

Воздействие производства и потребления атомной энергии на окружающую среду:

обзор исследования в рамках Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде

Дж. У. Ахмед и Х. Т. Доу

ПРЕДПОСЫЛКИ

На своей четвертой сессии, проходившей в 1976 году, Совет управляющих Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) просил Исполнительного директора ЮНЕП сделать сравнительный обзор различных форм производства энергии. ЮНЕП приступила к этому исследованию, проведя совещание по ископаемым видам топлива в 1978 году в Варшаве. По вопросам атомной энергии было проведено два совещания, одно в Женеве в ноябре 1978 года и другое в Найроби в апреле 1979 года. Совещание по возобновляемым источникам энергии было проведено в Бангкоке в январе 1980 года. Для целей сравнительной оценки планируется провести в 1980 году два совещания, одно узкое, для выбора методологии сравнения, и второе расширенное, для выработки сравнительных оценок. МАГАТЭ участвовало во всех совещаниях, проведенных до сего времени и активно сотрудничало в совместной подготовке доклада о воздействии атомной энергетики на окружающую среду [1]. МАГАТЭ будет также стремиться к участию в обоих совещаниях по сравнительным оценкам.

Воздействие атомной энергетики на окружающую среду по своей природе в основном аналогично воздействию энергетики на ископаемом топливе. Однако главной заботой в атомной энергетике являются радиоактивные выбросы и их влияние на биосферу, особенно на здоровье людей. Как следствие этого, исследование ЮНЕП сосредоточено главным образом на вопросах ущерба здоровью людей в результате производства атомной энергии.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Для оценки воздействия атомной энергии на окружающую среду в документе ЮНЕП рассматриваются различные операции, составляющие атомную энергетическую индустрию. Эти операции включают добычу и переработку урана, его обогащение, из-

Д-р Ахмед и д-р Доу являются сотрудниками Отдела ядерной безопасности и защиты окружающей среды МАГАТЭ.

готовление тепловыделяющих элементов, эксплуатацию реакторов, переработку облученного топлива (в случае варианта с регенерацией), обращение с радиоактивными отходами, образующимися на всех ступенях ядерного топливного цикла, снятие атомных установок с эксплуатации и транспортировку радиоактивных материалов. Воздействие различных операций на окружающую среду было нормализовано по отношению к полезному производству одного гигаватта энергии в год (ГВт-год).

Добыча урановой руды

Радиобиологическое воздействие добычи урана возникает вследствие облучения радоном и дочерними продуктами радона, которые выделяются из урановых руд. Вследствие вдыхания радона и его дочерних продуктов легочная ткань и дыхательные пути облучаются альфа-частицами, увеличивая таким образом возможность заболевания раком легких. В некоторых урановых рудниках может быть значительным также гамма-облучение всего тела.

Переработка урановых руд

В ходе операций по переработке руда обрабатывается механически и химически для экстракции основного количества урана и производства концентрата окиси урана, называемого "желтый брикет". Радиологическое воздействие при переработке урана возникает вследствие выброса пыли, содержащей уран и дочерние продукты урана (торий-226 и торий-230), радон и дочерние продукты радона и т.д. Радон выделяется из систем вентиляции баков выщелачивания, рудных масс, из системы удерживания хвостов и системы вентиляции установок дробления и размола. Большая часть радия в рудах нерастворима и остается в составе твердых хвостов; небольшая часть — около 1% или менее — растворяется. Растворы отходов содержат радий-226, торий-230, уран и небольшие концентрации продуктов распада радона.

Производство гексафторида урана

Концентрат окиси урана (U_3O_8) после размола должен быть очищен и превращен в летучее соединение — гексафторид урана (UF_6), пригодное в качестве сырья для обогатительных заводов. Радиологическое воздействие этой операции возникает вследствие выделения радионуклидов в окружающую среду, как в атмосферу, так и в водоемы.

Обогащение урана

Обогащение урана (увеличение концентрации изотопа урана-235) необходимо для производства топлива для легководных реакторов (ЛВР) и усовершенствованных газоохлаждаемых реакторов. Концентрация урана-235 в природном уране составляет около 0,7%, а содержание обогащенного урана в современном топливе для ЛВР составляет 2-4%. Крупномасштабная технология обогащения основывается либо на газовой диффузии, либо на центрифугировании изотопов урана в форме UF_6 .

Радиологическое воздействие на этой ступени возникает из-за попадания изотопов урана в окружающую среду. Следует отметить, что исследование ЮНЕП приписывает увеличенную профессиональную опасность большому количеству электроэнергии, потребляемой в процессе газодиффузионного обогащения. Если предположить, что две трети электроэнергии производится на угольных электростанциях, то производство электроэнергии, потребляемой в газодиффузионном процессе обогащения, будет дополнительно приводить к 0,01-0,1 смертельным случаям на ГВт-год, так как

опасность от угольных станций значительно выше, чем от атомных. Этот риск уменьшается на заводах с газовыми центрифугами, которые потребляет около 1/10 электроэнергии, необходимой для диффузионных заводов.

Изготовление топлива

На заводе по изготовлению топлива обогащенный UF_6 превращается в пудру двуокиси урана (UO_2), которая затем формируется в таблетки и спекается для получения твердого вещества желаемой плотности. Готовые таблетки загружаются в трубки из циркониевого сплава, к которым привариваются концевые заглушки для образования герметических топливных стержней. Готовые топливные стержни собираются в фиксированные решетки, называемые тепловыделяющими элементами. Радиологическое воздействие при изготовлении топлива может произойти в результате утечек изотопов урана и тория-234.

Эксплуатация атомных электростанций

При эксплуатации атомных электростанций образуются радионуклиды в результате деления ядерного топлива и нейтронной активации конструкционных материалов, продуктов коррозии и примесей охлаждающей реактор воды. Большинство продуктов деления остается в тепловыделяющих элементах, однако часть их может попасть в теплоноситель через дефекты топливных оболочек. Большинство радиоактивных изотопов, попавших в теплоноситель или замедлитель, удаляется системой газовой очистки воды. Тем не менее часть радиоактивного материала может в конечном итоге выделиться в окружающую среду.

Из множества радиоактивных продуктов деления и активации, образующихся при эксплуатации реактора, особое внимание уделяется воздействию на окружающую среду трития, углерода-14 и радионуклидов в форме твердых частиц, выбрасываемых в атмосферу и водоемы. Особое внимание уделяется тритию и криптону-85, поскольку эти радионуклиды являются долгоживущими и распространяются по всему миру. В частности, криптон-85 заслуживает особого внимания вследствие трудностей его контроля, его весьма слабой активности и высокой подвижности в окружающей среде. Вследствие большого периода полураспада углерода-14 ожидаемые дозы облучения в результате его накопления в окружающей среде значительно выше, чем от трития и благородных газов. Некоторые радионуклиды, особенно иод-131, радиологически существенны в местной среде. Иод-129 имеет существенное значение и в глобальном масштабе. Благородные газы, тритий в форме обогащенных тритием водяных паров, углерод-14 и иод попадают в окружающую среду в результате выбросов в атмосферу. Аэрозоли, содержащие как продукты деления и активации, так и продукты распада благородных газов, также могут выбрасываться в атмосферу.

Ущерб здоровью человека при производстве атомной энергии наносится главным образом за счет профессионального гамма-облучения продуктами деления и активации. Облучение населения происходит за счет выброса радионуклидов в окружающую среду. Радионуклиды, выбрасываемые в окружающую среду в качестве газообразных или жидких выбросов в ходе эксплуатации реактора, прежде чем они достигнут человека, претерпевают ряд сложных физических, химических и биологических преобразований. Эти преобразования зависят от местоположения реактора, метеорологических условий и различных путей облучения.

Радионуклиды, выбрасываемые жидкими отходами, могут приводить к дозам облучения человека через средство питьевой воды и потребления рыбы при сбросах в пресные водоемы или через средство потребления океанских рыб и моллюсков при сбросах в соленые воды. Часть населения может также облучаться на береговой линии за счет внешнего излучения радиоактивных отложений.

Регенерация топлива

Отработанные тепловыделяющие элементы из легководных реакторов содержат невыгоревший уран, плутоний, некоторые более тяжелые актиниды и высокоактивные продукты деления. Уран и плутоний в этом израсходованном топливе являются ценными источниками энергии и могут быть повторно использованы после отделения их от продуктов деления. Уран может быть вновь обогащен и переработан в новые тепловыделяющие элементы для реактора или может использоваться как основа "смешанного окисного" топлива, в которое добавляется соответствующее количество выделенного плутония.

Для ЛВР существует три варианта: без регенерации, регенерация только урана и плутониево-урановая регенерация. Эти три варианта связаны с рядом технико-экономических проблем, проблем здравоохранения, безопасности и окружающей среды, которые требуют различных решений. Регенерация плутония и урана приводит к наличию очищенного плутония, что потребует дополнительных гарантий, помимо уже имеющихся. Наличие регенерированного плутония существенно важно для разработки реакторов-размножителей.

В отработанных тепловыделяющих элементах ЛВР практически все радиоактивные газообразные продукты деления задерживаются физически или химически в циркониевой оболочке, в самой топливной матрице и в объемах для газообразных про-

Таблица 1. Ожидаемый риск для мирового населения в результате эксплуатации (THORP)

Подвергаемая риску группа	Характер воздействия	Риск* (на каждый год эксплуатации)	Примечания
Мировое население (включая работников THORP)	Смерть от облучения — вызванный облучением рак	2 (во всем мировом населении)	Число смертельных случаев от спонтанного рака (по всем причинам) составит, согласно оценкам, 8 млн.
Мировое население (включая работников THORP)	Серьезные генетические дефекты	1 (во всем мировом населении)	Касается общего числа для всех последующих поколений

* Риск вычисляется путем интегрирования дозы за столетний период в результате эксплуатации в течение одного года при проектной мощности (1200 т/год, что эквивалентно 40 ГВт-год).

дуктов деления на конце каждого топливного стержня. Эти газы освобождаются на ранних стадиях регенерации, обычно во время разрезания топливных элементов или растворения топлива. Газовые выходы содержат криптон-85, иод-129, некоторое количество трития и углерода-14. Разработаны методы для удаления каждого из этих элементов из выходящего газового потока.

Для определения воздействия регенерации топлива на окружающую среду в качестве примера был взят завод по переработке окисного топлива для тепловых реакторов (THORP), сооружаемый в Уиндскейле, Соединенное Королевство. Этот завод запроектирован на максимальную переработку 1200 тонн облученного урана в год (эквивалентно около 40 ГВт-год). Таблица 1 показывает предсказуемый риск для мирового населения в результате эксплуатации (THORP).

Обращение с радиоактивными отходами

Радиоактивные отходы получаются практически во всех областях атомной промышленности и накапливаются в жидком, твердом или газообразном виде с различными уровнями активности. Основная масса отходов образуется на начальной стадии ядерного топливного цикла, которая включает добычу и переработку урана, тогда как более активные отходы образуются на конечной стадии цикла, которая включает эксплуатацию реактора и переработку топлива (при варианте с регенерацией топлива). При варианте без регенерации и с регенерацией только урана, плутоний не выделяется и, следовательно, считается одним из элементов трансурановых отходов.

Радиоактивные отходы делятся на низко-, средне- и высокоактивные и на отходы, загрязненные трансурановыми элементами. Обращение с такими отходами может включать: а) немедленное удаление отходов по мере их возникновения, что применяется к низкоактивным газообразным и твердым отходам; б) удаление среднеактивных отходов, которое может потребовать предварительной их обработки и выдержки; в) удаление высокоактивных и трансурановых отходов, которое требует предварительной обработки и длительной выдержки. Для первых двух категорий отходов продемонстрированы безопасные и доступные методы удаления.

Обращение с твердыми отходами, загрязненными трансурановыми элементами, перед их отправкой в хранилище отходов или места захоронения требует подготовительных мероприятий. Отвержденные отходы обычно выдерживаются в промежуточных хранилищах до их отправки в хранилища или места захоронения.

Исследуется несколько возможностей в качестве будущих вариантов захоронения радиоактивных отходов на земле, а именно, захоронение с изоляцией на морском дне, в ледовых пластах и глубоких континентальных геологических формациях. Для каждого из этих вариантов разработаны определенные концепции, учитывающие специфику выбора места захоронения, форму отходов, среды и метод захоронения. Из этих вариантов весьма перспективным считается метод захоронения в глубоких континентальных геологических формациях.

Снятие атомных установок с эксплуатации

Снятие с эксплуатации атомных установок может быть определено как серия мероприятий, проводимых в конце срока существования установки, для обеспечения длительной защиты населения от остаточной радиоактивности и от других потенциальных опасностей в связи с ликвидацией установки. В этом отношении обычно

рассматриваются два основных подхода – немедленный демонтаж или безопасная консервация с демонтажом на более позднем этапе или без него. Методы снятия с эксплуатации атомных установок весьма различны, начиная от минимального удаления и фиксации остаточной радиоактивности в условиях обслуживания и надзора и кончая широкой очисткой, дезактивацией и захоронением. Каждый из этих методов безопасного хранения требует надзора и осторожности в течение периода выдержки, который может варьироваться по продолжительности от нескольких лет до десятилетий. Каждый метод заканчивается демонтажом атомной установки.

Транспортировка радиоактивных материалов

При транспортировке радиоактивных материалов реально вовлеченные количества материалов малы по сравнению с огромными транспортными потребностями угольных станций, на долю которых фактически приходится основное воздействие таких станций на окружающую среду. При транспортировке радиоактивных материалов беспокойство населения относительно воздействия на окружающую среду вызывает только радиоактивность. Объем транспортируемых радиоактивных материалов вырос и будет продолжать увеличиваться по мере роста атомной энергетики. Радио-

Таблица 2. Число смертельных случаев среди работников атомной промышленности и населения в результате топливного цикла ЛВР (без регенерации топлива) на ГВт-год

Составные части топливного цикла	Работники	Население
	Число смертельных случаев рака	Число смертельных случаев рака
Добыча руды	0,03-0,1	0,02-0,04
Переработка руды	0,036	0,005-0,04
Преобразование UF ₆	0,0004	0,001
Обогащение	0,0005	Пренебрежимо малое
Производство топлива UO ₂	0,01	Пренебрежимо малое
Производство энергии на ЛВР	0,13	0,06
Снятие с эксплуатации (немедленное)	0,004	Пренебрежимо малое
Обращение с отходами (включая хранение облученного топлива)	4 × 10 ⁻⁵	Пренебрежимо малое
Транспортировка	4 × 10 ⁻⁵	1 × 10 ⁻⁵
Атомная промышленность в целом	0,28	0,14

активные материалы, связанные с ядерным топливным циклом, обычно транспортируются автотранспортом и в меньшей степени железнодорожным и морским транспортом.

РЕЗЮМЕ

Число смертельных случаев рака среди работников атомной промышленности и населения в результате функционирования атомной энергетики в расчете на один ГВт-год приведено в таблице 2 для варианта без регенерации топлива.

Ущерб здоровью людей от атомной энергетики составляет малую долю ущерба населению мира, причиняемого в результате облучения из естественных и других источников радиации, как это показано в таблице 3.

Таблица 3. Ожидаемые глобальные дозы облучения из различных источников радиации (библиография [2], стр. 16)

Источник облучения	Ожидаемая глобальная доза (дни)**
Годовое облучение из естественных источников	365
Один год полетов на самолетах гражданской авиации	0,4
Использование годичной продукции фосфатных удобрений при современном уровне производства	0,04
Годовое производство электроэнергии во всем мире на угольных электростанциях при существующих мировых установленных мощностях (1000 ГВт (эл.))	0,02
Годовое облучение от излучающих потребительских товаров	3
Годовое производство атомной энергии при существующих мировых установленных мощностях (111 ГВт (эл.))	0,83
Год ядерных взрывов, усредненный за период 1951-1976 годов	30
Годовое использование излучений в медицинской диагностике	70

** Ожидаемая глобальная доза для каждого из этих источников радиации выражается как продолжительность облучения населения мира из естественных источников радиации, которое привело бы к такой же ожидаемой дозе. Вклад профессионального облучения учитывается.

Библиография

- [1] The Environmental Impacts of Production and Use of Energy: Part II – Nuclear Energy, UNEP Energy Report Series, UNEP, Nairobi (Sept. 1979).
- [2] Sources and Effects of Ionizing Radiation, 1977 Report by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) to the General Assembly, United Nations, New York (1977).