новые продукты деления. Большинство этих продуктов деления — короткоживущие, однако при этом также образуются и новые долгоживущие продукты (см. с. 5). Актиниды также могут поглощать нейтроны, образуя актиниды с более высокими массами (см. с. 5). Кроме того, не все актиниды могут быть трансмутированы до того, как реакции в реакторе станут затухать. Таким образом, чтобы трансмутировать большую часть долгоживущих радионуклидов, потребуется несколько прогонов через этапы репроцессинга, изготовления топлива и реакторную установку.

Однако даже сложные схемы трансмутации практически не могут преобразовать все долгоживущие радионуклиды в короткоживущие. Трансмутация выделенного урана, который составляет около 94 мас.% отработанного топлива из легководяного реактора и период полураспада которого очень большой (кроме того, он обычно загрязнен некоторыми продуктами деления), только ухудшит положение, поскольку основной технологический процесс трансмутации почти всех видов урана включает в себя преобразование урана-238 в плутоний-239. Также надо будет подвергнуть утилизации другие долгоживущие продукты деления. Следовательно, долговременное хранилище, а также все другие предприятия по хранению и обращению с радиоактивными отходами будут продолжать оставаться неотъемлемой частью схем трансмутации.

См.: Трансмутация, с. 5



ТАБЛИЦА 1: ОСНОВНЫЕ ДОЛГОЖИВУЩИЕ РАДИОНУКЛИДЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ БЕСПОКОЙСТВО

Радионуклиды (период полураспада, лет; округлен до двух значимых знаков)	Тип	Воздействие	Возможность трансмутации	Проблемы при трансмутации
Стронций-90 (29)	Среднеживущий продукт деления	Содействует начальному разогреву отходов. Определяет вместимость хранилища. Определяет дозу излучения в случае сценария несанкционированного проникновения. Ведет себя как кальций в организме	Нет	Не может быть трансмутирован вследствие малого нейтронного сечения. Отвечает за большую часть тепла, выделяемого отработанным топливом и высокоактивными отходами, и поэтому ограничивает возможность увеличения вместимости хранилища в результате трансмутации
Цезий-137 (30)	То же	То же, кроме того, что ведет себя как калий в организме. Также радиационный барьер к распространению	Нет	То же самое. Кроме этого, выделение из делящихся материалов делает невозможной радиационную самозащитенность для предотвращения нарушения режима нераспространения
Олово-126 (100 000)	Долгоживущий продукт деления	Утечка в грунтовые воды	Трудно	Трудно отделить от отработанного топлива/ВАО. Много времени на трансмутацию. Более низкие изотопы ведут к новой генерации радионуклида
Селен-79 (60 000)	То же	То же	Нет	То же
Цезий-135 (2,3 млн)	То же	То же	Нет	Образование Cs-135 из Cs-133. Разделение изотопов затруднено из-за наличия Cs-137
Цирконий-93 (1,5 млн)	Продукт активации	Утечка в грунтовые воды	Нет	Наличие стабильных изотопов Zr даст больше Zr-93. Потребуется дорогой процесс отделения изотопов
Углерод-14 (5 700)	То же	Утечка в грунтовые воды и/или выброс в атмосферу в виде CO ₂ ; включение в живую материю	Нет	Малое нейтронное сечение для захвата. Часто выбрасывается в виде газа в результате операций по репроцессингу
Хлор-36 (300 000)	То же	Подземные воды	Нет	Присутствие природного Cl-35 приведет к образованию Cl-36
Технеций-99 (210 000)	Долгоживущий продукт деления	Утечка в грунтовые воды. Воздействует на щитовидную железу	Да. Требуется медленные нейтроны	Потребуется несколько циклов трансмутации
Йод-129 (16 млн)	Долгоживущий продукт деления	То же	Да. Требуется медленные нейтроны	То же. Кроме этого, его трудно уловить при отделении. С ним трудно работать при изготовлении мишеней. Может вызвать проблемы коррозии
Уран (в основном U-238, 4,5 млрд)	Исходный материал актиноидов	Составляет основную массу отработанного топлива (~94 мас.%). Имеет более высокую радиоактивность, чем трансураниевые отходы, намеченные к захоронению в геологических формациях	Нет. Вероятно будет отделяться и утилизироваться как НАО или использоваться как обедненный уран	Трансмутация U-238 приведет к наработке дополнительного количества Pu-239, что срывает цель трансмутации как стратегии обращения с отходами. По существу, создаст экономику реакторов-размножителей
Америций-241 (430)	Актинид	Гамма-излучатель. Проникает в человеческий организм. Утечка в грунтовые воды (исходный элемент для U-233). Радиотоксичность	Предпочтительно в реакторах на быстрых нейтронах	Потребуется многократных циклов отделения и облучения. Приведет к созданию коряя, что еще более затруднит последующие циклы
Нептуний-237 (2,1 млн)	То же	Утечка в грунтовые воды	Предпочтительно в реакторах на быстрых нейтронах	Образование более радиоактивного и более короткоживущего Pu-238
Кюрий-244 (18)	То же	Высоко радиоактивный источник альфа- и гамма-излучения. Частично отвечает за нагрев отработанного топлива	Трудно. Требуется реактора на быстрых нейтронах	Трудно отделить от других актиноидов в ВАО вследствие проблем, связанных с химическими процессами и обработкой. Потребуется многократного прохождения через цикл вместе с другими актиноидами. Может потребоваться хранение в течение десятилетий или даже столетия. При облучении более низких актиноидов (Pu и Am) образуется дополнительно Cm-244 и другие изотопы Cm
Плутоний (в основном Pu-239, 24 000)	То же	Делящийся Pu-239. Радиотоксичность. Проникает в кости	Для делящихся изотопов требуется реактор на быстрых нейтронах	При захвате нейтрона образуются более высокие изотопы и более высокие актиноиды (например, Am и Cm)

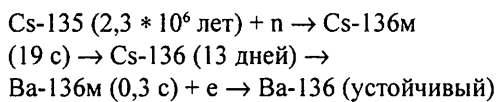
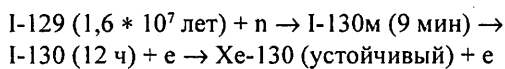
Таблица, с изменениями и дополнениями, взята из Organisation for Economic Co-Operation and Development/Nuclear Energy Agency, *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation: Proceedings of the Fifth International Information Exchange Meeting*. Mol, Belgium, 25—27 November 1998. Paris: OECD/NEA 1999, p. 470, а также Organisation for Economic Co-Operation and Development/Nuclear Energy Agency, *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation: Status and Assessment Report*, Paris: OECD/NEA 1999.

Достоинства схем трансмутации и трудности, связанные с ними, становятся яснее, если понимать некоторые основы физики трансмутации.

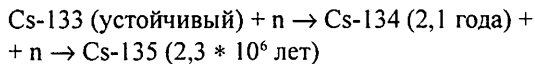
Физические основы трансмутации

В отношении обращения с радиоактивными отходами важно рассмотреть два типа реакции трансмутации: захват нейтрона и расщепление³. Цель заключается в преобразовании долгоживущих радионуклидов в короткоживущие.

Двумя такими реакциями являются поглощение нейтрона иодом-129 и цезием-135 (с периодами полураспада, указанными в скобках)⁴:

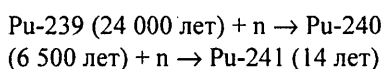


Однако захват нейтрона может также привести к созданию долгоживущего радионуклида, что противоречит цели трансмутации, как было бы в случае Cs-133.

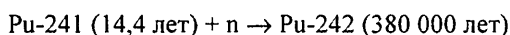


Цезий в отработанном топливе представляет собой смесь изотопов Cs-133 и Cs-135, разделение которых практически невозможно частично из-за того, что присутствие очень радиоактивного изотопа Cs-137 делает обращение с цезием и обработку его крайне трудным, дорогим и опасным делом. Таким образом, легко понять, что наработка большего количества Cs-135 в результате захвата нейтрона Cs-133 сведет на нет все преимущества от трансмутации Cs-135.

Следующий пример (в скобках приведены периоды полураспада, округленные до двух значимых цифр) показывает, как будет проходить трансмутация плутония-239 в результате двух последовательных реакций.



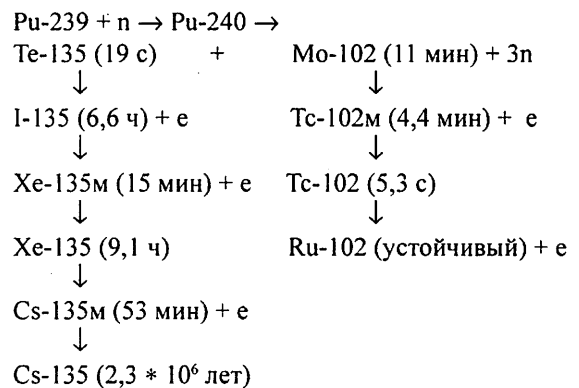
Однако последующий захват нейтрона привел бы к образованию Pu-242, который имеет длительный период полураспада:



Приведенные примеры показывают, что ядерные реакции трансмутации потребуют более тщательного контроля, с тем чтобы полное превращение долгоживущих радионуклидов в короткоживущие шло без образования новых долгоживущих радионуклидов.

Заметим также, что захват нейтрона плутонием-239 и -240 не решил бы проблемы устранения долгоживущих радионуклидов, даже если бы весь плутоний был преобразован в короткоживущий плутоний-241. Это объясняется тем, что с плутонием-241 связана целая цепочка полураспадов. Он распадается на америций-241, период полураспада которого равен 430 лет. Америций-241 в свою очередь распадается на нептуний-237 с периодом полураспада свыше 2 млн лет. Следовательно, чтобы добиться значительного снижения долгоживущих актинидов, таких как плутоний, обычно требуется реакция деления ядра.

В результате трансмутации посредством реакций деления образуются преимущественно короткоживущие продукты деления, которые распадаются на устойчивые элементы, но некоторые из этих короткоживущих продуктов деления могут также распадаться на долгоживущие. В примере, приведенном ниже, показано образование двух короткоживущих продуктов деления: теллур и молибден. Оба они претерпевают серию бета-распадов. Цепочка распадов молибдена-102 состоит из короткоживущих радионуклидов до тех пор, пока не образуется устойчивый (нерадиоактивный) рутений-102. Теллур распадается до долгоживущего цезия-135.



Предлагаемые схемы трансмутации

Предлагались различные схемы трансмутации. Предлагались три типа реакторов (легководяные, на быстрых нейтронах и подкритические) и два типа репроцессинга. В табл. 2 (с. 6) указаны тип или типы репроцессинга, связанного с каждым типом реактора, а также радионуклиды, которые могут стать кандидатами на трансмутацию. Большинство схем трансмутации предполагает использование комбинации реакторов и

связанных с ними технологий репроцессинга. Например, в одной схеме топливом легководящих реакторов должно быть смешанное окисное (МОХ) топливо, т.е. топливо, изготовленное из плутония, извлеченного из обогащенного низкообогащенного уранового топлива. Обработанное МОХ-топливо затем подвергнется репроцессингу, и из него будут извлечены трансурановые актиниды, которые послужат топливом для реактора на быстрых нейтронах (обычно называемого реактором-размножителем). В свою очередь, топливо реактора на быстрых нейтронах будет подвергнуто репроцессингу, и оставшаяся часть актинидов будет служить топливом подкритического реактора на базе ускорителя.

Ни одна из этих схем не может (исходя как из основ физики, так и из-за практических соображений) трансмутировать уран, пезий-135, утерот-14 и некоторые другие радионуклиды. В табл. 1 на стр. 4 приведены различные радионуклиды, которые вызывают озабоченность с точки зрения долговременного обращения с ними, а также их статуса относительно различных схем трансмутации.

ОСТАТОЧНЫЕ ОТХОДЫ

Трансмутация не устраняет потребность в долго-временном хранении для высокоактивных отходов и обработанного топлива. Приведенные выше теоретические схемы нельзя реализовать так, чтобы при этом были устранены почти все долгоживущие радионуклиды. Во-первых, ни одна из схем трансмутации не может охватить все вызывающие беспокойство радионуклиды, поскольку многие из них фактически нельзя трансмутировать с практической целью (см. таблицу 2, примеры трансмутации).

В-третьих, процесс деления актинидов эффективен не на 100%. Например, по самым лучшим оценкам при любой из предположенных схем, при трансмутации 906 т трансурановых элементов (которые, как ожидается, будут нарабатываться ядерными реакторами США в течение их лицензионного срока службы) останутся 2,4 т остатка. По составу остаточные трансурановые отходы будут сдвинуты в сторону более высоких изотопов актинидов и, таким образом, они будут более радиоактивны. Это создаст большие радиологические риски и затруднит их утилизацию. Наконец, поскольку пезий-137 будет помешаться в долговременное хранилище вместе с пезием-135, то, учитывая большую количество тепла, которое он генерирует, следует ожидать, что потребности в просторстве для его захоронения могут быть весьма значительны. Решение проблемы местимости могильника будет облегчено только после хранения долгоживущих отходов в течение сотен лет с неизбежными при этом неопределенностями, рисками и затратами.

Кроме того, что проблема с ураном (который отвечает за 94 мас.% радиоактивного материала в отработанном топливе) и со значительным количеством долгоживущих трансурановых радионуклидов и продуктов деления не решается, трансмутация дополнително создаст значительные объемы отходов, особенно при использовании водного репроцессинга (см. данные по наработке отходов при использовании од-

Реакторы и источники нейтронов	Репроцессинг и радионуклиды	Комментарии
<p>Легководящие реакторы (ЛВР): (Наиболее распространенный тип коммерческих ядерных реакторов). Критический реактор, в качестве топлива используется либо низкообогащенный уран, либо смешанное ураноплутониевое топливо</p>	<p>Репроцессинг: водный 1-129 Радионуклиды: в основном плутоний, Тс-99, I-129</p>	<ul style="list-style-type: none"> Создает больше радиоактивных отходов высокой активности, чем в ЛВР В результате репроцессинга нарабатываются большие объемы жидких радиоактивных отходов Проблема безопасности реакторов Навозможно деление большинства актинидов Большое накопление трансурановых материалов, что создает проблемы обращения с радиоактивными отходами
<p>Реакторы на быстрых нейтронах (БР): Репроцессинг: в основном сухой Радионуклиды: плутоний, и возможно, I-129, но только в мизинках с замедлителем</p>	<p>Репроцессинг: в основном сухой Радионуклиды: плутоний, и возможно, I-129, но только в мизинках с замедлителем</p>	<ul style="list-style-type: none"> Постоянные проблемы нанесения урона развитию реакторов на быстрых нейтронах Продукты деления трансмутируются неэффективно Большое накопление трансурановых материалов, хотя и в меньшей степени, чем в ЛВР Проблема безопасности реакторов
<p>Подкритические реакторы: Система на базе ускорителя с мизинью обеспечивает подкритический реактор быстрыми нейтронами</p>	<p>Репроцессинг: репроцессинг может быть в мизинках с замедлителем вне активной зоны реактора Радионуклиды: плутоний и второстепенные актиниды. Возможно Тс-99 и I-129, но только в мизинках с замедлителем вне активной зоны реактора</p>	<ul style="list-style-type: none"> Подкритические реакторы накапливаются только в стадии разработки Стоимость пропорциональна высокой работности Безопасность реактора остается открытым вопросом Продукты деления трансмутируются неэффективно

ТАБЛИЦА 2. ПРИМЕРЫ ТРАНСМУТАЦИИ

См.: Трансмутация, с. 7

нократных НОУ и МОХ топливных циклов, стр. 9—11). Она также переведет некоторые материалы из класса, подлежащего захоронению в геологических формациях, в класс, подлежащий захоронению в хранилищах для низкоактивных отходов, особенно если, как было предложено, с ураном будут обращаться как с “низкоактивными” отходами. Это может привести еще к большим общим радиологическим рискам для людей, по сравнению с захоронением всего отработанного топлива в долговременном хранилище, соответствующим образом выбранном и спроектированном. Даже в контексте постепенного свертывания атомной энергетики для внедрения схем трансмутации потребовались бы десятилетия, а для их завершения — возможно, столетия⁶. Это может потребовать законодательно регламентированного контроля за отходами в течение периодов времени, более длительных, чем это целесообразно или желаемо.

Последствия трансмутации

Внедрение любой из схем трансмутации, описанных выше, чревато определенными последствиями для режима ядерного нераспространения, окружающей среды, здоровья человека, безопасности, затрат и будущего атомной энергетики.

Режим нераспространения. Все схемы трансмутации требуют репроцессинга трансурановых радионуклидов. Хотя эти схемы могут и не нарабатывать материалы, представляющие интерес для разработчиков оружия в ядерных державах, они могут быть использованы для производства ядерного оружия и представлять серьезную угрозу режиму нераспространения, поскольку

ку негосударственные группировки или неядерные державы могут попытаться заполучить и использовать их. Даже методы репроцессинга, считающиеся безопасными в отношении распространения, такие как пиропереработка, могут быть легко модифицированы, что позволит извлекать достаточно чистый плутоний, пригодный для изготовления оружия. Эти типы установок могут фактически увеличить риск распространения из-за их компактных размеров и потенциальных проблем, связанных с выработкой соответствующих гарантий. Более того, реклама трансмутации как инструмента обращения с радиоактивными отходами может привести к широкой передаче этой технологии. Выделение изотопов, таких как нептуний-237 и америций-241, также способно увеличить риск распространения, поскольку оба этих радионуклида могут использоваться для изготовления оружия. Создание и внедрение схем, при которых существенно возрастает выделение материалов, пригодных для изготовления оружия, значительно увеличит риск распространения.

Окружающая среда и здоровье человека. Репроцессинг, необходимый во всех схемах трансмутации, является одним из самых опасных и наносящих наибольший ущерб компонентов топливного цикла. Он порождает большие объемы отходов и выбросы радиоактивности в воздух и воду. Его воздействие на здоровье рабочих, а также людей, проживающих вблизи предприятия и даже в удаленных местностях, хорошо подтверждено документально. Так, именно озабоченность экологическими и медицинскими последствиями лежит в основе претензий Ирландии, Норвегии, Исландии и других стран к Великобритании и Франции, избавляющихся от своих так называемых “низкоактивных”

См.: Трансмутация, с. 8

ГЛОССАРИЙ

Актиниды: Группа элементов, расположенных сверху Периодической таблицы, в которую среди других элементов входят уран, плутоний, нептуний, америций и другие. Трансурановый актинид относится к тем актинидам, которые в Периодической таблице расположены выше урана, главным образом плутоний. К второстепенным актинидам относятся все актиниды, кроме урана и плутония (прежде всего нептуний, америций и кюрий). Элементы, относящиеся к группе актинидов в общем, имеют сходные химические свойства.

Водное отделение: Использование водной среды, например, раствора азотной кислоты в воде, для обеспечения отделения радионуклидов.

Бета-распад: Испускание электронов или позитронов (частиц, таких же, как электроны, но заряженных положительно) ядром элемента в процессе радиоактивного распада.

Цепочка распада: Серия радиоактивных распадов, оканчивающаяся образованием устойчивого ядра.

Сухое отделение: Использование электрохимических методов для выделения радионуклидов.

Продукты деления: Любой атом, образованный в результате деления тяжелого элемента. Продукты деления радиоактивны (как правило посредством бета-распада).

Нейтрон: Элементарная частица, немного тяжелее протона, электрически нейтральная. Ядро атома состоит из протонов и нейтронов (элемент

определяется числом протонов, тогда как изотоп определяется общим числом нуклонов). Захват нейтрона означает поглощение атомом нейтрона с образованием нового изотопа.

Пиропереработка: Вид сухого электрохимического разделения, предложенного для использования при работе с металлическим топливом трансмутационного реактора (например, для трансмутации на базе ускорителя или для реакторов на быстрых нейтронах).

Репроцессинг: Общий термин, означающий выделение элементов из облученного ядерного топлива.

Подкритический реактор: Ядерный реактор, сконструированный так, что он работает с внешним источником нейтронов для дополнения внутренне генерируемых нейтронов с целью поддержания цепной реакции.

Надкритический: Когда каждое из делений в реакторе приводит к инициализации более чем одного последующего деления, что ведет к цепной реакции, приводящей к аварийному разгону реактора, за исключением случаев, когда процесс тщательно контролируется и мощность реактора увеличивается под контролем и делается слегка надкритичной на короткие промежутки времени.

Мишень: В контексте схем трансмутации на базе протонного ускорителя, материал, который при бомбардировке его протонами из ускорителя испускает нейтрон в процессе так называемого ядерного расщепления. Этот термин также относится к отдельным радионуклидам, из которых изготовлены мишени для облучения.

радиоактивных отходов, сбрасывая их в море. Поскольку при изготовлении топлива жидкие отходы не нарабатываются, этот этап воздействует, в основном, на рабочих, причем эффект этого воздействия — того же порядка, что и от этапа репроцессинга. Причиной серьезной обеспокоенности является повышенный радиологический риск при обращении с неоднократно облученным топливом. Наконец, повышенный объем транспортировки высокоактивных отходов, неизбежный при некоторых схемах трансмутации, может увеличить вероятность дорожно-транспортных происшествий с соответствующими последствиями.

Безопасность реакторов. Трансмутация потребует разработки и внедрения новых реакторных технологий и/или расширенного использования существующих реакторов. Некоторые из этих новых реакторов были описаны как реакторы с “внутренне присущей безопасностью”. Однако увеличению некоторых элементов безопасности по сравнению с существующими реакторами противостоят снижение других ее элементов и появление новых проблем, присущих этой новой конструкции реактора. Например, ряд эффектов обратной связи, помогающих в существующих реакторах предотвратить реакцию аварийного разгона, отсутствуют в некоторых трансмутационных реакторах. Для систем на базе ускорителя возможность отключения источников нейтронов и тот факт, что реактор обычно находится в подкритичном состоянии, представляют определенное преимущество. Но, с другой стороны, эти системы слишком сильно полагаются на возможность отключения источников нейтронов в случае аварии. Кроме того, может потребоваться обеспечение работы внешнего источника нейтронов не на полную мощность, когда в реакторе находится свежее топливо, иначе реактор может стать надкритичным.

Затраты. Затраты на трансмутацию, особенно для усовершенствованных схем, которые потребуются для значительного сокращения объемов актинидов, непомерно высоки. И хотя для компенсации этих затрат будет вырабатываться электроэнергия, маловероятно, что доходов от этого будет достаточно. Трансмутация скорее всего потребует десятки миллиардов долларов на разработку и дополнительные большие субсидии даже во время эксплуатации, когда, как ожидается, продажа электроэнергии будет приносить некоторые доходы.

Продолжение развития атомной энергетики. Трансмутация рассматривается не только в контексте обращения с отходами, нарабатываемыми действующими ядерными реакторами (т.е. как часть плана постепенного свертывания ядерной энергетики). Большинство схем трансмутации, особенно в Европе и Японии, предполагает бесконечно долгое существование ядерной энергетики; при этом трансмутация рассматри-

вается как часть нового ядерного топливного цикла. Основываясь на предположении, что некоторые текущие проблемы атомной энергетики будут решены, часть ее защитников отводит трансмутации существенную роль в деле обеспечения развития атомной энергетики.

Заключения и рекомендации

Наш основной вывод заключается в том, что схемы трансмутации не решают проблем долгосрочного обращения с радиоактивными отходами. Почти вся масса отходов, предполагаемых для трансмутации, состоит из урана, который, согласно текущим официальным предложениям, будет рассматриваться как низкоактивные отходы, и его утилизация будет осуществляться таким образом, что это создаст значительно больший риск, чем утилизация в тщательно выбранных и специально сконструированных долговременных хранилищах. Кроме того, после трансмутации останется значительное количество трансурановых материалов, а также долгоживущих продуктов деления. Будут наработаны большие объемы новых радиоактивных отходов, и все это вызовет новые риски распространения и высокие затраты. Несмотря на столь серьезные ограничения, некоторые продолжают рассматривать трансмутацию как “заманчивую” и необходимую для оживления “ядерного варианта” область исследований. Оценки, способствовавшие восприятию трансмутации как технологии обращения с радиоактивными отходами, страдают серьезными недостатками в своей аналитической части и были, в основном, сделаны теми, кто хотел бы продолжения развития атомной энергетики.

В свете этих выводов, основная рекомендация IEER заключается в следующем, поскольку нет хорошо продуманной технической базы для продолжения работ в этом направлении, надо отказаться от трансмутации как от технологии обращения с радиоактивными отходами.



1. Более подробную информацию по вопросам, связанным с долгосрочным обращением с радиоактивными отходами, см. ЭБ № 10, 1999.
2. Вскоре после публикации этого номера выйдет в свет подробный отчет IEER, в котором будут даны оценки технологий трансмутации.
3. Возможна также трансмутация с использованием фотоядерных реакций, когда трансмутация вызывается энергетическими фотонами. Схемы фотоядерной трансмутации ставят, по существу, те же самые основные вопросы, что и схемы, обсуждаемые в данной статье, при этом они еще и менее разработаны, чем последние.
4. n — нейтрон, e — бета-частица, m — метастабильный (возбужденное состояние ядра, которое не распадается сразу до основного состояния).
5. В этом случае стронций-90 скорее всего также будет захоронен в хранилище, поскольку его полураспад примерно такой же, как и у цезия-137.

См.: Трансмутация, с. 16

Радиоактивные отходы атомной энергетики

Иногда атомную энергетику представляют как источник энергии, который создает лишь небольшой объем загрязнения. Однако, принимая во внимание все стадии производства атомной энергии — от добычи урана до обработки и хранения отработанного топлива, включая все промежуточные этапы, — атомная энергия порождает большое количество и разнообразие отходов и видов загрязнения окружающей среды. Поскольку правительство и промышленность не могут как следует справиться с обращением, содержанием, изоляцией и регулированием токсичных и радиоактивных веществ, нарабатываемых на протяжении всего ядерного топливного цикла, это чаще всего ведет к тяжелым последствиям, как в отношении здоровья человека, так и окружающей среды¹.

Добыча урана, его переработка и обогащение постоянно наносят серьезный вред здоровью людей и окружающей среде. Хвосты переработки во многих странах мира продолжают давать утечку радиации в почву и загрязнять грунтовые воды. В результате технологических операций по коммерческому репроцессингу большие объемы радиоактивных отходов продолжают сбрасываться в водные бассейны, из которых добывают продукты питания, как в случае сброса отходов в Ирландское море и пролив Ла-Манш, соответственно, британскими радиохимическими предприятиями в Селлафилде и французскими радиохимическими предприятиями в Ла Геге.

В таблице на развороте на двух следующих страницах приведены оценки объемов радиоактивных отходов, нарабатываемых атомной энергетикой². Кроме радиоактивности, многие из этих отходов также содержат токсические нерадиоактивные материалы. Например, хвосты переработки содержат токсические элементы типа мышьяка и молибдена. В таблице приведены объемы отходов, нарабатываемых в результате однократного топливного цикла на низкообогащенном уране и однократного смешанно-оксидного топливного цикла. Ниже даны определения различных типов радиоактивных отходов.

В отношении данных по наработке отходов и связанных с ней предпрятий существуют большие неопределенности и расхождения, в зависимости от таких факторов, как качество урановой руды, типы реакторов и установок по переработке, выгорание топлива, действующая нормативная база и эффективность принуждения к исполнению. Оценки, используемые в таблице, взяты из Brian Chow and Gregory Jones (RAND 1999). Они дают правдоподобный сквозной анализ по всем этапам наработки радиоактивных отходов по двум типам ядерных циклов, используемых в легководяных реакторах.

Однократный топливный цикл на низкообогащенном уране (НОУ-ОК) является наиболее широко применяемым подходом. Все коммерческие ядерные

См.: Радиоактивные отходы, с. 16
Примечания, с. 16

В НИЖЕПРИВЕДЕННОЙ ТАБЛИЦЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ РАЗБИТЫ НА ПЯТЬ КАТЕГОРИЙ:

Отработанное топливо: Выгруженное облученное топливо. Отработанное топливо и ВАО содержат больше радиоактивности, чем все остальные отходы в ядерном топливном цикле.

ВАО (высокоактивные отходы): Отходы, нарабатываемые при репроцессинге отработанного топлива. ВАО и отработанное топливо содержат больше радиоактивности, чем все остальные отходы в ядерном топливном цикле.

САО (среднеактивные отходы): Отходы, загрязненные альфа-излучающими трансурановыми радионуклидами с периодом полураспада более чем 20 лет и с суммарной концентрацией таких радионуклидов свыше 0,1 кюри на тонну отходов на момент анализа. (То же самое, что и трансурановые отходы по определению Министерства энергетики США, но термин САО чаще используется в международной практике.)

Хвосты: Остатки руды от переработки после извлечения из нее урана.

НАО (низкоактивные отходы): Не попадающие под вышеприведенные определения.

* Эти категории определяются существующей нормативной базой в США и некоторых других странах. Хотя мы и используем их здесь для простоты передачи оценок, сделанных в исследовании RAND, классификация отходов США дефектна в принципе, поскольку определение категории отходов основано на происхождении отходов, а не на физических или химических свойствах, которые определяют степень опасности отходов и, следовательно, должную технологию обращения с ними. Обсуждение этой проблемы можно найти в Science for Democratic Action, vol. 6, no. 1, May 1997.

ГОДОВОЙ ОБЪЕМ НАРАБАТЫВАЕМЫХ НА ОДИН В ОДНОКРАТНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ И В ОДНОКРАТНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ НА В КУБИЧЕСКИХ МЕТРАХ НА ГИГАВАТТ

НОУ однократный цикл

Этапы	ОЯТ ^б	САО	НАО	Хвосты
Добыча и дробление	—	—	—	65 000
Производство UF ₆	—	—	32—112	—
Обогащение	—	—	3—40	—
Изготовление топлива	—	—	3—9	—
Репроцессинг и остекловывание	Неприменимо	Неприменимо	Неприменимо	Неприменимо
Эксплуатация реактора	—	22—23	86—130	—
Хранение отработанного топлива и герметизация ^а	—	2	0,2	—
Окончательная утилизация отработанного топлива ^а	26	—	—	—
Вывод из эксплуатации ^а	—	9	333	—
ВСЕГО	26	33—44	457—624	65 000

МОХ однократный цикл

Этапы	ОЯТ ^б	ВАО ^б	САО	НАО	Хвосты
Добыча и дробление	—	—	—	—	50 060
Производство UF ₆	—	—	—	25—86	—
Обогащение	—	—	—	3—35	—
Изготовление топлива	—	—	13	7,4—12,5	—
Репроцессинг и остекловывание	—	2—4 ^б	17—39	8016—8037 ^с	—
Эксплуатация реактора	—	—	22—23	86—130	—
Хранение отработанного топлива и герметизация ^а	—	—	0,3	0,03	—
Окончательная утилизация отработанного топлива ^а	26	—	—	—	—
Вывод из эксплуатации ^а	—	—	10,1	315	—
ВСЕГО	26	2—4	62—95	8452—8615	50 060

Примечания:

а. В данные по объемам отходов не включены радиоактивные выбросы в атмосферу и воду, за исключением сбросов в водоемы жидких НАО, связанных с репроцессингом. Используются типовые характеристики современных легководящих реакторов: предполагается, что выгорание всего топлива составляет 42,5 ГВт-дн (тепловой энергии) на тонну тяжелых металлов (т.е. урана или плутония); предполагается, что термический КПД реакторов сос-

тавляет 33 %; предполагается, что для производства 1 ГВт электро-энергии в год потребуется 26 т урана.

б. Фактический объем отработанного топлива и ВАО не отражает тех издержек, которые связаны с их утилизацией. Например, не объем, а тепло, генерируемое отработанным топливом и ВАО, определяет объем пространства, необходимого для их захоронения в геологических формациях. Необходимость при хранении ОЯТ и

Источники: Все данные по объемам отходов взяты из Brian G. Chow and Gregory S. Jones, *Managing Wastes With and Without Plutonium Separation* (Santa Monica, California: RAND, 1999). Значения по репроцессингу НАО также основаны на данных из Groupe Radioecologie Nord Cotentin, *Inventaire des rejets radioactifs des installations nucléaires*, vol. 1, July 1999, p. 19, and Cogema, *Environmental Report*, 1996, p. 54. Комментарии взяты из Makhijani, Hu, and Yih, eds., *Nuclear Wastelands: A Global Guide to Nuclear Weapons Production and Its Health and Environmental Effects* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995).

РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИЗ РАСЧЕТА РЕАКТОР

на низкообогащенном уране (НОУ-ОК)
смешанно-оксидном топливе (МОХ-ОК)^а
электроэнергии в год ($\text{м}^3/(\text{ГВт}\cdot\text{год})$)

Комментарии

С точки зрения радиационных доз и числа пострадавших людей добыча урана является одним из самых опасных этапов ядерного топливного цикла, который оказывает непропорциональное воздействие на местное население. При добыче руды образуются большие объемы отходов в виде экономически незначимых обедненных урансодержащих материалов, которые не рассматриваются как радиоактивные отходы. Хвосты обогатительных фабрик отвечают более чем за 95 % всего объема радиоактивных отходов, не включая отходы горно-добывающих предприятий. Многие территории хвостохранилищ во всем мире не прошли экологической очистки или остаются заброшенными и загрязняют почву и поверхностные воды радиоактивными и нерадиоактивными токсичными веществами.

В процессе изготовления гексафторида урана, который идет на обогатительные предприятия, образуется ряд химических форм урана. Кроме урана, в аэрозольной форме и растворенного в воде, другие опасные компоненты включают в себя такие химические вещества, как фтористоводородная кислота, азотная кислота и газ фтор.

Низкоактивные отходы, образуемые на этапе производства гексафторида урана и обогащения, обычно сбрасываются в отвалы. Многие из этих "низкоактивных" отвалов дают утечку радионуклидов в грунтовые воды. Отходы от обогащения включают также нерадиоактивные токсичные химические отходы, такие как полихлорированные бифенилы (ПХБ), хлор, аммиак, нитраты, цинк и мышьяк.

Поскольку на этапе изготовления топлива жидких отходов не образуется, его воздействие в основном ограничивается рабочими и достигает того же порядка, что и для работников сектора репроцессинга. Поводом для серьезного беспокойства является повышенный радиологический риск при обработке многократно облученного топлива.

Из всех этапов ядерного топливного цикла репроцессинг создает ряд наиболее трудно разрешимых экологических проблем. Отходы от репроцессинга вместе с отработанным топливом содержат больше радиоактивности, чем все другие отходы в топливном цикле. В 1957 г. в Советском Союзе произошел взрыв емкости с высокоактивными жидкими отходами. Опасность взрывов других емкостей, содержащих отходы от репроцессинга, в России, США и других странах сохраняется по сей день. Утечки опасных веществ из некоторых других емкостей создали загрязнение почвы и грунтовых вод. Большинство по объему радиоактивных отходов от репроцессинга сбрасывается прямо в водоемы. Репроцессинг создает серьезные проблемы в отношении принципа нераспространения, поскольку он включает в себя отделение материалов, пригодных для изготовления ядерного оружия (уран и плутоний). Кроме того, присутствуют еще и радиоактивные выбросы в атмосферу криптона-85 и углерода-14, данные по которым здесь не приведены.

Уязвимым местом ядерных реакторов является возможность возникновения крупной аварии (например, Чернобыль, Три Майл Айленд). Ядерные реакторы на кипящей воде производят значительные выбросы радиоактивных благородных газов.

Значительные количества "низкоактивных" отходов образуются в результате утечки продуктов деления через трещины в оболочке твэлов в бассейны для хранения отработанного топлива. Эти продукты деления улавливаются смолами в фильтрах, которые затем попадают в категорию "низкоактивных" отходов в США и среднеактивных отходов в Европе.

Невозможность изолировать загрязнение от отработанного ядерного топлива с тем, чтобы оно не попало в среду обитания человека в течение всего периода времени, пока оно остается опасным, делает задачу утилизации отработанного топлива одной из самых трудных проблем, связанных с атомной энергетикой.

Большая часть радиоактивности от отходов, связанных с выводом из эксплуатации реакторов, сосредоточена в относительно небольшом объеме сильно радиоактивного материала. Большинство реакторов и соответственного коммерческого атомного оборудования еще предстоит вывести из эксплуатации.

ВАО разносить их в пространстве (с тем, чтобы они, например, не создавали эффект накопления тепла, что может привести к коррозии упаковки, в которой они содержатся, или не вызывали нежелательные изменения в геологическом строении) означает, что их эффективный объем при захоронении будет значительно больше, чем их фактический объем.

в. Эти цифры отражают не общий исходный объем жидких ВАО от репроцессинга, а скорее тот объем, который образуется в результате выпаривания, концентрации и остекловывания исходного объема и который приблизительно на 98 % меньше (Агентство по ядерной энергии, Организация за экономическое сотрудничество и развитие, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle* [Paris: OECD, 1994], page 33).

г. Эти цифры включают в себя $7956 \text{ м}^3/(\text{ГВт}\cdot\text{год})$ жидких сбросов в окружающую среду (Groupe Radioecologie Nord Cotentin, 1999).

д. Здесь не предполагается, что хранение отработанного топлива и его герметизация требуют перемещения отработанного топлива на площадку для промежуточного хранения перед его окончательной утилизацией. Если бы для промежуточного хранения отработанного топлива кроме бассейнов с водой использовались сухие контейнеры, то за время промежуточного хранения нарабатывалось бы дополнительно $6 \text{ м}^3 \text{ НАО}/(\text{ГВт}\cdot\text{год})$ отходов.

е. Хотя объемы отработанного топлива на выходе МОХ и НОУ циклов одинаковы, отработанное МОХ-топливо сложнее в обращении, поскольку физически оно более разогрето, чем отработанное НОУ-топливо.

ж. Сюда входит вывод из эксплуатации реактора, а также предприятий по переработке и обогащению, изготовлению топлива и репроцессингу.

Сразу после Второй мировой войны пристальное внимание научной общественности было привлечено к идее чрезвычайной дешевизны и неисчерпаемости ядерной энергии. Как бы в противовес ужасам новой войны, которые могло вызвать использование ядерного оружия, будущее ядерной энергии всячески приукрашивалось для создания образа мира, процветания и изобилия, что должно было вызвать всеобщее восхищение.

В 1953 г. Льюис Страус, председатель Комиссии по атомной энергии (КАЭ), веря в “атомное будущее” человечества, проповедовал идею о том, что прогрессом в области атомной энергии будет руководить “Святое Провидение”. Этой лихорадке поддался и Конгресс США. Его видение проблемы было отражено в Законе об атомной энергии 1954 г., основополагающем законодательном документе, в котором были определены условия коммерциализации атомной энергетики, не противоречащие производству ядерного оружия. В Законе было заявлено, что

развитие, использование и контроль над атомной энергией должен быть направлен на то, чтобы способствовать делу мира во всем мире, повышения общего благосостояния, уровня жизни и развития свободной конкуренции между частными предприятиями.

Использование атомной энергии для повышения уровня “общего благосостояния” должно было быть “подчинено достижению основополагающей цели, состоявшей в том, чтобы максимально способствовать общей обороне и безопасности страны”.

США хотели представить миру “добрый” образ атома. Это происходило параллельно с накоплением огромного арсенала все более мощного оружия. Неточные и вводящие в заблуждение заявления и панегирики атомной энергии вскоре стали неотъемлемой частью истерии холодной войны, одерживавшей победу на территории всей страны. К началу 80-х годов не только на Мэйн-стрит (“Главная” улица, название центральной улицы во многих небольших городках США. — *Прим. переводчика*), но и на Уолл-Стрит осознали, что ядерная энергия далеко не “настолько дешева, чтобы не надо было измерять ее стоимость”, напротив, она оказалась слишком дорогой, чтобы ее можно было себе позволить. Однако дорогу себе начали пробивать другие идеи сомнительного характера. К их числу можно отнести заявления о возможности строительства реакторов с “внутренне присущей безопасностью” или о возможности использования атомной энергии в качестве практического решения проблемы парниковых газов?

После первых ядерных испытаний, проведенных Советским Союзом в 1949 г., США решили ускорить разработку водородной бомбы. Начались проектирование, производство и испытания ядерных зарядов, а также был открыт полигон для ядерных испытаний в Неваде. Советы последовали тем же путем. В США испытания термоядерной установки были проведены 31 октября 1952 г., а в Советском Союзе — 12 августа 1953 г.

Томас Мюррей, член КАЭ, ясно видел, что с точки зрения пропаганды необходимо сместить внимание людей с оружия на гражданскую энергетику, поскольку и США, и Советский Союз на всех парах неслись в эпоху термоядерного оружия. Такая пропаганда могла помочь представить США в качестве приверженца мирного использования атомной энергии в отличие от Советского Союза со всеми ужасами его термоядерной программы. В дополнение к пропагандистскому преимуществу, завоеванному благодаря клеймению Советского Союза за его милитаристскую политику (несмотря на то, что там параллельно велась разработка атомных электростанций), у США была и другая причина гордиться с началом масштабного гражданского производства атомной энергии — страх, что если США замешкаются, этого первыми добьются Советы. Как оказалось в итоге, Советский Союз и Великобритания действительно опередили США в создании коммерческой ядерной энергии, добившись этого в 1954 и 1956 г. соответственно. В США аналогичный результат был получен в 1957 г.

В декабре 1953 г. президент США Эйзенхауэр произнес речь в Организации Объединенных Наций на фоне разработок и испытаний ядерного оружия в США и СССР. В первых вариантах речи описывалась разрушительная природа атомного и термоядерного оружия. Однако окончательная речь содержала две части: в первой приводилось наглядное описание мощи и ужаса ядерного оружия, а во второй в превосходных терминах говорилось о возможностях применения мирного атома.

Значительная часть речи Эйзенхауэра в ООН была посвящена идее развития гражданской атомной энергии, которая позднее стала известна под названием “Атом в мирных целях”. В той речи Эйзенхауэр сказал следующее:

США будут не просто добиваться сокращения или уничтожения ядерных материалов, используемых в военных целях.

Особая задача будет состоять в том, чтобы обеспечить в достаточной мере производство электрической энергии в регионах мира, испытывающих энергетический голод. А державы-участницы [программы] будут использовать

часть своих возможностей для служения нуждам человечества, а не для запугивания.

В рамках программы “Атом в мирных целях” страны должны были поставлять ядерные материалы новому международному агентству по атомной энергии, которое предусматривалось создать под эгидой ООН. Это агентство должно было препятствовать распространению ядерного оружия и одновременно способствовать развитию атомной энергетики. Президент Эйзенхауэр также полагал, что это агентство станет заниматься распределением расщепляемого материала и назначением соответствующих экспертов, которые бы работали по всему миру.

Утверждение Эйзенхауэра, что атомная энергия может “быстро перейти” со стадии разрабатываемой технологии на стадию “универсального и эффективного использования”, не было подкреплено тщательным анализом. Скорее, оно превращало ранние мессианские высказывания об атомной энергии в хорошо просчитанное орудие холодной войны. По вопросу об атомной энергии не существовало никакого разделения по идеологическим фронтам. В Советском Союзе истинные приверженцы испытывали по крайней мере такой же энтузиазм в отношении атомной энергии, как и в США. В ней нашли свое воплощение известный афоризм Ленина о том, что коммунизм — это советы плюс электрификация всей страны, и приверженность Сталина к реализации крупномасштабных промышленных проектов.

Спустя полтора десятка лет американская программа “Атом в мирных целях” нашла свое более формальное, но яркое выражение в Статье IV Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО). Этот договор гарантировал подписавшим его сторонам “неотъемлемое право” пользования преимуществами атомных технологий, включая атомную энергию (полный текст Статьи IV данного договора приводится на стр. 15). За не многим более чем два десятилетия атомная энергия поднялась до статуса, близкого к праву на “жизнь, свободу и достижение счастья”, которое не только вдохновляло основателей Соединенных Штатов, но и до сих пор продолжает вдохновлять людей во всех частях света.

Для глав множества государств, освободившихся от колониальной зависимости и надеявшихся на быстрое преодоление экономической нищеты, атомная энергия представлялась неотделимой от национальных флагов и гимнов, являвшихся символами вновь обретенной свободы. Атомная энергия — это было “современно”, подобно сталеплавильным заводам и национальным авиакомпаниям; предполагалось, что модернизация в этом направлении даст бывшим отсталым колониям мощный импульс для скачка вперед и позволит им занять достойное место среди индустриальных держав мира. Даже Индия, где Ганди решительно отстаивал

идею продвижения страны по пути, отличному от западного, не предприняла шагов по независимой оценке западных заявлений, несмотря на то, что она уже в 40-е годы обладала для этого достаточным научным и техническим потенциалом³.

Атомные скептики

К сожалению для истинных приверженцев, идея об энергии “настолько дешевой, что не надо будет измерять ее стоимость”, а именно это требовалось для преобразования фривольных и сильно приукрашенных мечтаний в суровую экономическую реальность, в действительности была смесью самообмана и пропаганды, не имевшей под собой никакой технической основы. В самом деле, все технические оценки, от сделанных в рамках засекреченного Манхэттенского проекта до данных правительством, промышленностью и академическим сообществом в конце 1940-х — начале 1950-х гг., дали один и тот же результат. Освоить атомную энергию будет сложно, и она еще долго не сможет конкурировать с электричеством, произведенным на угольных электростанциях, хотя она и может составить конкуренцию углю, в особенности, если цены на него возрастут. Ни одна комиссия не пришла к заключению о том, что атомная энергия будет дешевой, не говоря уже о том, что она станет “слишком дешевой, чтобы измерять ее стоимость”.

Согласно заявлению К. Г. Сьютса, вице-президента и главы научно-исследовательского отдела компании General Electric, сделанному в декабре 1950 г.:

В настоящее время атомная энергия представляет собой исключительно дорогой и неудобный способ получения энергии, которую гораздо экономичнее получать, используя традиционные виды топлива... Экономика атомной энергетики на данный момент не является привлекательной, и вряд ли этого можно скоро ожидать в будущем. Атомная энергия — это дорогая энергия, она не такая дешевая, как заставили поверить общество.

Приведем еще один пример. В 1948 г. КАЭ представила на обсуждение Конгресса доклад, в котором говорилось о “ничем неподкрепленном оптимизме в отношении характера технических трудностей [с которыми сталкивается атомная энергетика] и времени, требующемся на их преодоление”. Комиссия, в состав которой входили Энрико Ферми, Гленн Сиборг и Дж. Р. Оппенгеймер, даже не имела единодушного мнения по поводу стоимости топлива, хотя низкие цены на топливо были минимально необходимым требованием для того, чтобы атомная энергия могла конкурировать с электричеством, полученным при использовании ископаемого топлива.

См.: Атом и пропаганда, с. 14

На протяжении 40-х и 50-х гг. США переживали крупные преобразования в области энергетики. До начала и во время Второй мировой войны США были практически самодостаточны в отношении нефтяных ресурсов. Но значительное увеличение числа автомобилей на протяжении десятилетия, а также взрывной рост потребления нефти в других областях привели к тому, что к концу 1940-х гг. США стали превращаться в постоянного нетто-импортера. К началу 60-х гг. США уже импортировали около одной пятой всей потребляемой в стране нефти.

В начале 50-х гг. один из официальных анализов ситуации с ресурсами был проведен комиссией, назначенной президентом Трумэном и названной Президентской комиссией по сырьевой политике. Она стала известной как Комиссия Палей, по имени ее председателя.

Основной областью интереса Комиссии Палей в энергетическом секторе была нефть. Отчет Комиссии, подготовленный в 1952 г., предсказывал, что к 1970-м годам страна начнет испытывать дефицит нефти. Более того, Комиссия Палей вынесла крайне негативную оценку атомной энергии и призвала к проведению “энергичных исследований в области солнечной энергии, где США могли бы внести неоценимый вклад в благосостояние всего мира в целом”. Комиссия также поощрила проведение работ в области исследования энергии ветра и биомассы. Однако, несмотря на сделанные Комиссией заключения, только после того, как в 70-х гг. по США ударил сильнейший энергетический кризис, были предприняты значительные шаги по проведению исследований в области возобновляемой энергии.

Учитывая оценки, свидетельствующие о том, что атомная энергия, в лучшем случае, сможет удовлетворить только незначительную часть энергетических потребностей, кажется совсем нелогичным, что именно она, а не солнечная или другие виды энергии от возобновляемых источников стала активно развиваться. Очевидно, предполагалось, что возобновляемые источники энергии не смогут обеспечить такого же пропагандистского капитала в “холодной войне”, как атомная энергия. Интересно отметить, что недостатку государственных средств на проведение исследований в области возобновляемых источников энергии сопутствовало отсутствие корпоративных усилий в этой области, а также интереса со стороны большого числа ученых и инженеров.

Стойкие иллюзии

История атомной энергии не оправдала надежд ее приверженцев. Почти полвека спустя после того, как с помощью ядерного реактора была зажжена первая

электрическая лампочка⁴, заказы на ядерные реакторы в развитых странах практически отсутствуют. Продажа реакторов развивающимся странам, ремонтные работы на построенных реакторах и вывод из эксплуатации отслуживших свой срок реакторов — это круг заказов, которым сейчас обеспечены производители атомной энергии и ее продавцы. В США с 1978 г. не поступило ни одного заказа на строительство атомного реактора, а все заказы на их строительство, сделанные в период с 1974 по 1978 г., были аннулированы. Даже во Франции, бастионе атомной энергетики, где на атомных реакторах производится около четырех пятых всего электричества, сейчас признают, что станции на природном газе с комбинированным циклом более экономичны, чем атомные реакторы.

В 1986 г. на примере Чернобыля можно было увидеть ужасные, имеющие большую область охвата, и, в значительной степени, непоправимые последствия серьезных аварий на атомных реакторах. Каждая конструкция гражданского атомного реактора включает в себе вероятность таких катастрофических аварий, хотя их вероятность, а также особые механизмы протекания могут отличаться от конструкции к конструкции и от страны к стране.

Несмотря на то, что надежды приверженцев использования атомной энергии в значительной степени не оправдались, большинство правительств стран мира не желают, как кажется, отказываться от ее использования. Это нежелание представляет собой комплексное явление, и обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной статьи. Частично это может быть результатом ощущений, сложившихся у многих неядерных развивающихся стран. Они заключаются в том, что главные обладатели этой технологии на Западе несправедливо лишают их доступа к технологии, гарантированной им согласно Статье IV ДНЯО как часть сделки за отказ от ядерного оружия. Сильное влияние продолжает оказывать и идея, что ядерная энергия является символом современных “высоких” технологий.

Тем не менее, проблемы, связанные с применением Статьи IV ДНЯО, не имеют под собой почвы, потому что атомная энергия, в общем и целом, является неэкономичной, а ее использование — нежелательным по целому ряду причин. Даже присвоенный ей статус “высокой” или “продвинутой” технологии во многом преувеличен. Например, проектирование и строительство фотогальванических ячеек и создание надежных, контролируемых с помощью компьютера распределительных электрических сетей, которые могут питаться от разнообразных источников энергии, во многом представляют собой более комплексное и продвинутое в технологическом плане явление, чем проектирование и строительство атомных реакторов.

После того, как идея об атомной энергии как “настолько дешевой, что не нужно будет измерять ее

См.: Атом и пропаганда, с. 15

стоимость” была убита суровой действительностью, атомная промышленность для логического обоснования необходимости своего существования взяла на вооружение идеи защиты окружающей среды и нераспространения. Защитники атомной энергии утверждают, что она могла бы стать основополагающим фактором в деле сокращения выброса в атмосферу загрязняющих веществ, в особенности двуокси углерода, вносящей существенный вклад в глобальное потепление. Однако при этом игнорируются экологические последствия добычи урана и радиоактивных отходов, которые являются неотъемлемыми составляющими технологии (смотри “Наука для критических масс”, с. 9—11). Кроме того, анализ, проведенный IEER, продемонстрировал, что высокоэффективные станции, работающие на природном газе, дают большее сокращение выбросов парниковых газов на единицу инвестиций, чем атомная энергия⁵. Следует также отметить, что проблемы, связанные с использованием ископаемого топлива и с атомной энергией, просто несопоставимы. Надо ли нам искать альтернативу изменению климата в возможности катастрофических аварий, подобных Чернобылю?

В первые годы “холодной войны” многие приверженцы атомной энергии предлагали, чтобы производство военного плутония использовалось для субсидирования электростанций. После конца холодной войны атомная индустрия делала заявления о том, что атомная энергетика может помочь “перековать мечи на орала”, поскольку избыточный плутоний с демонтированных ядерных боеголовок мог бы быть использован для производства топлива для коммерческих ядерных реакторов. Однако осуществление такой программы привело бы к созданию финансовой и физической инфраструктуры для превращения плутония в “коммерческий” товар со всеми вытекающими отсюда последствиями, как то проблема нераспространения, вопросы экологии и цены⁶.

Для решения вопросов безопасности атомная промышленность начала и продолжает продвижение на рынок второго поколения коммерческих ядерных реакторов (см. статью по трансмутации на с. 1), некоторые из которых даже были названы их сторонниками “с внутренне присущей безопасностью”. Вопрос безопасности вообще является основополагающим, поскольку общественный скепсис по поводу заявлений представителей атомной промышленности заметно возрос после аварий на Три Майл Айленд и в Чернобыле. Однако, независимо от достоверности утверждений о защищенности от аварий с неконтролируемым выбросом радиоактивных отходов в атмосферу, высказывания в духе “с внутренне присущей безопасностью”, не будучи подкрепленными веским техническим содержанием, скорее имеют риторическую ценность. Хотя представляется теоретически возможным создать реакторы, которые

СТАТЬЯ IV ДОГОВОРА О НЕРАСПРОСТРАНЕНИИ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

1. Никакое положение настоящего Договора не следует толковать как затрагивающее неотъемлемое право всех участников Договора развивать исследование, производство и использование ядерной энергии в мирных целях для дискриминации и в соответствии со статьями I и II настоящего договора.
2. Все участники Договора обязуются способствовать возможно самому полному обмену оборудованием, материалами, научной и технической информацией об использовании ядерной энергии в мирных целях и имеют право участвовать в таком обмене. Участники Договора, которые в состоянии делать это, также сотрудничают в деле содействия, по отдельности или совместно с другими организациями или международными организациями, дальнейшему развитию применения ядерной энергии в мирных целях, особенно на территориях государств — участников Договора, не обладающих ядерным оружием, с должным учетом нужд развивающихся районов мира.

Источник: Congressional Research Service, *Nuclear Proliferation Factbook* (Washington, DC: US Government Printing Office), September 1980.

будут отличаться большей степенью безопасности по сравнению с уже существующими, нельзя рассматривать безопасность в качестве черты, внутренне присущей различным технологиям. Все предлагавшиеся до настоящего времени реакторы обладали некоторым потенциалом для самых серьезных аварий.

Сейчас существуют гораздо лучшие и безопасные источники энергии⁷. Пришло время отказаться от атомной энергии как от не осуществившейся мечты прошлого века. Мы можем и обязаны заменить фальшивую пропаганду “атомов в мирных целях” на программу “энергия в мирных целях”, которая может сделать благополучие современного поколения совместимым с защитой безопасности и окружающей среды для жизни будущих поколений.



1. *Обманы атомной энергии: ядерная мифология США — от электричества “слишком дешевого, чтобы измерять его стоимость” до реакторов с “внутренне присущей безопасностью”* (Новосибирск, Нонпарель, 2000). Все ссылки, если особо не оговорено, можно найти в этой книге.
2. Для сравнения показателей снижения эмиссии парниковых газов при использовании атомной энергии для замещения работающих на угле электростанций и современных станций, работающих на природном газе с комбинированным циклом, см. *Энергетика и Безопасность* № 5, 1998.
3. George Perkovich, *India's Nuclear Bomb: The Impact on Global Proliferation*. Berkeley: University of California Press, 1999, pp. 15—21.
4. В 1951 г. первое атомное электричество было выработано на Экспериментальном реакторе-размножителе I и было использовано в качестве энергии для лампочки. Как реактор, так и лампочка хранятся в музее в Айдахо.
5. См. *Энергетика и Безопасность* № 5, 1998.
6. См. *Science for Democratic Action*, vol. 5, no. 4, February 1997.
7. Например, см. Отчет IEER *Wind vs. Plutonium: An Examination of Wind Energy Potential and a Comparison of Offshore Wind Energy to Plutonium Use in Japan* (1999), Глава 9 в книге *Обманы атомной энергии* и Thomas Johansson et al., *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington, DC: Island Press, 1993.

НОВАЯ КНИГА

Обманы атомной энергии: ядерная мифология США — от электричества «слишком дешевого, чтобы его измерять» до реакторов с «внутренне присущей безопасностью», Аржун Макхиджани и Скотт Салеска. Новосибирск: Нонпарель, 2000, 360 с. (бесплатно)

В этой книге дан критический анализ, а также приведены исторические данные с целью опровергнуть заявления ядерной индустрии о том, что атомная энергия может ослабить проблему накопления парниковых газов и снизить зависимость США от иностранной нефти. В ней также вскрываются опасности дальнейшего распространения ядерного оружия в результате растущих запасов плутония, нарабатываемого существующими атомными электростанциями во всем мире.

Радиоактивные отходы со с. 9

реакторы в США и в большинстве стран мира используют НОУ-ОК топливный цикл. «На низкообогащенном уране» означает тип используемого топлива; «однократный» говорит о том, что отработанное топливо не подвергается обработке с целью извлечения плутония и урана для изготовления нового реакторного топлива.

В однократном топливном цикле на смешанно-оксидном топливе (МОХ-ОК) используется смешанное оксидное топливо, изготовленное из плутония, извлеченного из НОУ отработанного топлива. Активная зона реактора в этом цикле включает в себя 30 % МОХ-топлива, а остальное — НОУ-топливо. После облучения отработанное МОХ-топливо направляется на утилиза-

цию, а отработанное НОУ-топливо — на репроцессинг. В настоящее время МОХ-топливо используется приблизительно в 30 коммерческих ядерных энергетических реакторах в Германии, Франции и Бельгии.

Предлагаются и другие технологии обработки отработанного ядерного топлива, такие как трансмутация и реакторы на быстрых нейтронах, которые требуют многократного прохождения через этап репроцессинга. Анализ этих предложений дан в статье на с. 1.



1. Детальный анализ можно найти в *Nuclear Wastelands*, Makhijani, Hu, and Yih, eds. (Cambridge, Mass.: MIT Press), 1995.
2. Выбросы в атмосферу и воду не включены, за исключением слива жидких отходов от репроцессинга.

Трансмутация со с. 8

6. National Research Council. *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation*. Washington: National Academy Press, 1996. p. 5; and OECD/NEA *Status and Assessment Report* 1999, p. 204. В

некоторых схемах трансмутации предполагается хранение среднеживущих отходов до 600 лет, с тем чтобы произошел их распад (см. Rubbia et al., *Fast Neutron Incineration in the Energy Amplifier as an Alternative to Geologic Storage: The Case of Spain*, CERN/LHC/97-01 (EET), Geneva: European Organization for Nuclear Research, February 17, 1997).