

# Обзор воздействия атомной энергии на окружающую среду

Эссам Э. Эль-Хиннави

Энергия уже давно считается важным фактором удовлетворения основных потребностей человека, а также стимулирования и поддержания роста экономики и уровня жизни до такой степени, что часто страна отождествляет свое благосостояние с ее огромной и все увеличивающейся потребностью в энергии. Статистические данные о потреблении энергии в мире за последние годы [1] показывают, что мировое потребление энергии на душу населения почти удвоилось за последние 30 лет, а существующие тенденции свидетельствуют о том, что это потребление будет расти еще более быстрыми темпами в будущем. Это увеличение является естественным результатом растущей социально-экономической деятельности и повышения уровня жизни.

Растущие потребности в энергии в мире удовлетворяются до сих пор во все возрастающей степени путем использования ископаемого топлива и гидроэнергии. Атомная энергия осваивается и используется в промышленном масштабе примерно в течение двух десятилетий и удовлетворяет небольшую часть потребностей в электроэнергии. Общая установленная электрическая мощность атомных электростанций в мире в 1976 году составляла 79,9 ГВт (эл), получаемая на 187 энергетических реакторах, действующих в 19 странах [2].

В Таблице I приводятся самые последние данные о возможной электрической мощности атомных электростанций в конце настоящего — начале будущего столетия. Эти данные свидетельствуют о широких возможностях, которые становятся еще более широкими после 1985 года в результате возможных изменений в темпах роста экономической деятельности и вследствие ряда других факторов, которые могут повлиять на темпы ввода в эксплуатацию атомных электростанций. В соответствии с оценками МАГАТЭ ядерная энергетика будет составлять примерно 11-13% общей электрической мощности в мире в 1985 году и примерно 17-20% — в 2000 году.

В местном и, в некоторых случаях, в региональном масштабе факторы производства и использования электроэнергии, влияющие на окружающую среду, приобрели огромное значение и служат напоминанием о том, что можно ожидать в более широком масштабе, если не будет уделено достаточно серьезного внимания последствиям для окружающей среды удовлетворения потребностей человека в энергии. На основании последних исследований влияния энергии на окружающую среду стало очевидным, что отдельные государства не являются изолированными в этом отношении и что действия одной страны могут легко нанести ущерб окружающей среде в соседнем государстве. На основании этих факторов, пробудивших интерес общественности к этим вопросам, возникла необходимость попытаться разумно изучить аспекты влияния общества с развитой энергетикой на окружающую среду. Хотя атомные электростанции не выбрасывают в атмосферу летучей золы или ядовитых газов как электростанции, работающие на ископаемом топливе, утечка радиоактивности из продуктов ядерного деления является основным поводом для беспокойства общественности в связи с расширением использования атомной энергии, несмотря на строгие меры контроля и предосторожности. Предпринимались многие попытки установить приемлемые уровни радиоактивности для окружающей среды или для человека, и, хотя рекомендации МКРЗ находят всеобщее применение при оценке опасностей профессионального облучения, их распространение на большие группы населения и окружающую среду в целом подвергается широкой критике.

Д-р Эль-Хиннави является старшим специалистом в области программного планирования, Программа ООН в области окружающей среды, Найроби.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

В настоящее время в реакторах преобладающего типа используется топливо из обогащенной двуокиси урана и вода в качестве замедлителя и теплоносителя. Используя воду, можно получать пар непосредственно в реакторе (BWR) или можно переносить его тепло во внешний парогенератор (PWR). Кроме этих легководных реакторов (LWR) разрабатываются другие типы реакторов, основанные преимущественно на использовании графита или  $D_2O$  в качестве замедлителя. К экспериментальным системам или прототипам относится реактор с рециклом плутония, в котором топливо частично или целиком состоит из плутония, а также реакторы-размножители на быстрых нейтронах (например LMFBR), в которых топливо представляет собой смесь двуокиси плутония и природной или обедненной двуокиси урана. Последний тип реактора предназначен для производства большого количества расщепляющегося материала, пригодного в качестве реакторного топлива, по сравнению с потребляемым количеством.

"Ядерный топливный цикл" относится ко всей программе, начиная от добычи и переработки урановых руд, производства тепловыделяющих элементов для реакторов, перевозки и переработки облученного топлива и кончая обращением с отходами, образующимися на всех этапах цикла. В этой статье рассматриваются вопросы воздействия на окружающую среду в связи со всеми этими этапами.

### Добыча и переработка урановых руд

Производство урана в 1975 году составило примерно 26 000 тонн и, согласно расчетам, достигнет 40 000 тонн в 1980 году [4, 6-8]. Современные прогнозы говорят о том, что потребности в дешевом урановом топливе к 1985 году превзойдут возможности производства урана. Общие потребности в уране оценены примерно в 0,8-1 млн. тонн в 1990 году и 2-3 млн. тонн - к 2000 году [6, 8]. В настоящее время не существует единого мнения в отношении того, имеется ли фактически такое количество дешевого урана в верхних слоях земной коры, из которых он может добываться в промышленных масштабах. Во всяком случае, представляются неизбежными более активные меры по изысканию и эксплуатации новых запасов с целью удовлетворения прогнозируемых растущих потребностей атомной энергетики [6, 9]<sup>1</sup>.

Урановые руды добываются методом подземных разработок, открытых разработок и методом выщелачивания в зависимости от геологического состава руды. Для атомной электростанции мощностью 1000 МВт (эл) (LWR) требуется примерно 50 000 - 80 000 тонн урановой руды (содержащей 0,2% U). В течение всего срока эксплуатации станции, составляющего примерно 30 лет, эта цифра составит примерно 1,5 млн. тонн. Это соответствует необходимости разработки примерно 1000 акрофутов урановой руды по сравнению примерно с 50 000 акрофутами угля, для электростанции такой же мощности, работающей на угле [10]<sup>2</sup>.

Таблица I. Оценочная мощность ядерных электростанций (ГВт (эл)) на 1985 и 2000 гг.

Год	ОЭСР [3]	ОЭСР - АЯЭ/МАГАТЭ [4]	ЕРДА США [5]	МАГАТЭ [6]
1985	538-700	479-530	390-488	350-400
2000	2800-4100	2005-2480	1695-2250	1500-1800

<sup>1</sup> Положение аналогично и с другими металлами, применяемыми в атомной промышленности (например, цирконий, бор, кадмий, графит). Необходимо наладить правильное использование этих запасов с целью удовлетворения растущих потребностей атомной и других отраслей промышленности.

<sup>2</sup> 1 акро-фут представляет собой объем жидкости или твердого вещества, необходимый для заполнения площади в 1 акр глубиной в 1 фут. 1 акр равен  $4,047 \times 10^3 m^2$ ; 1 фут равен  $3,048 \times 10^{-1} m$ .

Факторы воздействия на окружающую среду, связанные с добычей урана, можно подразделить на: воздействие на сушу и воду (через промывочную и отработанную воду, оставшуюся в результате рудничного водоотлива, и/или промывки скважин) и опасность профессиональных заболеваний. Радон, получаемый в результате радиоактивного распада  $^{226}\text{Ra}$ , встречающийся в рудах, считается основным фактором увеличения случаев заболевания раком среди горняков, добывающих уран [11-14]. С облучением обычно борются с помощью либо естественной, либо искусственной вентиляции, и оно поддерживается в допустимых пределах концентрации радона. Борьба с пылью, образующейся во время ведения горных работ, также необходима для предотвращения воздействия опасных уровней как кремнезема, так и радиации.

Необходимо отметить, что воздействие на окружающую среду и опасность профессиональных заболеваний, связанная с добычей угля (необходимого для работы электростанций мощностью 1000 МВт (эл), очевидно, более значительны, чем эти же факторы, связанные с добычей урана (необходимого для работы электростанций такой же мощности). Число несчастных случаев со смертельным исходом на шахтах, приходящихся на одну тепловую электростанцию, работающую на угле, в три раза больше числа несчастных случаев со смертельным исходом, связанных с эксплуатацией атомных электростанций [15]. Число "смертей в результате воздействия окружающей среды" среди шахтеров-угольщиков (от пневмокониоза) значительно выше, чем у шахтеров, работающих в урановой промышленности.

В процессе переработки руды примерно 70% всей радиоактивности, содержащейся в руде, подаваемой на перерабатывающие заводы, остается в нерастворенном состоянии в твердых хвостах [16]. Факторы воздействия на окружающую среду хвостов после переработки руды включают: ветровую эрозию на неограниченные районы, загрязнение рек из отвалов, расположенных вблизи берегов или же в результате повышения уровня воды во время половодья до основания отвалов, приводящее к выщелачиванию радия из материала и просачиванию воды через отвалы в грунтовые воды [17]. Исследования [17-22] показали, что отвалы переработки должны быть стабилизированы против ветровой эрозии и размыва на весьма продолжительные периоды времени (определяемые периодом полураспада в 1620 лет  $^{226}\text{Ra}$ ). Вследствие выделения радона из радия в хвостах, этот материал нельзя использовать ни в качестве конструкционного материала, ни как материал для засыпки при строительстве зданий, предназначенных для людей; такие здания нельзя также строить вблизи от отвалов обогащения.

#### Изготовление топлива

Основная потенциальная опасность в процессе изготовления топлива связана с токсичностью фтористого водорода и фтора, применяемых в производстве шестифтористого урана. Безопасные методы обращения с этими химическими веществами достаточно хорошо разработаны во фторохимической промышленности. Образующийся  $\text{UF}_6$  представляет собой высококоррозионный газ во время его прохождения через обогатительные установки, однако при комнатной температуре — это твердое вещество, которое можно безопасно упаковывать в стальные цилиндры. Именно в момент выхода из процесса конверсии в виде  $\text{UF}_6$  этот материал в топливном цикле попадает в систему гарантий, предусмотренную Договором о нераспространении ядерного оружия и созданную МАГАТЭ. В соответствии с этими гарантиями ядерный материал во всех последующих операциях цикла должен подвергаться фактическому учету с большой точностью.

Так как степень обогащения урана повышается, повышается и опасность случайной агломерации достаточного количества  $^{235}\text{U}$  для начала цепной реакции. Хотя аварии с образованием критичности весьма маловероятны, необходимо соблюдать большую осторожность для того, чтобы исключить такие случаи. Остатки обедненного урана из обогатительных установок обычно складываются в целях их возможного использования в будущем в качестве вторичного компонента реакторного топлива. Этот материал является слегка радиоактивным и постепенно выделяет еще более опасные изотопы  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{222}\text{Rn}$ . Образование этих изотопов является однако весьма медленным и любая опасность облучения от этих запасов контролируется путем ограничения доступа в эту зону.

Производство топливных элементов из двуокиси урана в настоящее время представляет собой достаточно хорошо разработанный процесс, который, по-видимому, не имеет в себе значительных опасностей. Производство смешанного окисного топлива является, однако, гораздо более сложным процессом. Опасность связана с токсичностью плутония и с тем, что "критическая масса" двуокиси плутония, в которой может начаться цепная реакция деления, составляет лишь несколько килограммов. Однако с обычными опасностями, возникающими во время производства смешанного окисного топлива, бороться нетрудно.

### Эксплуатация реактора

В процессе обычной эксплуатации ядерного реактора образуются радиоактивные продукты деления и активации. Эти радиоактивные материалы в основном удерживаются внутри топливных элементов. Радиоизотопы, которые диффундируют в теплоноситель или образуются в нем, удаляются с помощью систем обработки газообразных и жидких отходов. Выбросы низкой интенсивности, которые имеют место во время обычной эксплуатации, строго контролируются с целью обеспечения того, чтобы не были превышены разрешенные пределы выброса. Характер радиоактивных выбросов из реакторов зависит от типа реактора и от применяемых конкретных систем обработки отходов. Радиоизотопы, выбрасываемые вместе с газообразными отходами, состоят преимущественно из: благородных газов ( $^{133}\text{Xe}$ ), активационных газов ( $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{16}\text{N}$ ,  $^{35}\text{C}$ ), паров трития, а также газа, галогенов и частиц. Мощность доз, связанных с выбросом  $^{14}\text{C}$ , весьма мала, однако при продолжительном периоде его полураспада (5730 лет) он дает значительный вклад в коллективную дозу [23-26]. Таким же образом увеличивающийся выброс трития (в основном в виде воды, содержащей тритий, НТО) в атмосферу требует тщательных исследований и периодической оценки влияния на окружающую среду, включая хроническое облучение при весьма низких уровнях радиации [27]. Сбросы жидких отходов включают тритий,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{58}\text{Co}$  и  $^{60}\text{Co}$  помимо ряда активированных продуктов коррозии, таких как  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{51}\text{Mn}$ , которые преобладают в жидких сбросах с LWR.

По сравнению с опасностью газообразных выбросов с электростанций, работающих на ископаемом топливе, опасность выбросов с атомных электростанций во время обычной эксплуатации чрезвычайно мала. Однако тепловое загрязнение считается более серьезным в случае атомных электростанций, чем в случае электростанций, работающих на ископаемом топливе. Первые отводят в основном все свое неиспользованное тепло в охлаждающую воду, в то время как на последних примерно 15% тепла отводится через вытяжную трубу вместе с продуктами сгорания [28]. Другими словами, атомная электростанция будет выделять в охлаждающую воду примерно на 50% сбросного тепла больше, чем электростанция, работающая на ископаемом топливе, производящая то же самое количество электроэнергии.

Беспокойство населения в отношении эксплуатации реакторов направлено на возможность аварии, приводящей к выбросу значительных количеств радиоактивности в окружающую среду. Хотя во время эксплуатации атомного реактора возможны различные виды аварий, в конструкции реактора предусмотрены многочисленные предохранительные устройства и способы эксплуатации, которые автоматически останавливают реактор в случае какой-либо серьезной неисправности. Кроме того, большинство энергетических реакторов размещается внутри здания с противоаварийной оболочкой, целью которой является удержание в основном всей радиоактивности, которая может быть выброшена в случае серьезной аварии. Однако эффективность этих мер безопасности (в особенности системы аварийного охлаждения активной зоны) подвергается некоторой критике [13, 29-31].

Для определения вероятности крупной аварии атомного реактора был проведен ряд исследований, в которых использовалась информация о частоте отказов различных инженерных компонентов реактора. В результате самого последнего из этих исследований [32], которое обычно называется докладом Расмуссена, подсчитано, что авария, связанная с расплавлением активной зоны в LWR, имеет вероятность примерно 1/20000 на реактор-год, и что 99 из 100 аварий, связанных с расплавлением активной зоны, не приведут к ранним смертельным исходам. Согласно прогнозу, примерно

1 из 170 аварий, связанных с расплавлением активной зоны, вызовет более 10 ранних смертельных исходов, и лишь 1 авария из 500, связанная с расплавлением активной зоны, вызовет, согласно прогнозу, более 100 ранних смертельных исходов. Возражения по поводу компетентности этого исследования являются многочисленными и сложными. Критики подвергали сомнению правильность использования методов, оценку риска аварий и фактор субъективной ошибки (см., например, [33-35]). Другие критики подчеркивали недостаточное внимание, уделяемое в исследовании вероятностям естественных опасностей (например, ураганы, землетрясения), умышленному саботажу или войне.

Аварии быстрых реакторов-размножителей могут иметь более серьезные последствия, чем аварии LWR. Основное беспокойство вызывает теоретическая вероятность того, что активная зона реактора-размножителя на быстрых нейтронах при расплавлении может образовать критическую конфигурацию. Другими факторами, которые, по-видимому, делают их более опасными, являются использование натрия в качестве теплоносителя, более высокое энерговыделение, более мощный поток нейтронов и более высокая рабочая температура.

Во всяком случае, последствия крупной аварии будут зависеть не только от количества радиоактивности, выброшенной в окружающую среду, но и от многих других факторов: например, от среднего возраста продуктов деления; от относительного количества имеющихся актинидных элементов, от вида выброса (например, в атмосферу или в реку); от метеорологических условий и плотности населения в данном районе; от метеорологических условий и плотности населения в данном районе; от быстроты, с которой производится ликвидация аварии. Кроме этих соображений, отсутствие до сих пор каких-либо серьезных аварий реакторов, а также тот факт, что расчетная вероятность такого явления весьма мала, значительно затрудняет количественную оценку влияния на окружающую среду возможных крупных аварий реакторов.

Полный демонтаж атомной электростанции после ее снятия с эксплуатации (обычно установленного в 20-30 лет) будет затруднительным и опасным вследствие наведенной радиоактивности в конструкции реактора во время его эксплуатации. Бомбардировка нейтронами материалов, использованных при строительстве реактора, приводит к образованию ряда радиоактивных изотопов. Некоторые из этих изотопов испускают сильно проникающие гамма-лучи и имеют период полураспада в несколько лет. Однако опыт, полученный при снятии с эксплуатации небольших энергетических реакторов, позволяет надеяться на возможность полного удаления энергетических реакторов после их списания. Последствия для окружающей среды такой операции еще недостаточно изучены.

## Переработка топлива

Отработавшие топливные элементы, удаляемые из реакторов при перегрузке топлива, являются наиболее радиоактивным материалом в топливном цикле. Основную опасность представляет высокий уровень гамма-излучения в результате распада радиоактивных продуктов деления. Отработавшие элементы помещаются в глубокие резервуары с водой, известные под названием бассейнов выдержки, и находятся там в течение определенного времени. Необходимо хранить их в этих бассейнах таким образом, чтобы не дать возможность значительному количеству делящегося материала —  $^{235}\text{U}$  и  $\text{Pu}$  — образовать критическую конфигурацию. После того, как короткоживущие продукты деления распались до низких уровней активности — на что требуется несколько месяцев — топливо можно перерабатывать.

Число отработавших топливных элементов, находящихся на хранении, быстро возрастает и очевидно будет возрастать в течение некоторого времени. Бассейны выдержки удовлетворительны для краткосрочного хранения, однако ясно, что они не могут служить постоянным местом хранения отработавшего топлива. Эти бассейны требуют постоянного надзора и, несмотря на снижение уровня радиоактивности во время хранения, актиниды, находящиеся в отработавших элементах, будут проявлять опасную радиоактивность в течение сотен тысяч лет. На заводе по переработке топлива отра-

ботавшее топливо растворяется химическим путем и остаточный топливный материал регенерируется. Во время этого процесса основная часть продуктов деления, помимо индуцированных радиоактивных продуктов, имеющих в топливных оболочках, преобразуется в твердые и жидкие отходы. До последнего времени заводы по переработке топлива являлись основным источником радиоактивного заражения окружающей среды ядерной промышленностью.

Газообразные продукты деления, содержащиеся в топливных элементах, особенно  $^{85}\text{Kr}$  и  $^{129}\text{I}$ , выделяются из топливных таблеток во время переработки. Выделяются также тритий и летучие компоненты  $^{14}\text{C}$ . Значительная часть радиоактивного материала удаляется из газообразных выбросов, однако  $^{85}\text{Kr}$  (период полураспада 10,8 лет) и тритий (период полураспада 12,3 года) выбрасываются в атмосферу из существующих заводов. Учитывая необходимость соблюдения норм излучения, когда начинается промышленная переработка окисного топлива, придется почти обязательно удалять эти два газа из выбросов через вытяжную трубу.

Низкоактивные жидкие отходы, в конечном счете выбрасываемые в окружающую среду, также образуются во время переработки. Обычно большая часть из небольших количеств трития выбрасывается вместе с этими отходами. Необходимо разработать усовершенствованные методы хранения или удаления этих отходов. На перерабатывающих заводах образуются также средние и низкоактивные твердые отходы. В результате переработки топлива, использованного в течение одного года на LWR мощностью 1000 МВт (эл), образуется примерно 20-60 м<sup>3</sup> таких отходов. Основным компонентом среднеактивных твердых веществ является материал топливных оболочек, степень радиоактивности которого зависит от его состава и характера облучения. Этот материал загрязняется небольшими количествами отработавшего топлива. До настоящего времени большая часть отходов этого типа захоронялась в землю или помещалась в емкости и сбрасывалась в океан. АЯЭ/ОЭСР в настоящее время проводит наблюдения за сбросом 7000 г/г на глубину 4500 м в Атлантическом океане [36, 37]. Другие методы удаления включают захоронение на большие глубины в заброшенных шахтах или в подходящие геологические формации [38, 39].

Высокоактивные отходы, образующиеся в результате переработки отработавшего топлива, согласно оценочным данным достигнут к 1990 году 20 000 м<sup>3</sup> [22]. Эти отходы содержат более 99% продуктов деления, которые находятся в топливе вместе с меньшим количеством актинидов. Высокоактивные отходы хранятся в настоящее время преимущественно в жидкой форме, и некоторые составляющие будут оставаться опасно радиоактивными на протяжении нескольких сотен тысяч лет. В настоящее время не существует общепринятых средств, с помощью которых высокоактивные отходы могут постоянно изолироваться от окружающей среды и оставаться безопасными на протяжении весьма продолжительных периодов времени. Разрабатываются способы преобразования высокоактивных отходов в относительно инертные твердые вещества [22]. По-

Таблица II: Число перевозок в рамках ядерного топливного цикла, запланированных до 2000 года [40]

	Число перевозок/год в		
	1980	1990	2000
Топливо	670	2500	5400
Отработавшее топливо	2000	6400	12 000
Плутоний	20	143	438
Отходы и продукты деления	630	2450	5500

стоянное удаление высокоактивных твердых отходов в стабильные геологические формации считается наиболее вероятным решением, однако еще необходимо продемонстрировать его осуществимость. Нельзя с определенностью сказать, можно ли с помощью таких методов и мест захоронения полностью предотвратить утечку радиоактивности в результате нарушений, вызванных природными процессами или деятельностью человека.

Сброс в моря высокоактивных отходов строго ограничивается международными и региональными конвенциями, которые являются обязательными для многих стран с ядерной энергетикой. Сброс отходов в Антарктике запрещен договором.

#### Перевозка радиоактивных материалов

Важным аспектом ядерной энергетикой является безопасная перевозка радиоактивных материалов. Установки, входящие в ядерный топливный цикл, обычно географически разбросаны даже в пределах одной страны, поэтому радиоактивные материалы в различной форме необходимо перевозить к таким установкам и из них. Объем перевозок радиоактивных материалов возрос и он будет возрастать по мере развития ядерной энергетикой. Радиоактивные материалы, образующиеся в рамках ядерного топливного цикла, обычно перевозятся по суше автотранспортом или по железной дороге, а также морем. Транспортировка самолетами обычно используется для небольших количеств, необходимых в медицинских или исследовательских целях. Предполагаемое число перевозок в рамках ядерного топливного цикла в Соединенных Штатах Америки приводится в Таблице II (для LWR, HTG и LMFBR).

Перевозка радиоактивной руды из рудника на завод по переработке руды при нормальных или аварийных условиях вряд ли приведет к каким-либо нежелательным последствиям для окружающей среды. Таким же образом и перевозка продуктов такого завода, т.е. "желтого кека" или же последующая перевозка  $UF_6$  и  $UO_2$ , содержащихся в соответствующих контейнерах для перевозки, вряд ли окажет какое-либо воздействие на окружающую среду.

Топливные элементы отправляются в упаковках, конструкция которых исключает образование случайной критичности даже в серьезных аварийных условиях. Радиоактивность нового необлученного топлива фактически не может иметь последствий для окружающей среды и может иметь весьма незначительные последствия для отдельных транспортных рабочих в обычных условиях. Даже в случае аварии физические свойства и низкая удельная активность топлива ограничат облучение весьма низкими уровнями. Теоретически случайная критичность может привести к серьезным неблагоприятным последствиям для окружающей среды. Результатом могут быть эквиваленты доз, превышающие 500 бэр для отдельных лиц, находящихся в непосредственной близости, а близлежащий район потребует тщательной и возможно дорогостоящей дезактивации. Однако с помощью строгого контроля и введения авторитетных норм, установленных для проекта и конструкции контейнера, вероятность достижения критичности во время перевозки практически устранена.

Отработавшие топливные элементы перевозятся в экранированных баках с водяным или воздушным охлаждением весом 20 тонн или более. Тяжелая биологическая защита баков должна снизить излучение находящихся внутри отработавших топливных элементов до установленных заранее уровней в соответствии с нормами МАГАТЭ; в противном случае баки должны направляться в соответствии со специальными соглашениями. При нормальных условиях перевозки дозы облучения транспортных рабочих должны поддерживаться в пределах допустимых величин путем ограничения излучения вблизи контейнеров. Если рабочие обслуживают значительное число перевозок, может оказаться необходимым произвести обследование и ввести дополнительные меры контроля, такие как ротация мест работы. Серьезная авария, при которой разрываются стенки бака, приводящая к потере содержимого, может иметь серьезные последствия для населения и окружающей среды, однако вероятность такого разрыва сводится к минимуму строгим соблюдением регламентирующих требований в отношении типа, испытаний конструкции и утверждения конструкции баков. Низкоактивные отходы упаков-

выважются в герметичные контейнеры, например, в стальные барабаны емкостью 55 галлонов и направляются к местам захоронения обычным транспортом.

Отвержденные высокоактивные отходы направляются в места хранения с возможностью их последующего извлечения, такие как геологические формации, соляные шахты или наземные хранилища в контейнерах, сходных с баками, используемыми при перевозке отработавшего топлива.

Упаковка и перевозка радиоактивных материалов регулируются международными и национальными нормами перевозки. МАГАТЭ опубликовало нормы безопасной перевозки радиоактивных материалов, которые приняты фактически всеми международными транспортными организациями и используются большинством государств-членов в качестве основы для их собственных норм. МАГАТЭ предпринимает энергичные и непрекращающиеся усилия по техническому обновлению норм безопасной перевозки и по упрощению процедур их принятия и применения.

### Проблема плутония

Плутоний-239 (который неотделим от других изотопов Pu) является изотопом, вызывающим наибольшее беспокойство; этот изотоп используется в атомных бомбах и составляет по крайней мере 70% от общего количества плутония, получаемого в энергетических реакторах. Он имеет период полураспада в 24 400 лет. Многие факты свидетельствуют о том, что в соответствии с перспективной программой развития мировой ядерной энергетики будут производиться и обрабатываться относительно большие количества плутония, особенно если будут широко применяться быстрые реакторы-размножители. В настоящее время ежегодно производится примерно 20 тонн плутония, большая часть которого остается в переработанном виде в отработавших тепловыделяющих элементах. К 2000 году ежегодное производство может достигнуть нескольких сотен тонн.

Для того, чтобы вызвать цепную реакцию, необходимо примерно 6 кг  $^{239}\text{Pu}$  в виде металла, возможно 9 кг в виде  $\text{PuO}_2$ , и немногим большее количество плутония, вырабатываемого в реакторе, содержащего различные изотопы плутония. Существует опасность, что если достаточное количество плутония из реактора будет случайно сконцентрировано в одном месте, возможно в процессе переработки или изготовления топлива, то может произойти цепная реакция с испусканием мощного импульса смертельной дозы излучения и распространением, возможно стремительными темпами, плутония. Обычно применяются строгие меры контроля, которые пока оказались эффективными.

Что касается токсичности и канцерогенности плутония, то существует ряд противоречивых мнений (см., например, [41-43]). Плутоний весьма токсичен; его абсолютную токсичность можно сравнить с токсичностью биологических токсинов [43]. Однако последние нестабильны, как и большинство протеинов; после кипячения в растворе они теряют свою активность через несколько минут. Плутоний, с другой стороны, остается опасным на протяжении времени, примерно в 20 раз превышающем его период полураспада, или примерно полмиллиона лет. В отличие от токсинов, плутоний действует медленно; небольшие канцерогенные дозы в легких могут не вызвать рака в течение 10, 20 или 40 лет. (Некоторые загрязняющие вещества также имеют длительный скрытый период и плохо распадаются). Некоторые авторы поэтому призывают к пересмотру максимальной допустимой дозы МКРЗ в 40 нКи  $^{239}\text{Pu}$ .

### ЯДЕРНЫЕ ГАРАНТИИ И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

На всех этапах топливного цикла, включая перевозку ядерного материала, необходимо обеспечить строгое наблюдение и осторожность как на национальном, так и на международном уровнях, с тем чтобы ядерный материал не попал в руки случайных лиц, которые могут использовать его бесконтрольно, в результате чего может быть нанесен ущерб либо населению, либо окружающей среде. Поэтому требуются серьезные усилия, как в национальном, так и в международном масштабе, для предотвращения любого переключения ядерного материала или саботажа на ядерных установках.

Создание и воплощение в жизнь системы физической защиты на национальном уровне является основной обязанностью правительства, и это тесно связано с национальной системой учета ядерного материала, а также с его постановкой под гарантии и контроль. Эта система должна охватывать ядерный материал, находящийся в работе, на хранении и в процессе перевозки на всех этапах топливного цикла как на национальном, так и на международном уровне. На международном уровне МАГАТЭ разрабатывает и осуществляет систему ядерных гарантий.

Система, созданная в рамках Договора о нераспространении, является наиболее широко применимой и во многих отношениях представляется наиболее эффективной. Однако основные ограничения и недостатки существующих мер в области гарантий, которые вызывают беспокойство за окружающую среду, могут быть суммированы следующим образом: отказ многих государств стать участниками Договора о нераспространении; неспособность гарантий предотвратить переключение ядерной технологии с производства ядерной энергии на создание ядерного военного потенциала; факт, что многие ядерные установки не охватываются гарантиями; существование ряда лазеек в соглашениях о гарантиях, касающихся их применения к мирным ядерным взрывам, материалам, предназначенным для использования в военных целях помимо взрывов, а также к дальнейшей передаче материалов третьему государству; отсутствие на практике гарантий в отношении исходных материалов; практические проблемы эффективного контроля инвентарных количеств ядерного материала; легкость, с которой государства могут выйти из Договора о нераспространении и из большинства соглашений о гарантиях, не связанных с Договором о нераспространении; недостатки процедур учета и предупреждения; а также отсутствие эффективных санкций, направленных на предотвращение переключения материала, поставленного под гарантии.

Нельзя не учитывать вероятность переключения ядерного материала в результате актов терроризма и не учитывать опасность того, что появится возможность и повод для ядерного шантажа.

За последние годы были приняты более строгие меры, направленные на предотвращение хищений ядерных материалов и нападений на ядерные установки. Как ни были бы желательны эти меры, факты свидетельствуют о том, что опасность остается реальной и имеет тенденцию к увеличению по мере дальнейшего распространения ядерной технологии.

## ВЫВОДЫ

В Таблице III приводятся сравнения воздействия на окружающую среду электростанции мощностью 1000 МВт (эл), работающей на каменном угле, и трех ядерных электростанций с такой же мощностью. Преимущество реакторов для окружающей среды заключается в следующем: 1) в категории выбросов, причем для реакторов они составляют от 1200 до 1500 т/год по сравнению с миллионом тонн загрязнителей атмосферы, выбрасываемых электростанциями, работающими на угле; и 2) в использовании площади, где 300-400 акров площади, необходимой для электростанции, работающей на угле, сравниваются с 70-140 акрами, необходимыми для атомной электростанции, а 200 акров в год, которые должны быть вскрыты при добыче угля, сравниваются с 13 акрами, необходимыми при открытой добыче урана для LWBR и значительно менее одного акра для LMFBR. Потребности в охлаждающей воде примерно одинаковы для LMFBR и электростанции, работающей на угле, но на 40-50% больше для LWBR. Однако результаты воздействия загрязнителей нельзя измерить по весу или объему. Степень ущерба определяется взаимодействием с жизненно важными факторами. Ясно, что неядерные отходы и загрязнители воздействуют на человека и окружающую его среду и что некоторые из них могут иметь генетические последствия, однако в случае радиоактивных отходов ущерб будет более значительным и его будет трудно ликвидировать.

Хотя некоторые страны замедлили темпы осуществления своих ядерных энергетических программ, отказ от ядерного деления не был бы целесообразным или оправдан-

Таблица III: Воздействие на окружающую среду электростанции мощностью 1000 МВт (эл) [44]

Тип	На каменном угле	LWBR	HTGR	LMFBR
<b>ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ</b>				
Выбрасываемое количество				
Бте/с <sup>a</sup>	1,49 × 10 <sup>6</sup>	1,93 × 10 <sup>6</sup>	1,43 × 10 <sup>6</sup>	1,31 × 10 <sup>6</sup>
<b>ВЫБРОСЫ</b>				
Радиоактивность				
(10 <sup>3</sup> ки/г)	—	2253	2	2
<b>ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ</b>				
(т/год)				
SO <sub>2</sub>	45 000	1500 <sup>b</sup>	1200 <sup>b</sup>	—
NO <sub>x</sub>	26 000	900	700	—
CO	750	25	20	—
Частицы	3500	120	95	—
HC	260	9	7	—
<b>ОТХОДЫ (10<sup>3</sup> фут<sup>3</sup>/год)<sup>c</sup></b>				
Радиоактивные	—	12	10	8
Золы	200	7 <sup>b</sup>	5 <sup>b</sup>	—
<b>ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ</b>				
Разрабатываемая площадь в акрах	200	13	9	0,05
Площадки под станции (в акрах)	300-400	← 70-140 →		
<sup>a</sup> 1 британская тепловая единица = 1054 × 10 <sup>3</sup> Дж. <sup>b</sup> Выбросы, приписываемые реакторам, вычисляются на основании электроэнергии, использованной при обогащении. <sup>c</sup> 1 фут <sup>3</sup> = 2832 × 10 <sup>-2</sup> м <sup>3</sup> .				

ным [45]. На данном этапе развития ядерной энергетики важно уделять особое внимание подробным фундаментальным исследованиям различных видов воздействия на окружающую среду, связанных со всеми этапами ядерного топливного цикла и разработке соответствующих мер обеспечения защиты человека в окружающей его среде.

Программа ООН в области окружающей среды включает исследования, связанные с воздействием на окружающую среду всех источников энергии. На своей четвертой сессии (1976 г.) Совет управляющих ЮНЕП рекомендовал проведение глубоких исследований воздействия на окружающую среду ископаемых видов топлива, ядерной энергии и возобновляемых источников энергии. Результатом этих исследований, которые проводятся в сотрудничестве с соответствующими органами ООН и другими организациями, является подробная сравнительная оценка этих воздействий, основной целью которой является составление перечня нерешенных проблем по степени их важности для дальнейших исследований и разработок.

Этот доклад был представлен на Международной конференции по ядерной энергетике и ее топливному циклу в 1977 г., Зальцбург, Австрия.

- [1] UNITED NATIONS, UN Statistical Yearbook, 1975: UN Publ. Sales No. E/F. 76.XVII.1 (1976).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Power Reactors in Member States, IAEA, Vienna (1976).
- [3] OECD, Energy Prospects to 1985, OECD, Paris (1974).
- [4] OECD-NEA/IAEA, Uranium: Resources, Production and Demand, Rep. OECD, Paris (1976).
- [5] HANRAHAN, E.J., Demand for uranium, Atomic Industrial Forum, Phoenix, 1976.
- [6] KRYMM, R., and WOITE, G., IAEA Bulletin **18** (1976) 6.
- [7] KENWARD, M., New Sci. **69** (1976) 686.
- [8] HANSEN, M., IAEA Bulletin **18** (1976) 16.
- [9] JOHNSON, D.M., In Proc. 9th World Energy Conf., Detroit, 1974, US Natl. Energy Conf., London (1975), Paper 3.1–14.
- [10] DIECKAMP, H., Trans. Am. Geophys. Union **52** (1971) 756.
- [11] SAGON, L.A., Science **177** (1972) 487.
- [12] NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE, The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation (BEIR Report), Washington (1972).
- [13] EDSALL, J.T., Environ. Conservation **1** (1974) 21.
- [14] FOX, R.W., et al., Ranger uranium environmental inquiry, Australian Govt. Publ. Service, Canberra (1976).
- [15] ROSE, D., et al., Am. Sci. **64** (1976) 291.
- [16] BEVERLY, R.G., in Proc. Int. Symp. Radiation Protection in Mining and Milling of Uranium, Bordeaux, 1974.
- [17] CLARK, D.A., State of the Art, Uranium Mining, Milling and Refining Industry, US Environmental Protection Agency Rep. EPA-660/2-74-038 (1974).
- [18] SNELLING, R.N., SHEAR, S.D., Radiol. Health Data Rep. **10** (1969) 475.
- [19] SNELLING, R.N., Radiol. Health Data Rep. **11** (1970) 511.
- [20] SNELLING, R.N., Radiol. Health Data Rep. **12** (1971) 17.
- [21] RUBIN, J.H., Management of Radioactive Wastes (Proc. Symp. Paris), OECD, Paris, 1973.
- [22] PARKER, H.E., WEST, P.J., in 9th World Energy Conf. Detroit 1974, US Natl. Energy Conf., London (1975), paper 4.2–15.
- [23] MAGNO, P.J., et al., 13th AEC Air Cleaning Conference, San Francisco, 1974.
- [24] KUNZ, C., et al., Health Physics Soc. Rep. CONF-74/018 (1974).
- [25] KUNZ, C., et al., Proc. Am. Nucl. Soc. Mtg. New Orleans, 1975, Trans. Am. Nucl. Soc. **21** (1975).
- [26] RUBLEVSKIJ, V.P., et al., USAEC Rep. CONF-730907-P1 (1974); Proc. 3rd Int. Congress of the Int. Radiation Protection Assoc., Washington, 1973, Vol.1, p.296.
- [27] ROHWER, P.S., WILCOX, W.H., Nucl. Saf. **17** (1976) 216.
- [28] MASTERS, G.M., Introduction to Environmental Science and Technology, Wiley, London (1975).
- [29] FORD, D.F., KENDALL, W.H., An assessment of the ECC's rulemaking hearing, Union of Concerned Scientists, MIT, Cambridge (1973).
- [30] HENDRIE, J.M., Annu. Rev. Energy **1** (1976) 663.
- [31] LEWIS, H.W., et al., Rev. Mod. Phys. **47** Suppl. No.1 (1975).
- [32] USAEC, Rasmussen Report, WASH-1400 (1974).
- [33] EDSALL, J.T., Environ. Conservation **2** (1975) 205.
- [34] KENDALL, H.W., MUGLEWER, S., Preliminary Review of the AEC Reactor Safety Study, Sierra Club (1974).
- [35] LOVINS, A.B., Nuclear Power: Technical Bases for Ethical Concern, Friends of the Earth, London (1974).
- [36] OECD/NEA, Radioactive Waste Disposal Operation into the Atlantic, OECD, Paris (1967).
- [37] WEBB, G.A.M., MORLEY, F., UK National Radiation Protection Board Rep. NRPB-R14, Harwell (1973).
- [38] OECD/NEA, Radioactive Waste Management Practices in Western Europe, OECD/NEA, Paris (1972).
- [39] KRAUSE, H., Disposal of Radioactive Waste, Rep. NEA/OECD, Paris (1972).
- [40] BLOMEKE, J.O., et al., Nucl. News **18** (1975) 62.
- [41] BAIR, J.W., THOMPSON, R.C., Science **183** (1974) 715.
- [42] TOMPLIN, A.R., COCHRAN, T.B., Radiation Standards for Hot Particles, Natural Resources Defense Council Rep., Washington (1974).
- [43] EDSALL, J.T., Bull. At. Sci. **32** (1976) 27.
- [44] FOWLER, J.M., Energy and the Environment, McGraw Hill, New York (1975).
- [45] FLOWERS, B., Nuclear Energy and the Environment, Royal Commission on Environmental Pollution, Rep. No.6, London (1976).