

Энергетика и Безопасность

№ 16 2001

Издание IEER

Плутониевый эндшпиль: прекратить репроцессинг, начать иммобилизацию

Аржун МАКХИДЖАНИ

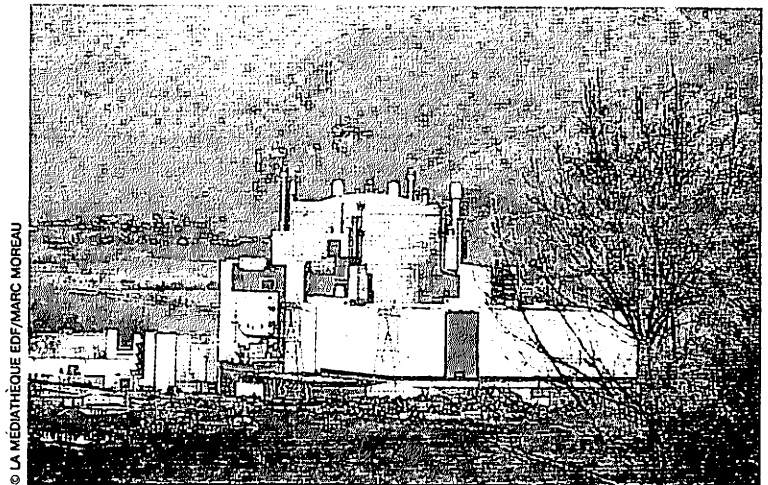
Преращение холодной войны сразу же обострило проблему избыточных запасов оружейного плутония, причиной чего были широко распространенные опасения, что результатом крушения Советского Союза могут стать черные рынки этого плутония (и тактических ядерных боеголовок). Вместе с тем в последнее десятилетие все более возрастает значение другой не менее важной проблемы возможного ядерного распространения (выделенного гражданского плутония), внимание которой уделяют значительно меньше.

Надеждой атомной индустрии было то, что гражданский плутоний станет ценным топливом. Однако экономические события в реальном мире опровергли эти надежды, так же как политические события привели к отказу от идеи, что большие военные запасы плутония являются ценным ресурсом для безопасности.

Поскольку, по существу, все изотопные комбинации выделенного плутония, как гражданского, так и военного происхождения, могут быть использованы для изготовления ядерного оружия, плутоний является одним из наиболее важных звеньев, соединяющих гражданскую и военную атомную промышленность. Таким образом, управление выделенным плутонием, независимо от его происхож-

См.: Плутониевый эндшпиль, с. 2
Примечания, с. 15

Все предыдущие номера "Энергетики и безопасности" можно найти в Интернете на сайте IEER
<http://www.ieer.org/russmain>



Суперфеникс, самый большой реактор-размножитель в мире, остановлен преждевременно и навсегда в 1998 г. Французская программа по реакторам-размножителям провалилась вследствие технических проблем и высоких затрат.

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Анализ риска: только один из инструментов

Аржун МАКХИДЖАНИ¹

Анализ риска — относительно новая дисциплина, которая стала играть важную роль в общественных дебатах и процедурах принятия решений по широкому кругу экологических вопросов. Этот анализ стремится количественно оценить опасность, которую несут опасные вещества или процессы. В своей основе анализ рисков является вероятностным: он нацелен на количественное определе-

См.: Анализ риска, с. 7
Примечания, с. 16

В БЮЛЛЕТЕНЕ

Французский отчет ставит под сомнение достоинства репроцессинга и MOX-топлива.....	9
Американо-российское соглашение по утилизации плутония.....	12

дения, является ключевым вопросом хорошо продуманной политики нераспространения.

По вопросам избытка военного плутония было много написано, включая большое количество работ, опубликованных IEER, Национальной академией наук и др. В январе 2001 г. IEER выпустил отчет об обращении с гражданским плутонием и о том, что его утилизация может и должна рассматриваться в комплексе с утилизацией избытков военного плутония. В настоящей статье дается краткое изложение этой работы. Более подробные сведения можно найти в полном тексте отчета¹.

Плутоний-239 получается путем облучения в реакторе относительно часто встречающегося в природе урана-238. Это может быть сделано в военных целях: плутоний извлекается из топливных стержней или мишеней, облученных в ядерном реакторе (собираетельно называемых “облученное реакторное топливо” или “отработанное топливо”). Вместе с тем плутоний также может быть получен в гражданских ядерных реакторах, поскольку в их ядерном топливе уран-238 присутствует в больших количествах. Поскольку таких реакторов имеется довольно много (более 400 во всем мире), общее количество плутония, произведенное гражданской атомной энергетикой, намного превышает объемы, наработанные военными ядерно-оружейными программами. К концу 1999 г. общий объем плутония, созданного в гражданских энергетических реакторах, превышал 1 400 т, по сравнению с 270—300 т по военным программам.

Плутоний может также использоваться как топливо для реакторов. Чтобы использовать его как ядерное топливо, необходимо вначале отделить плутоний от остаточного урана и продуктов деления в облученных топливных стержнях. Химические и электрохимические процессы, используемые для этого выделения, объединяются общим названием “репроцессинг”. Из военного плутония около 250 т находится в государственных запасах. Остальное количество было использовано при ядерных испытаниях, рассеялось по миру (или по подземным полостям) как неиспользованный остаток после испытаний или захоронено как отходы. Из гражданского плутония около 280 т было выделено, а остальное количество остается в отработанном топливе. Некоторая часть выделенного гражданского плутония была использована для производства топлива из смеси оксида плутония и оксида урана (МОХ-топлива), а остальное находится в хранилищах. В табл. 1 приведены современные данные по мировым запасам гражданского выделенного плутония.

Поскольку количество плутония, используемого в МОХ-топливе, значительно меньше, чем его выделяемое количество, каждый год запасы гражданского плутония возрастают примерно на десять тонн. Военные запасы растут со скоростью примерно 1 т/год, главным образом, в России и США, при этом оба государства заявляют, что они осуществляют репроцессинг из экологических соображений, а не из военных. При таких темпах через несколько лет запасы гражданского выделенного плутония станут превышать запасы военного. Они и так уже настолько велики, что представляют серьезную проблему с точки зрения ядерного нераспространения. Межведомственная рабочая группа Правительства США по утилизации плутония ясно заявила, что

См.: Плутониевый эндшпиль, 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 принесение научного анализа в деятельность общественности для демократизации и создания более здоровой окружающей среды.

Сотрудники IEER:

Аржун Махиджани — президент
Лиза Ледуидж — координатор по внешним связям
Мишель Бойд — координатор по международным связям
Энни Махиджани — научный сотрудник
Шрирам Гонпал — научный сотрудник
Луис Чалмерс — заведующий библиотекой
Дайана Кон — бухгалтер
Бетси Турно-Шулдс — 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, HKN Foundation, Ploughshares Fund, Town Creek Foundation, Beldon Fund, Turner Foundation, New Land 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 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 тех изданий, в которых воспроизводятся наши статьи.

Выпуск 16 (vol. 9, no. 2) английского издания вышел в свет в феврале 2001 г.

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

“Практически любая комбинация изотопов плутония — различные формы элемента, отличающиеся различным числом нейтронов в их ядрах, — может быть использована для изготовления ядерного оружия. Однако, не все комбинации в равной степени эффективны”².

Из одной тонны оружейного плутония можно изготовить около 200 ядерных зарядов или — если будут использованы более изощренные конструкции вооружения — даже больше. Для изготовления такого же оружия из энергетического плутония его потребуется приблизительно на 40 % больше. Таким образом, накопленного энергетического плутония будет достаточно для изготовления по крайней мере 30 000 ядерных бомб мощностью близкой к той, что разрушила Нагасаки.

Предыстория проблемы гражданского плутония

В течение большей части времени после Второй мировой войны плутоний рассматривался ядерными державами не только как валюта силы, но и как источник «магической» энергии. Такой взгляд был обусловлен тем, что реактор особого типа — реактор-размножитель — должен был преобразовывать уран-238 в плутоний в количествах больших, чем фактически нужно для работы реактора. Следовательно, несмотря на то, что при этом бы производилось электричество, на конечном этапе количества топлива (плутония-239) оказывалось бы больше, чем на начальной стадии³.

Однако большие надежды 50-х годов на то, что плутоний будет таким «магическим» источником энергии, — которая даже может оказаться «слишком дешевой, чтобы определять ее стоимость», — не оправдались, застряв в куче практических проблем, которые за последние 25 лет постепенно становились все более серьезными:

1. Оказалось, что урана в природе больше, чем предполагалось, и цена на уран стала быстро падать (с небольшим всплеском в 70-е годы). В настоящее время она находится на отметке (или около) самых низких показателей за прошедшие годы.
2. Оказалось, что реакторы-размножители с натриевым охлаждением — технология, выбранная для создания плутониевой экономики, в которую было вложено наибольшее количество усилий и денег, — это технология, которую очень трудно осуществлять и сделать рентабельной. Несмотря на то, что за четыре десятка лет на строительство только больших завершенных АЭС было израсходовано свыше 20 миллиардов долларов (в ценах 1999 г.), эта технология продолжает страдать техническими проблемами и высокими затратами. В табл. 2 (см. с. 4) приведены приблизительные данные по капитальным затратам на основные реакторы-размножители с натриевым охлаждением во всем мире (в ценах 1996 г.) и текущему состоянию различных реакторов.
3. Выделенный гражданский плутоний может быть использован для изготовления ядерного оружия, так что развитие плутониевой экономики влечет за собой значительное повышение рисков нарушения режима нераспространения по сравнению с рисками от атомных энергетических реакторов, работающих на урановом топливе.
4. Репроцессинг оказался дорогой технологией, что увеличивает затраты на плутоний по сравнению с ураном.
5. Репроцессинг приводит к наработке большого количества жидких радиоактивных отходов, а также других радиоактивных отходов, которые вызывают экологические проблемы и создают риски безопасности и здоровью.

Эти структурные факторы усугубляются недавними событиями, которые все, за исключением одного, крайне неблагоприятны для продолжения гражданско-

См.: Плутониевый эндшпиль, с. 4

Таблица 1: Оценки запасов выделенного гражданского плутония в стране, где он хранится, т

Страна	Выделенный плутоний	Дата получения данных	Комментарии
Франция	~80	Конец 1999 г.	Включает зарубежный Pu, который хранится во Франции
Великобритания	78,5	31 марта 2000 г.	
Россия	30	2000 г.	Включает зарубежный Pu, который хранится в Великобритании
Япония	5,3	Конец 1999 г.	
США	1,5	2000 г.	
Другие	11	Конец 1998 г.	Германия, Бельгия, Индия
Всего	~206		К концу 2000 г. общие запасы будут превышать 210 т

Примечание. Сюда входит плутоний в форме необлученного MOX-топлива.

го репроцессинга и использования МОХ-топлива:

1. Германия после избрания коалиционного правительства социал-демократов и "зеленых" в конце 1998 г. приняла решение о постепенном отказе от атомной энергии. Отказ, как представляется на сегодняшний день, будет относительно медленным, приблизительно соответствуя сроку службы существующих АЭС. Но отказ непременно включает в себя остановку репроцессинга немецкого отработанного топлива. Это сделает еще более сложным обоснование продолжение работы UPR2 во Франции (предприятие, полностью занимающееся репроцессингом зарубежного отработанного топлива) и THORP в Великобритании (предприятие по репроцессингу, принадлежащее государственной компании British Nuclear Fuels (BNFL) и тоже предназначенное для обслуживания зарубежных клиентов).
2. Решение германского правительства о свертывании атомной энергетики, а следовательно, и репроцессинга, вызвало реакцию во Франции и других странах, и сделало возможным обсуждение политиками вопроса о сворачивании атомной энергетики (ранее такой вопрос просто не ставился.) К примеру, это решение Германии сделало особенно уязвимым для критики субсидирование плутониевых программ правительством Франции (См. статью по Франции на с. 9).
3. Комитет по науке и технологии Палаты лордов (Великобритания) в 1999 г. пришел к заключению, что

большая часть британского плутония должна быть объявлена отходами. Это был сильный удар по перспективам субсидирования плутониевого топлива в Великобритании.

4. Авария, связанная с натриевым пожаром на демонстрационном реакторе-размножителе в Монзю (Япония) в 1995 г., всего лишь около полутора лет спустя после того, как он был запущен, и авария в сентябре 1999 г. с возникновением самоподдерживающейся цепной реакции на заводе в Токаймура (погибло два работника от высокой дозы облучения, многие другие получили травмы) усилили оппозицию японским планам по использованию МОХ-топлива. Все будущее атомной энергетики в Японии сейчас намного сомнительней, чем это казалось возможным до аварии в Токаймура.
5. Откровение, что некоторые данные BNFL по контролю качества МОХ-топлива были сфабрикованы, включая данные, связанные с некоторой частью топлива, отправленного в Японию, повергли британскую программу по МОХ-топливу и репроцессингу в смятение.
6. Российский Минатом (Министерство атомной энергии) с его сильнейшей приверженностью к плутониевой экономике испытывал и продолжает испытывать финансовые затруднения и не может самостоятельно продолжать развивать амбициозную программу по реакторам-размножителям. В России также отсутствуют промышленные предприятия по изготовлению МОХ-топлива.

См.: Плутониевый эндшпиль, с. 5

Таблица 2: Капитальные затраты на реакторы-размножители с натриевым охлаждением мощностью свыше 100 мегаватт теплоэнергии, МВт

Реактор, страна	Мощность, МВт	Сроки эксплуатации, годы ^а	Капитальные затраты, миллионы USD (в ценах 1996 г.)
Ферми 1, США	300	1966—1972	403
БН350, Казахстан	1 000	1972—	724
Феникс, Франция	560	1973—	395
Дюнрей PFR, Великобритания	600	1974—1994	~395
Джойо, Япония	100	1977—	144
KNK-2, Германия	~100	1977—1991	107
БН600, Россия	1 470	1980—	918
FFTF, США	400	1980—1993	1 397
Суперфеникс, Франция	2 900	1985—1998	6 028
Монзю, Япония	714	1994—1995	5 134
SNR-300, Калкар, Германия	782	Не был открыт	4 272
Всего	8 906		19 917^б

Примечания. а. Начало эксплуатации соответствует моменту достижения критичности. б. Суммарное количество не включает в себя около 1,6 миллиарда долларов (в современных ценах), потраченных на незавершенный и заброшенный реактор-размножитель Клинч-Ривер (около 3 миллиардов долларов в ценах 1996 г.), сюда также не входят затраты на другие незавершенные реакторы.

7. Единственный недавний фактор в пользу использования MOX-топлива поступил из военного сектора. Соглашение, заключенное между США и Россией 1 сентября 2000 года, может заполнить единственный пробел в российской инфраструктуре плутониевого топливного цикла при условии, что она будет полностью финансироваться Западом и проходить, как предусматривается (см. ниже). Договор нацелен на перевод военных запасов плутония, которые обе страны объявили излишками, в форму, не пригодную для использования при производстве ядерного оружия, преимущественно путем использования его в качестве MOX-топлива в легководяных реакторах. Россия также хочет, чтобы предприятие по изготовлению MOX-топлива было в состоянии изготавливать MOX-топливо для реакторов-размножителей. Однако Россия и США не смогли достигнуть договоренности о том, кто будет нести ответственность за программу, в том числе в случае аварии. Договор оставляет этот вопрос открытым для дальнейших переговоров (см. статью на с. 12).

Чистым результатом исторических и современных тенденций и событий является большой политический вопрос о том, что делать с огромными и стремительно

растущими экономически невыгодными запасами гражданского плутония. Проблема усугубляется тем, что запасами плутония и предприятиями управляют учреждения, внушающие народу все меньше уважения и доверия, и далеко не последней причиной в этом являются фабрикация данных, вопросы безопасности и экологические скандалы, которые донимают BNFL. Этими факторами усугубляются проблемы, лежащие в основе и возникающие в результате негодных экономических решений, принимаемых правительствами и корпорациями, имеющими отношение к плутонию.

Неудивительно, что плутониевая индустрия продолжает настаивать на субсидиях, притязать на которые она не имеет никаких оснований. Огромные суммы порядка 100 миллиардов долларов уже потрачены во всем мире за последние пять десятилетий на попытки создать плутониевую экономику. Громадная часть этих денег пошла на большие реакторы-размножители, в большинстве своем ныне остановленные. Большая часть оставшихся средств потрачена на репроцессинг и использование получающегося в результате этого нерентабельного плутония в качестве реакторного топлива. Данные по этим затратам приведены в табл. 3. Не видно конца этим субсидиям и нет разумного пути разрешения многочисленных проблем, которые так и останутся неразрешенными в обозримом будущем.

См.: Плутониевый эндшпиль, с. 6

Таблица 3: Краткие данные по приблизительным чистым затратам на попытки использования плутония в качестве топлива во всем мире

Категория затрат	Стоимость, USD (в ценах 1999 г.)	Комментарии
Большие реакторы-размножители	~20 млрд	Большие реакторы мощностью свыше 100 мегаватт теплотенергии; только завершённые реакторы
Незавершённые реакторы-размножители, небольшие реакторы-размножители, чистые эксплуатационные расходы	~10 млрд?	Чистые операционные расходы — это расходы на эксплуатацию реактора, превышающие доход от продажи электричества
Репроцессинг и MOX	~40 млрд	За вычетом значения, полученного при замене MOX как топливо на уран. Приблизительная оценка
Строительство радиохимического предприятия Rokkasho-mura	~20 млрд	Незавершённый завод, сейчас официально намеченный к завершению в 2005 г.
Другие прошлые затраты (исследовательские и опытно-конструкторские работы, инфраструктура, вывод из эксплуатации в прошлом, долгосрочное хранение гражданского плутония)	Много миллиардов	Включает в себя закрытые радиохимические предприятия (например, Вест-Валлей в Нью-Йорке), прошлый репроцессинг и вывод из эксплуатации реакторов-размножителей, исследовательские и опытно-конструкторские работы на репроцессинг и реакторы-размножители
Промежуточный итог, затраты к настоящему времени	~100 млрд	
Чистые затраты на продолжение репроцессинга и изготовление MOX	~2 млрд/год	Исходя из 1 000 долларов на тонну тяжелого металла и репроцессинг по текущим расценкам
Затраты на хранение старых запасов плутония	0,4 млрд/год	
Затраты на вывод из эксплуатации и утилизацию гражданского плутония в будущем	В целом миллиарды или десятки миллиардов	

По всем разумным критериям экономичности и безопасности индустрия гражданского плутониевого топлива и реакторов-размножителей должна была полностью уйти со сцены энергетических альтернатив, по крайней мере, десять лет назад. Однако в некоторых странах выделение гражданского плутония продолжается до сих пор. В некоторых странах сохраняются также планы, ориентированные на реакторы-размножители. Использование плутония в качестве топлива (в форме смешанно-оксид-плутоний-уранового топлива или МОХ-топлива) в существующих реакторах особенно возросло в 90-е годы, что потребовало новых дотаций для плутониевой индустрии.

Эти дотации и нереалистичные планы сохраняются, поскольку те, кто пылко надеются и верят в долгосрочное будущее плутония как источника энергии, имеют достаточную силу на политической и экономической аренах, чтобы не дать угаснуть плутониевому пламени. Действительно, они смогли в огромной степени увеличить количество плутония, выделяемого и используемого в качестве МОХ-топлива в легководяных реакторах (наиболее распространенный тип гражданских реакторов), подавляющее большинство которых не были для него предназначены. Только во Франции гражданская плутониевая индустрия получает около 1 миллиарда долларов в год в качестве ассигнований на использование МОХ-топлива. (См. статью по Франции на с. 9).

Утилизация военного плутония

Планы, ориентированные на плутониевое топливо, получили поддержку в результате окончания холодной войны. Соединенные Штаты и Россия предлагают использовать большую часть своих объявленных излишков оружейного плутония в качестве топлива для гражданских АЭС. Под видом реализации принципов нераспространения это обеспечит индустрии плутониевого топлива новые огромные субсидии, а ядерному истеблишменту двух стран — аргументы для продолжения репроцессинга и программ по реакторам-размножителям. В частности, Минатом имеет определенные планы использования инфраструктуры, созданной с помощью западных фондов по программам нераспространения, для своей программы по реакторам-размножителям.

Минатом недвусмысленно заявил, что американо-российская программа утилизации оружейного плутония “должна рассматриваться как первый шаг к развитию в будущем технологии замкнутого ядерно-топливного цикла...” Это будет включать “использование смешанного уран-плутониевого топлива в реакторах на быстрых нейтронах” (другое название реакторов-размножителей)⁴. США согласились с такой системой в России в контексте оружейного плутония, хотя в 70-х

годах эта идея была отвергнута в США как слишком уязвимая в смысле нарушения принципов нераспространения (см. статью по Американо-российскому соглашению, с. 12).

Перевод избыточного военного оружейного плутония в топливо и использование его на гражданских АЭС вызывают опасения не только с точки зрения ядерного распространения, но также и относительно безопасности. Подавляющее большинство гражданских реакторов было предназначено для урана, а не смешанного оксидного (МОХ) топлива, в котором делящийся материал обеспечивается изотопами плутония. Может понадобиться модификация этих реакторов с тем, чтобы включить в них большее число управляющих элементов. Оружейный плутоний никогда не использовался в качестве гражданского топлива в реакторах, хотя плутоний, полученный из гражданского отработанного топлива, сейчас используется в гражданских энергетических реакторах во Франции, Германии, Бельгии и Швейцарии. Для оценки безопасности МОХ-топлива, произведенного из оружейного плутония, будут использоваться те же машинные коды, что были разработаны и проверены для энергетического плутония. Остается неясным, как будут разрешены проблемы безопасности, возникающие вследствие различия плутониевого состава оружейного и энергетического плутония и схем загрузки МОХ-топлива.

Последствия аварии на реакторе с МОХ-топливом будут намного тяжелее, чем на реакторе с урановым топливом, поскольку МОХ-топливо содержит больше плутония и трансураниевых радионуклидов. В России система государственного надзора относительно слаба, что вызывает вопросы о том, как будут подниматься и решаться проблемы безопасности. Более того, возникнут новые риски ядерного распространения, поскольку свежее МОХ-топливо будет транспортироваться по дорожным магистралям и храниться на гражданских АЭС, которые сейчас не обеспечивают безопасность на военном уровне.

Иммобилизация

Даже если бы выделение плутония в гражданском и военном секторах немедленно прекратилось, все равно осталась бы огромная проблема обращения с выделенным гражданским плутонием и избыточными военными запасами. Поэтому крайне необходимо не только остановить гражданский репроцессинг, но и разработать план по переводу выделенного гражданского плутония и избыточного военного плутония в формы, не пригодные для производства ядерного оружия, и сделать это настолько быстро, насколько это совместимо с безопасностью, здравоохранением и охраной окружающей среды.

ние как вероятности, так и величины конкретных вредных последствий, от которых могут пострадать люди, группы людей или экосистемы².

Оценка риска включает в себя несколько этапов, начиная от определения природы опасности и кончая оценкой размера воздействия и фактических эффектов.

Определение природы опасности

Во-первых, необходимо решить, может ли и каким образом некий конкретный процесс или вещество нанести вред. Например, вещество может быть токсичным кратковременно, вызывать отравление только при продолжительном воздействии, быть канцерогенным, вызывать мутации и т.д. Также необходимо определить дозы, ответственные за те или иные эффекты. Если опасности включают в себя аварийные выбросы, необходимо также рассчитать вероятность аварий. Возможно, что прежде, чем наступит данная авария, должна произойти определенная серия отказов. В таких случаях анализ риска обычно включает в себя построение “дереьев отказа” — диаграмм, показывающих последовательности отказов в подсистемах, которые могут повлечь отказ системы в целом. В идеальном случае это позволяет провести вычисления общей вероятности отказа.

Определение дозы воздействия

При оценке воздействия вследствие загрязнения окружающей среды (называемой “реконструкцией дозы”) очень важно знать “характеристики источника выбросов” — количество загрязняющего вещества, выбрасываемого из источника загрязнения в определенную среду, такую как воздух или воду, — или необходимо знать точную историю концентрации загрязняющего вещества в воздухе, воде или почве.

Сбросы в одну среду могут оказать воздействие на другую среду. Так, выбросы частиц радиоактивного материала в воздух приведут, по мере их выпадения, к отложению их в почве. Загрязняющие вещества на поверхности почвы могут просочиться в подземные воды или быть смыты в поверхностные воды дождем или при таянии снега. Радионуклиды, такие как цезий-137, стронций-90 или углерод-14, и многие органические токсические соединения могут попадать из воздуха, воды и почвы в растительность или сельскохозяйственные культуры.

“Анализ путей проникновения” проясняет зачастую сложные пути, которыми загрязняющие вещества из окружающей среды достигают человека. Этот анализ позволяет перевести оценки выбросов в оценки доз. Дозы облучения персонала, в принципе, могут быть выяснены более прямым путем. Например, работники АЭС но-

сят пленочные дозиметры, которые могут регистрировать дозы воздействия гамма- и бета-излучения. Внутренние дозы облучения радиоактивным материалом могут быть определены по анализам мочи и путем измерения радиоактивности всего тела.

Вредные вещества могут также содержаться в потребительских товарах, в этом случае, для того чтобы оценить дозы воздействия, необходимо провести выборочный анализ продуктов и схем использования или потребления.

Оценка наносимого вреда

После того, как определены дозы воздействия на группы людей, проживающих вне объекта, и на персонал предприятия, можно оценить последствия вредного воздействия на здоровье, если известны эффекты воздействия данного вещества. Другой путь оценки вреда, наносимого здоровью, во многих случаях заключается в проведении эпидемиологических исследований (если можно установить соответствующие контрольные группы и группы облученных людей).

Риски могут быть выражены в абсолютных и относительных единицах, а также из расчета на человека или на группу людей. Сказать, что риск для человека заболеть раком в результате данного уровня воздействия равен 1 из 100 000, это, в общем, равносильно тому, что сказать, что можно ожидать одного дополнительного случая рака, превышающего норму, в группе из 100 000 людей, если каждый из этой группы подвергся одной и той же степени воздействия. Это формулировка “абсолютного риска”, поскольку здесь указывается фактическое число случаев рака, которые бы произошли в результате этого воздействия.

Можно также определить “относительный риск”, например, сказав, что в результате воздействия индивидуального риска (в пределах группы людей, подвергшихся воздействию) заболеть определенным видом рака удвоился. Это означает, что можно ожидать, что в группе людей, подвергшихся воздействию, случаев заболевания раком окажется в два раза больше, чем в сравнительной “контрольной”, но не подвергшейся облучению, группе людей.

Неопределенности в природе опасности

При определении опасности кратковременные эффекты от высоких уровней воздействия токсических веществ обычно хорошо известны; в таких случаях относительно легко показать, что эффект, вероятно, был вызван определенной опасностью. Например, хорошо известны сильные кратковременные эффекты от воздействия излучения высоких уровней, вызывающего рвоту и выпадение волос.

См.: Анализ риска, с. 8

В противоположность этому, хронические эффекты воздействия низких доз токсических материалов и излучений проявляются в течение долгого времени и могут быть обусловлены многими, трудно различимыми факторами, такими как диета, генетическая предрасположенность, воздействие других вредных веществ. Например, длительный латентный период и неопределенности, связанные с причинами возникновения рака, делают трудным установление связи между воздействием и отрицательными последствиями.

Дополнительные проблемы возникают из-за того, что оценки долгосрочных эффектов зачастую основаны скорее на экстраполяции, чем на прямых данных: относительно высоких доз — на относительно низкие дозы, исследований на животных — на людей, данных по мужчинам — на женщин, взрослых — на детей и эмбрионы. В результате таких экстраполяций возникает ряд проблем. Например, некоторые вещества могут иметь пороговый предел, ниже которого они не причиняют особого вреда, делая, таким образом, непропорциональными экстраполяции относительно высоких на низкие дозы. В других случаях воздействия в пределах норм, установленных для взрослых, могут нанести больше вреда (пропорционально) детям и эмбрионам.

Другой серьезной проблемой при определении опасности является отсутствие данных. Очень большое число химических веществ было введено в широкое пользование без анализа их долгосрочной токсичности при малых дозах. Синергетические эффекты токсических химических веществ, действующих совместно или в комбинации с излучением, слишком часто совсем не изучались. Наконец, основное внимание в исследованиях по идентификации опасности было сосредоточено на раковых заболеваниях, зачастую в ущерб другим важным вредоносным воздействиям на здоровье, таким как врожденные дефекты у детей и нарушения иммунной системы.

Неопределенности при оценке воздействия

Чтобы вычислить дозу воздействия в результате аварии, необходимо оценить вероятность как аварии, так и ее последствий. Для хорошо изученных систем эти оценки относительно просты. Например, число автомобильных катастроф в США и их последствия могут быть оценены достаточно точно от года к году.

Однако при оценке вероятностей для новых сложных систем, содержащих компоненты с предполагаемой низкой частотой отказов, возникает много проблем. Внутренняя зависимость между отказами компонент подсистем может быть не очень ясной. В таких случаях предсказания частоты катастрофических событий, таких как плавление активной зоны ядерных реакто-

ров, делаются на основе ограниченных данных. Моделирование может помочь снизить эти неопределенности, но не исключить их. Иногда трудно предвидеть даже типы катастрофических аварий, которые могут произойти, не говоря уже об определении их вероятностей.

Оценки воздействия также зависят от того, насколько хорошо известны характеристики источников выбросов или концентраций загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду. Иногда данные отсутствуют из-за того, что не были проведены измерения. Например, в течение первых трех десятков лет работы предприятия Министерства энергетики (МЭ) по переработке урана около Ферналда, штат Огайо, измерения выбросов в атмосферу радия-226 не проводились. В других случаях качество официальных оценок может оказаться низким из-за неэффективного мониторинга, плохого содержания инструментов и множества других причин. Повторная оценка характеристик источников выбросов вредных веществ составляет существенную часть работы по оценкам доз и вредным воздействиям на здоровье групп людей, проживающих вне объекта, вблизи военных заводов МЭ. По сравнению с этим оценка воздействий химических веществ, попавших в пищевые продукты, зачастую относительно легка.

То же самое наблюдается в отношении персонала предприятий: соответствующих данных зачастую нет или они слишком ненадежны, чтобы сделать точные оценки доз воздействия на работников. Например, воздействие на работников нерадиоактивных вредных материалов, таких как фтористоводородная кислота, в результате технологических операций на многих ядерных военных заводах не может быть напрямую выяснено, поскольку никаких измерений по этим материалам не проводилось. Тем не менее, эти воздействия могут оказаться намного более серьезными, чем это представлялось.

Ограничения, присущие анализу риска

Неопределенности являются неотъемлемой частью анализа рисков, поскольку оценки рисков представляют собой в общем случае вероятностные утверждения. Оценивать неопределенности и выражать их принято явным образом. Если данные достаточно качественные, то вычисление неопределенностей — задача довольно простая. Однако, если данные низкокачественные или они отсутствуют, то такие вычисления намного более проблематичны и противоречивы, поскольку вместо реальных данных и анализа включают в себя субъективные суждения “экспертов”. Диапазон неопределенности в таких случаях может быть довольно большим.

Однако, даже если есть все необходимые данные, нужные для вычисления, по нескольким причинам ана-

См.: Анализ риска, с. 16

Французский отчет ставит под сомнение достоинства репроцессинга и MOX-топлива

Анни МАКХИДЖАНИ

Защитники атомной энергетики любят приводить в качестве примера ее успеха Францию. Во Франции АЭС вырабатывают 75—80 % всей электроэнергии страны, и это часто выставляется как символ предполагаемого широкого признания атомной энергетики французским народом¹. Однако начиная с конца 80-х годов наибольшее беспокойство у общественности стало вызывать обращение с ядерными отходами, когда французское правительство впервые попыталось начать местные обследования под возможные площадки для захоронения отходов. Эта обеспокоенность в свою очередь подхлестнула дебаты относительно постепенного сворачивания атомной энергетики. В таком контексте впервые официальное внимание было уделено более узкой, но крайне важной теме: обсуждению вопроса о прекращении репроцессинга.

Июльский отчет 2000 г. под названием *Etude economique prospective de la filiere electrique nucleaire* (“Исследование экономических перспектив сектора атомного электричества”) подготовлен по поручению французского премьер-министра Лионеля Жоспена с целью предоставления правительству² экономического анализа атомной энергетики, включая репроцессинг и использование MOX-топлива (смешанного [плутоний-уранового] оксидного топлива)³. Этот отчет известен как отчет Шарпина, по имени главного автора Жан-Мишеля Шарпина, который является главой Комиссии по планированию⁴. Соавторами являются Бенжамин Дессю, директор программы ECODEV (Экоразвитие) Национального центра научных исследований (НЦНИ)⁵, и Рене Пиллат, Haut Commissaire a l'energie atomique (Верховный комиссар по атомной энергетике).

Принимая во внимание разнообразие направлений, представляемых авторами, включая французский ядерный истеблишмент, отчет следует рассматривать как нечто вроде документа официального технического консенсуса. Во вступительной части отчета авторы заявляют:

“Мы не пытались определить наиболее желаемые результаты и уж тем более, как их достигнуть. Поэтому в данном исследовании не даются никакие рекомендации. [...] Мы не стремились направить выбор властей или даже оказать влияние на общественное мнение. Нашей целью было сделать возможным проведение необходимого демократического обсуждения на

основе проверенной информации и четко сформулированной технической, экономической и экологической аргументации”.

Хотя в отчете не давалось никаких рекомендаций, два его основных вывода относительно репроцессинга совершенно не вызывают сомнения. Более того, они основаны на данных, предоставленных самой ядерной промышленностью. Во-первых, репроцессинг и использование MOX-топлива экономически невыгодны и будут оставаться таковыми в обозримом будущем. Во-вторых, репроцессинг и MOX-топливо будут мало способствовать снижению запасов трансурановых радионуклидов в отходах, включая плутоний.

Отчет построен таким образом, чтобы дать сравнительный экономический анализ различных возможных режимов производства электроэнергии. В нем также дается оценка воздействия этих вариантов, в частности выбросов двуоксида углерода, на окружающую среду в долгосрочной перспективе. Ниже приводится краткое содержание первой главы отчета “Pour la France: l'heritage du passe” (“В отношении Франции: наследие прошлого”), в которой делаются два вывода относительно репроцессинга. Сначала — в качестве контекста — мы дадим краткий обзор положения дел в электроэнергетике и в области использования MOX-топлива во Франции.

Производство электроэнергии во Франции

Общее производство электроэнергии во Франции в 1997 году составляло 481 тВт·ч (тераватт-час)⁶, при этом 376 тВт·ч (78 %) поступило из атомного сектора. Сектор гражданской атомной энергетики представлен 58 реакторами с водой под давлением, из которых 20 в настоящее время используют MOX-топливо, 8 — в настоящее время не используют MOX-топливо, однако могут быть модифицированы с тем, чтобы использовать его, а оставшиеся 30 реакторов используют UO₂ (диоксид урана) в качестве топлива и не могут быть модифицированы для использования MOX-топлива.

Активная зона реакторов, в которые загружается MOX-топливо, на 30 % состоит из MOX-топлива, остальной объем занимает низко обогащенный уран. В объем MOX-топлива, потребляемого этими двадцатью

См.: Отчет, с. 10
Примечания, с. 16

реакторами, входит почти весь плутоний, выделяемый из французского отработанного топлива. В табл. 1 приведены данные по полному объему отработанного топлива, выгружаемого из французских реакторов, и количеству топлива, подвергаемого репроцессингу. Если бы MOX-топливо загружалось во все 28 реакторов, которые могут его использовать, то все приблизительно 1 100 т UO₂-отработанного топлива, ежегодно нарабатываемого во Франции, могли бы пройти репроцессинг. Однако во Франции уже накоплены значительные запасы неиспользованного выделенного плутония, поскольку гражданский репроцессинг начался намного раньше, чем широкое использование MOX-топлива.

Сценарии

Анализ в отчете проводится на основе семи предложенных сценариев. Шесть из них постулируют различные будущие уровни репроцессинга и использования MOX-топлива. Эти сценарии по существу делятся на две группы по три сценария в каждой и отличаются только предполагаемым сроком службы реакторов (41 год в сравнении с 45 годами). Седьмой, называемый S7, является фиктивным: в нем оценивается уровень цен на электричество во Франции, исходя из предположения, что репроцессинг никогда не начинали.

Разница в предполагаемых средних сроках службы настолько мала, что мы сосредоточим наше обсуждение здесь только на второй группе сценариев, S4—S6, в которой предполагается, что срок службы реакторов составляет 45 лет. Это же предположение делается в сценарии без репроцессинга, благодаря чему можно сравнивать затраты при разных уровнях репроцессинга и без репроцессинга.

В сценариях с S4 по S6 принимаются следующие предположения:

- ▶ в S4 полагают, что репроцессинг будет остановлен в 2010 г.;
- ▶ сценарий S5 соответствует современной ситуации во Франции, в которой репроцессингу подвергается

Таблица 1: Типы и объемы топлива, подвергнутого репроцессингу во Франции

Тип отработанного топлива	Ежегодная выгрузка, т	Объемы топлива, подвергнутые репроцессингу, т
UO ₂	~1 100	850
MOX	~100	0
Всего	1 200	850

Источник: Commission Nationale d'Evaluation Relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, Institutée par la loi 91-1381 du 30 décembre 1991, Rapport d'Evaluation N°4, October 1998.

70 % отработанного топлива, а из извлеченного плутония изготавливают MOX-топливо и облучают его в 20 реакторах;

- ▶ S6 соответствует ситуации, когда все вновь нарабатываемое отработанное топливо (но не старые запасы отработанного топлива, не прошедшие репроцессинг) подвергается репроцессингу и из извлеченного плутония изготавливают MOX-топливо и облучают его в 28 реакторах.

Заметьте, что ни в одном из сценариев не предполагается досрочного прекращения репроцессинга. В отчете отмечается, что прежде чем отвергнуть его, авторы рассмотрели сценарий, в котором прекращение репроцессинга намечалось на 2001 г. — дата обновления контрактов на репроцессинг французской энергетической компании Electricite de France. Доводы, приводимые в пользу того, чтобы не рассматривать досрочную остановку репроцессинга, заключаются в том, что резкий останов повлек бы за собой многочисленные технические (хранение облученного топлива), социальные и юридические проблемы. Роланд Лягард, уполномоченный по разработке и координации политики по этой проблеме от министра по окружающей среде Доминика Войнета, недавно поднял вопрос о возможности прекращения репроцессинга в 2002 г.

Экономический анализ

В табл. 2 приведены основные данные по затратам в сценариях S4—S7, где предполагается один и тот же 45-летний срок службы реактора. Приведенные затраты включают в себя затраты на вывод из эксплуатации с отсрочкой (немедленный вывод из эксплуатации стоит дороже). Все показатели затрат приведены во французских франках 1999 г.

Из этих результатов можно сделать несколько выводов. Ясно, что без репроцессинга экономическая ситуация во Франции была бы лучше. Разница в величине совокупных затрат между полным репроцессингом, о чем мечтает ядерный истеблишмент, и отсутствием репроцессинга достигает 165 миллиардов франков (около 25 миллиардов долларов, исходя из 6,55 франков за один доллар). В среднем по всему периоду срока службы всех реакторов (45 лет) эта разница достигает примерно 3,7 миллиардов франков в год. Однако MOX-топливо используется только в некоторых реакторах и только в течение некоторой части срока их службы. Следовательно, разница в затратах в сценариях с полным репроцессингом и при его отсутствии из расчета на реактор, использующий MOX-топливо, на год использования MOX-топлива составляет приблизительно 50 миллионов долларов (включая комплексные издержки репроцессинга).

Остановка репроцессинга в 2010 г. могла бы сэкономить в совокупности почти 40 миллиардов франков

Таблица 2: Стоимость и производство электроэнергии при различных схемах репроцессинга во Франции

Сценарий	S4 (конец репроцессинга в 2010 г.)	S5 (70%-й репроцессинг)	S6 (полный репроцессинг)	S7 (без репроцессинга)
Совокупные издержки, миллиарды франков	2 888	2 910	2 927	2 762
Общее совокупное производство электроэнергии, миллиард кВт·ч	20 238	20 238	20 238	20 238
Средняя стоимость электроэнергии, сантим/(кВт·ч)	14,27	14,38	14,46	13,65

Примечание: Обменный курс доллара к франку непостоянный. Приблизительный коэффициент перевода можно получить исходя из предположения, что один доллар США приблизительно равен одному евро. Евро и франк имеют фиксированное отношение: 1 евро равен 6,55 франкам. Один сантим равен 0,15 цента.

Отчет
со с. 10

(6 миллиардов долларов), тогда как увеличение повторного использования плутония с 70 до 100 % из нарабатываемого ежегодно UO_2 -отработанного топлива стоила бы дополнительно 17 миллиардов франков (2,6 миллиарда долларов). К сожалению, цифры по прекращению репроцессинга в 2001 или 2002 г. не приводятся. Однако результаты экстраполяции приведенных данных указывают на то, что можно было бы сэкономить значительно больше.

Анализ материальных балансов

В табл. 3 приведены данные по прогнозируемым запасам плутония и америция в тоннах к концу срока службы реакторов, который предположительно составляет 45 лет.

Следовательно, если сравнивать сценарий с максимальным репроцессингом и сценарий без репроцессинга, запас плутония сократится только на 153 т (S6 в сравнении с S7) — около 23 %. Разница в запасах плутония при сценарии с постепенным сворачиванием репроцессинга к 2010 г. и при сценарии с полным репроцессингом еще меньше — 15 %. Причины, по которым репроцессинг так мало влияет на запасы плутония, следующие:

- ▶ Отработанное MOX-топливо все еще содержит большое количество остаточного плутония.
- ▶ Во Франции накопились запасы плутония, выделенного за длительный период, когда еще не было реакторов, использующих MOX-топливо, или их было очень мало⁷. Франция не обладает достаточным запасом реакторных мощностей, чтобы использовать этот накопленный запас. Более того, хранящийся в течение длительного времени плутоний содержит америций-241, сильный гамма-излучатель, получающийся в результате распада плутония-241. Его присутствие опасно для работников, и до того, как начать изготовление MOX-топлива, потребуется удалить его из плутония.
- ▶ Планы Франции по использованию больших объемов плутония в реакторах-размножителях развалились из-за серьезных технических проблем и очень больших затрат на программу реакторов-размножителей. Звезду этой программы — Суперфеникс, до настоящего времени крупнейший реактор-размножитель в мире, Франция остановила навсегда задолго до первоначального намеченного срока.
- ▶ Часть плутония в отработанном топливе Франция не планирует выделять, поскольку без вовлечения это-

См.: Отчет, с. 16

Таблица 3: Количества плутония и америция в не прошедшем репроцессинг отработанном топливе (UO_2 и MOX), нарабатываемом при различных схемах репроцессинга во Франции

Сценарий	S4 (конец репроцессинга в 2010 г.)	S5 (70%-й репроцессинг)	S6 (полный репроцессинг)	S7 (отсутствие репроцессинга)
Конечные запасы плутония и америция, т	602	555	514	667

Примечание. Вклад америция в указанные количества составляет несколько процентов.

Американо-российское соглашение по утилизации плутония

Мишель БОЙД

Первого сентября 2000 года бывший вице-президент США Ал Гор и российский премьер-министр Михаил Касьянов подписали американо-российское соглашение по утилизации плутония¹. Согласно договору 68 тонн оружейного плутония — по 34 т с каждой стороны — должны быть переведены в формы, не пригодные для использования при производстве ядерного оружия, либо путем его облучения в качестве топлива в реакторах (МОХ-топливо), либо путем иммобилизации его в стеклянные формы совместно с высокоактивными радиоактивными отходами.

США решили использовать 25,57 т плутония в качестве МОХ-топлива, а остальное количество (8,43 т)

иммобилизовать, тогда как Россия все 34 т своего плутония будет использовать для производства МОХ-топлива. Некоторые характеристики запасов избыточного оружейного плутония приведены в таблице.

Согласно соглашению, иммобилизованный плутоний извлекать нельзя будет уже никогда, однако после того, как все ее 34 т плутония пройдут утилизацию, страна может подвергнуть репроцессингу свое отработанное МОХ-топливо. Российское Министерство атомной энергии (Минатом) ясно заявило, что оно намерено подвергнуть репроцессингу МОХ-топливо как часть первого шага в развитии “замкнутого” ядерного топливного цикла (см. статью на с. 1). С учетом графика выполнения программы по МОХ-топливу, предусмотренной в соглашении, Россия сможет начать повторно извлекать остаточный плутоний из отработанного МОХ-топлива к 2025 г., а возможно, и раньше. Несмотря на то, что большая часть объявленного излишка плутония намечена для использования в легководяных реакторах в США и России, Россия также намеревается использовать некоторую часть своего МОХ-топлива в реакторах-размножителях на быстрых нейтронах². МОХ-топливо для реакторов на быстрых нейтронах содержит значительно больший процент плутония, чем для легководяных реакторов.

Два центральных вопроса в соглашении, финансирование и ответственность за возможные аварии при выполнении российской программы, были отложены для решения в процессе последующих переговоров, и до тех пор, пока они не будут решены, России не сможет приступить к выполнению программы по МОХ-топливу. Более того, условия соглашения предусматривают, что в течение одного года должна быть достигнута договоренность об увеличении темпов утилизации вдвое, однако в настоящее время не совсем ясно, как это будет сделано. Ниже приведено более детальное обсуждение этих трех вопросов.

Финансирование

План финансирования российской МОХ-программы был оставлен для последующих переговоров, с целью заключения многостороннего соглашения к 1 сентября 2001 г. Если соглашение не будет заключено к марту следующего года, США и Россия могут либо согласиться изменить графики выполнения своих программ применительно к новым условиям, либо совсем прекратить программы.

См.: **Соглашение**, с. 13
Примечания, с. 15

ОБЪЕМЫ И МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ

По Соединенным Штатам Америки

Объем, т	Форма	Метод утилизации
25,00	Оружейные детали и чистый металл	Облучение в МОХ-топливе
0,57	Оксид	Облучение в МОХ-топливе
2,70	Примесный металл	Иммобилизация
5,73	Оксид	Иммобилизация

По Российской Федерации

Объем, т	Форма	Метод утилизации
25,00	Оружейные детали и чистый металл	Облучение в МОХ-топливе
9,00	Оксид	Облучение в МОХ-топливе

Формы

Оружейные детали из плутония и чистые металлы: плутоний, находящийся внутри либо извлеченный из элементов вооружения или частей оружия, и металлический плутоний, предназначенный для изготовления частей оружия. Оружейные детали из плутония могут быть сплавлены с другими элементами, особенно с галлием.

Примесные металлы: плутоний, сплавленный с одним или несколькими другими элементами в виде гомогенного металла, и не сплавленный металлический плутоний, который не является чистым металлом.

Оксид: плутоний в форме двуоксида плутония.

Источник: *Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки об утилизации плутония, заявленного как плутоний, не являющийся более необходимым для обороны, обращении с ним и сотрудничеству в этой области.* 1 сентября 2000 г.

По текущим оценкам, стоимость российской программы по МОХ-топливу составляет 1,7—2,5 миллиардов долларов, тогда как американская программа оценивается приблизительно в 4 миллиарда долларов³. США выделили 200 миллионов долларов на реализацию российской программы и пообещали еще 200 миллионов долларов, которые пока не одобрены Конгрессом. В июле прошлого года на встрече в Окинаве (Япония) США и Россия обсуждали вопрос многостороннего финансирования российской МОХ-программы с остальными лидерами стран “большой восьмерки” (Великобритания, Канада, Франция, Германия, Италия и Япония). Великобритания взяла на себя обязательство выделить 100 миллионов долларов, а Франция собирается внести 60 миллионов долларов, что, с учетом американского вклада, составит 560 миллионов долларов из 900 миллионов, требуемых для начала разработки и создания российских предприятий по производству МОХ-топлива⁴.

Страны “большой восьмерки” договорились разработать план международного финансирования российской программы прежде чем они встретятся снова в Генуе (Италия) в июле следующего года. В рамках экспертной группы по ядерному нераспространению стран “большой восьмерки” была создана специальная комиссия по разработке пакета финансовых предложений и многосторонней структуры проекта, включая такие вопросы, как структура управления проектом и обеспечение прав стран-доноров. Управление реализацией российской программы по МОХ-топливу было предложено Европейскому банку реконструкции и развития⁵.

Ответственность при авариях

Соединенные Штаты и Россия еще не договорились о том, кто будет нести финансовую ответственность по любым претензиям, связанным с российской программой по МОХ-топливу. В США в соответствии с законом Прайса—Андерсона в случае аварии владельцам АЭС выделяется до 10 миллиардов долларов⁶. С учетом современного состояния экономики России вряд ли можно ожидать такого, хотя и недостаточного для решения проблем в случае крупной ядерной аварии, уровня финансовой компенсации. Более того, уровень правового надзора за МОХ-программой в России может быть ниже. Недавно в Государственную думу был внесен на рассмотрение законопроект, который в случае, если он пройдет, передаст право лицензировать мероприятия, связанные с гражданской атомной энергетикой, от Госатомнадзора (ГАН) — федерального надзорного органа — Минатому.

Хотя Минатом предпочел бы использовать МОХ-топливо в реакторах на быстрых нейтронах “нового по-

коления”, на строительство которых потребовалось бы много лет, он согласился с планом США использовать МОХ-топливо в существующих легководяных реакторах (ЛВР). Учитывая то, что США финансирует (по крайней мере, частично) этот план, авария на российском ЛВР, использующем МОХ-топливо, может вызвать серьезный политический кризис между двумя странами по вопросу ответственности, даже если будет достигнута договоренность.

В соглашении предусматривается, что США и Россия должны достичь договора об ответственности не позднее вступления в силу многостороннего финансового соглашения, которое должно быть заключено к 1 сентября 2001 г. До тех пор, пока вопрос об ответственности не будет разрешен, помощь России ограничивается на уровне предпроектных конструкторских работ, результаты которых ей не разрешено использовать при строительстве или эксплуатации АЭС, работающих на МОХ-топливе.

Темпы утилизации

В соглашении 31 декабря 2007 г. определяется как намеченная дата начала эксплуатации предприятий по утилизации плутония с минимальным объемом утилизации в две тонны в год в каждой стране. Россия продвигала “западный вариант”, по которому МОХ-топливо, изготовленное в России, должно было использоваться в западноевропейских реакторах. Однако французская компания по репроцессингу Cogema, которая изготавливает МОХ-топливо для западных реакторов, стала возражать против этого плана, поскольку благодаря субсидиям российское МОХ-топливо продавалось бы по более низкой цене. Позже Россия согласилась использовать МОХ-топливо в своих собственных реакторах прежде, чем продавать его в другие страны⁷.

Как показывает американско-российское соглашение по утилизации высокообогащенного урана⁸, коммерческая сторона программ по утилизации может замедлить темпы утилизации. В соответствии с недавним отчетом Главного бюджетно-контрольного управления, поставки российского низкообогащенного урана (НОУ) в США были задержаны, поскольку Россия была не удовлетворена уровнем поступлений, получаемых ею по соглашению. Кроме этого, USEC Inc., частная американская компания, выполняющая коммерческий контракт, стала подумывать об отказе от роли исполнительного уполномоченного в 1999 г., поскольку снижение рыночных цен на НОУ привело к снижению ее доходов⁹.

Соглашение по плутонию также предусматривает разработку США и Россией детального плана действий к 1 сентября 2001 г., с целью, по крайней мере, удвоения темпов утилизации. Приведем несколько вариантов повышения этих темпов.

- ▶ **Экспортирование МОХ-топлива для использования в других странах:** Минатом особенно заинтересован в этом варианте. Швеция и Канада выразили интерес к использованию российского МОХ-топлива в своих реакторах. Как Россия, так и США отправили образцы МОХ-топлива в Канаду для проведения испытаний в реакторе КАНДУ, однако США решили по утилизации не экспортировать свое МОХ-топливо в рамках своей программы.
- ▶ **Увеличение числа реакторов, использующих МОХ-топливо, в России:** В настоящее время этот вариант кажется маловероятным, поскольку число российских реакторов, которые могут использовать МОХ-топливо, — ограничено, и Россия не обладает финансовыми средствами для завершения строительства нескольких реакторов, ведущегося уже на протяжении многих лет. Помощь США по соглашению не включает финансирование завершения строительства этих или строительства новых реакторов. Однако соглашение разрешает США помогать в модификации существующих российских реакторов, с

- тем чтобы они могли использовать МОХ-топливо.
- ▶ **Использование активной зоны, состоящей из МОХ-топлива более, чем на одну треть:** Могут быть разработаны новые реакторы с активной зоной, на 100 % состоящей из МОХ-топлива, однако все существующие российские реакторы потребуют модификации, с тем чтобы они могли использовать хоть какое-либо количество МОХ-топлива. Даже частичное содержание МОХ-топлива в активной зоне ЛВР делает эксплуатацию и контроль за реактором более сложными.
- ▶ **Использование “усовершенствованных ядерных реакторов”:** Минатом заявил, что он хочет построить “новое поколение” реакторов-размножителей. General Atomics и Framatome; кроме того, Министерство энергетики (МЭ) США, Минатом и Fiji Electric ведут исследования в области газотурбинного модульного гелиевого реактора, возможно, для использования МОХ-топлива после 2010 г.¹⁰
- ▶ **Увеличение мощности предприятий по преобразованию и изготовлению МОХ-топлива.**



См.: **Примечания**, с. 15

ЦИТАТЫ ИЗ АМЕРИКАНО-РОССИЙСКОГО СОГЛАШЕНИЯ ПО УТИЛИЗАЦИИ ПЛУТОНИЯ

“Ни одна из Сторон не извлекает плутоний, содержащийся в отработавшем плутониевом топливе, до тех пор, пока эта Сторона не выполнила обязательства, изложенные в пункте 1 статьи II настоящего Соглашения (утилизировать не менее тридцати четырех (34) метрических тонн утилизируемого плутония)”.

— Пункт 2, статья VI

“Ни одна из Сторон не извлекает утилизируемый плутоний, содержащийся в иммобилизованных формах”.

— Пункт 3, статья VI

“Содействие, оказываемое Правительством Соединенных Штатов Америки {Российской Федерации}, направляется на такие виды деятельности как исследование, проектирование, разработка, лицензирование, строительство и/или модификация установок (включая модификацию ядерных реакторов) и технологических процессов, систем и инфраструктуры, связанной с этой деятельностью”.

— Пункт 1, статья IX

“Для темпа утилизации {две (2) метрические тонны в год}, Стороны после вступления в силу настоящего Соглашения сотрудничают с целью заключения в течение одного (1) года многостороннего соглашения, определяющего положения по оказанию содействия, необходимого для этого темпа”.

— Пункт 8, статья IX

“В случае, если Правительство Российской Федерации приостановит осуществление любой деятельности..., Правительство Соединенных Штатов Америки имеет право пропорционально приостановить осуществление своей деятельности по настоящему Соглашению”.

— Пункт 14, статья IX

“Никакое отработавшее плутониевое топливо не перерабатывается ни одной из Сторон после прекращения действия настоящего Соглашения, если такая переработка не станет предметом мониторинга на основе договоренности Сторон...”

— Пункт 7, статья XIII

“Стороны продолжают переговоры по положениям об ответственности, которые будут применяться ко всем претензиям, которые могут возникнуть в результате осуществления деятельности в соответствии с Соглашением, и стремятся достичь договоренности, содержащие эти положения в письменной форме в наиболее реальные сроки, и, в любом случае, не позднее вступления в действие многостороннего соглашения...”

— Приложение по оказанию содействия,
Раздел II, пункт 1

“До вступления в действие договоренности, содержащей положения об ответственности, упомянутой в пункте 1 данного раздела: а) деятельность по оказанию содействия в рамках Соглашения ограничивается соответствующими работами на стадии проектных работ, предшествующих строительству; б) ни одна из Сторон не обязана в рамках Соглашения строить, модифицировать или эксплуатировать установки по утилизации, включая реакторы; в) Российская Федерация никоим образом не использует результаты проектных работ, предшествующих строительству, в рамках Соглашения, в том числе в целях строительства, модификации или эксплуатации установки по утилизации, включая реакторы”.

— Приложение по оказанию содействия,
Раздел II, пункт 2

Источник: Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки об утилизации плутония, заявленного как плутоний, не являющийся более необходимым для обороны, обращению с ним и сотрудничеству в этой области. 1 сентября 2000 г.

В своих предыдущих аналитических работах IEER показал, что иммобилизация плутония одним из нескольких способов была бы более безопасным, быстрым и дешевым путем перевода выделенного плутония в формы, не пригодные для производства ядерного оружия⁵. Основной целью этой иммобилизации должно быть предотвращение хищения плутония неядерными государствами или группами террористов. Идея иммобилизации всего выделенного гражданского плутония и всего избыточного военного плутония не получила развития по двум причинам:

- ▶ Обычно считают, что Россия не примет никакой альтернативы, кроме использования плутония в качестве топлива. Поэтому вариант с МОХ-топливом из избыточного военного плутония видится как единственно возможный для перевода российского оружейного плутония в формы, не пригодные для использования при производстве ядерного оружия (в данном случае — отработанное топливо).
- ▶ Лобби сторонников плутония на Западе и в Японии непоколебимы в своей приверженности созданию инфраструктуры МОХ-топлива с использованием фондов ядерного нераспространения.

Несмотря на то, что Минатом действительно хочет использовать западные фонды для создания МОХ-топливной инфраструктуры, это не означает, что другие предложения будут отвергнуты всеми составляющими российского общества и правительства. Например, никогда российскому правительству официально не предлагалось на рассмотрение предложение по покупке всего российского выделенного гражданского плутония и всего избыточного оружейного плутония для иммобилизации и хранения в России под международными га-

рантиями. Покупка 80 тонн плутония стоила бы, самое большее, два миллиарда долларов, если оценивать его по максимальной теоретически возможной цене (т.е., если бы он волшебным образом был бы переведен в МОХ-топливо по нулевой стоимости)⁶. Иммобилизация плутония стоила бы сопоставимую сумму. Существующие договоренности по сотрудничеству в области ядерной безопасности указывают на готовность России рассмотреть программы, которые бы она иначе не приняла. Однако, никакого предложения с западной стороны по покупке российских излишков плутония для иммобилизации российскому правительству официально сделано не было. Такое предложение, в сочетании с полным прекращением репроцессинга во всем мире, заслуживает неотложного рассмотрения в интересах ядерного нераспространения, безопасности и экологии.



1. Arjun Makhijani, *Plutonium End Game: Managing Global Stocks of Separated Weapons-Usable Commercial and Surplus Nuclear Weapons Plutonium*. Takoma Park, Maryland: Institute for Energy and Environmental Research, January 2001. Можно найти в Интернете: <http://www.ieer.org/reports/pu/index.html>.
2. U. S. DOE, *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Usable Fissile Material Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives*, DOE/NN-007. Washington, DC: U.S. Department of Energy, January 1997, p. 37.
3. Процесс, конечно, теоретически ограничен имеющимся объемом урана-238, которого в природе имеется в избытке.
4. Источник цитат: *Strategy for the Development of Power Engineering in Russia for the First Half of the 21st Century: Principal Provisions*. Moscow: Ministry of Atomic Power Engineering of the Russian Federation, 2000, pp. 17—18.
5. Технические анализы IEER и комментарии по утилизации оружейного плутония можно найти в Интернете: <http://www.ieer.org/latest/pu-disp.html>.
6. Фактическая экономическая ценность плутония как топлива (либо гражданского, либо военного происхождения) отрицательна, поскольку он обходится дороже, чем урановое топливо.

Соглашение со с. 14

1. Полное название соглашения: *Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки об утилизации плутония, заявленного как плутоний, не являющийся более необходимым для обороны, обращение с ним и сотрудничеству в этой области. 1 сентября 2000 г.* Его можно найти на английском в Интернете по адресу <http://twilight.saic.com/md/bilatagreement1.htm> (pudispagree.pdf).
2. В соглашении конкретно указываются реактор БОР-60 в Димитровграде и реактор БН-600 в Заречном. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах могут работать в режиме с увеличением или в режиме с уменьшением чистого выхода плутония, в зависимости от того, как эксплуатируется реактор, а также от конфигурации его активной зоны и зоны воспроизводства.
3. Оценки затрат российской стороны взяты из *Preliminary Cost Assessment for the Disposition of Weapon-Grade Plutonium Withdrawn from Russia's Nuclear Military Programs*, Joint US-Russian Working Group on Cost Analysis and Economics in Plutonium Disposition, April 2000, p. iii. Сайт в Интернете <http://www.doe.md.com/> (под рубрикой "Work with Russia"). Оценки затрат американской — из Laura Holgate, Presentation to the Advisory Board to the Secretary of Energy on Plutonium Disposition in Russia, March

- 13, 2000. Стенограмма предоставлена Кевином Кампсом, Nuclear Information and Resource Service, Вашингтон.
4. Hisane Masaki, "G-8 to tackle disposal of Russian plutonium". *Japan Times*, October 25, 2000; *Post-Soviet Nuclear & Defense Monitor*, Nov. 13, 2000, p. 15.
5. *NuclearFuel*, Dec. 11, 2000, p. 7.
6. По состоянию на 20 августа 1998 года, общий максимальный страховой иск составлял 9,43 миллиарда долларов. (Источник: NUREG/CR-6617: The Price-Anderson Act — Crossing the Bridge to the Next Century: A Report to Congress, Prepared by ICF Incorporated for U.S. Nuclear Regulatory Commission, August 1998.) Закон Прайса—Андерсона был принят в 1957 г. как поправка к Закону об атомной энергии. Последняя поправка была внесена в 1988 г. с принятием закона о поправках к закону Прайса—Андерсона 1988 г. (Public Law 100-408).
7. *NuclearFuel*, Dec. 11, 2000, p. 9.
8. Полное название: *Соглашение между Правительством Соединенных Штатов Америки и Правительством Российской Федерации относительно утилизации высоко обогащенного урана, извлеченного из ядерного оружия (18 февраля 1993 г.)*.
9. General Accounting Office, *Implications of the US Purchase of Russian Highly Enriched Uranium*, GAO-01-148, December 2000.
10. *NuclearFuel*, Dec. 11, 2000, p. 9.

го плутония в программу по трансмутации она не сможет его использовать⁸.

Выводы IEER

Отчет Шарпина позволяет общественности впервые детально ознакомиться с официальными данными по репроцессингу и использованию МОХ-топлива во Франции. Выводы, сделанные в нем, явно указывают на путь в сторону более раннего прекращения репроцессинга, поскольку никакие важные проблемы в области энергетики и обращения с радиоактивными отходами не могут быть решены с его помощью. По-видимому, быстрое сворачивание репроцессинга и, соответственно, прекращение использования МОХ-топлива может оказаться в экономических интересах Electricite de France, которая, как и все другие энергетические компании, сталкивается с наступлением эры отмены государственного регулирования и установлением конкуренции. Компания, которая, вероятно, будет против такой политики, это Cogema — в основном государственная компания, в чье ведение входят все предприятия по репроцессингу и изготовлению МОХ-топлива во Франции.



Анализ риска со с. 8

Анализ риска не должен быть единственным основанием для принятия решения. Во-первых, в нем не делается различий между добровольными и недобровольными рисками. Между этими рисками существуют принципиальные общественные, политические и этические различия. Можно добровольно потерять сотню долларов, делая ставки с большим риском на скачках, но оправданно не желать потерять и доллара при грабеже.

Второй фундаментальной проблемой, связанной с анализом риска, является то, что события с катастрофическими последствиями, но с низкой вероятностью, рассматриваются наравне с событиями с незначительными последствиями, но с высокой вероятностью. Это обусловлено тем, что простой риск рассчитывается как произведение вероятности события и оцененного последствия. Таким образом, редкие, крупномасштабные аварии, наподобие чернобыльской или в Бхопале, рассматриваются наравне с более вероятной периодической утечкой небольшого количества радионуклидов или химических веществ. Эта проблема оказывается наиболее серьезной, когда последствия аварии, такие как потеря жизни или увечье, или широкомасштабное загрязнение подземных вод непоправимы.

Анализ рисков обычно уравнивает риски, которые простираются далеко в будущее, с рисками, которым

1. Например, см. документальный фильм «Ядерная реакция», показанный по PBS 15 апреля 1997 г.
2. Сегодняшнее французское правительство представляет собой коалицию из пяти партий левой ориентации, включая социалистическую партию и партию зеленых. Министерство окружающей среды возглавляет член партии зеленых Доминик Воннет.
3. Jean-Michel Charpin, Benjamin Dessus and Rene Pellat, *Etude economique prospective de la filiere electrique nucleaire*, La Documentation francaise, July 2000. Доклад можно найти на французском в Интернете: <http://www.plan.gouv.fr>.
4. Комиссия по планированию подчиняется премьер-министру. В ее задачу входит помощь в выборе направлений решения экономических и социальных вопросов путем предоставления экспертных исследований.
5. ИЦНИ связан с правительством и имеет отделения в разных районах Франции. Он проводит исследования во многих областях, включая физические и биологические науки, здравоохранение, а также экономику и общественные науки.
6. Один тераватт равен одному триллиону ватт (10^{12} или 1 000 000 000 000 Ватт).
7. К концу 1996 г. эти накопленные запасы составляли приблизительно 35 т. Если включить зарубежный плутоний, то эта величина возрастает до почти 65 т.
8. Краткое содержание аналитической работы IEER по трансмутации как методу обращения с радиоактивными отходами (включая проблемы охраны окружающей среды, обращения с отходами, стоимости и ядерного нераспространения) можно найти в ЭБ, № 13, 2000 г. или в Интернете по адресу <http://www.ieer.org/ensec/no-13/no13russ/transmut.html>.

подвергается поколение, непосредственно извлекающее выгоду из той или иной деятельности. Аналогично, риски, которые несет одна часть общества, уравниваются с преимуществами, получаемыми другой частью общества, даже когда распределение рисков является, в сущности, дискриминирующим. Например, сельское население и этнические меньшинства зачастую несут бремя непропорционального риска от деятельности, преимуществами которой пользуются городской средний класс и богатые люди.

В общем, анализ рисков может быть полезным количественным руководством при принятии решения, если в его основу положена добротная наука и если он дополняется социальными и политическими процессами принятия решения, учитывающими присущие ему ограничения.



1. Эта статья впервые появилась в англоязычном бюллетене IEER *Science for Democratic Action*, vol. 2, no. 2.
2. John J. Cohnsen and Vincent T. Covello, *Risk Analysis: A Guide to Principles and Methods for Analyzing Health and Environmental Risks*, Council on Environmental Quality, Executive Office of the President, Washington, D.C. 1989. (Имеется в National Technical Information Service, Springfield, Virginia). Полезный (хотя довольно некритичный) обзор анализов рисков, в который вошло много соответствующих нормативных положений и рабочих материалов. Я бы хотел поблагодарить Джима Вернера за обширные комментарии по черновому варианту этой статьи.