

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.И. Бойко, Д.Г. Демянюк, Д.С. Исаченко

ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РЕЖИМ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 621.039.51(075.8)

ББК 31.46я73

Б77

Бойко В.И.

Б77

Ядерный топливный цикл и режим нераспространения: учебное пособие / В.И. Бойко, Д.Г. Демянюк, Д.С. Исаченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 104 с.

ISBN 978-5-98298-777-8

В пособии описан ядерный топливный цикл, подробно рассмотрены вопросы добычи урана, обращения с радиоактивными отходами в совокупности с угрозой режиму ядерного нераспространения, а также вопросы системы учета и контроля ядерных материалов. Приведены категории ядерных материалов.

Разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом, обеспечение безопасности и противодействие терроризму» и предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по направлению 011200 «Физика» и специальности 140309 «Безопасность и нераспространение ядерных материалов».

УДК 621.039.51(075.8)

ББК 31.46я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук
заведующий кафедрой прикладной аэромеханики ТГУ
И.М. Васенин

Доктор физико-математических наук
декан физико-технического факультета ТГУ
Э.Р. Шрагер

ISBN 978-5-98298-777-8

© Томский политехнический университет, 2009

© Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Исаченко Д.С., 2009

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2009

Содержание

Введение	4
1. Ядерный топливный цикл.....	5
2. Добыча урана.....	7
3. Обращение с ядерными отходами.....	30
4. Характеристика режима нераспространения ядерных материалов и его компоненты	56
5. Национальные гарантии нераспространения как внутренняя система противодействия угрозам ЯОО	60
6. Контрольные списки и ядерный топливный цикл	74
8. Ядерные реакторы и контрольные списки	93
Список литературы	103

Введение

Ядерный топливный цикл – это совокупность способов добычи и производства топлива для ядерных реакторов, подготовки его к использованию и утилизации. Термин «топливный цикл» указывает на тот факт, что отработавшее или облученное ядерное топливо (ОЯТ) после прохождения специальной переработки может использоваться повторно. Длительность ядерного топливного цикла, включая окончательное захоронение высокоактивных отходов, составляет от 50 до 100 лет.

Обогащение урана как составная часть ядерного топливного цикла – является основным и необходимым технологическим процессом при производстве ядерного топлива для атомных электростанций, но при этом наиболее чувствительным звеном ядерного топливного цикла с точки зрения распространения оружия массового уничтожения.

На сегодняшний день достаточно простое переключение мирного использования ядерной энергии на военные рельсы является ключевой проблемой ядерного нераспространения.

1. Ядерный топливный цикл

Использование атомной энергии требует использования различных предприятий. Каждый из этих объектов представляет опасность. Это и радиоактивная пыль в шахтах по добыче урана, потенциальные и фактические радиационные проблемы даже при нормальной эксплуатации предприятий, и несчастные случаи как с персоналом, обслуживающим ядерные установки, так и с людьми, живущими поблизости, заканчивая возможным загрязнением грунтовой воды в репозитории для радиоактивных отходов.

Необходимые шаги для того, чтобы уран стал топливным элементом показаны на следующей иллюстрации (рис. 1). После использования уранового топлива на атомной электростанции и его выдержки в бассейне есть два возможных способа переработки ОЯТ (отработавшего ядерного топлива). Первый способ – прямое захоронение, второй – подвергнуть переработке. Подвергнуть переработке означает отделить уран от плутония в ОЯТ, изготовить новые топливные элементы с этим материалом и повторно использовать в ядерном реакторе. Большинство стран, использующих ядерную энергию, не подвергает ОЯТ переработке. Более подробная информация по переработке дается в следующей главе.

Обогащение приводит к появлению большого количества обедненного урана (т.н. хвосты). Каждое предприятие по обогащению производит несколько тысяч тонн этого материала в год. По экономическим причинам дальнейшая судьба этого материала не определена. Может быть, что только малая часть будет использована (вне ядерного топливного цикла), а от остального нужно будет избавиться полностью.

Радиоактивные отходы производятся в каждой ядерной установке. Отходы могут быть классифицированы как низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО). По сравнению с другими категориями, высокоактивные отходы составляют небольшое количество по объему, но сосредотачивают в себе большинство радиоактивности. Основными видами высокоактивных отходов являются: отработавшее топливо, подлежащее «прямому» захоронению, полученные в процессе переработки остеклованные радиоактивные отходы (РАО), а также радиоактивные материалы, находящиеся внутри реактора. Существует большое разнообразие низко- и среднеактивных отходов. Количество отходов зависит от типа реактора и требований по обращению с отходами, включая захоронение; эти факторы отличаются в зависимости от страны. Например, 1300-мегаваттный реактор с водой под давлением в Германии производит приблизительно 60 кубометров низкоактивных и среднеактивных отходов и около 26 тонн ОЯТ каждый год. После вывода из эксплуатации АЭС, на таком реакторе образуется 5 700 кубометров низкоактивных отходов. Для Германии вычислено, что используя ядер-

ную энергию, исходя из срока службы реактора в 35 лет, будет произведено приблизительно 300 000 кубометров отходов для захоронения.

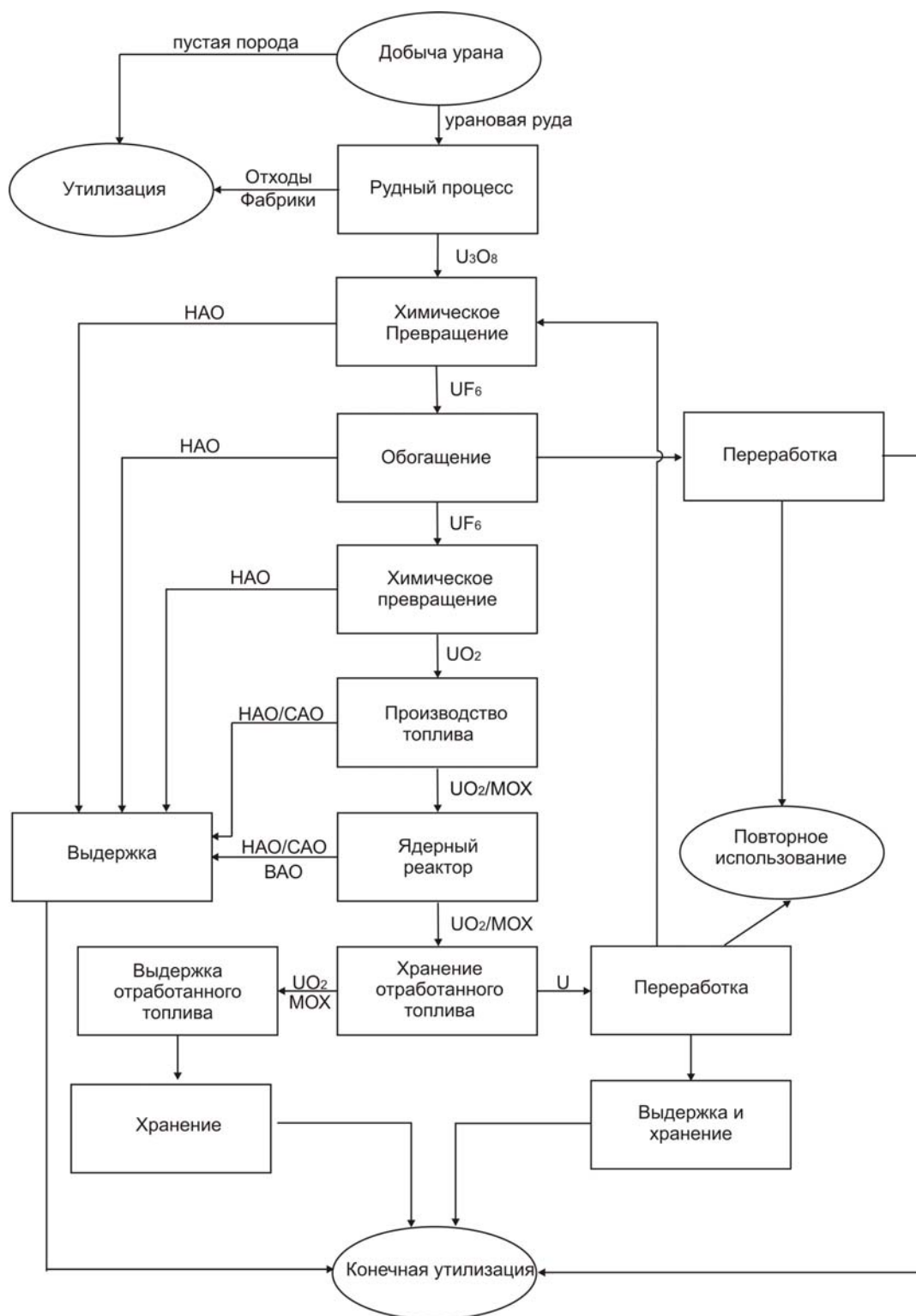


Рис. 1. Идеализированное представление топливного цикла с переработкой и без переработки

С переработкой или без переработки, но хранилище для окончательного захоронения ядерных отходов необходимо. Это верно не только для большого количества низко и среднеактивных отходов, но также и для отработавшего топлива, потому что, например, отработавшее смешанное оксидное топливо не перерабатывается в промышленном масштабе. Исключением является Франция, где небольшое количество такого топлива удалось переработать. В мире не существует репозиторий (места окончательного захоронения) для высокоактивных отходов и отработавшего топлива. Хранилища для низко- и среднеактивных отходов работают в некоторых странах с ядерными программами. Необходимо, чтобы репозиторий появился как можно быстрее. Если место захоронения будет выбрано и спроектировано правильно, то репозитории способны уменьшить опасность по сравнению со всеми другими вариантами обращения с РАО. Необходимо управлять негативными эффектами атомной энергетики.

2. Добыча урана

Эра урана, добываемого в промышленных масштабах, началась с конца Второй мировой войны, когда этот материал добывался как стратегический ресурс. Для получения этого сырья для ядерной бомбы были предприняты большие усилия с огромными издержками. Поначалу никто не придавал значения воздействию радиации на здоровье рабочих и окружающую среду. Соединенные Штаты получали уран из разнообразных источников, в основном из своих и канадских месторождений. Советский Союз, до обнаружения больших отечественных месторождений, основал огромную горнодобывающую промышленность для получения урана в европейских государствах-сателлитах, в отдельных частях Восточной Германии и Чехословакии, а также в Венгрии и Болгарии. В это время более чем 100 000 человек тяжело трудились в рамках восточногерманского проекта «Wismut», чтобы добыть то же количество урана, которое сейчас могут добыть несколько сот человек на каком-нибудь канадском месторождении.

В 1970-х уран всё больше и больше становится коммерческим ресурсом для выработки ядерной энергии, ситуация начала изменяться: рынок развивался – теперь правительства больше не были единственными заказчиками урана – были установлены экологические стандарты для добывающей промышленности. С концом Холодной войны большая потребность в добыче урана исчезла, так как вторичные ресурсы, запасы сырья или материал для ядерной бомбы стали доступными для гражданского использования. В настоящее время вторичными ресурсами снаб-

жают почти половину ядерной индустрии, и это оставляет шанс на выживание только самым экономичным шахтам по добыче урана. Однако из-за быстрого истощения вторичных ресурсов и предложений о расширении производства ядерной энергии, сделанных в нескольких странах, ситуация меняется снова: уран может еще раз стать редким ресурсом, который будет добываться по высокой (экологической) стоимости.

Горная промышленность урана: технология и влияние

При средней концентрации 3 г\тн в земной коре, уран не очень редкий металл. Добыча имеет смысл только в месторождениях, содержащих концентрации, по крайней мере, порядка 1000 г\тн (0,1 %); руды с более низким содержанием в настоящее время добываются только в чрезвычайных обстоятельствах. Концентрации, имеющие промышленное значение, имеются в различных частях мира. Эти залежи различаются геологическим расположением, размером, количеством содержащегося в руде урана, условиями доступа к месторождению. На Плато Колорадо на западе Соединенных Штатов, где его содержание в руде – 0,1–0,2 процента, уран добывался в тысячах небольших шахт до начала 1980-х, когда цена на этот материал резко упала. В то же время на озере Эллиот (Онтарио, Канада), в Восточной Германии и Чехословакии уран добывался в течение многих десятилетий главным образом в очень больших подземных шахтах и часто с более низким содержанием в руде. Когда восточногерманские операции по добыче урана были остановлены в 1990 г., цена на их продукцию была приблизительно в десять раз выше цен на мировом рынке.

После окончания Холодной войны продолжились разработки только самых выгодных месторождений. Большая концентрация в руде встречается редко – на реке McArthur в месторождении под землёй (Саскатчеван, Канада) добывается материал с содержанием урана 17,96 %. Наиболее низкая концентрация в руде – в открытой шахте Ресинг, в Намибии (0,029 %).

Большое количество урана добыто традиционно – в открытых или подземных шахтах. За исключением нескольких месторождений в Канаде, содержание урана в рудах обычно ниже 0,5 %, поэтому нужно добыть очень большое количество руды, чтобы получить уран. В шахтах рабочие не защищены от радиоактивной пыли и газа радона, повышающих риск заболевания раком лёгких. На ранних стадиях добычи урана после Второй мировой войны шахты были плохо вентилируемы, что приводило к необычайно высоким концентрациям пыли и радона в воздухе. В 1955 г. обычные концентрации радона в шахтах «Висмута» были приблизительно 100 000 Бк/кубометр, с максимумами 1,5 миллиона Бк/кубометр.

В общей сложности 7163 восточногерманских шахтёра умерли от рака лёгких между 1946 и 1990 гг. Для 5237 из них, профессиональное воздействие было признано причиной болезни. В Соединённых Штатах Конгресс признал ответственность правительства за здоровье первых шахтёров (главным образом, индейцев Навахо) только в 1990 г., приняв закон о компенсации подвергшимся радиации. Административные препятствия для того чтобы получать компенсацию, были настолько высоки, и капитал, ассигнованный для этой программы, был настолько недостаточен, что многие шахтёры (или выжившие члены семьи) получили компенсацию только после принятия нового закона в 2000 году.

В течение добывающего цикла большие объёмы загрязнённой воды, выкачанные из шахты и спущенные в реки и озёра, попадают в окружающую среду. Сточные воды из месторождения «Рабит Лэйк» в Канаде, например, вызвали увеличение массы урана в донных отложениях залива Hidden Bay реки Уоллостон (Wollaston). В 2000 году содержание урана в донных отложениях в 8 раз превышало природный уровень. С тех пор оно росло быстрее, чем в геометрической прогрессии и между 2000 и 2003 годом увеличилось в 10 раз. В речных донных отложениях в районе месторождения «Висмут» (Wismut) концентрации радия и урана в 100 раз больше, чем природная норма.

Вентиляция шахт, снижающая опасность для здоровья шахтёров, выпускает в атмосферу радиоактивную пыль и газ радон, увеличивая риск заболевания раком лёгких для людей, живущих поблизости. На «Висмуте» (шахта Schlema–Alberoda), например, в общей сложности 7426 миллионов кубометров (235 m³/s) загрязнённого воздуха были выброшены в атмосферу в 1993 г., со средней концентрацией радона 96 000 Бк/кубометр.

Отвалы образуются в открытой шахте, например, когда тоннели проложены через безрудные зоны или концентрация урана в руде слишком низкая. Отвалы часто содержат повышенные концентрации радионуклидов по сравнению с нормальной породой. Такой материал продолжает угрожать людям и окружающей среде и после закрытия шахты, так как он источает газ радон и радиоактивную воду. Груды отвалов урановых шахт «Висмута» в области Schlema/Aue содержат объём 47 миллионов кубометров и покрывают область 343 гектара. Отвалы часто сваливали в непосредственной близости от жилых районов. В результате, были обнаружены высокие концентрации радона в воздухе (приблизительно 100 Бк/кубометр) на обширных территориях. В некоторых местах концентрация радона была даже выше – 300 Бк/кубометр. Это продолжалось пока радиоактивный материал не был изолирован. Независимый институт экологии (Ecology Institute) обнаружил, что при

продолжительной жизни в такой области риск заболеть раком легких достигает 20 случаев при концентрации 100 Бк/кубометр и 60 случаев при концентрации 300 Бк/кубометр – в расчёте на 1000 жителей. Кроме того, отвалы часто использовали в смеси с гравием или цементом для строительства дорог. Таким образом, гравий, содержащий повышенные радиоактивные концентрации, был распределён на больших территориях.

В некоторых случаях уран добывают из низкосортной руды выщелачиванием. Это делается из экономических побуждений, если содержание урана в руде слишком низкое. Щелочная или кислая жидкость вводится в массу материала и проникает вниз, где откачивается для дальнейшей обработки. В Европе, например в Восточной Германии или Венгрии, эта технология использовалась до 1990 г.

В процессе выщелачивания по-прежнему существует опасность выбросов пыли, газа радона и выщелачивающей жидкости. После завершения процесса выщелачивания, в особенности если руда содержит сульфид железа (случай Тюрингии в Германии и Онтарио в Канаде), могут появиться новые проблемы.

Доступ к воде и воздуху может стать причиной непрерывного бактериального производства кислоты в отвалах, что ведет к самопроизвольному выщелачиванию урана и других загрязнителей в течение многих столетий с возможным постоянным загрязнением грунтовых вод.

Пока выщелачивание не является востребованным из-за снижения цен на уран, но оно может снова заинтересовать производителей, если добыча руд с низким содержанием урана начнёт снова представлять экономический интерес.

Альтернативный способ – добыча растворением (solution mining). Эта технология, также известная как «выщелачивание на месте залегания», включает в себя введение щелочной или кислой жидкости (например, серной кислоты) через скважины в залежи урановой руды, и выкачивание обратно. Таким образом, эта технология не требует удаления руды с места добычи. Эта технология может использоваться только там, где месторождения урана расположены в водоносном слое в водонепроницаемой породе, не слишком глубоко (приблизительно 200 м) в основании, и граничащие с водонепроницаемой породой.

Преимущества этой технологии – уменьшенный риск несчастных случаев и облучения для персонала, низкая стоимость, не требуется много места для складирования отходов. Главные недостатки – риск отклонения выщелачивающих жидкостей от месторождения урана и последующего загрязнения грунтовой воды, и невозможность восстановления естественных условий в зоне выщелачивания после окончания операций. Возникшая загрязненная смесь или свалена на поверхности в

некоторых водохранилищах, или введена в так называемые глубокие ликвидационные колодцы.

Исторически выщелачивание использовалось в большом масштабе там, где есть крупные месторождения – оно включало ввод миллионов тонн серной кислоты, в Stráz pod Ralskem, Чешская Республика, в различных местах в Болгарии, и немного в Königstein, в Восточной Германии. В случае Кёнигштайна, в общей сложности 100 000 тонн серной кислоты были введены с жидкостью в месторождение руды. После закрытия месторождения, 1,9 миллиона кубометров этой жидкости остаётся в порах породы; ещё 0,85 миллиона кубометров такой жидкости находятся где-то между зоной выщелачивания и предприятием по обработке. Жидкость содержит высокие концентрации опасных примесей. Если сравнивать с допустимыми для питьевой воды концентрациями, то кадмия там больше в 400 раз, мышьяка – в 280, никеля – в 130, урана – в 83 раза. Эта жидкость представляет опасность с точки зрения загрязнения водоносного слоя. Проблема загрязнения грунтовой воды намного серьезнее в Чехии, в Stráz pod Ralskem, где было закачано 3,7 миллиона тонн серной кислоты: 28,7 миллиона кубометров загрязнённой жидкости до сих пор содержатся в зоне выщелачивания, расположенной на территории размером 5,74 кв. км. Кроме того, загрязнённая жидкость распространилась вне зоны выщелачивания горизонтально и вертикально, подвергая угрозе заражения территорию примерно в 28 кв. км и 235 миллионов кубометров грунтовой воды.

С уменьшением цен на уран в течение прошлых десятилетий, выщелачивание по технологии «добыча растворением» – единственный способ, использующийся в США. Выщелачивание в естественных залежах получает широкое распространение по всему миру в случае с месторождениями с низким содержанием урана. Новые проекты реализуются в Австралии, России, Казахстане, и Китае.

Руда, добытая в открытых или подземных шахтах сначала выщелачивается на специальном заводе. Завод обычно располагается около шахт, чтобы сократить количество транспортировок. Затем уран обрабатывается с помощью гидрометаллургического процесса. В большинстве случаев как средство выщелачивания используется серная кислота, хотя также применяется и щёлочь. Поскольку в процессе выщелачивания из руды выделяют не только уран, но и несколько других элементов (молибден, ванадий, селен, железо, свинец и мышьяк), нужно выделить уран из этой смеси. Конечный продукт, произведённый на заводе, обычно называемый «жёлтый пирог» (U_3O_8 с примесями), упаковывается и отправляется в бочках. Главная опасность, следующая из процесса обогащения – выбросы пыли. Закрывая завод по добыче урана, нужно

избавиться от больших количеств радиоактивно загрязнённых отходов безопасным способом.

Отходы от процесса обогащения, отходы с урановой обогатительной фабрики имеют форму жидкого раствора. Они обычно откачиваются в искусственные водоёмы для конечного захоронения. Количество произведенных отходов фактически равно количеству добытой руды, так как извлеченный уран представляет только незначительную долю от общей массы. Таким образом, количество радиоактивных отходов (РАО), произведённых на тонну (t) урана, обратно пропорционально количеству руды (концентрации урана в руде).

Самый большой в мире искусственный водоём около завода по производству урана – Rössing в Намибии; он содержит более 350 миллионов тонн твёрдого материала. Аналогичные объекты в Соединённых Штатах и Канаде содержат до 30 миллионов тонн твёрдого материала. В Восточной Германии – 86 миллионов тонн.

Однако раньше отходы в некоторых случаях просто выбрасывались в окружающую среду без всякого контроля. Самый тревожный пример – в Монтане (Габон) такая практика продолжалась до 1975 г.: филиал французской компании Cogéma добывал уран там с 1961 г. В течение первых пятнадцати лет эксплуатации отходы с завода по производству урана сбрасывались в ближайший ручей. В общей сложности около двух миллионов тонн отходов с этого завода были выброшены в окружающую среду, загрязняя воду и опускаясь в донные отложения в речной долине. Когда добыча прекратилась в 1999 году, радиоактивные отходы вместо вывоза и утилизации покрыли тонким слоем почвы, склонной к эрозии.

Не считая удалённого урана, жидкие отходы содержат все элементы руды. Поскольку продукты полураспада урана (торий–230 и радий–226) из руды не выделяют, раствор содержит до 85 процентов от природной радиоактивности руды. Из-за технических ограничений не может быть извлечён весь существующий в руде уран. Поэтому жидкий раствор содержит немного остаточного урана. Кроме того, жидкий раствор содержит тяжёлые металлы и другие загрязнители, типа мышьяка, так же как и химические реактивы, добавленные в процессе дробления.

Радионуклиды, содержащиеся в урановых отходах, обычно испускают в 20–100 раз больше гамма–радиации по сравнению с природным уровнем. Гамма–радиация локализована, и ее уровень быстро уменьшается при увеличении дистанции.

Когда поверхность отвалов высыхает, мелкий песок разносится ветром. Небо было тёмным от бурь, разносящих радиоактивную пыль по деревням, расположенным в непосредственной близости от восточ-

ногерманских свалок отходов около завода по обработке урана до того момента, пока свалки не были защищены покрытиями. Впоследствии радий-226 и мышьяк были найдены в образцах пыли в этих деревьях.

Радий-226 в отходах распадается с образованием радиоактивного газа радон-222, продукты распада которого могут вызывать рак лёгких при вдыхании. Часть радона улетучивается. Норма выброса радона не зависит от процента содержания урана в отвалах; она зависит главным образом от общего количества урана, первоначально содержавшегося в добытой руде. Выброс радона – главная опасность, которая остаётся после того, как урановые шахты закрыты. Американское агентство по охране окружающей среды (EPA) оценило риск заболеть раком лёгких у жителей, проживающих поблизости от неизолированных свалок РАО на расстоянии до 80 гектаров, как два случая на сто человек.

Когда радон распространяется при помощи ветра, много людей получают небольшие дозы радиации. Хотя риск для человека не слишком велик, об этом нельзя забывать из-за большого количества людей, которых эта проблема затрагивает. Принимая во внимание беспороговый дозовый эффект, EPA оценило, что залежи отходов уранодобывающей промышленности, существующие в Соединённых Штатах (по состоянию на 1983 г.), могли вызвать 500 смертельных случаев от рака лёгких в течение 100 лет, если бы не было предпринято никаких контрмер.

Вытекание загрязнённой жидкости из отвалов – ещё одна большая опасность. Такие утечки создают риск загрязнения грунтовых и поверхностных вод. Опасные для людей уран и мышьяк попадают в питьевую воду и рыбу. Проблема утечек очень важна в случае с кислотными жидкостями, поскольку радионуклиды более подвижны в кислой среде. В отходах, содержащих сульфид железа, происходит самоподдерживающееся производство серной кислоты, что увеличивает скорость перемещения радионуклидов в окружающую среду. Утечка из хранилища отходов в Хельмсдорфе («Висмут») происходила на уровне 600 000 кубометров ежегодно; только половину от этого количества удавалось останавливать и откачивать обратно в хранилище, пока не заработала установка по обработке загрязнённой воды. По сравнению со стандартами для питьевой воды в составе жидкости в Хельмсдорфе содержалось: сульфаты – в 24 раза больше, мышьяк – в 253 раза больше, уран – в 46 раз больше. В районе венгерского завода по хранению урановых отходов Pécs, загрязнённая грунтовая вода перемещается со скоростью 30–50 м ежегодно в направлении источников питьевой воды ближайшего города.

В связи с длинным периодом полураспада радиоактивных элементов необходимо в течение длительного времени поддерживать безопасность хранилищ отходов на высоком уровне, однако хранилища подвержены

многим видам эрозии. После ливня могут сформироваться овраги; растения и животные могут повредить хранилища, что увеличит выброс радона и сделает хранилище более восприимчивым к климатическому воздействию. В случае землетрясений, сильного дождя или наводнений, хранилища могут быть полностью повреждены. Например, это случилось в 1977 г. в Гранте, Нью-Мексико (США) и привело к утечке 50 000 тонн жидкой смеси и нескольких миллионов литров заражённой воды, в 1979 г. в Черч Рок, Нью-Мексико, это привело к утечке более 1000 тонн жидкой смеси и приблизительно 400 млн литров зараженной воды.

Иногда, из-за подходящих характеристик, сухие РАО использовались для строительства домов или для захоронения мусора. В построенных из такого материала домах, были обнаружены высокие уровни гамма-излучения и концентрации газа радон. Американское агентство по охране окружающей среды (EPA) оценило риск получить рак легких для жителей таких домов, как 4 случая на 100 человек.

Очистка выработанных месторождений

На заре развития уранодобывающей промышленности, после Второй мировой войны, горнодобывающие компании оставляли шахты в том виде, в котором они были на момент исчерпания месторождения: в США не считалось нужным что-либо предпринимать даже в случае с открытыми месторождениями, не говоря уже об утилизации производённых отходов; в Канаде, РАО завода по переработке урана часто просто сваливались в ближайшие озера.

В Канаде и Соединённых Штатах, всё ещё существуют сотни небольших шахт по добыче урана, где никаких работ по утилизации и восстановлению не предпринималось. В некоторых случаях, чиновники всё ещё пытаются определить владельцев, которые могли бы считаться ответственными за утилизацию отходов, время от времени правительственным ведомством приходится утилизировать отходы на этих участках за свой счёт (по крайней мере, они объявляют об этом). Пример успешной программы по утилизации – это большая шахта Джекпайл Пагуайт в Нью-Мексико. Значительная работа, которая приближается к завершению, была произведена для утилизации отходов больших шахт «Висмут» по добыче урана в Восточной Германии.

Очистка необходима не только для неработающих шахт, но также и по завершении выщелачивания месторождений: от производённых жидких отходов необходимо безопасно избавиться, и грунтовая вода, загрязнённая вследствие процесса выщелачивания, должна быть восстановлена до чистого состояния. Восстановление грунтовой воды – очень трудоёмкий процесс, невозможно восстановить её качество до изначального, хотя и применяются сложные насосы и схемы обработки.

В Соединённых Штатах усилия по восстановлению воды были приостановлены во многих случаях, после того, как годы перекачки и обработки воды не привели к осязаемому уменьшению количества загрязняющих веществ. После этого стандарты по очистке воды были смягчены.

Тогда как урановые месторождения главным образом расположены в отдалённых областях, где грунтовая вода едва пригодна для питья, всё-таки многие места разработок находились в плотно населённых областях, в частности, в тех местах, где с помощью выщелачивания добывали уран для Советского Союза. Если программы по восстановлению идут полным ходом в Германии и Чешской Республике, то в Болгарии не делается ничего.

Чтобы ограничить выброс загрязняющих веществ в окружающую среду, нужно решить проблему избавления от РАО. Идея вернуть отходы туда, откуда была добыта руда не обязательно является верным решением. Хотя большинство урана было извлечено из руды, это не сделало её менее опасной: совсем наоборот. Большинство радионуклидных примесей (85 процентов всей радиоактивности и всех химических примесей) всё ещё присутствуют. С помощью механических и химических процессов использованная урановая руда находится в такой форме, в которой радионуклиды стали более подвижны и более восприимчивы к перемещению в окружающую среду. Поэтому в большинстве случаев сброс отходов в подземные шахты невозможен; там они находились бы в прямом контакте с грунтовой водой.

Это похоже на ситуацию с хранением отходов в открытых шахтах. Здесь также существует непосредственный контакт с грунтовой водой и утечки повышают риск загрязнения грунтовой воды. Преимущество хранения в шахтах только одно – это относительно хорошая защита от эрозии. В большинстве случаев отходы сваливаются на поверхности земли из-за отсутствия других вариантов. В этом случае есть возможность принимать меры защиты. Обязательно необходимо защитить РАО от эрозии.

В Соединённых Штатах подробные инструкции для захоронения отходов были разработаны Агентством по охране окружающей среды (ЕРА) и Комиссией по ядерному регулированию (КЯР) в 1980-х гг. Эти инструкции не только определяют максимальные концентрации загрязняющих веществ в почве и допустимые выбросы загрязняющих веществ (в частности для радона), но также и промежутки времени, в течение которого предпринятые меры должны работать: 200–1000 лет, желательно без активного обслуживания. На основании этих инструкций более чем дюжина мест, где скопились РАО, была приведена в порядок. Частично путем покрытия РАО слоем из глины и горной породы, и частично посредством переноса отходов в более подходящие места, чтобы избежать опасности при наводнении или загрязнения грунтовой воды.

В Канаде, напротив, меры, принятые для утилизации отходов уранового производства, являются намного менее строгими; для РАО в области озера Эллиот, Онтарио, например, такие меры включают в себя «водное покрытие» как единственный «защитный барьер». Около урановых шахт в Восточной Европе и экс-СССР ситуация разная: в Восточной Германии, Венгрии и Эстонии в настоящее время места урановой добычи пытаются очистить и решить проблему РАО, а в Чешской Республике, на Украине, в Казахстане и Кыргызстане всё ещё не разработаны меры восстановления. 100 миллионов тонн отходов в Актау (Казахстан) даже не оборудованы временным покрытием; поэтому, большое количество пыли продолжает рассеиваться по окрестностям. Отходы в Киргизии расположены на крутых склонах и подвергаются опасности распространения из-за оползней.

Стоимость утилизации отходов охватывает чрезвычайно широкий диапазон. Верхний предел цен установили правительства в Соединённых Штатах и Германии. Если исходить из произведённой продукции, то утилизация отходов, образовавшихся при производстве фунта U3O8, составляет \$14. Эта цифра превышала стоимость фунта U3O8 до того, как началось недавнее повышение цен. Нижний предел отмечен в Канаде – US\$ 0,12; это отражает необычайно низкие экологические стандарты, применяемые в случае месторождения Эллиот Лэйк.

Чтобы избежать продолжения ситуации, в которой брошенные шахты приходится очищать за средства налогоплательщиков, добывающая промышленность обязана начинать отчисление денег на утилизацию отходов в тот момент, когда начинается добыча. Но даже эта мера не может гарантировать, что не будут привлечены средства налогоплательщиков: средства, отложенные для очистки от РАО мест урановой добычи, принадлежавших обанкротившейся Atlas Corp в Моабе (Юта, США), например, составляют лишь три процента от стоимости программы очистки, которая тянет на US\$ 300 миллионов. В Австралии закрытие Рэйнджер Майн стоит около 176 миллионов австралийских долларов, из которых есть лишь 65 миллионов. В случае, если бы компания ERA, которой принадлежит Рэйнджер Майн, обанкротилась – налогоплательщикам пришлось бы платить за утилизацию отходов.

Запасы урана. Первичные ресурсы

Месторождения урана обычно классифицируются по размеру подтверждённых запасов руды и стоимости её извлечения. Согласно авторитетной «Красной Книге» (АКК 2004), «известные ресурсы», которые можно добыть так, чтобы стоимость была ниже \$130/кг (эквивалентный US\$50/фунт U3O8) составляют приблизительно 4,6 миллиона тонн ура-

на во всём мире. Кроме того, так называемые «необнаруженные запасы», которые можно добыть за те же деньги, составляют 6,7 миллиона тонн урана, плюс 3,1 миллиона тонн урана, стоимость добычи которого неизвестна. Так как «необнаруженные запасы» – как следует из названия – являются лишь теоретически подтверждёнными, дальнейшее обсуждение будет ограничено «известными ресурсами», включая категории ДПР (Достаточно проверенные ресурсы) и ПДР I (Предполагаемые дополнительные ресурсы I). Рис. 2 показывает мировую карту ДПР, добыча которых стоит менее US\$130/кг урана (WUP 2005).

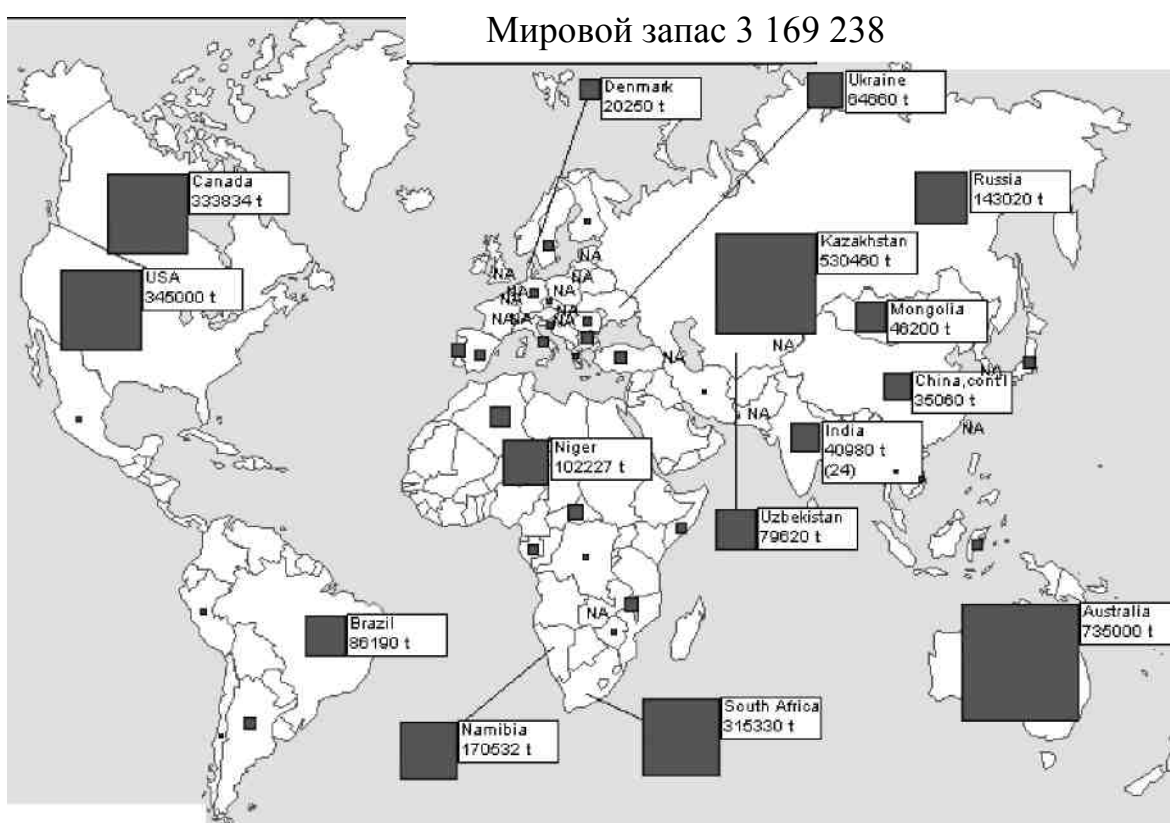


Рис. 2. Мировые запасы урана (ДПР по цене \$130 за кг урана) (тонн урана) ПДР на период 1/1/2003, стоимость урана US\$130/кг или меньше (Организация экономического сотрудничества и развития); t – тонны, NA – данных нет

Уран, в отличие от любого другого сырья, найден на всех континентах. Но лишь немного стран являются основными источниками урана, в особенности если речь идет о рудах с высоким содержанием урана, которые можно добыть по низкой цене.

Достигнув пика приблизительно в US\$ 43/фунт U₃O₈ в конце 1970-х, цена урана на рынке скоро опустилась до US\$ 10/фунт U₃O₈. В конце 2000 г., она даже опускалась до самого низкого уровня – US\$ 7/фунт U₃O₈, но затем начала подниматься снова, достигнув US\$

33/фунт U3O8 10 октября 2005 г.. Средняя цена урана по «спотовым» и годовым контрактам в Европе с 1994 до 2008 г. показана на рис. 3.

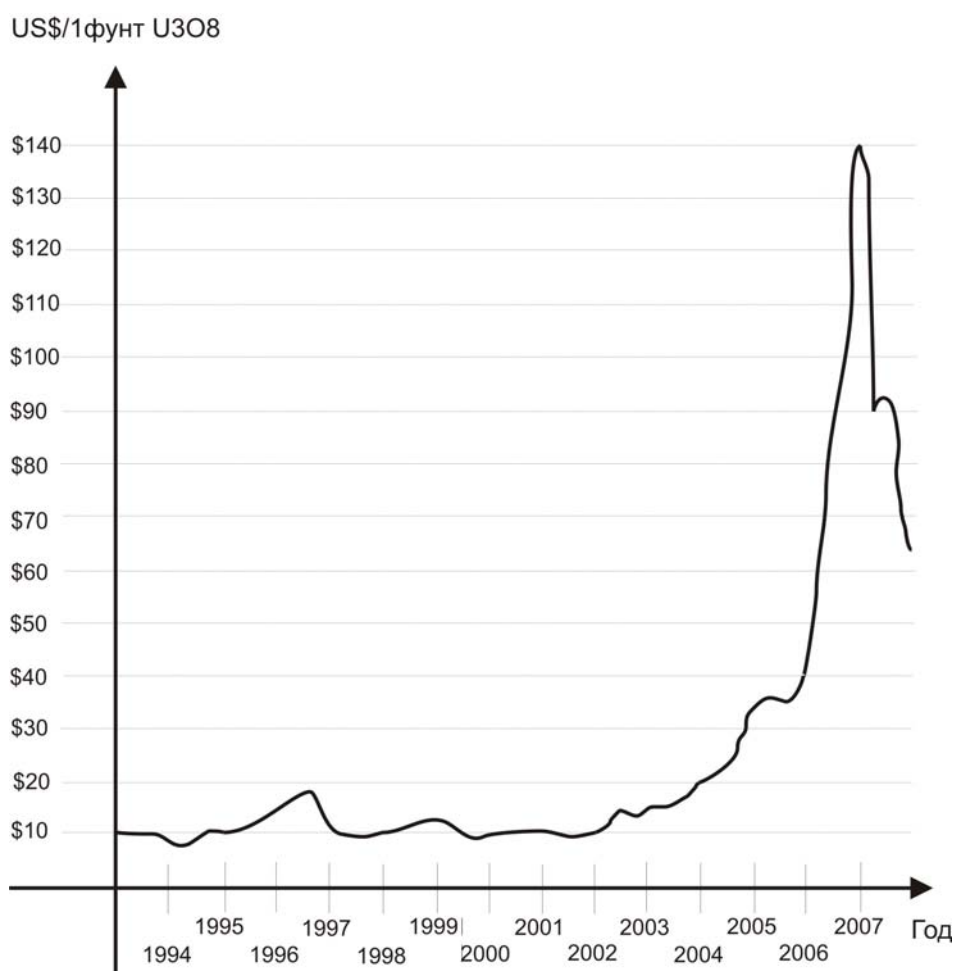


Рис. 3. Изменение цены урана с 1994 по 2008 г.

В течение двух десятилетий из-за снижения цен на уран работы по разведке месторождений урана свелись к минимуму. Но теперь они снова растут, в частности с тех пор, как цена на уран на рынке достигла в сентябре 2004 г. US\$ 20/фунт U3O8; много геологоразведочных компаний открылись заново или изменили свой подход. В результате новые данные могут увеличить количество известных источников. В то время как открытие крупномасштабных месторождений не является невозможным, всё-таки более вероятно, что ведущиеся работы выявят в основном небольшие месторождения с низким содержанием урана в руде. Единственное исключение – Ши Крик (Саскатчеван, Канада), где, возможно, обнаружено крупное месторождение. Впервые за 20 лет.

Несколько месторождений урана в настоящее время недоступны для добычи из-за политических препятствий. Самый известный пример – это

крупное месторождение в Джабилуке на территории Северной Австралии. Участок окружен Национальным парком Какаду, но включен в список мирового наследия ЮНЕСКО. Из-за препятствий со стороны традиционных владельцев (коренных народностей), компания ERA была вынуждена остановить разработку месторождения и засыпать склон, на котором уже велась работа. Другой пример – Кроунпойнт, в Нью-Мексико (США). По этому проекту, осуществлявшемуся на земле Навахо, было приостановлено действие лицензии в мае 2000 г. по запросу от местных истцов. Тем временем, Совет Навахо (одна из народностей североамериканских индейцев) издал закон, запрещающий добычу и переработку урана на земле Навахо. Закон вступил в силу 29 апреля 2005 г., но может быть изменен федеральным правительством.

Лицензия на добычу урана на озере Маклин (Саскатчеван, Канада) была аннулирована в сентябре 2002 г. решением суда по требованию местной экологической организации. Однако компания Cogema, которой принадлежит месторождение, добилась в марте 2005 г. возобновления работ через суд.

Предполагаемые новые шахты по добыче урана в индийских провинциях Джарканд, Андхра Прадеш, и Мегхалаи встретили сильное сопротивление коренных жителей и экологических групп.

Оппозиция состоит не только из экологических организаций или коренных жителей: в Австралии три штата (Квинсленд, Виктория и Западная Австралия) запретили добычу урана. Хотя это и не удерживает геологоразведочные компании, идущие на риск ради продолжения работы в этих штатах. Они, очевидно, надеются на пересмотр политики, зная, что действующее федеральное правительство благосклонно относится к добыче урана.

В дополнение к тем месторождениям, где уран добывается как основной ресурс, существует несколько типов месторождений, где уран – только сопутствующий продукт, добываемый вместе с золотом, медью или фосфатами.

В Южной Африке весь уран добывается как побочный продукт добычи золота. Однако, учитывая неблагоприятный обменный курс местной валюты и недавние низкие цены на уран, в настоящее время остался всего один золотой рудник (Ваал Ривер), добывающий ещё и уран. Кроме того, малая доходность многих южноафриканских золотых рудников может повлечь за собой закрытие многих шахт, уменьшая перспективы развития урановой добычи.

Шахта «Олимпик Дам» в Австралии работает на очень большом месторождении меди. Уран добывается как побочный продукт. Несмотря на низкое содержание урана (0,053 %), общее количество урана там

составляет 302000 тонн – это самое крупное урановое месторождение в мире. В настоящий момент происходит дискуссия об удвоении годового объёма добычи.

Фосфат имеет среднее содержание урана от 0,005 до 0,02 %. Потенциальное содержание урана в известных мировых запасах фосфата находится в диапазоне 5–15 миллионов тонн урана (эта цифра не содержится в оценках, приведённых выше). Главные месторождения расположены в Иордании, Марокко, Соединённых Штатах и Мексике. Существуют различные технологии, чтобы выделить уран – в мире работает около 400 установок, использующих мокрый процесс с фосфорной кислотой, которые могут обеспечить производство до 11 тысяч тонн урана в год дополнительно. В то время как множество заводов по добыче урана было построено в странах, таких как Соединённые Штаты, Канада, Испания, Бельгия, Израиль и Тайвань, большинство из них было закрыто из-за недавнего снижения цен на уран, но их перезапуск мог бы стать экономически выгодным снова с повышением цен на уран.

Кроме того, несколько типов больших, но малопродуктивных месторождений урана не включены в мировые оценки урановых ресурсов, самые известные – месторождения чёрного сланца с содержанием урана от 0,005 до 0,04 %. Из-за их большой протяжённости по площади они содержат очень большие запасы урана – 169230 тонн в Роннебурге (Германия), 254000 тонн в Ранштаде (Швеция), и 4–5 миллионов тонн в Чаттануге Шале (США). Но кажется, даже сторонники ядерной энергетики не уверены, что эти запасы урана когда-либо будут использованы: «Чёрный сланец содержит большой запас урана, добыча которого будет сопровождаться очень высокими издержками производства, развитие которого потребовало бы огромных шахт, перерабатывающих заводов и хранилищ РАО, что привело бы к серьёзной экологической оппозиции. Кроме того, область Роннебург в настоящее время – предмет многомиллиардного проекта восстановления «Висмута». Поэтому месторождения чёрного сланца представляют долгосрочный ресурс, для разработки которого потребуется, чтобы рыночные цены на уран достигли US\$ 130/кг, а также преодоление экологической оппозиции, что впрочем необходимо в случае всех трёх месторождений».

Другой потенциальный запас урана, обсуждаемый время от времени – это морская вода: она содержит 3 мг/т урана, но полный запас оценен в 4 миллиарда тонн. Продолжаются исследования относительно улучшения технологии добычи, но пока этот способ неконкурентоспособный с учётом текущих цен на уран, энергетический и экологический баланс ещё не оценён.

Вторичные ресурсы

Вторичные ресурсы – ресурсы, для которых не требуется обрабатывать урановую руду. Они включают уран из других источников, таких как отработавшее топливо, оружейный уран и обеднённый уран, плюс имеющиеся запасы выделенного урана.

Уран из отработавшего топлива: Извлечение урана из ОЯТ в настоящее время осуществляется на перерабатывающих заводах в Ла-Аг (Франция) и Селафилд (Великобритания). Однако до настоящего времени лишь незначительная часть полученного урана была использована для изготовления нового топлива. И нет никаких надежд, что ситуация может измениться в ближайшем будущем.

Как было обнаружено в недавнем сообщении французского Суда аудиторов, предприятие Электриситэ де Франс (ЭФ) произвело запас переработанного урана (ПУ) на 250 лет вперёд. Из 1050 тонн ОЯТ, ежегодно образующегося во Франции в настоящее время, 850 тонн подвергаются переработке в Ла-Аг (кроме того, существуют 100 тонн отработавшего МОКС-топлива, которые не могут быть переработаны вообще). В результате переработки извлечено приблизительно 816 тонн урана и 8,5 тонны плутония. Для долгосрочного хранения примерно 650 тонн из этого количества обращены в более устойчивую оксидную форму. Уран, восстановленный на бывшем перерабатывающем заводе Маркул, так и не был использован для производства нового топлива. Он всё ещё находится в Маркуле, в форме жидкого уранилнитрата: 3800 тонн, принадлежащие ЭФ, и 4800 тонн, принадлежащие СЕА и Согéма.

Использование переработанного урана (ПУ) проблематично по нескольким причинам. Из-за того, что ПУ загрязнен искусственными изотопами урана U-232 и U-236, при обработке необходимы специальные меры предосторожности: U-232 и его продукты распада увеличивают дозу облучения персонала, а U-236, как нейтронный поглотитель, требует более высокого уровня обогащения. Как следствие, использование ПУ становится не очень привлекательным на существующем рынке: изготовление из него ядерного топлива в три раза дороже по сравнению с природным ураном. По причинам, связанным с применяемой технологией, единственный завод, подходящий для обогащения ПУ во Франции (принадлежит компании Eurodif) не может работать с этим материалом из-за опасности загрязнения искусственными изотопами. Для производства двух тепловыделяющих сборок на основе ПУ, которые затем были испытаны на АЭС Круас, материал был обогащён на иностранном центрифужном заводе.

Разбавление ВОУ: Высоко обогащенный уран (ВОУ) из списанных ядерных боеголовок может быть смешан с низкообогащенным ураном (НОУ) для использования в качестве ядерного топлива.

В 1993 г., Соединённые Штаты и Россия заключили соглашение ВОУ–НОУ, согласно которому Россия должна была поставлять обеднённый уран, изготовленный из 500 тонн ВОУ в Соединённые Штаты в течение двадцати лет. Это количество ВОУ представляет собой эквивалент 153000 тонн естественного урана, а его конверсия задействует 92 миллиона разделительных единиц.

Поставки согласно этому соглашению (НОУ, полученный из 30 тонн ВОУ, ежегодно заменяет приблизительно 9000 тонн природного урана) продолжатся до 2013 г.

Тем временем, Соединённые Штаты начали смешивать собственный ВОУ. В общей сложности для этих целей выделено 153 тонны ВОУ; приблизительно 39 тонн уже переработаны, остальное будет переработано до 2016 г. (NEA 2004)

К сожалению, в ВОУ содержится не только U–235, но и большое количество U–234. Если «нежелательный» уран–234 оказывается в ядерном топливе, то, скорее всего, топливо не сможет соответствовать принятым стандартам. Поэтому желательно смешивать ВОУ с материалом, в котором содержание U–234 низко.

В России данная проблема решается путём обогащения урановых хвостов (радиоактивные отходы добывающей промышленности) и получения смеси с содержанием 1,5 % по урану–235, для чего используются избыточные мощности центрифужных заводов. Этот подход в дальнейшем позволит России выполнить обязательства по соглашению ВОУ–НОУ, не затрагивая запасы природного урана. Наиболее интересно, что обогащение хвостов требует большего количества мощностей, нежели тех же мощностей высвобождается при разбавлении ВОУ (Diehl 2004). Огромное количество работы для создания ВОУ, таким образом, сделано впустую; происходит лишь восстановление урана в прежнем состоянии.

Уран за счёт обогащения «хвостов»: Отходы, являющиеся результатом обогащения урана, называют обеднённым ураном или «хвостами». Они находятся в форме гексафторида урана (UF₆) и всё ещё содержат некоторое количество делящегося изотопа урана U–235, который может быть извлечён дальнейшим обогащением. С 1996 года «хвосты» западноевропейских обогатительных компаний Уренко (URENCO) и Евродиф (Eurodif) посылают в Россию для дообогащения. В России обогащают не природный уран, а эти хвосты на предприятиях, принадлежащих Росатому – Российскому Федеральному Агентству по атомной энергии (ранее – Минатом). Продукт, полученный через дообогащение, – главным обра-

зом материал, эквивалентный природному урану. Этот продукт посылают назад в Уренко и Евродиф, в то время как вторичные «хвосты» остаются в России, где они далее повторно обогащаются до состояния, аналогичного природному урану. Этот материал используется для разбавления ВОУ. Судьба оставшихся «хвостов», в количестве не менее двух третей от ввезённого, до сих пор неизвестна. В мае 2005 г., компания Cogéma/Argeva объявила, что подписано соглашение с российским Техснабэкспортом о передаче технологии обесфторивания, которая позволяет переводить гексафторид урана (UF₆) обратно в форму U₃O₈, что является более подходящей для хранения формой. В августе 2005 г. Росатом объявил, что «хвосты» могут быть использованы в быстрых реакторах.

В настоящее время Уренко и Евродиф посылают 7000 тонн урановых «хвостов» в Россию для дообогащения ежегодно и получают обратно около 1100 тонн эквивалентного природному урана. Eurodif, кроме того, получает 130 тонн урана в форме UF₆, обогащённого до 3,5 процентов. Для Urenco и Eurodif дообогащение связано, прежде всего с уклонением от утилизации хвостов. Для Росатома вследствие этих контрактов возникает возможность использовать избыточные мощности по обогащению. Urenco предполагает, что контракт на дообогащение с Россией будет разорван после 2010 г. Детали относительно бизнеса дообогащения могут быть запрошены у Питера Диля (Diehl 2004).

Если цена на уран будет расти, обогатительные компании пойдут по пути использования радиоактивных отходов обогащения. Таким образом они снизят потребности в природном уране за счёт дообогащения. И будут производить такое же количество урана, используя меньшее количество природного материала.

Запасы природного и низко–обогащённого урана: Доступна только небольшая часть информации о запасах низко–обогащённого и природного урана в мире. Это одна из причин неуверенности в прогнозах относительно развития уранового рынка. Природные запасы урана составляют 41 633 тонны, а запасы ВОУ составляют эквивалент 23 440 тонн природного урана (NEA 2004); но эти данные ненадежны, так как информация из большинства стран недоступна.

Замена урану

Продолжительность использования урана может быть продлена за счёт использования других делящихся материалов, например плутония, или изотопа урана–233, который может быть получен через облучение тория.

Плутоний (МОКС–топливо): Что касается топлива, которое используется в легководных реакторах – расщепляющийся изотоп урана U–235 может быть заменен изотопом плутония–239. Его смешивают с

природным или немного обогащённым ураном, чтобы получить смешанное оксидное топливо (МОКС). Пригодный для использования плутоний может быть получен за счёт переработки ОЯТ или из ядерного оружия. Центр Международной безопасности и Сотрудничества в Стэнфордском Университете оценивает общее количество оружейного плутония в 92 тонны, этого хватит, чтобы заменить 11 040 тонн природного урана, а количество энергетического плутония – в 252 тонны, которые смогут заменить 30 240 тонн природного урана. Некоторые особенности производства и обращения с МОКС–топливом таковы, что против его использования выступают некоторые политики. В частности, беспокойство вызывает опасность и экологические последствия переработки ОЯТ, необходимой для выделения плутония, а также необходимость транспортировок на большие расстояния.

В сентябре 2000 г., Соединённые Штаты и Россия подписали соглашение об утилизации оружейного плутония, согласно которому каждая страна утилизирует по 34 тонны этого материала в течение следующих двадцати пяти лет. Плутоний должен быть использован для изготовления МОКС–топлива. С этой целью Соединённые Штаты планируют построить завод по производству МОКСа на объекте Саванна Ривер Сайд в Южной Каролине, в то время как российский завод должен быть построен в Северске, недалеко от Томска. Сборки с американским плутонием были изготовлены на заводах в Кадараше и Маркуле во Франции и доставлены для испытаний в Катобу (Южная Каролина) в апреле 2005 г.

Плутоний, произведённый в коммерческом реакторе, может быть выделен во время переработки ОЯТ. Пока такая переработка главным образом имеет место в Европе, в Ла–Аг (Франция) и Селафилде (Великобритания), но только некоторая часть накопленного ОЯТ подвергается переработке. В дополнение к экологическим проблемам, связанным с этим процессом, переработка имеет ограничения: свежее топливо (которое превращается в ОЯТ, поступающее на переработку), должно быть сделано из природного урана. В противном случае, если свежее топливо сделано из переработанного материала, нежелательные изотопы загрязнят выделенный плутоний. В 2003 г. АЭС Евросоюза (они пока главные потребители МОКС–топлива), использовали МОКС с общим количеством плутония – 12,12 тонн, что эквивалентно 1450 тоннам природного урана и 0.97 млн. единицам деления.

Торий: Индия, ведущая страна по количеству месторождений с низким содержанием урана и с большими месторождениями тория, как и другие страны, рассматривает создание топливного цикла на основе тория. Сам торий (Th–232) не подвергается ядерному делению и таким образом не может поддерживать цепную реакцию, но когда он подвер-

гается нейтронному облучению, то превращается в расщепляющийся изотоп урана U-233, который может использоваться в качестве реакторного топлива. Процесс, однако, требует сильного нейтронного источника, ядерного реактора на урановом или плутониевом топливе для облучения тория. Таким образом, торий не исключает, а только уменьшает потребность в уране. Уран-233 может быть выделен при переработке и превращен в топливо или сожжен. Однако эта технология довольно-таки трудноосуществима, так как отработавшее ториевое топливо очень плохо растворяется в азотной кислоте (это требуется во время переработки), а уран-233 представляет серьезную радиационную опасность из-за присутствия урана-232 и сильных гамма-излучающих продуктов его распада.

Прототипы реакторов на основе тория (AVR в городе Jülich и THTR 300 в городе Hamm-Uentrop, Германия) были закрыты вследствие технических проблем. Их топливо было сделано из тория и высокообогащенного урана, помещенных в графитовую оболочку.

Даже если бы технологические проблемы ториевого топливного цикла были решены, запасы тория также ограничены, а эксплуатация привела бы к новым экологическим проблемам.

Южная Африка планирует начать эксплуатацию реактора PBMR. Однако, этот тип реактора использует только уран, несмотря на свою схожесть с THTR 300).

Выводы о ресурсах урана

Мировые ресурсы урана могут быть описаны следующим образом: известные первичные ресурсы (возможно, добывать при рыночной цене до US\$ 130/кг) включают 4,6 миллиона тонн урана. Вторичные ресурсы добавляют еще 0,21 миллиона тонн природного уранового эквивалента (это добавляет пять процентов к природным ресурсам). Трудно определить, сколько урана можно получить из ОЯТ или за счёт дообогащения – это сильно зависит от наличия и мощности производственных установок). Кроме того, плутоний может заменить около 0,04 миллиона тонн природного урана.

Спрос и предложение на уран

В 2003 г. во всём мире номинальная производительность урановых шахт составила 47260 тонн.

Таблица 1

Добыча урановых руд в мире

Номер	Страна	Тонн урана	% мировой добычи
1	Канада	10457	29,2 %
2	Австралия	7572	21,2 %
3	Казахстан	3300	9,2 %

Окончание табл. 1

4	Россия	3150	8,8 %
5	Нигер	3143	8,8 %
6	Намибия	2036	5,7 %
7	Узбекистан	1770	4,9 %
8	США	846	2,4 %
9	Украина	800	2,2 %
10	ЮАР	758	2,1 %
11	Китай	750	2,1 %
12	Чешская республика	345	1,0 %
13	Бразилия	310	0,9 %
14	Индия	230	0,6 %
15	Германия	150	0,4 %
16	Румыния	90	0,3 %
17	Пакистан	45	0,1 %
18	Аргентина	20	0,1 %
	Общее мировое количество	35772	100 %

Но в реальности произведено было лишь 35772 тонн или 76 процентов от уровня общей производительности. С другой стороны, потребление в том же самом году составило 68435 тонн урана. Таким образом, шахты обеспечили лишь 52 %, остаток был обеспечен вторичными ресурсами. Учитывая, что вторичные ресурсы иссякнут менее чем через десять лет, производство урана из шахт должно будет почти удвоиться, чтобы удовлетворить спрос. А это значит, что будет построено много новых шахт, так как увеличение производства невозможно только за счёт существующих мощностей. Однако увеличить добычу в короткие сроки невозможно, для этого потребуется около десяти лет или больше. Кроме того, есть лишь немного месторождений, готовых к разработке, так как исследования почти не велись в течение прошлых двух десятилетий из-за низких цен на уран. И так как известные запасы урана в рудах с высоким содержанием очень ограничены, увеличение производства должно будет происходить за счёт месторождений с низким содержанием урана в руде. Это приведёт к чудовищным экологическим последствиям. Если предложения о расширении использования ядерной энергии в мире будут поддержаны, то все вышеописанные проблемы усугубятся.

Другой аспект – региональная неустойчивость спроса и предложения. Ни одна страна–потребитель, за исключением Канады и Южной Африки, не может удовлетворить спрос на уран с помощью собственного производства. И многие современные крупномасштабные потребители, за исключением Соединённых Штатов и России, имеют незначительные запасы урана. Только семь стран производят больше урана, чем необходимо для внутренних потребностей (если таковые имеются), см. рис. 4.

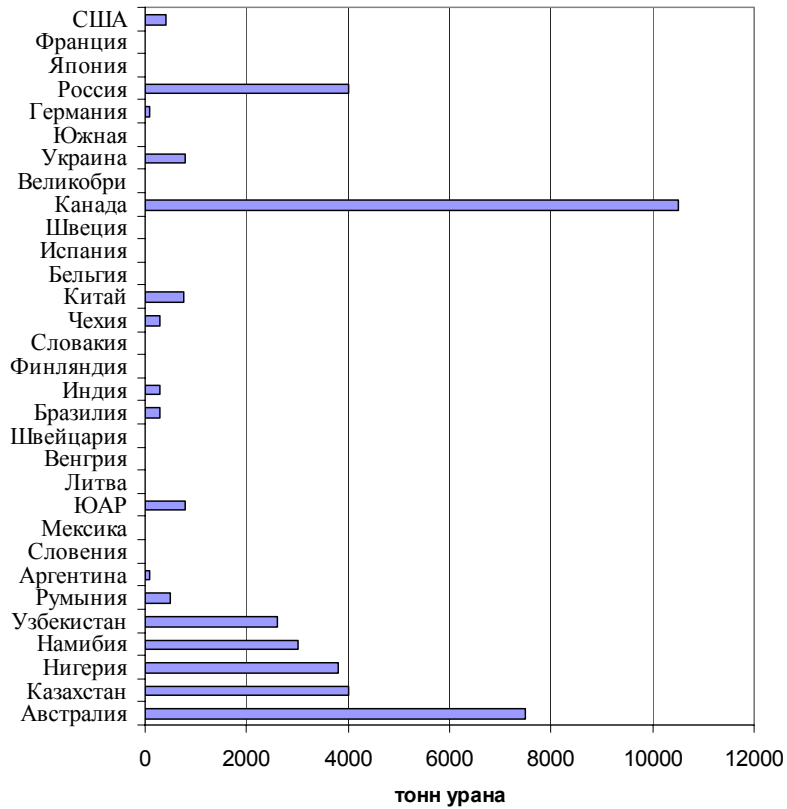


Рис. 4. Производство урана в 2003 г.

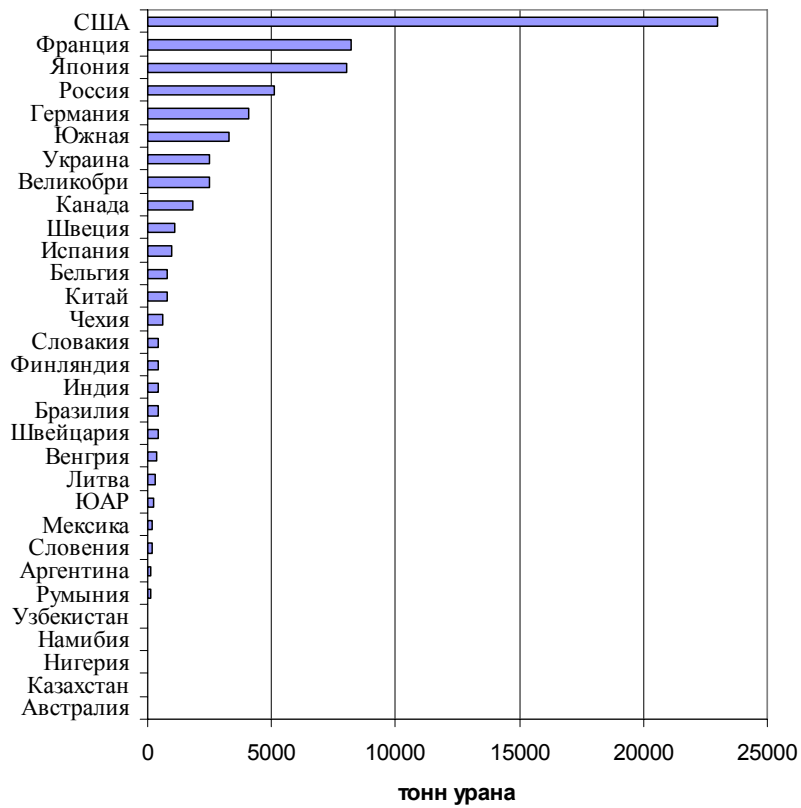


Рис. 5. Потребность в уране в 2003 г.

Особенно серьёзной является ситуация в России: начиная с распада Советского Союза, Россия была отрезана от главных ресурсов урана, главным образом в Казахстане. При современных масштабах производства 3150 т/г (2003), запас России будет истощён через пятнадцать лет. Кроме того, ежегодные потребности самой России составляют 5100 тонн урана (2003), что превышает производство на 1950 тонн. Кроме того, у России имеются планы построить несколько новых реакторов. В отсутствие урана, страна столкнётся с серьёзным кризисом через довольно короткое время. Российские чиновники теперь даже предлагают вести добычу на месторождениях в Якутии (больших, но с низким содержанием урана) только для того, чтобы добыть хоть что-то. Это желание подстёгивается тем фактом, что свободные обогатительные мощности используются не для обогащения природного урана, а для дообогащения импортных «хвостов», чтобы иметь материал для разбавления ВОУ. Количество мощностей, требуемое чтобы получить этот материал из природного урана, было бы существенно ниже. Таким образом, высвободилась бы часть мощностей, первоначально используемых для производства ВОУ.

Эта ситуация должна быть особенно интересна Европейскому союзу (ЕС), так как в 2003 году Россия поставила в ЕС около 35 % от всех ядерных материалов. Эти поставки состояли из: 3400 тонн природного урана, 1000 тонн урана, полученного в результате дообогащения хвостов, и 1300 тонн урана, полученного за счет разбавления ВОУ.

Индия и Китай намереваются претворить в жизнь программы по ядерной энергии и таким образом станут потенциальными крупномасштабными потребителями урана. Однако они располагают только очень ограниченными запасами этого материала.

Индия, не присоединившаяся к Договору о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), испытавшая ядерное оружие в 1974 г., не имеет никакого доступа к иностранным ресурсам урана. Собственные ресурсы Индии небольшие и с низким содержанием урана. Но, не имея другого выбора, Индия в настоящее время планирует разрабатывать новые месторождения в нескольких частях страны, провоцируя разъярённое коренное население и экологические организации. Усилия Индии в области ториевого цикла нужно рассматривать в этом же контексте. Однако есть некоторые признаки того, что Индия пытается найти политическое решение этой дилеммы: 31 марта 2005 г. она ратифицирована Конвенцию по ядерной безопасности, которая открывает индийские АЭС для иностранных инспекций.

Китай хотел бы импортировать уран из Австралии, однако это пока невозможно из-за международных обязательств поставщика. Китай

не желает допускать инспекторов МАГАТЭ на свои объекты, что необходимо для подтверждения мирных целей китайской ядерной программы. Несмотря на всё это, в феврале 2005 г. Китай и Австралия начали переговоры, направленные на то, чтобы сделать урановые поставки возможными.

Но даже если бы все эти проблемы были преодолены, должен быть учтён ещё один аспект: насколько хватит подтверждённых запасов урана. Известные ресурсы могли бы удовлетворять сегодняшние потребности в течение семидесяти лет. Однако строящиеся новые реакторы увеличат потребление урана. При существующем плане развития и использовании урана в однократном цикле (не подвергая переработке) в реакторах на лёгкой воде, известные ресурсы урана истекли бы приблизительно в 2030 г., а предполагаемые ресурсы – приблизительно к 2060 г. Поэтому ядерная энергетика сможет существовать только при условии новых разработок урана – ценою высоких экологических и экономических издержек.

Ограничения известных запасов урана могли быть преодолены массивным использованием быстрых (бридерных) реакторов. Бридерная технология могла бы увеличить период использования известных урановых запасов до 60 лет. Однако технические проблемы привели к закрытию всех опытных реакторов, за исключением одного в России. Россия и Китай всё ещё считают эту технологию способной удовлетворить их потребности в электроэнергии.

Расширение добычи урана, в то время как проблемы прошлого не решены

- Возрождающаяся горнодобывающая промышленность создаст новые экологические проблемы и долги, в то время как существующие проблемы – наследие Холодной войны – всё ещё не решены во многих странах.

Известные запасы становятся недостаточными для удовлетворения увеличивающегося спроса

- Известные месторождения руды могут удовлетворять спрос до 2030 г. (без переработки ОЯТ), предполагаемые ресурсы закончатся приблизительно к 2060 г. Поэтому урановая промышленность будет обращать всё большее внимание на месторождения с низким содержанием урана в руде, что ведёт к серьёзным негативным экологическим последствиям.

- Вторичные ресурсы в настоящее время обеспечивают почти половину потребностей в уране, однако их количество составляет пять процентов от мировых запасов природного урана.

Нехватка добывающих мощностей

- Уранодобывающая промышленность должна удвоить производство в течение приблизительно десяти лет, чтобы удовлетворять сегодняшний спрос. Но существующих мощностей для этого не хватит. Лишь небольшое количество новых шахт может быть открыто в этот срок, а подготовка дополнительных шахт займёт длительное время.
- Какой-либо рост спроса может быть удовлетворён только увеличением добывающих мощностей.

Региональные несоответствия спроса и предложения

- Наиболее крупные потребители урана имеют очень небольшие его запасы и должны будут импортировать этот материал. Только семь стран обеспечивают свои нужды и могут экспортировать уран.
- Особенно сомнительной является ситуация в России, которая стоит на пороге серьёзного кризиса. Этот кризис будет иметь влияние на поставки урана в ЕС, который в настоящее время зависим от России.
- Проблемы со снабжением урана будут развиваться быстрее, если Индия и Китай, не имеющие значительных урановых ресурсов, начнут обещанное масштабное развитие атомной энергетики.
- Кроме того, возникнут серьёзные проблемы в области охраны урановых грузов, направляющихся в Россию, Индию, и Китай.

3. Обращение с ядерными отходами

Транспортировка

Без транспортировки радиоактивных материалов ядерная энергетика не сможет существовать, потому что транспортировки обеспечивают связь между отдельными стадиями ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Примеры транспортируемых материалов – гексафторид урана, новые и отработавшие топливные элементы, и многие виды РАО. Во всем мире ежегодно совершается приблизительно 100000 транспортировок, связанных с ЯТЦ; в Германии происходит около 10000 перевозок ежегодно. Часть транспортируемого сырья преодолевает длинные расстояния, например, гексафторид урана от Германии до России (приблизительно 1000 км по земле) или плутоний с перерабатывающего завода во Франции в Японию (больше чем 15 000 миль по морю). В некоторых местах происходит сосредоточение транспорта (перерабатывающие предприятия, временные предприятия хранения, порты). В интересах безопасности населения и транспортных рабочих, система транспортировок должна быть хорошо продумана, с учётом возможных несчастных случаев и радиационного облучения транспорта. В большинстве стран ядерные транспортировки ограничиваются одним–двумя маршрутами. Например, немец-

кие АЭС снабжаются топливом, произведённым в Швеции, тогда как шведские электростанции снабжены топливом, сделанным в Германии.

Для транспортировки радиоактивных материалов применяют рекомендации МАГАТЭ. Рекомендации направлены на уменьшение опасности до «приемлемого» уровня. Философия безопасности основана на том, как упаковать радиоактивный материал. Требования по надёжности упаковки зависят от того, какой материал находится внутри. Для транспортировки высокорadioактивного вещества контейнер должен выдерживать серьезные нагрузки. Требования следующие: выдерживать падение с высоты 9 м на плоский объект, падение с высоты 1 м на стальной брусок, температуру 800°C в течение 30 минут, погружение на глубину 15 м на 8 часов. Эти требования часто критикуются, потому что подобные стандарты могут обеспечить некоторую безопасность, но не учитывают всех возможных опасностей. Например, такие требования по безопасности не гарантируют сохранность контейнера при столкновении с транспортным объектом, передвигающимся со скоростью 80 км/ч на скалистой площадке, или при нахождении в туннеле, где происходит пожар в течение 30 минут. В таких случаях, произойдет выход радиации в окружающую среду и сильное облучение населения.

В последние годы случилось небольшое количество несчастных случаев при транспортировках в рамках ЯТЦ. Информации об утечках радиации не публиковалось. Однако было заявлено о существенном увеличении числа транспортировок из-за ввода в строй новых АЭС, хранилищ отходов и т. п. в некоторых странах. К счастью, никаких серьезных несчастных случаев до сих пор не происходило. Но это всё-таки возможно при каждой транспортировке.

Нельзя добиться абсолютной безопасности при транспортировке радиоактивного материала. Не существует эффективной защиты транспортного средства и контейнера от террористических нападений. Несчастные случаи или террористические атаки во время транспортировки высокоактивных отходов, ОЯТ, плутония могут привести к смертельным дозам облучения в непосредственной близости и в пределах нескольких километров от места аварии. В таком случае потребовалось бы переселение или эвакуация людей, живущих в радиусе нескольких километров.

Переработка ОЯТ

В шестидесятых и начале семидесятых годов прошлого столетия, существовала мечта: бесконечная работа атомных электростанций, обеспечивающих всю необходимую энергию дешево. ЯТЦ тогда казался «вечным двигателем». После использования свежего уранового топлива в реакторах его требовалось переработать, чтобы выделить уран и плу-

тоний, затем использовать эти материалы для производства нового топлива для бридерного реактора, где количество плутония в топливе увеличивается. Отработавшее в бридере топливо нужно было снова переработать, чтобы получить ещё больше плутония. Однако мечта не осуществилась. Ввиду проблем в области безопасности, несовершенства экспериментальных реакторов и высокой стоимости, программы развития бридеров были приостановлены в большинстве стран. Сначала – в Соединённых Штатах (в 1977 году), несколько лет спустя – в Германии, и позже – в Великобритании и Франции. Сегодня только Япония, Россия и Индия имеют интересы в области бридерных реакторов. Однако разработки в этих странах идут медленно и отстают от запланированных сроков. В дополнение к описанной ситуации можно отметить, что основная причина переработки ОЯТ пропала. Без развитой бридерной технологии непрерывная «переработка» топлива невозможна. Однако ядерная промышленность в некоторых государствах продолжает переработку. Теперь, выделенные уран и плутоний планируют использовать уже в легководных реакторах в виде МОКС–топлива. Не в каждой такой стране есть предприятия, осуществляющие переработку ОЯТ. Например, в Германии было принято решение отказаться от переработки в 1989 году, исходя из экологических соображений и экономических причин. Немецкое ОЯТ перерабатывается во Франции и Великобритании; там же, но в гораздо меньших количествах перерабатывают ОЯТ из Бельгии, Швейцарии и некоторых других стран. В эксплуатации сейчас находятся следующие перерабатывающие предприятия:

Таблица 2

Перерабатывающие предприятия

Страна	Местоположение	Производительность [т/год]
Франция	Ла–Аг (UP2–800)	1 000
	Ла–Аг (UP3)	1 000
Великобритания	Селлафилд (B205)	1 500
	Селлафилд (THORP)	1 200
Россия	«Маяк» Челябинск (RT1)	600
Япония	Токай Мура (Токай)	100
Индия	Тарапур (PREFRE)	400
	Калпаккам (KARP)	100

Все данные в таблице номинальные – как правило, ни один из заводов не достигает этих объёмов производительности. В частности, известно, что THORP в Селлафилде никогда не работал на полную мощность. Следует отметить, что переработка в военных целях производится во Франции, Великобритании, России и Индии, а в Соединённых Штатах и Северной Корее переработка ведётся только в целях оборонной промышленности.

Переработка – сложный химический процесс. ОЯТ разрезают на куски и погружают в азотную кислоту. После этого выделяют уран и плутоний, а остальные материалы (отходы) подвергаются дальнейшей обработке. В результате переработки появляются:

- плутоний;
- уран;
- низко-, средне- и высокоактивные отходы;
- радиоактивные выбросы в атмосферу и сбросы в водоёмы.

Если подвергнуть переработке восемь отработавших урановых топливных элементов, то из полученных материалов можно сделать один МОКС-топливный элемент, что будет сопровождаться образованием огромного количества РАО.

Плутоний/МОКС

В настоящее время результатом переработки в гражданских целях является плутоний. Обычное топливо легководных реакторов содержит приблизительно 1 % плутония. Теоретически ежегодно можно выделять 5–6 тонн плутония.

Плутоний должен быть использован для производства МОКС-топлива. В действительности очень трудно использовать весь этот материал. Во всем мире существуют только небольшие производственные мощности для производства МОКСа. В промышленном масштабе производство существует только во Франции и Бельгии. Завод по изготовлению МОКС-топлива в Селлафилде работает с 2001 года, но его эксплуатация не была идеальной и включала в себя грубые ошибки персонала. В России нет завода для изготовления МОКСа, в Японии и Индии существуют только небольшие экспериментальные установки. Таким образом, вопрос повторного использования плутония остается туманным. Технологии, связанные с окончательным захоронением этого материала, не разрабатываются, существует лишь вариант иммобилизации плутония (смешивание с высокоактивными отходами и жидким стеклом/керамикой).

Вопросы безопасности и доз облучения при работе с МОКСом более значимы, нежели в случае с урановым топливом:

- плутоний более радиоактивен. Вдыхание менее 0,1 мг плутония смертельно;

- риск, связанный с критичностью при обращении и производстве плутония намного выше, чем в случае с ураном;
- существует риск распространения плутония как в течение процессов переработки и изготовления МОКСа, даже если они протекают без аварий, так и вследствие несчастных случаев при переработке, хранении, транспортировке и обращении с плутонием, а также при изготовлении МОКСа и его транспортировке;
- легководные реакторы первоначально не были разработаны для использования в них МОКСа. Работа с таким топливом возможна только при снижении требований по безопасности (реактор менее стабилен, остановить его сложнее);
- при использовании МОКСа количество плутония в активной зоне увеличивается, радиологические последствия более опасны;
- более высокие уровни выделения тепла и нейтронной радиации приводят к тому, что количество сложностей при транспортировке, хранении, и использовании МОКС–топлива возрастает;
- при современном положении вещей и с использованием существующих технологий невозможно использовать МОКС в промышленном масштабе. Окончательное захоронение плутония вызовет затруднения, связанные с более высоким тепловыделением, нейтронной радиацией и критичностью. По сравнению с прямым захоронением уранового топлива, это более сложно, опасно и дорого.

Уран

Уран достигает приблизительно 99 процентов от отработавшего топлива. В большинстве стран только малая часть (или даже вовсе никакая) переработанного урана попадает снова в реактор (в гражданском секторе). Эта часть включает в себя небольшое количество делящегося урана и большие количества нуклидов урана с нежелательными радиационными характеристиками. Большая часть выделенного при переработке урана просто хранится. Небольшое количество урана используется для изготовления брони и артиллерийских снарядов, а также при производстве самолётов. По сути выделенный из ОЯТ уран бесполезен, так как его невозможно использовать в реакторах, так что следует запретить его применение в других областях, где целесообразно использовать нерадиоактивные материалы. Для этого материала не разработаны технологии окончательного захоронения или новые подходы по обращению.

Отходы

Долгоживущие радионуклиды, первоначально сконцентрированные в ОЯТ, после переработки оказываются распределёнными между

разными видами радиоактивных отходов переработки. Некоторые виды отходов – высокоактивны и выделяют большое количество тепла. Благодаря переработке количество радиоактивных отходов увеличилось в 100 раз или больше, по сравнению с объёмом ОЯТ.

Все отходы необходимо строго учитывать и обеспечивать их временное хранение. Это ведёт к повышенным дозам радиации во время безаварийной работы и риску несчастных случаев и аварий. В частности, РАО хранят в жидком виде, что создаёт дополнительную опасность. В Селлафилде только небольшая часть отходов, произведённых на заводе THORP с 1994 г., была остеклована. Экспериментальный перерабатывающий завод WAK в Германии был закрыт в 1990 г.; приблизительно 80 кубометров жидких высокоактивных отходов хранятся на предприятии до сих пор. Запланированное остекловывание должно серьёзно уменьшить риск несчастного случая при хранении и транспортировке. Но радиация и тепловыделение остаются серьёзной проблемой даже в этом случае.

Излучение

Радиоактивное излучение во время растворения топлива, выделения урана и плутония, обработки и хранения отходов – неизбежно. Несмотря на системы защиты и профилактические меры часть радионуклидов все же попадает в атмосферу. Количество радиации, выбрасываемой ежегодно перерабатывающими заводами Селлафилд и Ла-Аг, в десятки и даже тысячи раз больше, чем выбросы с легководных реакторов. В результате люди облучаются вследствие радиоактивного загрязнения почвы, зданий, фауны и флоры. Согласно немецким нормам, оба перерабатывающих завода не получили бы лицензию в Германии. В некоторых исследованиях отмечается, что выбросы влияют на заболеваемость лейкемией у детей (около Ла-Аг уровень в 3 раза превышает обычный, около Селлафилда – в 10 раз). Прямое влияние на заболеваемость лейкемией со стороны перерабатывающих предприятий окончательно не доказано, но и не опровергнуто. Кроме того, проводились исследования по определению уровня облучения различных птиц и морских животных. Оказалось, что мясо птиц и морских животных, подвергшихся облучению радиацией с перерабатывающих предприятий, не удовлетворяет нормам ЕС по импорту пищевых продуктов.

Радиация с перерабатывающих предприятий распространяется не только на соседние области. Жидкие РАО попадают в океан и широко разносятся течениями. Радионуклиды из Селлафилда были обнаружены на побережье Ирландии. Традиционные рыбацкие нации вроде Норвегии опасаются радиоактивного загрязнения в районах промысла, например в Арктике.

Отсутствие экономической выгоды от переработки

Кроме вышеупомянутых аргументов, к негативным аспектам переработки можно отнести:

- В случае с легководными реакторами цель переработки недостижима. Использование полученного из ОЯТ урана в промышленном масштабе пока невозможно из-за отсутствия технологий. Следовательно, нет экономически оправданных инструментов для экономии урана, а также нет способа уменьшить количество плутония в РАО, подлежащих захоронению. В докладе для французского правительства от 2000 г., было сообщено, что переработка и МОКС–топливо в лучшем случае помогут уменьшить потребности в уране на 10 %, а также снизить на 15 % количество плутония в отходах (Marignac и Coeytaux 2003).

- Серьёзные аварии на перерабатывающих заводах реальны. В частности, существует пример, когда разрыв трубы привел к утечке 83 кубометров растворенного ОЯТ. В официальных публикациях сообщалось, что никакого воздействия на окружающую среду не произошло, так как утечка произошла в изолированное помещение. Но эта утечка была обнаружена только спустя несколько месяцев, и только удачное стечение обстоятельств не привело к серьезным последствиям.

- В связи с переработкой ОЯТ на Ла–Аг каждый год осуществляется приблизительно 450 транспортировок плутония или содержащих плутоний материалов. Общая протяженность всех транспортировок по Франции составляет 250 000 км. Здесь не учитываются транспортировки урансодержащих материалов. Очевидно, что топливный цикл без переработки требовал бы куда меньше транспортировок.

- Переработка увеличивает число объектов, способных стать мишенями террористических атак. Помимо транспортируемых материалов, такими мишенями могут быть отдельные объекты крупных комплексов. В частности, если самолет врежется в хранилище для ОЯТ или жидких высокоактивных отходов или же в здание для хранения выделенного плутония, то последствия превзошли бы по масштабам аварию на Чернобыльской АЭС.

- Переработка неэкономична. Несколько исследований на примере Германии, произведенных OECD/NEA, сравнили замкнутый топливный цикл и однократный. В результате было обнаружено, что цикл с переработкой дороже на 14–50 % (Gruppe Ökologie 1998). Новые данные, рассчитанные для Соединённых Штатов, показали увеличение расходов на 80 % в случае, если топливный цикл будет включать в себя переработку (Bunn 2003). Несмотря на то, что выводы этих исследований в пользу переработки, экономическая нецелесообразность – более важный фактор.

В заключение необходимо сказать, что переработка ОЯТ не несёт в себе ощутимой выгоды для безопасности, физической защиты, утилизации отходов или экономики.

Временное хранение

Независимо от типа ядерного цикла (с переработкой или без) необходимо организовать временное хранение ОЯТ и радиоактивных отходов. Для отработавшего топлива и отходов с высоким уровнем активности требуется длительное время хранения для снижения тепловыделения и уровня радиоактивности. Для низко- и среднеактивных отходов необходимо организовать временное хранение на период между различными стадиями обращения с ними и окончательным захоронением.

Для хранения ОЯТ используются три подхода (МАГАТЭ 1995):

- влажное хранение в бассейне выдержки
- сухое хранение в специальных контейнерах
- сухое хранение в емкостях, помещенных в вертикальные или горизонтальные шахты, стенки которых усилены бетоном

Только в некоторых случаях влажное хранение (в Швеции) и сухое хранение (в одном из четырнадцати хранилищ в Германии) осуществляются под землёй. Сухое хранение обеспечивает более низкую вероятность аварий, так как нет систем охлаждения, которые могут выйти из строя, а вероятность коррозии ниже. По этим причинам, а также из экономических соображений, в последние годы предпочтение отдают сухому хранению ОЯТ. С другой стороны, механические воздействия на оболочку выше в случае с сухим хранением, а также должна быть гарантия сохранности контейнеров в течение нескольких десятилетий. Состояние контейнеров в течение такого длительного срока трудно прогнозировать. Это зависит от типа топлива и типа контейнера. Хранилища часто не имеют удовлетворительного защитного барьера против излучения (влажное хранение) или не имеют подходящих средств наблюдения за излучением (сухое хранение). Также нет никакой эффективной системы многоуровневой защиты в случае серьезных воздействий, например крушения самолёта. В большинстве случаев есть только один барьер (сухое хранение в контейнерах) или никакого (влажное хранение в Ла-Аг, Франция). Сравнение уровней безопасности показывает, что преимущество остается за хранением в контейнерах, но риск излучения всё же остаётся. Можно повысить уровень безопасности, но это экономически невыгодно.

Хранилища могут быть расположены на территории АЭС или на некотором удалении (в случае централизованного национального хранилища). Хранение на АЭС предпочтительнее, так как сокращается количество транспортировок. Например, в Германии в последние годы главенствовала именно эта тенденция.

Приблизительно 95 процентов всех радиоактивных отходов – низко- или среднеактивные. Такие отходы хранятся в наземных хранилищах. В случае длительного периода хранения необходимо кондиционирование помещения по соображениям безопасности. Это особенно важно для газообразных и жидких отходов. Такая процедура снижает вероятность выбросов радиации в процессе обращения с РАО. Однако долгий срок хранения и газ, выделяющийся вследствие взаимодействия между РАО, материалом, с помощью которого они изолированы, и упаковкой могут представлять проблему для безопасности, особенно если для иммобилизации использовался бетон.

В случае серьезных аварий возможны большие выбросы радиации, несмотря на более низкую активность отходов по сравнению с ОЯТ и высокоактивными отходами. Например, в результате падения самолета. Из-за более низкого уровня радиоактивности таких РАО стандарты безопасности ниже, чем те, которые установлены для хранения ОЯТ или высокоактивных отходов.

Хранение низко- и среднеактивных отходов может быть осуществлено около реактора или в централизованном хранилище. Предпочтительнее выглядит первый вариант, так как он не требует транспортировок и соответствующих затрат.

Необходимо учитывать риск террористических атак, которые могут быть направлены как против АЭС, так и против хранилищ ОЯТ. Реакторы могут стать основной мишенью, но опасный потенциал больших хранилищ (например, на европейских перерабатывающих заводах) как минимум сопоставим с АЭС. В то же время контейнерное хранение ОЯТ вызывает стойкую неприязнь атомной промышленности в некоторых странах, например в Германии. Кроме того, доступ к хранилищам проще за счет меньшего количества мер физической защиты. Поэтому временные хранилища также могут стать целью для террористов.

Окончательное захоронение

Производство энергии на АЭС – так же как и деятельность в определенных областях науки, медицины, и промышленности – связано с появлением радиоактивных отходов (РАО). Излучение, исходящее от РАО, может вызывать генетические мутации и раковые заболевания, и, таким образом, представляет опасность для людей и окружающей среды. Поэтому радиоактивные отходы должны быть изолированы от окружающей среды. Методы обращения с РАО определяются уровнем их опасности. Этот уровень главным образом определяется по типу и интенсивности радиоактивного излучения, а так же по сроку, в течение которого радиоактивное вещество остается опасным для людей и окру-

жающей среды. Дополнительные факторы – такие свойства РАО, как например интенсивность выделения тепла.

Подробно спектр радиоактивных отходов, возникающих в различных странах, и различия в обращении с ними зависят не в последнюю очередь от того, включает ли ядерная программа той или иной страны переработку ОЯТ, как, например, во Франции, или ОЯТ планируется захоранивать. Страны, которые не подвергают ОЯТ переработке, рассматривают его де-факто и де-юре как отходы.

Период времени, в течение которого отходы представляют угрозу людям и окружающей среде, зависит от периода полураспада различных радиоактивных элементов, содержащихся в РАО. Элементы с периодом полураспада менее 30 лет обычно называются короткоживущими. Радионуклиды с более длинным периодом полураспада называются долгоживущими и содержатся в высокоактивных РАО, а иногда и в отходах средней активности. Большая часть этих отходов образуется в результате производства атомной энергии. Один из радионуклидов особенно длинного периода полураспада – уран-235 (период полураспада: 704 миллиона лет). В процессе производства атомной энергии появляется большое количество радиоизотопов с разными периодами полураспада – например, плутоний-239 (период полураспада – 24110 лет), цезий (период полураспада – 30,2 года), кобальт-60 (период полураспада – 5,3 дня), которые могут быть обнаружены в различных категориях отходов.

Тепловыделение происходит вследствие распада. У многих радиоизотопов период полураспада недолог, что облегчает обращение с ними. Для окончательного захоронения отходов, однако, продолжающееся выделение тепла может создавать такие проблемы, которые связаны с длительным воздействием тепла на изолирующие материалы.

Несмотря на то, что защитные меры и принципы безопасности при обращении с РАО в большинстве стран похожи, есть четкие отличия относительно методов переработки отходов, выбранных для различных типов РАО. Причинами этих отличий служат, например, экономические или организационные условия, связанные с масштабами национальной атомной программы и ответом на вопрос «переработка ОЯТ – да или нет?».

Основные критерии для определения метода переработки РАО – тип, интенсивность радиоактивного излучения, период полураспада доминирующих радиоизотопов. РАО делятся на следующие категории:

- низкорadioактивные отходы
- РАО промежуточного уровня (среднеактивные)
- высокорadioактивные отходы

Низко- и среднеактивные отходы, содержащие, прежде всего, короткоживущие радиоизотопы, период полураспада которых менее или

равен 30 годам, и отходы, в которых содержатся радиоизотопы с большим, чем 30 лет периодом полураспада, хранятся отдельно. Высокоактивные изотопы с коротким сроком полураспада образуются в результате военных программ и учитываются только в тех странах, которые ведут военные программы. В Соединенных Штатах для захоронения таких отходов был организован репозиторий в соляной шахте около Карлсбада, Нью-Мексико (1999). Отходы, появляющиеся в результате производства атомной энергии, обычно содержат большое количество долгоживущих радиоизотопов, которые утилизируют вместе со среднеактивными РАО. Однако, из-за различного уровня тепловыделения, есть потребность в разделении этих категорий.

В зависимости от типа отходов и требований по безопасности, для различных типов определены различные методы захоронения. Для короткоживущих изотопов в составе низко- и среднеактивных РАО захоронение предусмотрено в наземных установках (такая практика установлена во Франции и Соединенных Штатах) или близко к поверхности (Швеция и Финляндия). Все долгоживущие и высокорadioактивные отходы должны быть захоронены под землей, в глубоких геологических формациях.

В отличие от этой международной практики, после принятия решения о репозиториях в Горлебене и Конраде, РАО в Германии начали разделять по уровню тепловыделения, а период полураспада играет незначительную роль. В отличие от некоторых других стран (Франция), это позволяет Германии решать проблему отходов с низким уровнем излучения с помощью локальных хранилищ. А часть низкоактивных РАО можно использовать в коммерческой деятельности, если уровень радиации ниже уровней, установленных в Декрете о Радиационной защите (STRLSCHVO 2001). В других странах (Франция) низкорadioактивные отходы помещают в наземные хранилища, построенные специально для таких целей.

Фактическая ситуация

Научно-техническая дискуссия об управлении РАО происходит как минимум с тех же пор, когда началось обсуждение грани между военным и гражданском использованием атомной энергии. Уже в 1950–60-х гг. XX столетия обсуждался широкий диапазон методов обращения с отходами. Помимо окончательного захоронения, все еще обсуждающегося сегодня, этот диапазон включал в себя такие экзотические варианты, как утилизация РАО в космосе или в Антарктических ледниках. В первую очередь дискуссия касалась среднеактивных долгоживущих изотопов и высокоактивных РАО, включая ОЯТ. В течение шестидесятих годов прошлого столетия была принята концепция окончательного захоронения этих отходов в глубинных геологических формациях. Выбор места в различных

странах зависит от геологической ситуации и местных политических и социальных условий. Решающими факторами для выбора метода обращения с РАО служат стандарты безопасности и экономические аргументы.

Утилизация низко и среднеактивных РАО менее затруднена. На заре развития атомной энергетики происходило захоронение в морях, а в некоторых странах РАО помещали в долговременное наземное хранилище. В 1993 году Лондонская Конвенция остановила захоронение РАО в морях. Сегодня в нескольких странах уже действуют или строятся репозитории для окончательного захоронения низко- и среднеактивных отходов. В Германии также запланировано осуществить геологическое захоронение. Для репозитория на месте железного рудника Конрад, в городе Зальцгиттере, в 2000 году была выдана соответствующая лицензия.

Окончательное захоронение означает помещение РАО в репозиторий, разработанный специально для изолирования отходов от людей и окружающей среды. Обычно захоронение не подразумевает намерений когда-нибудь извлечь отходы обратно. В зависимости от типа отходов и периода времени, в который они будут излучать радиацию, РАО помещают в наземном сооружении или захоранивают в подземных шахтах. На поверхности утилизация возможна только для короткоживущих низко- и среднеактивных РАО. Наземные репозитории – сооружения, изолирующие отходы от людей и окружающей среды посредством технических барьеров. Эти сооружения требуют контроля и обслуживания. Для геологических репозиториях долгосрочная защита людей и окружающей среды обеспечивается геологическими барьерами, которые не требуют обслуживания.

В настоящий момент репозиториях для долгоживущих высокорadioактивных отходов не существует, хотя в течение семидесятых и даже шестидесятых годов прошлого столетия несколько стран предпринимали шаги, направленные на обеспечение окончательного захоронения отходов. Однако почти все страны стоят перед фактом отсутствия разработанных программ обращения с отходами. Главная причина – недооценка научно-технических и социальных проблем, связанных с реализацией таких планов. Сопротивление населения планам захоронения отходов возродило обсуждение вопросов обращения с отходами. Относительно далеко продвинулись в планировании и осуществлении своих программ лишь США (объект Юкка Маунтайн) и Финляндия (АЭС Olkiluoto).

Принципы и требования в области безопасности

На международном уровне главные цели в области безопасности при утилизации радиоактивных отходов состоят в следующем:

- Окончательное захоронение должно гарантировать, что люди и окружающая среда защищены от радиации и других опасностей.

- Потенциальные эффекты окончательного захоронения для людей и окружающей среды не должны ухудшить сложившуюся ситуацию.
- Будущие поколения не должны быть обременены трудностями вследствие сегодняшней деятельности по захоронению РАО.
- Потенциальное влияние окончательного захоронения на людей и окружающую среду других стран не должно быть серьезнее, чем влияние в пределах осуществляющей захоронение страны.

Во многих государствах, включая все страны Европейского союза, вышеуказанные принципы были отражены в законодательстве и требованиях по безопасности. В частности, это верно для радиационных стандартов, действующих при захоронении РАО. Также указанные принципы применяются для совершенствования стандартов. Как пример можно привести введение принципа минимизации влияния в законодательство нескольких странах, включая Декрет о радиационной защите Германии.

Стандарты для долгосрочной оценки безопасности репозитория указывают максимальную приемлемую дозу облучения людей и связанный с этим риск заболеть раком. Действующие стандарты разных стран определяют в качестве максимальной дозы в диапазоне от 0,1 до 0,3 мЗвт ежегодно. Обычно стандарты, связанные с риском, находятся в диапазоне от 10 в минус 4-й степени до 10 в минус 6-й степени. Это означает, что только один человек из 10 000 или 1 миллиона соответственно, облученный в течение всей жизни максимальной допустимой дозой, может заболеть раком.

Стандарты могут быть применены к репозиторию только после того, как территория его размещения всесторонне исследована. Применение требования минимизации облучения может быть применено только на стадии утверждения проекта и строительства. Принципы минимизации включают в себя:

- исключение необязательного излучения или загрязнения людей и окружающей среды;
- поддержание радиоактивного облучения или загрязнения на минимальном уровне, насколько это возможно с использованием передовых технологий в каждом конкретном случае – даже если существующие дозы облучения или уровень загрязнения ощутимо ниже принятых стандартов.

В дополнение к радиационным требованиям есть требования в области защиты окружающей среды, которые необходимо учитывать и выполнять. В Германии требуется учитывать т.н. принцип озабоченности, записанный в Водном Акте. Этот принцип требует защитить водные ресурсы, особенно грунтовые воды, от радиоактивного загрязнения или любого другого загрязнения в случае захоронения РАО.

Для последовательного достижения объявленных целей Международная комиссия по радиационной защите предлагает включить в каждую фазу проектирования репозитория улучшенные меры защиты от радиации (ICRP 1998). Это означает применение обоснованной процедуры, включающей концепцию изменения безопасности (система мультibarьера), для выбора подходящей площадки для репозитория. Похожая идея в сочетании с требованиями по защите грунтовых вод отражена в разработанном, но еще не опубликованном документе «Принципы безопасного окончательного захоронения», который разработан немецким федеральным департаментом по радиационной защите (BFS 2004).

Немецкий комитет по процедуре выбора площадки (AKEND) предложил новую процедуру выбора места для репозитория, в которой отражены следующие радиологические и нерадиологические требования, учитывающие вклад геологических барьеров в долговременную безопасность:

- В случае нормального функционирования репозитория, не должно быть никакой утечки вредных веществ из изолированной зоны в течение одного миллиона лет. Должен быть продемонстрирован запас прочности в отношении изоляции опасных веществ.

- В случае экстраординарных событий, должны быть соблюдены существующие стандарты в отношении влияния на людей и окружающую среду.

В целом эти требования должны помочь найти подходящую площадку для репозитория: выбранный участок должен наилучшим образом удовлетворять правилам поиска и определения площадки, разработанным на основе современных научно-технических знаний, и в любом случае удовлетворять основным требованиям по безопасности.

Почему репозитории располагают в глубоких геологических формациях?

В рамках общих требований по окончательному захоронению, главная цель утилизации РАО в глубоких геологических формациях – изоляция отходов от людей и окружающей среды в течение долгого периода времени. Во всем мире этот принцип применяется к высокоактивным и долгоживущим среднеактивным РАО. Сегодня лучшим вариантом считается захоронение в шахте, специально построенной для этих целей.

Напротив, короткоживущие низко- и среднеактивные РАО в большинстве стран утилизируют на небольшой глубине под землей или даже в наземных сооружениях. В отличие от этого подхода, в Германии довольно рано (1963–1967 гг.) было принято решение утилизировать все виды РАО в глубоких геологических формациях. Главными причинами для этого послужили плотное заселение Германии и интенсивное исполь-

зование земли и воды (Schwibach 1967). Этот альтернативный подход к утилизации РАО был осуществлен в Германии, когда произошло первое «испытательное» захоронение в закрытой соляной шахте (Asse II) рядом с Вольфенбюттелем (1967–1978 гг.), а затем когда короткоживущие низко- и среднеактивные РАО захоронили в Морслебене (1978–1998 гг.).

Можно смело утверждать, что захоронение в глубоких геологических формациях имеет решающие преимущества по сравнению со всеми другими вариантами наземной утилизации РАО, а именно:

- большое расстояние между отходами и биосферой;
- высокая и долгосрочная эффективность в сдерживании радионуклидов и прочих вредных веществ геологическими барьерами;
- медлительность геологических процессов, включая миграцию веществ в геосфере, и, как следствие, надежность выводов о функционировании репозитория в течение долгого времени;
- пассивное функционирование главных барьеров (геологических барьеров) системы захоронения, не требующих контроля и ремонта.

Кроме того, свойства геосферы, обеспечивающие эти преимущества, могут подвергнуться влиянию человека только в незначительной степени. Поэтому долгосрочная безопасность репозитория не зависит от технического и экономического потенциала будущих поколений. Предполагать что-либо об этом потенциале труднее, нежели спрогнозировать геологические изменения (Buser 1997; Gruppe Ökologie 2001; AKEND 2002). Кроме того, вскрытие репозитория в случае войны или террористического акта является маловероятным.

Очевидно, что эти преимущества равны для всех видов радиоактивных отходов, но они не рассматриваются как необходимые для изоляции короткоживущих изотопов всеми странами и учреждениями, т. е. используются не везде. Однако, эти преимущества эффективны, только если площадка для репозитория была отобрана с учетом аспектов безопасности и если пригодность продемонстрирована с помощью доказательств долгосрочной безопасности.

Окончательное захоронение – обязательно ли оно с и без использования атомной энергии

Радиоактивные отходы различного происхождения уже существуют во всех странах с ядерными программами или исследованиями. Эти отходы уже не исчезнут, даже если отказаться от атомной энергии. Управление этими отходами остается необходимым.

Задержки в появлении репозитория для долгоживущих высоко- и среднеактивных РАО в разных странах показывают, что утилизация отходов – огромная научно-техническая и общественная проблема. Эта

проблема будет расти вместе с увеличением количества отходов. Напротив, отказ от производства ядерной энергии облегчит решение проблемы утилизации РАО: с одной стороны, количество отходов, которые нужно захоронить, будет легче разделить на разные категории и собрать в отдельных местах, что облегчит выбор площадки для репозитория; с другой стороны, готовность людей одобрить строительство репозитория увеличится. Напротив, неограниченное использование атомных электростанций значительно увеличило бы требования по вместимости репозитория или даже привело бы к потребности в нескольких репозиториях.

Какие проблемы возникают при окончательном захоронении?

Захоронение РАО в наземных репозиториях не обладает преимуществами геологического захоронения (Gruppe Ökologie 2001): отходы помещены непосредственно в пределах биосферы и было бы рискованно оставить репозиторий без внимания, оценив его, как пассивную систему барьера. Вклад геологических барьеров в защиту людей и окружающей среды несравненно выше. Поэтому технические барьеры требуют особых мер контроля и ремонта. Доступность РАО и террористическая опасность – проблемы, которые требуют обеспечения дополнительных защитных мер, сдерживающих нежелательное вмешательство. Хотя наземные репозитории предназначены исключительно для короткоживущих радионуклидов, содержащихся в низко- и среднеактивных РАО, они нуждаются в наблюдении в течение нескольких столетий, чтобы гарантировать защиту для людей и окружающей среды. Гарантии надежности таких сооружений – условны. Таким образом, оказывается, что окончательное захоронение в наземных репозиториях может быть и является экономически удобным решением на сегодня, но оно рискованно и может привести к новым проблемам для будущих поколений.

Хотя захоронение радиоактивных отходов в глубоких геологических формациях расценено и позиционируется сегодня как самый безопасный способ утилизации РАО, такой вариант тоже таит в себе проблемы. Так или иначе, существуют возражения против этого варианта, которые заключаются в следующем:

- несопоставимость периода, в который РАО остаются опасными для людей и окружающей среды, с периодом, на который можно гарантировать надежность геологических барьеров;
- отсутствие возможностей наблюдения за изменениями геологических барьеров после закрытия и опечатывания репозитория;
- невозможность вмешаться в случае прекращения функционирования или отказа индивидуальных барьеров;
- необратимость окончательного захоронения после закрытия репозитория.

Всё это верно, но эти опасения могут быть учтены если подходить к выбору участка со всей осторожностью, предусматривая долговременную безопасность с учётом всех значимых аспектов. Нельзя игнорировать и то, что варианты утилизации с возможностью восстанавливать отходы могут создать нежелательные последствия для долгосрочной безопасности.

Окончательное захоронение РАО в скальных породах, способных сдерживать радионуклиды, таит в себе определённую проблему: газ, выделяющийся из РАО, может повредить геологический барьер. С одной стороны, выделение газа в репозитории может приводить к образованию трещин в породе, с другой стороны, изменение химической среды вблизи РАО может облегчить или ускорить распространение радионуклидов. Выделение газа главным образом свойственно низко- и среднеактивным РАО. Согласно фактическим оценкам, влияние этого аспекта не является однозначным аргументом против геологического захоронения, но на него нужно обратить пристальное внимание при оценке долгосрочной безопасности и в процессе проектирования репозитория.

Свидетельство долгосрочной безопасности, изоляции и период действия свидетельства

Все геологические формации и все площадки, предназначенные для окончательного захоронения РАО, имеют свои преимущества и недостатки. Это рождает методологические требования для доказательства пригодности выбранного участка. Существуют требования и к процессу захоронения в глубоких геологических формациях, хотя он и считается наиболее предпочтительным вариантом с точки зрения безопасности. Свидетельство долгосрочной безопасности для какой-либо площадки может быть подвергнуто сомнению ввиду вышеупомянутых неудобств. Это сомнение вырастает из-за того, что рассматривается очень долгий временной отрезок, в течение которого доступа к РАО не будет.

Из-за длительности периода полураспада некоторых радионуклидов, некоторые виды РАО представляют опасность для людей и окружающей среды в течение большого времени. Как следствие, изоляция отходов необходима в течение очень долгого времени. Наука не может дать надёжный прогноз в отношении репозитория, особенно его геологических барьеров, на весь период времени, в течение которого РАО сохраняют значительную опасность и должны быть изолированы от биосферы. Долгосрочное функционирование геологических барьеров зависит не в последнюю очередь от геологических и климатических процессов будущего. Некоторые из этих процессов бросают вызов надёжному долгосрочному планированию, но всё-таки обеспечивают основу для утверждений о долгосрочной безопасности репозитория.

Очевидно, что в настоящий момент невозможно предоставить научные доказательства того, что РАО будут надёжно изолированы в течение всего периода, пока сохраняется опасность для людей и окружающей среды. AKEND утверждает, что можно предсказать состояние геологических барьеров на следующий миллион лет, и что свидетельство долговременной безопасности может быть рассчитано на этот период (AKEND 2002). В других странах требования по долговременной безопасности похожи, но рассматривают куда меньший срок (до 10 000 лет). Однако, несмотря на уменьшение надёжности прогноза с увеличением рассматриваемого периода, нельзя игнорировать прогнозы, выходящие за рамки указанных временных периодов.

Неточности прогнозов могут усиливаться ввиду недостатка информации о репозиториях, о взаимодействии между отходами разных типов, о технических и геологических барьерах, учитываемых в прогнозах. Сейчас имеется возможность наблюдать за отходами и барьерами, однако невозможно наблюдать за течением процессов в репозитории, ведь нигде пока нет площадки захоронения, существующей долгое время. Но даже если появится геологический репозиторий и пройдёт достаточно времени, всё равно доступа внутрь не будет, как и возможности изучать происходящие там процессы.

Согласно AKEND, это означает, что принципы долговременной безопасности должны быть определены уже на стадии поиска площадки для репозитория (AKEND 2002). Эти принципы нужно знать и для того, чтобы делать более точные прогнозы. И возможность составить прогноз должна существовать уже на стадии выбора площадки. С другой стороны, получаемая для прогнозов информация должна действительно соответствовать результатам исследований площадки и необходимо предпринять все усилия, чтобы ликвидировать пробелы и неточности в массиве информации.

Восстанавливаемость

Восстанавливаемость означает возможность восстанавливать отходы (ОЯТ и прочие высокоактивные РАО) со складов в случае необходимости и без больших технических усилий. Восстанавливаемость радиоактивных отходов – проблема, обсуждаемая на международном уровне и сводящаяся к восстановлению ОЯТ. Восстанавливаемость захороненных отходов и обратимость процессов утилизации в настоящее время рассматривают во многих программах по обращению с РАО во всём мире (например, Соединённых Штатах, Швеции, Финляндии). Аргументы в пользу восстанавливаемости главным образом связаны с безопасностью, этическими и экономическими аспектами, например:

- технические проблемы, касающиеся безопасности, которые обнаружены после захоронения отходов, а также изменения в требованиях безопасности;

- возвращение ресурсов из репозитория;
- использование альтернативных методов обращения и утилизации РАО, которые могут появиться в будущем;
- реагирование на изменения в общественном сознании и в восприятии риска;
- свобода действия для будущих поколений.

Окончательное захоронение – основная задача в любом плане, обсуждаемом в рамках международной дискуссии о восстанавливаемости. Прежде чем утилизация может быть закончена, нужно пройти через несколько фаз захоронения. Доступ к отходам становится всё более и более трудным с каждой фазой, и технические усилия, требуемые для восстановления, также увеличиваются. После запечатывания репозитория восстановление может быть произведено только с помощью горнодобывающих технологий. Нет никаких согласованных определений или точных описаний различных фаз. Период, в течение которого возможно простое техническое восстановление, упоминаемый в разных странах, составляет от десятилетий до нескольких столетий.

Процесс обеспечения долгосрочной безопасности репозитория основан на тщательно выбранной пассивной необслуживаемой системе безопасности. Без предусмотренной фазы восстановления (облегченный доступ к отходам) безопасное состояние репозитория наступит довольно быстро. Однако если предполагается доступ с целью восстановления, то состояние пассивной безопасности будет достигнуто позднее – в зависимости от фаз восстановления. До тех пор будут требоваться различные меры безопасности в виде мониторинга и контроля, надёжность которых трудно гарантировать. Кроме того, активные меры по обеспечению безопасности требуют устойчивых социально-экономических условий, которые также нельзя гарантировать в течение длительного времени.

Этические принципы в отношении восстанавливаемости, в особенности свобода действий для будущих поколений, неубедительны. Неприемлемо бороться за выполнение этического принципа, если это неизбежно приводит к снижению безопасности. Защита текущих и будущих поколений сама по себе представляет фундаментальное этическое требование. Эта защита имеет самый высокий приоритет, потому что при отсутствии безопасности все другие аспекты становятся в значительной степени незначительными. Даже если выбор между различными вариантами остаётся открытым для будущих поколений, первичная ответственность решить проблему радиоактивных отходов всё ещё лежит на нынешнем поколении. Обсуждение восстанавливаемости не должно задерживать процесс организации репозитория, а желание обеспечить восстанавли-

ваемость не должно мешать возведению хорошо оборудованных репозиторий. С другой стороны, программа организации репозиторий может включать в себя меры по обеспечению восстанавливаемости отходов. Недавно новая концепция, включающая расширенный мониторинг и облегчённую восстанавливаемость, была предложена в Швейцарии. Она позволит «контролировать долгосрочную геологическую утилизацию» с использованием экспериментальных и пилотных установок, а также предусматривает организационные меры (ЕКРА 2000). В рамках проекта «Entsorgungsnachweis» уже выяснена техническая осуществимость этой концепции (NAGRA 2002), в настоящий момент происходит процесс принятия решения в отношении её реализации.

Международные подходы к выбору участка для репозиторий

При выборе площадки (то есть места для безопасной утилизации отходов) используются различные подходы. Это обусловило ряд очевидных различий в процессе выбора площадки, существующих между разными странами. Главные причины различий:

- различные концепции классификации мест утилизации и хранения РАО;
- различные политические и юридические требования;
- различные геологические условия в области исследований (национальная территория);
- различные требования для площадки (подходящая, самая лучшая).

Во многих странах, действия по поиску площадок под репозитории начались в семидесятых. Выбор участка был расценён как научно–техническая задача. Прозрачность и отслеживаемость процесса принятия решения или вообще не учитывались, или учитывались в незначительной степени. В некоторых случаях существовало настолько сильное влияние на исследователей извне, что решение принималось не в результате заранее утверждённой процедуры, а под влиянием прочих аргументов (например, Gorleben, Германия; Юкка Маунтаин, Соединённые Штаты). Соответственно, ни один из национальных процессов выбора площадки из начатых в семидесятых, не привёл к вводу в эксплуатацию репозитория для высокоактивных РАО и ОЯТ.

Отрицательный опыт процессов по выбору площадок и общественные тенденции последних десятилетий привели к возросшему участию общественности в принятии решений во многих странах. Выбор площадки больше не расценивается как простой научно–технический процесс, а требует рассмотрения определённых социальных предпосылок и демократической легитимизации.

Таблица 3

Рекомендации Немецкого комитета по процедуре выбора площадки

<i>Этапы Процесса</i>	<i>Процедуры, Критерии, Оценка</i>	<i>Общественное участие</i>
Этап 1: Идентификация областей, определение минимальных требований	<ul style="list-style-type: none"> • геологические критерии исключения и минимальные требования 	Для полной процедуры (этапы 1–5): <ul style="list-style-type: none"> • учреждение информационного центра
Этап 2: Выбор некоторых областей с особенно благоприятными геологическими условиями	<ul style="list-style-type: none"> • анализ геологических данных 	<ul style="list-style-type: none"> • комитет контроля проверяет соответствие правилам процесса
Этап 3: Идентификация и выбор области для дальнейшего исследования (минимум три участка)	<ul style="list-style-type: none"> • научно–плановые критерии исключения; • социально–экономический потенциальный анализ; • научно–плановые критерии оценки; • спецификация программ для исследования поверхности и соответствующих критериев оценки; • готовность исследовать поверхность; • геологические и геодезические аспекты 	Начиная от этапа 3: <ul style="list-style-type: none"> • форум граждан как центральный элемент участия; • центр компетентных экспертов поддерживает форум граждан; • круглый стол участников • определение и готовность участвовать в этапах 3 и 4 голосованием; • подготовка региональных концепций разработок; • заключительное решение местного совета/советов; • ориентирование на результаты голосования общественности и местных советов в конце этапа 5
Этап 4: Определение участков для подземного исследования (минимально два участка)	<ul style="list-style-type: none"> • исследование поверхности и оценка; • оценка безопасности; • готовность приступить к подземной программе исследования; • разработка критериев испытаний 	
Этап 5: <i>Решение относительно площадки</i>	<ul style="list-style-type: none"> • подземное исследование и его оценка; • критерии безопасности; • сравнение различных исследуемых участков 	
Лицензирование участка		<i>Источник: AKEND (2002)</i>

Отслеживаемость и прозрачность процесса выбора площадки под репозиторий, а также готовность общества принять выбор, являются важными составляющими принятия решений во всем мире. Процесс должен включать в себя такие шаги, как:

- определение необходимых процедур и критериев перед каждым этапом работ;
- поэтапный подход, ясная структура процесса с определённым порядком работ и чёткой системой принятия решений и процедурой лицензирования;
- участие общественности в процессе, начиная с ранних стадий (сотрудничество);
- учёт социо–научных критериев;
- обоснование используемых критериев.

Однако национальные подходы различны вследствие описанных выше различий между странами и не все считают нужным предпринимать эти шаги.

Недостаток общественной поддержки при выборе площадки и низкая степень легитимности принятого решения – следствие того, что значение общественного участия часто недооценивается. Исключения – Швейцария и Швеция, Финляндия в некоторой степени. В контексте принятия решения ясно, что любые существенные шаги по выбору площадки и обращению с РАО будут сопровождаться всесторонним вниманием со стороны общественности. Население не желает безоговорочно верить техническим решениям, смысл которых для него не ясен. Ключевая особенность пошаговой организации репозитория состоит в том, что решения, принимаемые на разных стадиях, обратимы.

Как пример передовой процедуры выбора площадки в таблице 6 представлены рекомендации Немецкого комитета по процедуре выбора площадки (AKEND). Особенности процедуры состоят во включении научно–технических и социо–научных критериев, а также в ясности процедуры выбора (состоит из пяти этапов).

Альтернативы утилизации

В дополнение к изоляции радиоактивных отходов в глубоких геологических формациях есть несколько других альтернатив, которые обсуждались в прошлом и которые частично осуществляются, например:

1. Отправка в космос

Это предложение, которое главным образом обсуждалось в Соединённых Штатах на ранних этапах проектирования хранилищ для долгоживущих РАО. Преимущество: радиоактивные отходы будут постоянно удаляться из человеческой среды обитания. Из-за высокой стоимости

это применимо лишь к небольшим количествам отходов (высокорadioактивные отходы). Кроме того, есть значительный риск с многочисленными последствиями, если при запуске произойдет катастрофа. Если бы этот путь утилизации был осуществим вообще, то он всё равно был бы использован лишь некоторыми странами из-за сложной технологии.

2. Захоронение в Антарктическом льду

Идея представляет собой утилизацию РАО в Антарктическом льду. Во многих областях возраст льда в Антарктиде составляет 15 миллионов лет и имеет толщину 4 км. Ситуация гарантированно не будет изменяться в обозримом будущем. Однако есть существенные вопросы относительно геофизических и геохимических свойств ледяных масс и их воздействия на глобальный климат. Также, потребовались бы изменения в международных юридических нормах и политических соглашениях. На данный момент ни одна страна не рассматривает данную идею.

3. Захоронение отходов в море

Захоронение низко- и среднеактивных отходов в море, разрешенное МАГАТЭ, не осуществлялось с 1983 г. в соответствии с добровольным мораторием, и было запрещено в 1993 г. Лондонской Конвенцией. Идея заключалась в захоронении низкоактивных отходов в таких местах океана, где преобладает низкая смешиваемость слоев воды, низкая скорость течений и высокая плотность. Идея захоронения в море высокоактивных отходов не рассматривалась всерьёз.

4. Утилизация на морском дне

В начале восьмидесятых некоторые государства – члены OECD/NEA – проанализировали другой метод утилизации высокоактивных отходов – на морском дне. Глубоководное морское дно имеет благоприятные свойства, толстые слои осадка имеют высокий потенциал задержания радионуклидов. Вероятность несчастного случая относительно низка. Однако нет никаких проверенных технологий для создания донных хранилищ. Такой метод требовал бы поправки к вышеупомянутой Лондонской Конвенции. Этот метод активно не исследуется.

Утилизация на небольшой глубине под землей

Для утилизации на небольшой глубине под землёй короткоживущих низко- и среднеактивных отходов создана продвинутая современная технология. Многие страны либо находятся в процессе разработки объектов для захоронения таких РАО, либо уже имеют действующие (например, в Европе, Соединённых Штатах, Японии, Южной Африке). Здесь изоляция отходов в течение относительно короткого промежутка времени (менее 300 лет) обеспечена выбором подходящего геологического барьера и строительством технических и геотехнических барьеров. Кроме того, ве-

дётся мониторинг. После проверки таким объектам могут присвоить статус обычного хранилища. Из-за долгого периода полураспада у высокоактивных РАО, включая ОЯТ, эта технология к ним не применима.

Альтернативы

Вопросы о том, есть ли какие-нибудь альтернативы захоронению в глубоких геологических формациях, часто поднимаются в общественных дискуссиях. Этические принципы, такие как экономия ресурсов или свобода выбора действий будущих поколений, играют существенную роль. Рассмотрим наиболее часто обсуждаемые в мире альтернативы:

- разделение и трансмутация;
- долгосрочное временное хранение.

Разделение и трансмутация

Разделение и трансмутация означают преобразование долгоживущих и токсичных радионуклидов в менее токсичные с как можно более коротким периодом полураспада. Трудности, связанные с организацией хранилищ для изоляции РАО в течение особо длительного времени заставили рассматривать трансмутацию долгоживущих радионуклидов как потенциальное решение для проблемы радиоактивных отходов. Идея в том, что программа трансмутации преобразовала бы проблему долгосрочной изоляции РАО в менее трудную проблему хранения отходов в течение нескольких десятков или сотен лет.

Для трансмутации необходим перерабатывающий завод, чтобы отделить долгоживущие радионуклиды от прочих. Впоследствии происходит преобразование долгоживущих радионуклидов в короткоживущие путём обработки в реакторе (критичный реактор, который является устройством для трансмутации, или подкритичный реактор, который нуждается во внешнем источнике нейтронов, чтобы поддерживать цепную реакцию).

Даже самые сложные схемы трансмутации (в теории) не способны переработать все долгоживущие радионуклиды, а кроме того они нарабатывают большое количество новых РАО. Таким образом, необходимость в репозитории для высокоактивных РАО сохраняется. Никакая схема трансмутации не в состоянии работать со всеми радионуклидами, так как многие из них не могут быть преобразованы. Например, трансмутация $Tc-99$ и $I-129$ не на 100 процентов эффективна, даже при многократной трансмутации. Наконец, появляются новые долгоживущие продукты деления актинидов (деление актинидов не на 100 процентов эффективно с точки зрения избавления от них). Это означает, что есть фундаментальные и существенные ограничения, которые не могут быть преодолены даже с помощью сложной и очень дорогой трансмутации.

Более того, всё это рождает необходимость управлять химическими и ядерными объектами куда более опасными, нежели репозиторий.

Единственный экономический довод в пользу такого метода состоит в том, что появится новое подразделение в ядерной промышленности, занимающееся трансмутацией. Стоимость систем трансмутации будет предельно дорога даже по сравнению с миллиардами, расходуемыми на программы организации репозитория.

Наконец, разделение радионуклидов, необходимых для трансмутации, увеличит риск ввиду того, что обеспечит свободный доступ к расщепляющимся материалам. Все процессы разделения, включая те, что имеют репутацию «устойчивых к распространению» на самом деле лишь увеличивают риск.

Но трансмутацию рассматривают не только в контексте управления отходами текущего поколения ядерных реакторов. В Европе (особенно во Франции) и Японии, большинство схем трансмутации являются продолжением ядерной программы, как часть нового ядерного цикла.

Заключение французской «Commission Nationale D'Evaluation» относительно трансмутации таково, что она может быть оправданной при появлении реакторов четвёртого поколения, которых пока не существует (CNE 2005). В любом случае, от остающегося количества радионуклидов нужно избавляться как от долгоживущих радиоактивных изотопов. Поэтому трансмутация не представляет реальную альтернативу геологическому захоронению.

Долгосрочное временное хранение

При долгосрочном хранении радиоактивных отходов (например, в Нидерландах), безопасность гарантируется социальным контролем. Это предполагает наличие в будущем существующих ныне научных и экономических возможностей, а так же способность и готовность всех членов общества осуществлять управление и принимать необходимые меры. Стратегия долгосрочного хранения имеет множество технических и этических аргументов в свою пользу. Она состоит в подходе, при котором одно поколение передало бы следующему мир с «равными возможностями при приёме на работу», и так далее для поколений, приходящих после, таким образом сохраняя существующие варианты и избегая трудностей отдалённого будущего. Согласно идее «катящегося подарка», текущее поколение возлагает на себя ответственность обеспечить наследникам необходимые навыки и ресурсы, чтобы иметь дело с любой проблемой, которую текущее поколение передаёт. Однако если существующее поколение задерживает строительство объектов утилизации отходов, ожидая новых технологий, или потому что хранение более

дёшево, то не следует ожидать, что будущие поколения поведут себя иначе. Такой подход в действительности всегда передавал бы ответственность за реальные действия будущим поколениям и по этой причине может быть оценён как неэтичный.

Самый существенный недостаток долгосрочной стратегии хранения связан с предположением о стабильности будущих обществ, и их продолжающейся способности соблюдать стандарты безопасности. Существует естественная тенденция общества привыкать к существованию поблизости от мест хранения отходов, игнорируя связанные с этим риски. Такие риски увеличиваются со временем, если не обеспечено надлежащего наблюдения и обслуживания объектов с РАО, что может привести в будущем к причинению вреда природе и общественному здоровью. Есть много известных примеров катастрофических экологических ситуаций, унаследованных из прошлого, что заставляет обратить внимание на этот недостаток стратегии.

Требование иметь в наличии различные варианты действий для будущих поколений также предполагает непрерывность существующих экономических и научных ресурсов. Если происходят социальные изменения, вроде войн и т. п., которые поглощают экономические и научные ресурсы и возможности, то сохранение вариантов в области хранения РАО может дать противоположный эффект. В результате будущие поколения больше не будут в состоянии следить за отходами, уровень безопасности снизится, а свобода действий будет ограничена. Нельзя перекладывать проблемы утилизации отходов на будущие поколения.

Решающий аргумент – это то, что прогнозы долгосрочного социального развития гораздо менее точны, чем прогнозы функциональной эффективности геологических барьеров, действующих как пассивные системы запечатанного репозитория. Поэтому нет никакого реалистичного решения в области безопасной утилизации радиоактивных отходов, кроме захоронения в глубоких геологических формациях. Общее преимущество состоит в том, что скальные формирования ввиду своих физико–химических свойств непроницаемы для жидкостей. Частично эти свойства остаются неизменными в течение нескольких геологических периодов, так что изоляция вредных отходов от попадания их в биосферу гарантирована в течение миллиона лет. Главный критерий, однако – правильный выбор участка захоронения на основе процедуры, учитывающей различные критерии.

Утилизация отходов четвёртого поколения реакторов

В случае с реакторами четвёртого поколения ядерное лобби снова обещает реализовать замкнутый топливный цикл, в котором будет находиться не только уран и плутоний, но и все трансурановые нуклиды. Таким образом, период изоляции РАО, который нужно обеспечить в

этом случае меньше – до 1000 лет. Два компонента чрезвычайно необходимы для осуществления этой мечты:

- разделение нуклидов в отработанном топливе с высокой эффективностью;
- трансмутация трансурановых нуклидов в реакторе.

Поэтому, так называемый символический топливный цикл, должен быть осуществлён на основе быстрых реакторов и новых видов тепловых реакторов.

Кажется, что это останется мечтой, как и замкнутый топливный цикл, придуманный в шестидесятых годах прошлого столетия. Ведь необходимо гигантское количество перерабатывающих заводов для разделения нуклидов. Все проблемы, связанные с газообразными выбросами и утечками радиоактивных материалов, с управлением радиоактивными и/или токсичными отходами, с безопасностью и возможными серьёзными несчастными случаями будут куда серьёзнее, чем на нынешних перерабатывающих предприятиях. До сих пор программы развития быстрых реакторов терпели неудачи из-за технических проблем. Нет никакой причины полагать, что ситуация изменится в будущем. Миллиарды евро необходимы для научных исследований по проектам трансмутации и разделения. Поскольку невероятно, что все долговечные нуклиды могут быть отделены и преобразованы, встаёт большой вопрос относительно того, позволит ли это всё уменьшить временной период, в который нужно изолировать РАО.

Реализация «символического топливного цикла» крайне маловероятна по причинам технического и экономического характера, а также по причинам, связанным с безопасностью, ядерным нераспространением, физической защитой.

4. Характеристика режима нераспространения ядерных материалов и его компоненты

Характерной особенностью ядерных материалов является то обстоятельство, что наряду с глобальным распространением мирной ядерной энергетики сами ядерные материалы не подлежат свободному распространению. Эта противоречивая особенность ядерных материалов лежит в основе, так называемой, проблемы нераспространения. То есть, безопасность ЯМ с точки зрения общества – это обеспечение исключительно мирного их использования.

В период «холодной войны» существовал определенный ядерный миропорядок, основанный главным образом на взаимном ядерном сдерживании двух сверхдержав. Каким бы хрупким он не был, но он все

же поддерживал определенную степень стабильности в мире. Окончание «холодной войны», разрушение биполярной структуры мира увеличили число факторов влияющих на стабильность режима нераспространения. Одним из таких факторов является – незаконный оборот ядерных материалов. Хищение и контрабанда ядерных материалов могут осуществляться с целью:

- коммерческой – перепродажи третьим лицам для личного обогащения похитителя;
- террористической – использования похищенного ядерного материала для терроризма или шантажа;
- развития государственной ядерной программы в обход ДНЯО.

Использование ядерных материалов в преступных целях может способствовать отдельным государствам или террористическим группам в их усилиях обойти тщательно разработанные механизмы контроля международного режима нераспространения и позволить им создать ядерное или радиологическое оружие. Если в 60–70-х годах прошлого столетия, для создания ядерного взрывного устройства требовались усилия целого государства, дорогая широкомасштабная программа, то в настоящее время научно-технический прогресс, распространение знаний и технологий сделали этот процесс доступнее.

Обострение угрозы распространения ядерных материалов в последнее время вызвано следующими причинами:

- высвобождением значительного количества ядерного материала оружейного качества в результате процесса сокращения ядерных вооружений;
- усложнением для государств, не обладающих ядерным оружием, развивающих собственные ядерные программы, условий получения материалов для развития таких программ в связи с укреплением международной системы экспортного контроля;
- увеличением числа и ростом влияния и финансовых возможностей в международных отношениях, террористических групп, транснациональных организованных преступных сообществ, сепаратистских движений на религиозной почве, религиозных сект.

Проблемы международного и внутреннего терроризма актуальны для многих стран с развитой ядерной энергетикой. Взрывы жилых домов в Москве и других городах России, террористические акты 11 сентября 2001 года в США и 23 октября 2002 года в Москве показывают степень серьезности намерений террористических организаций. По заявлению средств массовой информации террористическая организация «Аль Каида» возглавляемая Усамой бен Ладеном, проводила ис-

следования по созданию оружия массового уничтожения, в том числе и ядерного. С этой целью были налажены контакты с некоторыми учеными ядерщиками в Пакистане. Японская секта «Аум Сенрике», с помощью членов своей организации, приобрела в Австралии участки земли с залежами урановой руды, это может говорить о желании создать или приобрести ядерное оружие.

В современном мире режим ядерного нераспространения, несмотря на возникающие сложности, стал составной частью правовой инфраструктуры и безопасности каждой страны.

Некоторые проблемы, встретившиеся на пути развития режима нераспространения.

1. Обязательство ядерных держав развивать процесс ядерного разоружения оказалось одним из самых слабых звеньев режима нераспространения. Ядерное разоружение является сложным и долгим процессом.

2. В настоящее время группа стран находится вне режима ядерного нераспространения – Израиль, Индия и Пакистан. Эти государства имеют ядерное оружие, хотя и воздерживаются от его боевого развертывания.

3. В 1991 году в результате распада Советского Союза рухнуло огромное ядерное хозяйство Советского Союза. Распад явился колоссальным ударом и проблемой для мирового режима ядерного нераспространения.

Решение проблем нераспространения лежит на пути создания международных и национальных систем гарантий нераспространения.

Распад СССР стал уникальным событием в истории международных отношений в целом и нераспространения ядерного оружия, в частности. Он поставил международное сообщество перед новой, ранее не известной проблемой: впервые происходил распад международно-признанного ЯОГ.

Когда Советский Союз существовал, он подписывал Договор о нераспространении ядерного оружия. Он был ядерным государством. Однако, после того, как Советский Союз распался, на Украине, в Белоруссии, в Казахстане осталось ядерное оружие. Как быть с ним? Означало ли это, что в мире появились новые ядерные государства?

В этой ситуации все мировое сообщество и, прежде всего Россия, проявили огромные усилия к тому, чтобы эти государства не стали дополнительными ядерными державами. В результате все ядерное оружие оказалось сосредоточенным только в границах России. А Украина, Белоруссия, Казахстан присоединились к Договору о нераспространении ядерного оружия в качестве неядерных государств. Таким образом, ситуация была спасена и наследницей Советского Союза с точки зрения участия в Договоре о нераспространении как ядерная держава стала Россия.

Важно также отметить, что наиболее опасные с точки зрения нераспространения стадии ядерного топливного цикла остались также в одной стране. Комбинаты по обогащению урана и по переработке и выделению плутония находятся на территории России. Однако, распад единого ядерного хозяйства СССР сильно нарушил развитие этой отрасли во вновь образованных государствах и вызвал появление угроз в отношении ядерных материалов и установок, специфических для новых экономических условий.

Угроза распространения ядерных материалов является проблемой всех государств, на территории которых размещено ядерное оружие или предприятия ядерного топливного цикла. Международное сообщество сейчас стоит перед непростым выбором: как действовать дальше – попытаться усовершенствовать существующую систему ограничений, которая базируется на принципах, выработанных еще в период «холодной войны», или взять наиболее разработанные национальные принципы и системы и адаптировать их к глобальным реалиям.

Эффективность мер ядерного нераспространения в государстве зависит от осознания жизненной важности проблемы нераспространения всеми слоями общества. Понимание важности этой проблемы в обществе, включая представителей власти (например, депутатов Государственной Думы в России), определяет ее общественный рейтинг и соответствующее материальное обеспечение для ее решения. Поэтому так важна деятельность организаций по пропаганде идей ядерного нераспространения среди населения страны. Ряд организаций в нашей стране занимается этой важной деятельностью, среди них – Ядерное общество России и Центр политических исследований в России. Эти организации издают популярные журналы, книги, проводят научные конференции, на которые приглашаются представители широких кругов общественности.

Проблема нераспространения ядерных материалов в России

Выступив в качестве правопреемника СССР в вопросе о ядерном статусе, Россия получила в наследство все права и обязанности Советского Союза по ключевому международно-правовому документу, определяющему международный режим нераспространения, – ДНЯО. Россия стала также одним из трех (наряду с Соединенными Штатами и Великобританией) государств-депозитариев договора.

Обязательства, которые Россия приняла на себя по ДНЯО, в частности, включают:

- Обязательство не передавать кому бы то ни было ядерное оружие или другие ЯВУ, а также контроль над таким оружием или ЯВУ ни прямо, ни косвенно.

- Обязательство никоим образом не помогать, не поощрять и не побуждать какое-либо государство, не обладающее ядерным оружием (НЯОГ), к производству или к приобретению каким-либо иным способом ядерного оружия или других ЯВУ, а также контроля над таким оружием или ЯВУ.

- Обязательство не предоставлять исходного или специального расщепляющегося материала (или оборудования или материала, специально предназначенного или подготовленного для обработки, использования или производства специального расщепляющегося материала) любому НЯОГ, для мирных целей, если на этот материал не распространяются гарантии МАГАТЭ.

- Обязательство способствовать как можно более активному обмену оборудованием, материалами, научной и технической информацией об использовании ядерной энергии в мирных целях;

- Обязательство в духе доброй воли вести переговоры об эффективных мерах по прекращению гонки ядерных вооружений в ближайшем будущем и ядерному разоружению, а также о договоре о всеобщем и полном разоружении.

Сегодня можно утверждать, что Россия на протяжении всего периода с последних дней 1991 г. и до настоящего времени в целом строго придерживалась и продолжает придерживаться своих обязательств по ДНЯО. Как государство-продолжатель бывшего СССР Россия подтвердила все обязательства по действовавшим на тот момент и подписанным двусторонним и многосторонним договорам и соглашениям в области ограничения вооружений и разоружения. Россия заявила, что ориентируется «на полную ликвидацию в обозримом будущем тактического ядерного оружия».

Таким образом, политика ядерного нераспространения в принципиальном плане стала той внешнеполитической составляющей, которая плавно перешла из советского периода в российский, не претерпев сколько-нибудь существенных изменений.

5. Национальные гарантии нераспространения как внутренняя система противодействия угрозам ЯОО

С помощью национальных гарантий обеспечивается решение проблемы ядерного нераспространения на государственном уровне. Специальное обращение с ЯМ представляет собой совокупность мер и технических средств, обеспечивающих сохранность и знания о ЯМ. Таким образом, специальное обращение служит обеспечению национальных гарантий нераспространения.

Для того чтобы надежно выполнить цели национальных гарантий, необходимо создать эшелонированную защиту ЯМ. Специальное обращение с ЯМ включает различные меры, в том числе, меры по учету, контролю и физической защите ЯМ. Эти компоненты являются отдельными техническими системами. Однако в настоящее время наблюдается тенденция интеграции систем учета, контроля (УК ЯМ) и физической защиты ЯМ. С точки зрения выполнения национальных гарантий это важная положительная тенденция, которая повышает возможности эшелонирования защиты ЯМ.

Законодательная и нормативная базы осуществления национальных гарантий нераспространения

Договор о нераспространении ядерного оружия, вступивший в силу в 1970 году, является и по сей день главной законодательной базой предотвращения распространения ядерного оружия в мире. В настоящее время 189 государств присоединились к этому Договору. Этот Договор, продленный бессрочно мировым сообществом на конференции 1995 года, определил характер развития мирового режима ядерного нераспространения.

Вступление в силу Договора о нераспространении ядерного оружия в 1970 году значительно повысило роль МАГАТЭ в укреплении режима нераспространения ядерного оружия. Очень важным обстоятельством является то, что статья III.1 Договора требует принятия гарантий ко всей мирной деятельности государств, являющихся членами Договора. Соответствующая система гарантий МАГАТЭ, нашедшая свое отражение в документе INFCIRC/153, была создана в 1971 году и продолжает успешно функционировать по настоящее время.

Документ INFCIRC/153 гласит, что основное обязательство, принимаемое государством в рамках соглашения о гарантиях, заключенных в связи с Договором о нераспространении, состоит в том, чтобы принять, в соответствии с положениями соглашения, гарантии по всему исходному или специальному расщепляющемуся материалу во всей мирной ядерной деятельности в пределах его территории, исключительно с целью проверки того, чтобы такой материал не переключался на оружие или другие ядерные взрывные устройства.

В нашей стране в 1995 году был принят Федеральный закон «Об использовании атомной энергии», который позволил упорядочить деятельность с ЯМ и отношения, возникающие в процессе этой деятельности. Положения, изложенные в Законе, составляют основу для безопасного обращения и нераспространения ЯМ в Российской Федерации.

Федеральный закон определяет полномочия в области использования атомной энергии:

- Президента Российской Федерации (статья 7 Федерального закона).
- Федерального Собрания Российской Федерации (статья 8).
- Правительства Российской Федерации (статья 9).
- Органов государственной власти субъектов Российской Федерации (статья 11).
- Области совместного ведения органов государственной власти Российской Федерации и субъектов Российской Федерации (статья 10).
- Органов местного самоуправления (статья 12).

Наряду с этим Федеральным законом определяются права организаций, в том числе общественных организаций (объединений), и граждан в области использования атомной энергии, в том числе права:

- на получение информации в области использования атомной энергии (статья 13);
- на формирование политики в области использования атомной энергии (статья 14);
- на возмещение убытков и вреда, причиненных радиационным воздействием (статья 15);
- на социально-экономические компенсации для работников объектов использования атомной энергии (статья 16).

Статьей 2 Федерального закона «Об использовании атомной энергии» обеспечение безопасности провозглашено в качестве основного принципа правового регулирования отношений в области использования атомной энергии. Тем самым законодательно устанавливается приоритетность безопасности.

Таким образом, Федеральный закон в разных формах осуществляет правовое регулирование ядерной деятельности. В том числе некоторые виды деятельности вменяются как обязательные. К ним относятся физическая защита, учет и контроль ЯМ.

Физическая защита ядерных установок обеспечивается эксплуатирующими организациями и специально уполномоченными государственными органами, а на действующих судах – их экипажами. Требования к обеспечению физической защиты устанавливаются правилами физической защиты ядерных материалов. Запрещается эксплуатация ЯУ, использование ядерных материалов, если не приняты меры к обеспечению его ФЗ.

Практически все статьи Закона проникнуты идеей обеспечения безопасного развития ядерной индустрии России, включая и человеческий фактор. Последнее обстоятельство особо выделяется в Законе в виде положений о правах и обязанностях граждан, организаций и должностных лиц. Нарушение должностными лицами законодательства РФ в

области использования атомной энергии влечет за собой дисциплинарную, административную или уголовную ответственность. В том числе:

- нарушение требований к обеспечению ФЗ ЯУ;
- нарушение установленного порядка учета и контроля ядерных ЯМ;
- хищение, незаконное приобретение, хранение и продажа ЯМ;
- нарушение норм и правил использования АЭ;
- нарушение условий лицензии;
- приемка в эксплуатацию ЯУ без реализации мер по обеспечению защиты работников и населения прилегающих районов;
- невыполнение своих должностных обязанностей работниками ЯУ;
- самовольное оставление ЯУ;
- допуск к работе на ЯУ работников без соответствующих документов, удостоверяющих квалификацию, работников, имеющих медицинские противопоказания, а также лиц моложе 18 лет;
- прямое или косвенное принуждение работников указанными должностными лицами к нарушению регламента и инструкций по эксплуатации ядерной установки;
- направление должностным лицом работников в радиационно опасные зоны;
- необоснованный сброс радиоактивных веществ в атмосферу, водную среду и недра;
- сокрытие факта аварии;
- отказ в предоставлении информации, или искажение информации по вопросам безопасности ЯУ;
- вовлечение в хозяйственный оборот продукции, загрязненной радиоактивными веществами;
- нарушение установленного порядка экспорта и импорта.

Законом предусматривается также развитие общих федеральных норм и правил, которые устанавливают требования к безопасному использованию ядерных материалов. Эта нормативная база позволяет регулировать обращение с ЯМ, исключая неконтролируемое их распространение.

Нормативная основа деятельности с ЯМ – это правила, по которым эта деятельность должна проводиться. В части учета и контроля ЯМ разработан ряд нормативных документов международного и внутригосударственного уровней.

1. Рекомендации МАГАТЭ по развитию государственной системы учета и контроля ядерных материалов.
2. Концепция системы государственного учета и контроля ядерных материалов.
3. Основные правила учета и контроля ядерных материалов.

В нашей стране принята концепция системы государственного учета и контроля ЯМ (ГСУК ЯМ), в которой практически полностью учтены международные рекомендации.

Концепция ГСУК ЯМ определяет систему учета и контроля ЯМ как важный элемент системы государственного управления использованием атомной энергии. В этом документе определены структура, задачи и основные принципы функционирования ГСУК ЯМ.

Задачи, принципы построения и функционирования систем учета и контроля ЯМ более детально рассматриваются в последнем документе – Основных Правилах учета и контроля ядерных материалов (ОПУК).

ОПУК является центральным нормативным документом, устанавливающим требования и критерии учета и контроля ЯМ. Эти правила обязательны для всех юридических и физических лиц, осуществляющих деятельность с ЯМ.

Основные Правила устанавливают перечень и количественный порог для ЯМ, подлежащих учету и контролю. В Правилах сформулированы основные принципы учета и контроля – непрерывности знаний о ЯМ, категоризации ЯМ, измеряемого материального баланса ЯМ.

Характеристика современных систем учета и контроля ядерных материалов

Учет ядерных материалов – совокупность мер и технических средств, которые позволяют с достаточной надежностью определять наличные количества ЯМ и потоки ЯМ.

Все эти параметры: количества ядерных материалов в местах их нахождения, потоки ядерных материалов как внутри страны, так и между государствами подлежат тщательному учету. Потому, что информация о ядерных материалах составляет основу современных систем управления и безопасности ЯМ.

Раньше учет ЯМ велся в рамках бухгалтерской системы. Измерения ЯМ проводились только тогда, когда этого требовал технологический процесс. В остальное время велся только бумажный учет. Это приводило к потере достоверности данных о ЯМ.

Другая система учета и контроля ЯМ, лишенная отмеченных недостатков, внедряется у нас в стране в настоящее время. Это дополняющая первую система измеряемого материального баланса. В отличие от бухгалтерского учета ЯМ измеряются при всех значимых операциях с ними, включая, например, операцию их передачи. При этом учитывается статистическая природа результатов измерения ЯМ. Вывод о наличии аномалии можно сделать, только учитывая результаты статистического анализа неопределенности результатов измерений.

Новая система учета и контроля ЯМ позволяет не только повысить достоверность данных о ЯМ, но и сдерживать потенциальные несанкционированные действия с ЯМ.

Система измеряемого материального баланса ЯМ характеризуется тем, что:

- измерение ЯМ проводятся при всех значимых операциях с ними;
- зона баланса материалов (ЗБМ) является элементарной структурной единицей государственной системы учета и контроля ЯМ;
- для характеристики ЯМ кроме параметров партии используются атрибутивные признаки, однозначно определяющие наличие, либо отсутствие какого-либо свойства ЯМ.
- периодическое проведение физических инвентаризаций в ЗБМ является обязательным условием.

Зоны баланса материалов

Первой принципиальной особенностью новой системы материального баланса является то, что в ней вводится фундаментальное понятие зоны баланса материалов. В бухгалтерской системе этого понятия нет, и баланс ведется на уровне установки. А по сути, ведется на уровне того, что находится в ведении материально ответственных лиц.

Применение концепции зон баланса материалов подразумевает, что определены вход-выход, контролируемые из вне, а наличное (инвентарное) количество ЯМ подлежит определению на периодической основе. Способы определения инвентарного количества в отношении очехлованных изделий (тепловыделяющие сборки, отдельные тепловыделяющие элементы) – это штучный учет и контроль на предмет наличия ядерного материала. А в отношении материалов в балк-форме – это комплекс измерительных методов, применяемых для определения наличного количества – проверка ядерных материалов на выборочной основе.

Для каждой ЗБМ определяются ключевые точки измерения КТИ, каждая из которых представляет собой место, где ядерные материалы находятся в такой форме, что они могут быть измерены соответствующими методами, процедурами и техническими средствами измерений содержания массы и/или изотопного состава, других количественных характеристик, а также атрибутивных признаков ядерных материалов в целях определения потоков ядерных материалов или их наличных количеств.

Для обеспечения должного функционирования системы учета и контроля ЯМ на предприятии важной задачей является правильный выбор структуры зон баланса ЯМ. Однако определение размеров и границ ЗБМ является зачастую не простой задачей. ЗБМ должны быть такими, чтобы было легко измерять входные и выходные потоки и проводить

физические инвентаризации без больших экономических потерь из-за остановки производства.

Задача определения размеров ЗБМ носит оптимизационный характер, т. к. решение выбирается из ряда противоречивых требований. Например:

а) если ЗБМ – крупная, то меньше документации по предприятию и легче отчитываться. Однако в ЗБМ труднее и дороже проводить ФИ, т. к. надо останавливать производство;

б) если ЗБМ – маленькая, легче проводить ФИ. Однако по всему предприятию потребуется готовить большое количество отчетных документов.

Каждое предприятие выбирает структуру ЗБМ, исходя из такого рода противоречивых условий и придерживаясь некоторых общих рекомендаций по выбору ЗБМ. Отметим здесь следующие рекомендации:

- количество ЗБМ на предприятии выбирают так, чтобы их было достаточно для обеспечения учета и контроля всех ЯМ. При этом каждая ЗБМ документально оформляется и утверждается вышестоящей организацией. В конечном счете, количество и границы ЗБМ согласовываются с Минатомом, осуществляющим учет и контроль ЯМ на федеральном уровне;

- каждая ЗБМ должна представлять собой единый неделимый участок (односвязная область);

- при определении структуры зон баланса ЯМ на предприятии необходимо, чтобы границы ЗБМ были четко выраженными и соответствовали границам охраняемых зон. Границы ЗБМ и охраняемых зон могут совпадать;

- если границы ЗБМ не уменьшают возможности умышленного или непреднамеренного смешивания материалов из разных ЗБМ, то контроль ЯМ в такой зоне может потерять всякое значение;

- при определении границ ЗБМ целесообразно учитывать наличие физических барьеров. Физическими барьерами являются строительные конструкции (стены, перекрытия, ворота, двери), специально разработанные конструкции (заграждения, противотаранные устройства, решетки, усиленные двери, контейнеры);

- функциональные подразделения, такие как заводские лаборатории, склады, а также участки предприятий, требующие специальной защиты информации, выделяются в отдельные ЗБМ.

Категоризация ядерных материалов

Второй исключительно важный принцип – категоризация ядерных материалов. По ядерным материалам основным понятием является учетная категория материала. Если материал подпадает под учетную категорию, то к нему должны применяться определенные правила учета и контроля. Если материал не подпадает под учетную категорию, то таких жестких правил к

нему не применяется. Вопрос в связи с учетной категорией материалов возникает следующий: какие материалы следует относить к учетным?

У нас в стране учету и контролю подлежат следующие ядерные материалы:

- плутоний;
- плутоний с содержанием изотопа плутония-238 более 20 %;
- уран;
- уран-233;
- уран-235;
- торий;
- нептуний-237;
- америций-241, 243;
- калифорний-252,

а также следующие специальные неядерные материалы:

- литий-6;
- тритий;
- дейтерий;
- тяжелая вода.

Причем ядерные материалы подлежат государственному учету и контролю, если значения их масс, находящихся на предприятии, равны или превышают минимальные количества, которые определены в нормативных документах федерального уровня.

Для чего нужна категоризация ядерных материалов? Прежде всего для того, чтобы сосредоточить внимание на установках, наиболее привлекательных с точки зрения ядерных материалов, которые можно достаточно просто перевести в оружейные формы.

У нас в стране установлены четыре категории ядерных материалов в соответствии с критерием привлекательности и их количеством (более точно, в зависимости от формы продукта, содержащего ЯМ, типа ЯМ и их количества). В соответствии с категорией ядерных материалов устанавливаются требования к их физической защите, учету и контролю.

Надо отметить, что принятая у нас система во многом схожа с системой категоризации ядерных материалов в США, которая разработана для использования на предприятиях Министерства энергетики США. В обеих системах категоризации все, что связано с облученным топливом, имеет наименьший уровень привлекательности. Причина проста. Его самозащищенность, по сути, исключает возможность хищений или возможность какого-то неправильного использования. За исключением, пожалуй, проблемы, связанной с радиационным терроризмом. Поэтому в основу системы категоризации положен принцип привлекательности свежих ядерных материалов.

Физические инвентаризации в ЗБМ

Третья характерная особенность современных систем УК и ФЗ ЯМ – обязательное проведение физических инвентаризаций в ЗБМ. В новой системе учета (система материального баланса) является обязательным периодическое проведение физических инвентаризаций (ФИ) в ЗБМ с дальнейшим подведением материального баланса ЯМ.

Физическая инвентаризация – определение фактически наличного количества ЯМ путем измерений.

Имеются в виду следующие измерения:

- проверка наличия и целостности ЯМ;
- идентификация ЯМ;
- проверка целостности и идентификации пломб и печатей;
- подсчет имеющихся учетных единиц;
- взвешивание учетных единиц;
- проведение неразрушающего анализа ЯМ;
- отбор проб и их анализ.

Во время ФИ проверяется учетная документация, и составляются списки имеющихся ЯМ. Далее эти списки сопоставляются с наличными ЯМ. Ядерные материалы измеряют и находят фактически наличное количество ЯМ в ЗБМ. Сохранность и достоверность знаний о ЯМ анализируется по различию между фактически наличными и документально зарегистрированными ЯМ в ЗБМ.

Фактически наличное количество P ядерных материалов – это количество материалов, зафиксированное в процессе проведения текущей физической инвентаризации путем измерений и подсчета.

Разница между зарегистрированным количеством материала на момент текущей ФИ и фактически наличным количеством называется инвентаризационной разницей (ИР). Инвентаризационная разница неизбежна вследствие неизбежных погрешностей системы измерений. Она может быть как со знаком плюс, так и со знаком минус. Выявляется эта разница в процессе подведения материального баланса после проведения физической инвентаризации.

Подведение баланса ядерных материалов заключается в нахождении ИР. Именно эта величина требует анализа, объяснения и понимания.

Итоговое значение ИР также является случайной величиной, которая может быть положительной, отрицательной или равной нулю, обладающей некоторым распределением плотности вероятности и имеющей свою дисперсию. Принять решение о наличии аномалии можно только после статистического анализа дисперсии ИР. Разработаны конкретные статистические критерии, позволяющие проводить требуемый анализ и принимать решения.

Средства контроля доступа

Четвертая принципиальная особенность современных систем учета и контроля – максимальное использование средств контроля доступа. В основе систем учета и контроля ядерных материалов во всех развитых странах, в том числе и у нас, лежит принцип измеряемого материального баланса. При этом порядок измерения наличных ядерных материалов – это, по сути, серьезный физический эксперимент. Надо иметь в виду, что сами измерения ядерных материалов – процедура относительно длительная и небезопасная (особенно если речь идет о плутонии). Поэтому все усилия предпринимаются к тому, чтобы свести измерения ядерных материалов к необходимому минимуму. А непрерывность знаний относительно состояния ядерных материалов обеспечивается за счет применения средств контроля доступа (СКД) к ЯМ.

Средства контроля доступа включают два класса мер: по наблюдению и по сохранению. Самое простое и часто применяемое – визуальное наблюдение. Это непрерывное присутствие определенного количества лиц. При работе с ядерными материалами используется правило двух лиц. Наиболее важные операции с ядерными материалами производятся не менее чем двумя людьми. При работе с оружейными материалами может применяться правило трех человек.

Электронно-оптическое наблюдение в виде телевизионного мониторинга нашло широкое применение во многих странах для контроля ЯМ. Оптическое наблюдение за ЯМ многие годы успешно используется в международных гарантиях. МАГАТЭ применяет оптический мониторинг для контроля перемещений ЯМ, наблюдения за облученным топливом в хранилищах и в других случаях.

Меры сохранения обеспечивают непрерывность знания о ЯМ, находящихся в покое. Сохранение – это, прежде всего, использование разного рода датчиков, регистрирующих несанкционированный доступ (УИВ) или реагирующих на изменение состояния и положения ядерных материалов (гибридные методы сохранения ЯМ). Например, при сдвиге контейнера соответствующий сенсор дает сообщение, что контейнер сдвинут.

УИВ – это пломбы и печати различного типа.

Роль пломб и печатей заключается в обнаружении несанкционированного доступа к ЯМ (ставятся пломбы на контейнеры, упаковки изделий, двери и т. д.).

Эффективность действия пломб и печатей характеризуется тремя следующими свойствами:

- слабость: пломбы легко могут быть разрушены, то есть они являются средствами упреждения несанкционированных действий с ЯМ;

- указатель вмешательства: при разрушении пломбы ее трудно восстановить, не оставляя следов вмешательства;

- уникальность: пломбы (также как и печати) должны обладать уникальными идентификационными признаками (желательно скрытыми).

Клеящиеся пломбы (печати) содержат бумажную, виниловую или лавсановую подложку с нанесенным на нее с внутренней стороны клеящим составом. Клеящие пломбы могут содержать один или более слоев подложки.

Бумажная и виниловая клеящие пломбы имеют однослойную подложку. После установки эти пломбы трудно снять, т. к. при удалении они разрушаются (обрыв или расслоение).

Лавсановая пломба содержит прозрачный внешний слой и цветной металлизированный внутренний слой. На внутреннем слое находятся рисунок и порядковый номер. На цветной слой подложки лавсановой пломбы со стороны нанесения клея предварительно печатается по всей длине подложки признак нарушения целостности пломбы (например, слово, «Орел» – вскрыта). При снятии пломбы этот признак появляется на поверхности контейнера, а растянутая цветная подложка не совпадает с оставшимся изображением на контейнере. Клеящие пломбы используются для апломбирования контейнеров с ЯМ.

Штрихкодová технология для идентификации ЯМ

Пятая принципиальная особенность новой системы учета и контроля – использование штрихкодовой технологии для идентификации ЯМ. Штрихкодová технология позволяет экономить время и затраты на проведение операций, связанных, прежде всего, с физическими инвентаризациями и выборочным контролем ЯМ (т. е. там, где многократно повторяется операция сличения меток).

В основе линейных штрихкодových технологий с изменяемой шириной штрихов лежит оптическое различие толщины линий и расстояния между линиями. Эти два параметра используются для того, чтобы кодировать информацию.

Простота в кодировании обеспечивает высокую вероятность разрешения меток при усложненных обстоятельствах (нечеткое изображение меток).

Надо отметить, что сличение меток достаточно дорогая процедура. На сличение меток, имеющих десять символов (паспортные данные и изделие), требуется примерно 30 секунд. Это связано с подготовкой изделия, развертыванием его в определенном положении, чтобы можно было считать метку двух- или трехкратным считыванием. Неоднократное считывание необходимо, поскольку метки длинные и при однократном считывании они не запоминаются. Необходимо посимвольное сравнение.

При использовании штрихкодов с соответствующей компьютерной поддержкой вероятность неправильного считывания метки оценивается по экспериментам, проведенным в РНЦ КИ, примерно на уровне 10^{-6} . Ориентировочно, на миллион меток может быть одна такого рода ошибка. При этом сравнение осуществляется в пределах полутора-двух секунд.

Штрихкодовые технологии радикально решают проблему сличения изделий с документальными данными при проведении физических инвентаризаций. Их внедрение в производственную практику – залог успешной автоматизации учета и контроля.

Использование атрибутивных признаков ЯМ

Шестая особенность – использование атрибутивных признаков ЯМ. Основными данными о ЯМ являются параметры партии ЯМ, которые включают: массу, содержание и изотопный состав ЯМ. Кроме этих основных данных для характеристики ЯМ используют косвенную информацию о состоянии ядерного материала, устройств и меток, которыми он снабжен, а также местонахождении ЯМ. Эта информация выражается в виде атрибутивных признаков.

Атрибутивные признаки – данные, однозначно определяющие наличие либо отсутствие какого-либо свойства ЯМ.

Примеры атрибутивных признаков:

- В данной учетной единице имеется в наличии ЯМ или нет?
- Устройство индикации вмешательства подтверждает отсутствие несанкционированного доступа к ЯМ или нет?
- ЯМ того типа, который указан в паспорте или нет?
- Масса-брутто ЯМ не отличается от паспортных данных в пределах погрешности измерений или нет?
- Число учетных единиц в контейнере совпадает с данными документов или нет?
- Учетная единица с данным идентификатором находится в определенном для нее месте или нет?

Атрибутивные признаки особенно полезны при определении потоков ЯМ, когда требуется принять быстро поступивший в ЗБМ материал. При этом входной контроль материала осуществляют по его атрибутивным признакам.

Использование компьютерных информационных технологий в учете и контроле ядерных материалов

В настоящее время различные варианты компьютеризированных систем учета и контроля ядерных материалов (ЯМ) применяются во многих организациях ядерной отрасли нашей страны. Причины широ-

кого внедрения компьютерных информационных технологий в учете и контроле ЯМ достаточно просты. Задача определения местоположения, количества и состояния ЯМ на крупном предприятии не может быть удовлетворительно решена без использования компьютеризированных систем учета и контроля материалов. Требования Федеральной информационной системы определяют постепенный переход к отчетности предприятий по отдельной ЗБМ. Такой объем информации невозможно собрать и обработать без использования автоматизированных систем. Именно из-за недостатка в настоящее время развитых компьютеризированных систем учета и контроля ядерных материалов (СУиК ЯМ) используется упрощенная форма отчетности – по предприятию в целом.

Высокая озабоченность относительно материалов оружейного класса вынуждает вести их непрерывный мониторинг. Проблема непрерывности знаний о наличных количествах ЯМ, прежде всего, оружейного качества, является ключевой, и ее решение пытаются найти с помощью компьютеризированных систем обработки информации. Наконец, отчуждение и обобществление информации о наличных количествах и перемещениях ЯМ от непосредственных исполнителей в виде централизованных баз данных, получения независимых балансов и др. характеристик служат важным упреждающим фактором в отношении потенциальных несанкционированных действий с ЯМ и информацией о них. Таким образом, отмеченные выше причины, способствуя достижению высокого уровня непрерывности и достоверности знаний о ЯМ, служат серьезным стимулом к широкому внедрению компьютеризированных систем обработки информации о ЯМ на предприятиях, ведомствах и федеральном уровне.

Федеральная информационная система учета и контроля ядерных материалов.

Наличие Федеральной информационной системы (ФИС) является восьмой особенностью современной СуиК ЯМ. Федеральная автоматизированная информационная система учета и контроля ядерных материалов (ФИС) является составной частью ГСУК ЯМ и предназначена для информационной поддержки руководящих органов, занимающихся планированием и управлением ядерными материалами. В том числе ФИС должна:

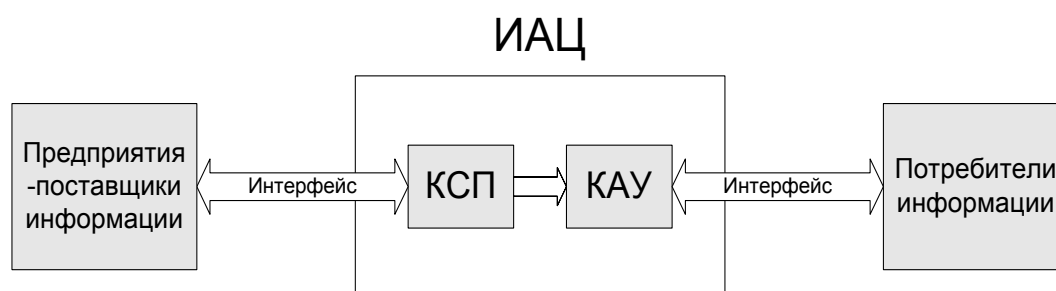
- обеспечивать информационную поддержку Минатома России, который уполномочен осуществлять учет и контроль ядерных материалов на федеральном уровне;
- осуществлять информационное взаимодействие с ведомственными информационными системами.

Задачи ФИС:

- создание и ведение государственного регистра ЯМ;

- предоставление информации о ЯМ заинтересованным потребителям;
- информационная поддержка задач, связанных с экспортом–импортом ЯМ;
- информационная поддержка задач, связанных с транспортировкой ЯМ.

Структура ФИС определяется взаимодействием конкретных поставщиков и потребителей информации. Это взаимодействие координируется Информационно-аналитическим центром. На рис.6 показана структура федеральной информационной системы.



ИАЦ - Информационно-аналитический центр

КСП - Комплекс сбора и подготовки информации

КАУ - Комплекс аналитической обработки информации и управления

Рис. 6. Структура ФИС

На данном этапе развития ФИС круг поставщиков информации ограничен российскими предприятиями. Для этих целей на них создаются автоматизированные СУиК ЯМ, которые обеспечивают ведение учета ЯМ на предприятии, формируют и направляют в ФИС регламентные отчеты о ЯМ.

Влияние человеческого фактора в обеспечении эффективности национальных гарантий.

В части эффективности национальных гарантий большую роль играет человеческий фактор. Воздействие «человеческих ошибок» на безопасность обращения с ЯМ чрезвычайно серьезно. Поэтому необходимо организовать работу с ЯМ.

6. Контрольные списки и ядерный топливный цикл

В состав контрольных списков, действующих в системе экспортно-го контроля России, входят два списка, которые непосредственно связаны с контролем передач товаров и технологий, применяемых в ядерной сфере экономики:

- список ядерных материалов, оборудования, специальных неядерных материалов и соответствующих технологий, подпадающих под экспортный контроль;
- список оборудования и материалов двойного назначения и соответствующих технологий, применяемых в ядерных целях, в отношении которых осуществляется экспортный контроль.

Важнейшей технической проблемой, связанной с контрольными списками, является проблема идентификации экспортируемой/импортируемой продукции в терминах действующих Списков при проведении экспертизы на всех уровнях системы экспортного контроля. Технические аспекты являются важнейшими и при анализе конечного использования. Кроме того, ядерные технологии динамично развиваются, появляются новые области их применения, разрабатываются новые поколения ядерных реакторов. Отдельные виды оборудования находят массовое применение в неядерных отраслях. Все эти обстоятельства обуславливают обновление Списков, что также связано с техническим анализом риска распространения в отношении новых товаров и технологий.

Первым этапом анализа чувствительности товара является установление его принадлежности той или иной технологии ядерного топливного цикла (ЯТЦ). В этом отношении важно представлять особенности всех технологий ЯТЦ, связанные с повышенным риском распространения. Возможность применения товара в каком-либо узле ЯТЦ, обладающем риском переключения на оружейное применение, делает данный товар особо чувствительным. Отсюда вытекает и основная задача контрольных списков – поставить под экспортный контроль передачу товаров и технологий ЯТЦ, которые технически можно использовать в оружейном варианте топливного цикла. Успешному решению проблемы эффективности контрольных списков как инструмента экспортного контроля могут способствовать, в частности:

- анализ возможных путей переключения ядерных материалов;
- установление корректного соответствия между элементами ядерного топливного цикла и позициями контрольного списка.

Для решения этих задач требуется технический анализ особенностей ЯТЦ в терминах экспортного контроля и нераспространения.

Под ядерным топливным циклом подразумеваются два понятия. Во-первых, ЯТЦ представляет собой последовательность технологических

операций по изготовлению ядерного топливного материала, по обращению с ним и его применению или по его переработке после извлечения из реактора. Ядерный материал, в принципе, может быть применен и в оружейных целях – в этом случае говорят о переключении ядерного материала на военное применение или об оружейном варианте реализации ЯТЦ.

Топливный цикл может быть замкнутым, включая, например, повторное использование плутония или урана в реакторах, или открытым, когда повторного использования топлива не происходит, а неразделившийся уран и наработанный плутоний направляются на длительное хранение. Существующие ЯТЦ начинаются с урана как с природного источника и создают плутоний как побочный продукт. В будущем топливные циклы, в принципе, могут быть основаны и на тории и смогут производить делящийся изотоп U-233.

Во-вторых, под ЯТЦ может подразумеваться система ядерных объектов, связанных между собой технологическим потоком ядерного материала. Такая система может состоять из урановых рудников, заводов по обработке сырья, конверсионных заводов, заводов по обогащению и изготовлению топлива, реакторов, хранилищ отработавшего топлива, заводов по переработке и связанных с ними хранилищ. Именно это понятие имеется в виду, когда говорят о степени развития ЯТЦ в какой-либо стране.

Очевидно, что любой из элементов ЯТЦ может рассматриваться как потенциальный объект экспортного контроля. При этом практической целью является составление списка тех товаров, которые должны стать предметом экспортного контроля на единой международной основе.

Ключевым условием для включения в контрольный список того или иного элемента ЯТЦ является опасность переключения данного элемента на военное использование. Анализ опасности переключения можно вести на основе системного рассмотрения технических характеристик всех элементов ЯТЦ с точки зрения их технологической и/или экономической «привлекательности» для переключения. В самом общем виде схема ЯТЦ представлена на рис. 7. В более детальном виде элементы ЯТЦ и соответствующие им позиции в контрольном списке представлены на рис. 8–10.

Структура ЯТЦ как последовательности технологических операций определяет и соответствующую совокупность ядерных объектов, на которых этот цикл осуществляется. ЯТЦ начинается с технологий по добыче и переработке уранового сырья (руды).

Технологии добычи и первичной переработки уранового сырья в разных странах различны: это может быть добыча и сухой размол руды с последующим изготовлением концентрата (так называемый «желтый кек») или, например, растворение сырья в залежи, а затем выкачивание и переработка жидкой фракции. Считается, что на начальной стадии

ЯТЦ – добыча и переработка руды – нет оружейной специфики. Поэтому товары, относящиеся к этой начальной фазе ЯТЦ, не включены в контрольные списки. Остается ограничиться констатацией того факта, что на первой стадии ЯТЦ готовится сырье для его второй стадии – для конверсионных производств.

Основная задача конверсионных технологий – приготовить из переработанного уранового сырья исходный материал для обогатительных (разделительных) производств. Поскольку обогатительные производства основаны на самых различных технологиях, использующих различные физические эффекты, то и исходный продукт для них различен. Этим и определяется многообразие материалов, получаемых на конверсионных производствах. По этой же причине все конверсионные производства требуют специально разработанных или подготовленных установок и оборудования. Именно так и сформулированы в «ядерном» контрольном списке основные позиции, посвященные конверсионным производствам (пп. 2.7.1–2.7.8).

Часть продуктов, получаемых на конверсионных производствах (см. схему на рис. 2), являются промежуточными. К готовым материалам, которые на выходе из конверсионных производств могут найти самостоятельное применение или послужить сырьем для разделительных (обогатительных) производств на следующей стадии ЯТЦ, относятся уран металлический, двуокись урана и гексафторид урана – UF_6 . В принципе, конверсионные технологии применяются и для переработки уже обогащенного урана или плутония. Это заставляет отнести конверсионный блок ЯТЦ к особо чувствительным технологиям в отношении проблемы распространения.

Процессы обогащения урана (^{235}U) по различным технологиям являются ключевыми в структуре ЯТЦ и поэтому рассматриваются в экспортном контроле как особо чувствительные. Это обусловлено тем, что на выходе обогатительных/разделительных производств получается обогащенный уран, который может быть переключен на оружейное применение. Значит, оборудование, материалы и технологии, относящиеся к этим производствам, представляют наибольший интерес для пролифераторов и могут быть потенциальными субъектами контрабанды.

Термины «обогащение» и «разделение» являются равноценными, так как отражают разные стороны одного и того же процесса – разделения изотопов урана с целью обогащения конечного продукта по содержанию в нем специальных делящихся материалов ^{235}U и ^{233}U . Обогащенным считается любой уран, в котором суммарное содержание этих изотопов выше природного. Различают низкообогащенный и высокообогащенный уран. Низкообогащенный уран (НОУ) содержит до 20 % ^{235}U , в то время как высокообогащенный уран (ВОУ) содержит как минимум 20 % ^{235}U , и

более 90 % – при оружейном применении. Обогащенный уран как специальный делящийся материал контролируется согласно позициям 1.2.2, 1.2.3 и 1.2.4 в основном ядерном контрольном списке.

На схеме (рис. 9) в блоке обогатительных технологий представлены как используемые технологии, так и перспективные, разработанные на лабораторном уровне. Их производственная эффективность различна. Все технологии, перечисленные в данном блоке, основаны на физических эффектах, связанных с незначительными различиями у атомов урана-235 и урана-238 в размере или весе, или в их способности к ионизации, к переходу в возбужденное состояние.

Наиболее известны электромагнитное разделение, газодиффузионная технология и сепараторный каскад из центрифуг (центрифужное обогащение), причем последняя из этих технологий является наиболее производительной и рассматривается экспертами как самая чувствительная в отношении распространения.

С появлением на выходе этих технологий обогащенного урана риск переключения продукта на военные нужды возрастает. На последующих стадиях ЯТЦ он также остается высоким, так как в некоторых случаях на производственной площадке возможно присутствие высокообогащенного урана.

Следующие стадии ЯТЦ (рис. 10) относят к реакторным, так как они включают изготовление топлива для ядерных реакторов, их эксплуатацию, обращение с ядерными отходами и отработавшим топливом, переработку (репроцессинг) облученного топлива.

Именно на реакторной стадии ЯТЦ может происходить формирование топливного цикла, как собственно замкнутого цикла. «Замыкание» заключается в том, что облученное ядерное топливо после отработки в реакторе подвергается переработке – репроцессингу – и его полезная выделенная часть снова используется как топливо для реактора.

Именно на реакторной стадии ЯТЦ появляется новый специальный делящийся продукт – плутоний, также состоящий из нескольких изотопов. Плутоний не существует в природе в виде природных залежей, и может быть получен только при облучении урана, например, в ядерном реакторе. Плутоний, с одной стороны, может быть использован как компонент топливного материала для реактора, с другой стороны, он может быть применен в ядерном боеприпасе как очень эффективный делящийся материал. Угроза переключения плутония рассматривается в нераспространении как самая серьезная. Вот почему экспорт таких товаров как ядерный реактор и многие его ключевые компоненты, как оборудование для репроцессинга или для обращения с ядерным топливом контролируется, а сами эти товары включены в контрольные списки.

К ядерному топливному циклу относятся и производства некоторых материалов, используемых в реакторных и оружейных технологиях: производство тяжелой воды, дейтерия, лития и др.

Наиболее опасными узлами ЯТЦ в отношении возможного переключения считаются технологии обогащения урана и технологии переработки (репроцессинга) облученного реакторного топлива. Обладание этими технологиями предоставляет доступ к так называемым специальным делящимся материалам – высокообогащенному урану и Pu-239.

Основные разделительные технологии

Разделительные (обогащительные) технологии предназначены для того, чтобы увеличить содержание в уране хорошо делящегося изотопа U-235 с его естественного уровня 0,7 % до уровней реакторного топлива (2 % в канальных реакторах типа РБМК, 3–4 % в легководных реакторах и выше – в быстрых реакторах) или до оружейного уровня (более 90 %). Ведущими государствами, обладающими обогащительными мощностями, являются США, Россия, Франция, Великобритания, Нидерланды. Определенными обогащительными производствами обладают Аргентина, Бразилия, Пакистан, Индия, что вызывает обеспокоенность в отношении распространения.

К наиболее применимым методам обогащения урана, опробованным на практике в промышленных масштабах, относят газовую диффузию, газовую центрифугу, аэродинамический метод и электромагнитное разделение. Среди перспективных методов наибольший интерес представляют лазерные методы разделения.

Газовая диффузия

Метод газовой диффузии был первым методом производства обогащительных работ и какое-то время оставался основным (в частности, оружейный уран для первых американских бомб в Манхэттенском проекте был получен именно этим методом). Газ гексафторид урана прокачивается через серию специальных мембран, обеспечивающих более быстрое прохождение молекул с более легкими атомами U-235. Поскольку разделительный эффект от пропускания газа через одну мембрану невелик, то приходится пропускать газ через длинную цепь мембран. Для получения 3 %-го реакторного обогащения необходима последовательность из более чем 1 000 мембран, для оружейного обогащения – более 4 000.

Это делает процесс очень энергоемким, под его размещение требуются значительные площади, что затрудняет задачу скрытого развертывания таких мощностей. Из-за его значительной энергоемкости в настоящее время этот метод практически вытеснен более эффективным и экономичным – методом центрифужного разделения.

Основное применяемое оборудование, подлежащее экспортному контролю: газодиффузионные барьеры, камеры диффузоров, компрессоры и газодувки, вакуумные уплотнения вращающихся валов, теплообменники для охлаждения газа, а также различное вспомогательное оборудование, обеспечивающее безопасную и надежную работы системы в среде агрессивного газа UF_6 на всех этапах полного технологического цикла (коллекторные трубопроводы, клапаны, вакуумные системы и др.).

Разделение на газовых центрифугах

В быстро вращающейся газовой центрифуге под действием центробежных сил относительное содержание молекул гексафторида урана с более тяжелыми атомами U-238 у внешней стенки будет больше, чем в центральной части рабочей камеры. Для того, чтобы различие в соотношении атомов U-238 и U-235 в газе стало заметным, так же, как и в методе газовой диффузии, требуется многократное повторение процесса.

Ориентировочно, один завод с 1000 центрифуг за год может нарабатывать материал для нескольких ядерных бомб. Такие производства тоже размещаются на больших площадях, но являются более экономичными и эффективными по сравнению с газодиффузионными.

Газоцентрифужные технологии относятся к наукоемким технологиям высокого уровня, требуют применения соответственно высокотехнологичных материалов и должны обслуживаться высококвалифицированным персоналом. В силу высокой эффективности эти производства имеют и высокую значимость в отношении распространения ядерного оружия.

К основному оборудованию этого метода относятся роторные сборки, роторные трубы, роторные опоры, перегородки, верхние/нижние крышки – все они представляют вращающуюся часть центрифуги. К статическому оборудованию относятся: магнитные подшипники, молекулярные насосы, статоры двигателей, ловушки и другое специально разработанное или изготовленное вспомогательное оборудование. Полный перечень контролируемого оборудования с указанием специальных материалов и параметров приведен в исходном «ядерном» контрольном списке.

Аэродинамическое разделение

В этом методе так же, как и в центрифужном разделении, используется центробежная сила. Гексафторид урана в данном случае направляется с большой скоростью на искривленную поверхность, и происходит частичное разделение газовых потоков, содержащих изотопы U-238 и U-235. На данный момент известно два основных метода аэродинамического разделения: процесс соплового разделения и процесс вихревой трубки.

Для 3 %-го обогащения по U-235 требуется 600-кратное повторение процесса, для получения материала оружейных кондиций – более 2 000 раз.

Технически этот метод не так сложен, как газодиффузионный и газоцентрифужный, но он очень энергоемкий и не получил большого распространения. Наблюдались попытки развивать этот метод в Южной Африке и в Германии.

Для обоих применяемых процессов применяют следующее основное оборудование: цилиндрические корпуса, газовые компрессоры и теплообменники, уплотнения вращающихся валов, кожухи разделяющих элементов, масс-спектрометры и ионные источники, вакуумные системы и насосы, системы подачи и отвода газовых потоков и другое оборудование. Полный перечень контролируемого оборудования, применяемого для аэродинамического разделения, приведен в исходном ядерном контрольном списке в позициях, составляющих пункт 2.5.2.5 этого списка.

Разделение лазерными методами

Методы основаны на различии в поглощении лазерного излучения изотопами ^{238}U и ^{235}U . Различие в частотах поглощения составляет величину порядка $10^{-4}\%$, однако в определенных условиях настройка лазера обеспечивает поглощение лазерного излучения только атомами U-235.

Существует несколько технологий лазерного разделения, например: в атомных парах (AVLIS); в молекулярных парах (MLIS); на основе химических реакций (CRISLA). Так, например, вариант AVLIS использует пары металлического урана, в которых излучение лазера поглощают только атомы U-235, они ионизируются и собираются на коллекторе продукта U-235.

Лазерные технологии находятся в стадии разработки, они сложны и даже на стадии отработки пилотного варианта требуют затрат на несколько порядков выше, чем затраты на отработку центрифужного метода. Однако, на современном этапе проработки лазерных технологий разделения изотопов урана можно ожидать их внедрения в промышленном масштабе.

Для технологии AVLIS применяют лазерные системы, системы испарения урана, системы транспортировки и блоки сбора жидкого металлического урана и отходов, корпуса сепараторных модулей. Для технологии MLIS применяют лазерные системы, сверхзвуковые расширительные сопла, сборники продукта UF_6 , компрессоры UF_6 , масс-спектрометры, уплотнители вращающихся валов и системы фторирования. Полный перечень контролируемого оборудования, применяемого для технологий AVLIS и MLIS, приведен в исходном ядерном контрольном списке в пунктах 2.5.2.7 и 2.5.2.8.

Электромагнитное разделение

Метод электромагнитного разделения до недавнего времени рассматривался как устаревший и малоэффективный метод обогащения урана. Но как показал случай с попыткой Ирака использовать именно

этот метод для обогащения урана, пролифератор при достижении своей цели может обратиться и к малоэффективным методам. Тем более, что метод электромагнитного разделения не содержит секретных технологий, и приобретение оборудования для этого метода может и не привлечь особого внимания.

При электромагнитном разделении рабочим телом являются ионы металлического урана, которые ускоряются и пропускаются через магнитное поле, заставляющее изотопы с различным атомным весом по-разному изменить свою траекторию. Соответственно, смешанный поток ионов будет разделяться на два пучка с высоким содержанием ^{235}U или ^{238}U . Таким образом, для осуществления разделения изотопов U-235 и U-238 необходимы источник ионов с системой их ускорения, мощное магнитное поле, система сбора разделенных изотопов.

Обслуживаются основные системы вспомогательным оборудованием, обеспечивающим снабжение магнитной энергией, высоковольтное питание, вакуумирование рабочих объемов, химическую обработку, очистку, регенерацию материала.

«Иракский след» дает всей системе нераспространения поучительный урок о том, что все методы разделения (устаревшие, малоэффективные, энергоемкие, разработанные лишь на лабораторном уровне) должны подлежать изучению, анализу и учету при осуществлении экспортного контроля в отношении разделительных технологий.

Реакторная часть топливного цикла

Реакторная часть топливного цикла включает в себя все технологии, непосредственно связанные с разработкой, конструированием, производством и эксплуатацией ядерных реакторов, независимо от их конструкции назначения. Ядерные реакторы как бы завершают ядерный топливный цикл. Именно в них находит практическое применение продукция всех предшествующих технологий ЯТЦ – ядерное горючее. Но ядерные реакторы нельзя отнести к классу чистых потребителей – в реакторах нарабатывается новый продукт – эффективно делящийся плутоний-239, специальный делящийся материал с оружейным применением.

Это обстоятельство приводит к тому, что реакторная часть топливного цикла становится потенциальным узлом переключения с достаточно высоким риском распространения (после операции репроцессинга облученного топлива получается плутоний реакторной чистоты).

Однако следует сделать принципиально важное замечание – количество и качество нарабатываемого в реакторе плутония в сильной мере определяется типом ядерного реактора и режимом его работы – это делает одни реакторы малоэффективными с точки зрения переключения, другие, напротив – потенциально опасными.

Началом реакторной части топливного цикла можно считать технологии по изготовлению тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок (см. рис. 7). После этой производственной стадии урановое ядерное горячее готово к загрузке в активную зону реактора.

Технологическая «судьба» облученного топлива, в котором может оставаться высокообогащенный уран и наработанный плутоний, может быть различной – облученное (отработавшее) топливо может быть направлено на длительное хранение или на переработку (репроцессинг).

Операция репроцессинга, когда она реализована в промышленном масштабе, делает ЯТЦ замкнутым, позволяя повторно использовать выделенные из облученного топлива делящиеся материалы. Строго говоря, только замкнутое технологическое кольцо «топливо – реактор – переработка – топливо» и позволяет называть ЯТЦ именно циклом. Промышленность, реализовавшая замкнутый ЯТЦ, получает определенные экономические выгоды.

К наиболее чувствительным технологиям реакторной части ЯТЦ следует, по-видимому, отнести технологии репроцессинга, так как они вплотную подводят потенциального пролифератора к обладанию плутонием – материалом с возможностями оружейного применения.

Риски переключения и распространения

Риск переключения – категория качественная. Говорят о высоком риске переключения, когда существует реальная физическая и технологическая возможность переключения назначения товара (материала, оборудования, установки) с мирного на военное (оружейное). В принципе, все технологии ЯТЦ могут быть разбиты на категории как по величине риска переключения, так и по степени риска распространения.

О рисках переключения для того или иного материала, оборудования можно говорить в том смысле, что, будучи импортированным как товар мирного применения, этот материал, оборудование могут быть использованы скрытым, неконтролируемым образом (непосредственно или после модернизации, переработки) в оружейном проекте.

Риск распространения может быть низким или отсутствовать, если экспортируется/импортируется товар, не имеющий отношения к ОМП, в отличие от тех случаев с высоким риском распространения, когда товар может быть использован для создания ОМП как непосредственно, так и после реализации переключения его назначения с мирного на военное.

Риск распространения может оцениваться как высокий не только по техническим показателям, но и зависеть от страны-получателя, от конечного пользователя. Экспорт чувствительных товаров в так называемые пороговые страны, в которых предполагается наличие скрытой государственной ядерной оружейной программы, несет в себе высокий риск распространения.

Высоким риском распространения будет обладать и экспорт по контракту с сомнительным конечным пользователем, замеченным в коммерческих контактах с террористическими организациями (группами). Анализ путей переключения ядерных материалов следует начинать, по-видимому, с рассмотрения структуры ядерных топливных циклов, сформировавшихся в сфере производства ядерного оружия. Это позволяет выявить возможные точки переключения, потенциально привлекательные для пролифераторов.

Принципиальные схемы технологических циклов в ядерной энергетической промышленности и при государственном производстве ядерного оружия в промышленном масштабе приведены на рис. 7 и 11. На схемах указаны основные используемые технологии и установки. Ключевыми этапами создания ядерного оружия (рис. 11) являются:

- изотопное обогащение;
- получение ядерного топлива и изготовление твэлов;
- облучение в активной зоне ядерного реактора;
- переработка отработавшего ядерного топлива (репроцессинг) с целью выделения урана и плутония;
- изготовление узлов и сборка готового оружия на основе плутония либо обогащенного урана.

Как видно из данных схем, имеется принципиальное сходство комплекса ядерных установок военного назначения с аналогичными ядерно-энергетическими комплексами. Таким образом, целевое использование перерабатывающих мощностей зависит в значительной степени от намерений государства-владельца, от его позиции и проводимой им политики в сфере нераспространения ОМП.

В силу технических особенностей конкретных топливных циклов и особенностей конструкций и назначения ядерных реакторов возможны различные пути переключения ядерных материалов. Фактически страна может располагать ядерными установками гражданского назначения, военного назначения либо обоими типами установок. Собственно технологические установки гражданского и военного назначения могут быть как разделенными, так и совместно функционирующими.

В качестве примера приведем схему (рис. 12), на которой представлен *топливный цикл воспроизводства с МОХ-топливом*. В данном виде цикла представлены практически все точки возможного переключения, имеющиеся и в других видах ЯТЦ. Следует, однако, подчеркнуть, что каждое из возможных переключений (материала, оборудования, установок), может иметь различные последствия по степени приближения к созданию ядерного взрывного устройства. Таким образом, степень приближения к созданию ЯВУ может послужить основой для технической классификации материалов, оборудования и установок, включаемых в контрольный список.

Основы технической классификации

За техническую основу для классификации контролируемых товаров можно принять относительный ущерб от возможного распространения каждого из них. При классификации рассматривается последовательная цепочка технологического процесса, который в конечном итоге может привести к сборке и испытанию ЯВУ.

В качестве иллюстрации весь технологический процесс от наработки необходимых материалов до сборки и испытания ЯВУ условно можно разделить на четыре стадии (рис. 13), каждая из которых охватывает собой специфическую группу материалов и оборудования, необходимых для выполнения данной стадии технологического процесса.

Первая группа. В первую группу включены ЯМ оружейного качества, процесс сборки ЯВУ, его испытание, а также оборудование и материалы, необходимые для процесса сборки и испытаний. Эта группа наиболее опасная с точки зрения риска распространения, так как:

- до готовности ядерного взрывного устройства к применению только один шаг;
- каждый предмет группы представляет значительный интерес для террористов или шантажистов;
- представляет очень большой интерес для стран – потенциальных пролифераторов;
- для реагирования мирового сообщества остается очень ограниченное время.

Поскольку предметы, входящие в эту группу, в основном, небольших размеров и количество их ограничено, вероятность обнаружения нелегальной деятельности с ними достаточно мала. Остается под вопросом и требует дополнительного рассмотрения необходимость включения в эту группу специального оборудования для испытаний ядерных взрывных устройств, так как его, по-видимому, можно отнести и ко второй группе.

Вторая группа. Сюда включены установки любых размеров и мощностей по изотопному разделению урана и по переработке облученного топлива. Для этой группы:

- необходимо два шага до готовности ядерного взрывного устройства (один шаг до получения материалов оружейного качества и второй шаг до изготовления ЯВУ);
- для террористов и шантажистов установки практически не представляют интереса, за исключением случаев саботажа и радиологической угрозы;
- для стран потенциальных пролифераторов установки представляют достаточно большой интерес;

- достаточно большое время реагирования;
- достаточно велика вероятность обнаружения.

Третья группа. В эту группу входит:

1. Оборудование для установок по изотопному разделению и для установок по переработке облученного топлива.
2. Природный и низкообогащенный уран.
3. Плутоний реакторной чистоты в облученном топливе.
4. Специальные (с перегрузкой на мощности) или исследовательские реакторы, способные производить плутоний оружейной чистоты.

Для этой группы:

- необходимо три шага до готовности ядерного взрывного устройства;
- оборудование не представляет интереса для террористов;
- оборудование не представляет большого интереса для стран потенциальных пролифераторов;
- имеет большое время реагирования;
- велика вероятность обнаружения.

Четвертая группа. Эта группа объединяет ядерные и неядерные материалы, установки и оборудование, которые представляют наименьшую опасность с точки зрения распространения.

Сюда входят остановленные при перегрузке энергетические реакторы (например, ВВЭР) и оборудование для них, исследовательские реакторы, обедненный уран, торий, оборудование и специальные неядерные материалы для специальных реакторов (исследовательских и других типов, в основном, останавливаемых при перегрузке реакторов) и вспомогательное оборудование и материалы разных типов.

Для этой группы:

- необходимо четыре шага до готовности ядерного взрывного устройства;
- материалы не представляют интереса для террористов;
- материалы представляют очень небольшой интерес для стран потенциальных пролифераторов;
- имеет очень большое время реагирования;
- очень велика вероятность обнаружения в процессе использования после приобретения.

Такое разбиение по группам, достаточно условное, используется для того, чтобы установить технические приоритеты для ядерных материалов, установок, оборудования и неядерных материалов в отношении потенциального риска распространения при их экспорте.



Рис. 7. Общая схема ядерного топливного цикла

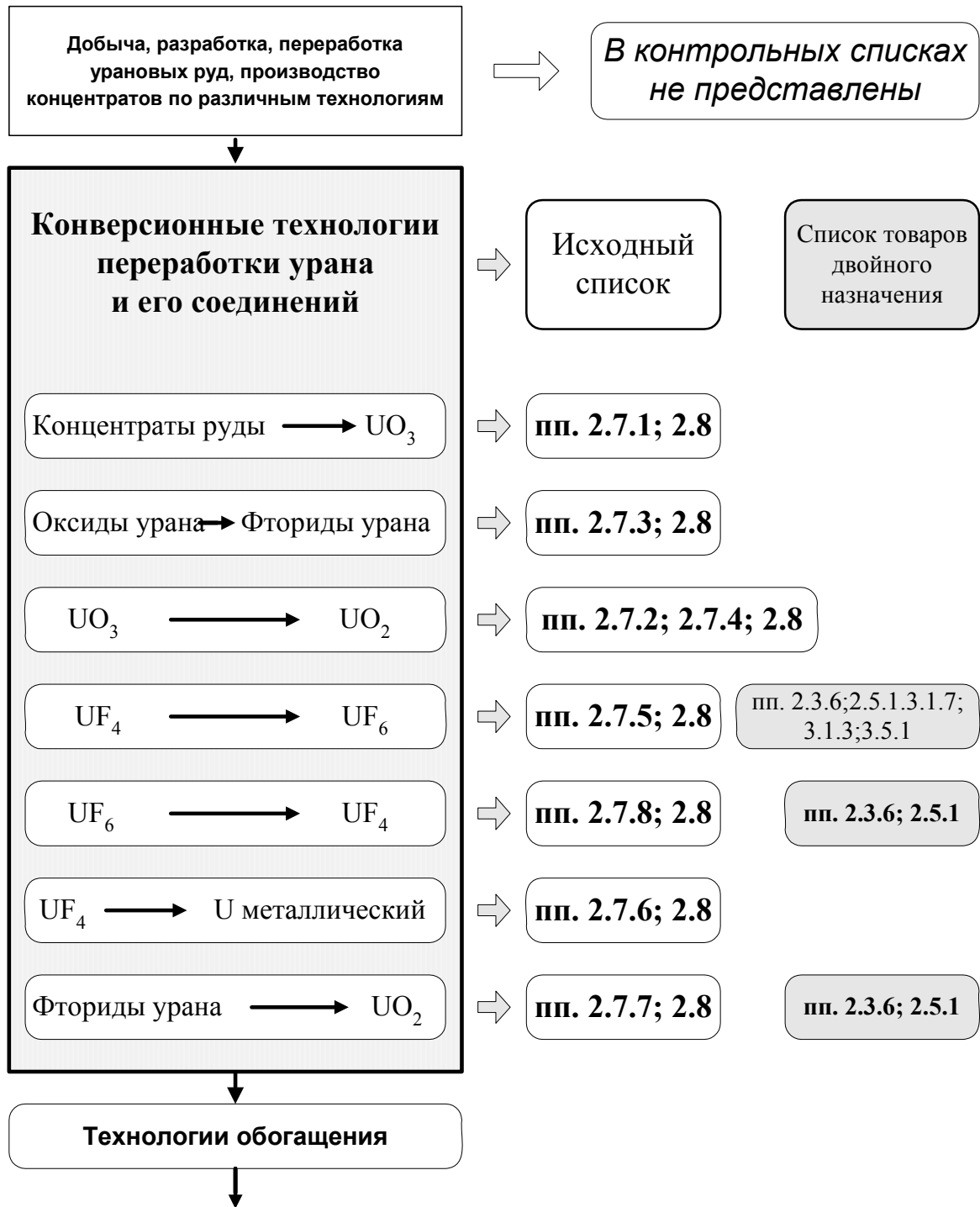


Рис. 8. Начало топливного цикла и контрольный список



Рис. 9. Предреакторная часть топливного цикла

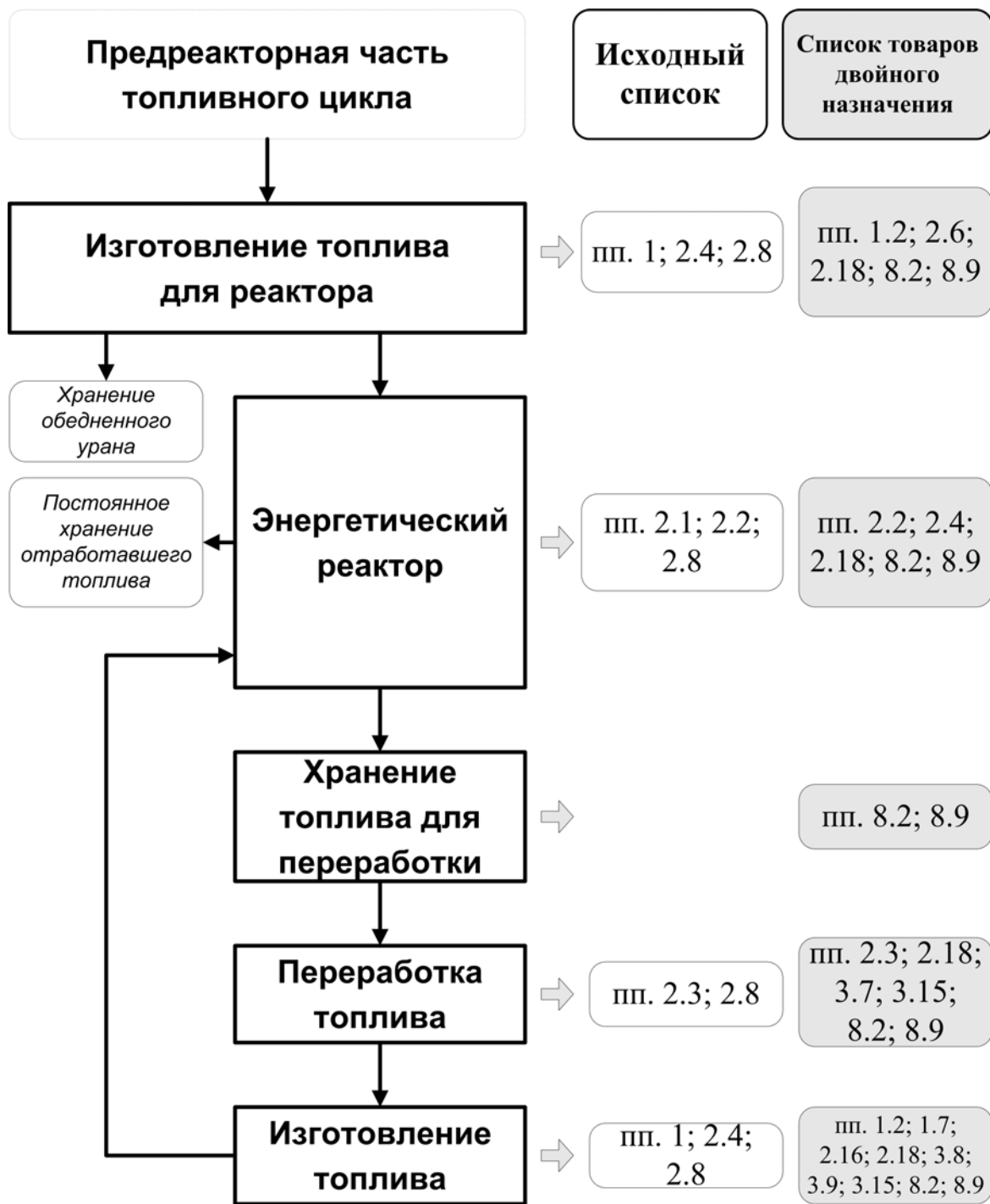


Рис. 10. Реакторная часть топливного цикла

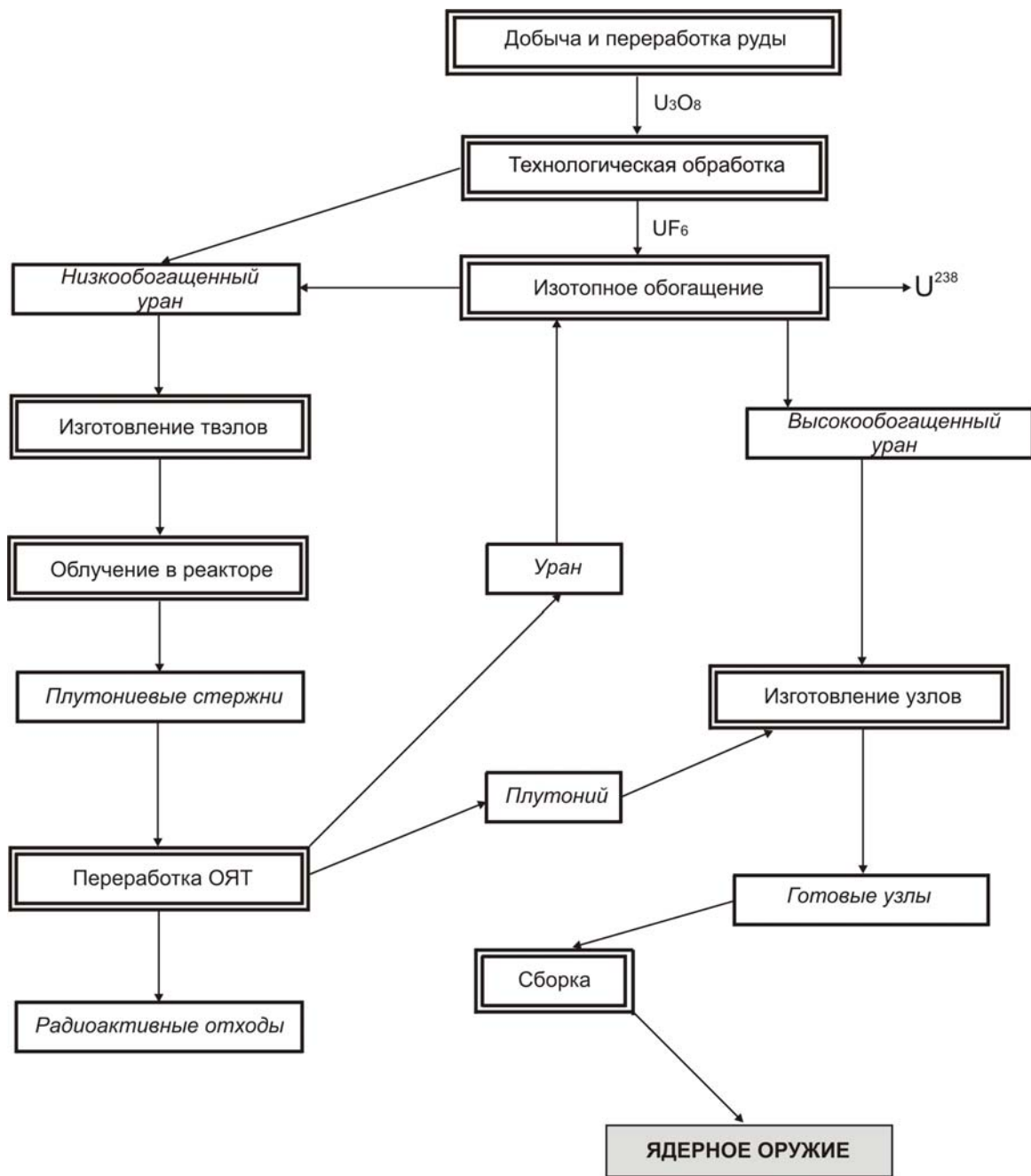


Рис. 11. Технологическая блок-схема производства ядерного оружия

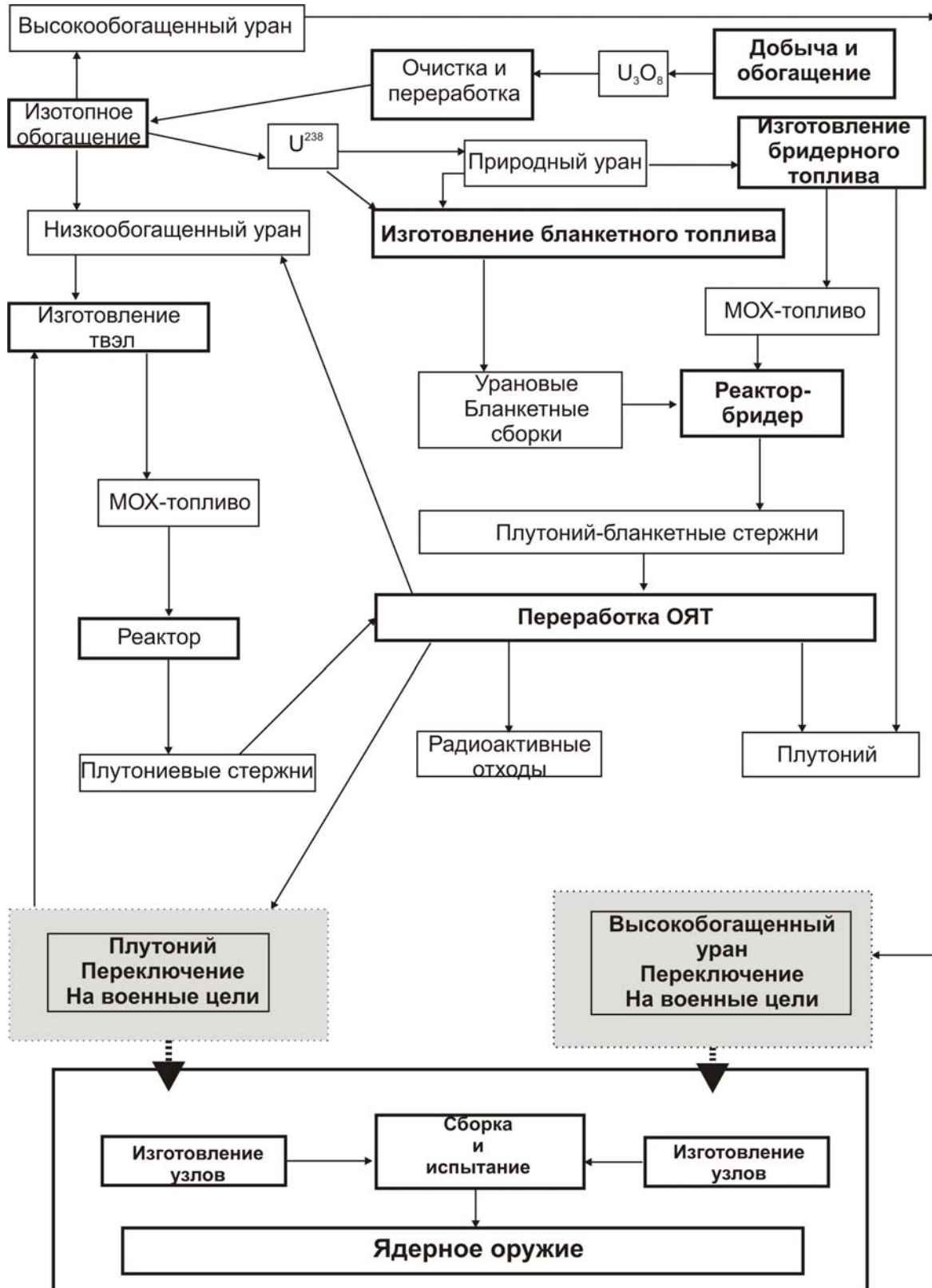


Рис. 12. Топливный цикл воспроизводства с МОХ-топливом

8. Ядерные реакторы и контрольные списки

Ядерный реактор – это энергетическое устройство, в котором осуществляется контролируемая цепная реакция деления ядер делящегося материала и отвод получаемой тепловой энергии. Это определение ядерного реактора носит самый общий характер и отражает лишь физическую сущность реактора. Существуют и другие определения ядерного реактора, описывающие этот объект в терминах его конструкции, его предназначения и т. п.

В терминах режимов ядерного экспортного контроля определение ядерного реактора должно, по-видимому, охватывать реакторные системы, устройства и компоненты, которые подлежат экспортному контролю в соответствии с законодательством, а также должно определять, что такое комплектный ядерный реактор, так как данная товарная позиция указана в контрольном списке (пункт 2.1.1 «Списка ядерных материалов», Указ Президента Российской Федерации № 202 от 14.02.1996 г.).

Исходя из этих требований и основываясь на Пояснительном замечании к пункту 2.1.1 указанного Списка, физическое определение ядерного реактора необходимо дополнить следующим образом: Реактор включает узлы, находящиеся внутри его корпуса и непосредственно приданные корпусу, а также оборудование, необходимое для его нормальной безопасной эксплуатации, аварийного охлаждения и аварийной защиты, и оборудование, контролирующее уровень мощности в активной зоне, и те его части, которые содержат теплоноситель первого контура, вступают с ним в контакт, контролируют и регулируют его.

Тем не менее, исчерпывающе точно очертить состав конструкции любого реактора каким-либо общим определением, по-видимому, невозможно, поскольку по существующим правилам границы реакторной установки уточняются для каждой АЭС Главным конструктором РУ и Генпроектировщиком.

Таким образом, определение принадлежности той или иной единицы реакторного экспорта к ядерному реактору, необходимое при анализе товара на принадлежность к пунктам 2.1, 2.8 Списка, может оказаться в конкретном случае прерогативой технической экспертизы.

Классификация

Существует несколько классификаций реакторов.

Реакторы делятся в зависимости от средней энергии их спектра нейтронов – на быстрые, промежуточные и тепловые.

По конструктивным особенностям активной зоны – на корпусные и каналные.

По типу теплоносителя – на водяные, тяжеловодные, натриевые.

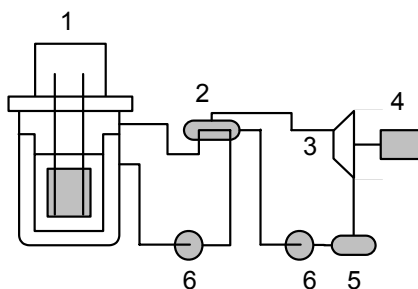
По типу замедлителя – на водяные, графитовые, тяжеловодные и др. Для целей гарантий МАГАТЭ реакторы подразделяются на энергетические и исследовательские, а также на критические сборки.

Для энергетических целей, для производства электроэнергии применяются:

- водо-водяные реакторы с некипящей или кипящей водой под давлением, (LWR, BWR, ВВЭР);
- уран-графитовые реакторы с кипящей водой (РБМК) или охлаждаемые углекислым газом;
- тяжеловодные каналные реакторы, (типа CANDU, HWR);
- жидкометаллические реакторы-размножители на быстрых нейтронах и др. («Phenix», Франция; БН-600, Россия).

В отдельную группу могут быть отнесены исследовательские реакторы, сооружаемые для отдельных специальных экспериментальных задач, имеющие нестандартные уникальные технические характеристики. В некоторых случаях вырабатываемое ими тепло утилизируется для производства электроэнергии или обогрева.

Общая принципиальная схема энергоустановки с ядерным реактором представлена на рис. 14.



*Рис. 14. Схема энергетической установки с ядерным реактором:
1 – ядерный реактор. 2 – теплообменник/парогенератор. 3 – паротурбинная установка. 4 – электрогенератор. 5 – конденсатор. 6 – насос.*

Эта схема может видоизменяться в зависимости от типа реактора (например, может появиться третий контур теплообмена). Не существует какой-то одной характеристики, которая бы определяла значимость данного реактора с точки зрения распространения ядерных материалов. Каждый тип реакторов имеет свой состав реакторного оборудования и материалов, подлежащих экспортному контролю.

Основные позиции по реакторному оборудованию в Списке ядерных материалов... (Указ Президента Российской Федерации № 202 от 14.02.1996 г.) составляют:

- Комплектные ядерные реакторы.
- Корпуса ядерных реакторов.

- Машины для загрузки и выгрузки топлива ядерных реакторов.
- Управляющие стержни ядерных реакторов и оборудование.
- Трубы высокого давления для ядерных реакторов.
- Циркониевые трубы.
- Насосы первого контура теплоносителя.
- Внутренние части ядерных реакторов, включающие поддерживающие колонны активной зоны, каналы для топлива, тепловые экраны, перегородки, трубные решетки активной зоны и пластины диффузора.

(В пояснительном замечании к данному виду оборудования определены следующие функции внутренних частей ядерных реакторов: поддержка активной зоны, удержание сборок топлива, направление потока теплоносителя первого контура, обеспечение радиационной защиты корпуса реактора и управление оборудованием внутри активной зоны.)

- Теплообменники (парогенераторы), за исключением теплообменников аварийной системы охлаждения или системы отвода остаточного тепловыделения.

- Оборудование детектирования и измерения потока нейтронов.

Основные позиции по ядерным реакторным материалам в Списке ядерных материалов (Указ Президента Российской Федерации № 202 от 14.02.1996 г.) составляют:

Исходные материалы:

- Природный уран.
- Обедненный уран.
- Торий.

Специальные расщепляющиеся материалы:

- Плутоний-239.
- Уран-233.
- Обогащенный уран.
- Нептуний-237.

Основные позиции по неядерным реакторным материалам в Списке ядерных материалов... (Указ Президента Российской Федерации №202 от 14.02.1996 г.) составляют:

- Дейтерий и тяжелая вода.
- Ядерно-чистый графит.

Одной из статей ядерного экспорта являются технологии. В Списке ядерных материалов... они определяются как технологии, связанные со всеми включенными в разделы 1 и 2 настоящего Списка предметами. Поскольку степень связи с предметами в Списке... не оговаривается, то вопрос чувствительности конкретной технологии в неочевидных случаях также остается прерогативой технической экспертизы.

Исследовательские реакторы. Классификация

Для того, чтобы составить представление об исследовательских реакторах (ИР), недостаточно описать какой-то один из почти 400 ИР, существующих в мире на настоящий момент. Технических воплощений исследовательских реакторов так же много, как и прикладных задач, стоящих перед атомной промышленностью. Поэтому для общего знакомства приведём обобщённую классификацию ИР, как она принята большинством специалистов в этой области.

При определении критериев классификации исследовательских реакторов принято выделять три основных признака: назначение, уровень плотности потока нейтронов, режим работы. В то же время, в промышленном реакторостроении делают акцент на такие особенности, как: замедлитель, теплоноситель, отражатель, структура активной зоны, спектр и пр. Эти критерии также очень важны и при классификации ИР, но часто выполняют служебные функции по отношению к первым трём классификационным критериям, предъявляемым к ним.

Каждый из трёх вышеуказанных критериев классификации в свою очередь может быть разделён на три направления. Таким образом, классификационная шкала, применяемая в настоящее время к ИР, содержит 9 специфических позиций.

Назначение

Пучковые реакторы, или реакторы для физических исследований. Характеризуются наличием мишеней, детекторов, расположенных вне активной зоны реактора на выходе специально устроенных пучков нейтронов и γ -квантов. Пучки оборудованы шиберами для выключения и включения потоков нейтронов при работе реактора. Возможны эксперименты и внутри активной зоны (в максимальном потоке), но преобладают эксперименты на пучках.

Изотопные реакторы, или реакторы для производства радионуклидов. В основном, речь идёт о производстве лабораторных количеств лёгких трансурановых элементов, например: ^{237}Np , ^{241}Am , ^{242}Cm , ^{252}Cf (2×10^{13} н/см²с), ^{254}Cf (100 кВт/см³), ^{242}Pu и т. д.

Петлевые, или материаловедческие реакторы. Под петлёй подразумевается встроенный в реактор автономный контур охлаждения экспериментального канала с регулируемыми режимами испытаний. Используются, как правило, для анализа поведения материалов (реакторные материалы: конструкционные, теплоносители, замедлители и пр.) в интенсивных потоках нейтронов и γ -квантов. Распространены фундаментальные и прикладные исследования по радиационной химии, воздействию излучений на синтетические материалы, радиационным поврежде-

ниям твёрдого тела и пр. Кроме того, автономные петли (число которых может достигать до 10) позволяют моделировать условия, типичные для ядерных реакторов промышленного назначения.

Плотность потока нейтронов

Реакторы первого класса (высокопоточные). Для них характерно то, что стоимость топлива (включая производство делящегося материала и изготовление ТВЭЛов) даёт наибольший вклад в стоимость поставляемых экспериментаторам нейтронов. Характеризуются большой мощностью и обеспечивают высокую плотность потока нейтронов. Нижняя граница плотности потока нейтронов, разделяющая реакторы первого и второго класса, лежит в области 10^{15} нейтр/см²с.

Реакторы второго класса (со средней плотностью потока). Ядерное топливо выгорает медленнее, однако его стоимость сравнима с суммой расходов на эксплуатацию и амортизационных отчислений. Важно отметить, что реакторы этого класса ещё несколько лет назад считались высокопоточными.

Реакторы третьего класса. Эти реакторы характеризует чрезвычайно малый расход топлива. Время работы ТВЭЛов сравнимо со временем морального и материального старения реактора (15–20 лет). Таким образом, затраты на топливо включаются в капитальные затраты на строительство. Для проведения опытов требуются не столько высокие потоки, сколько возможность легко менять условия проведения эксперимента. Таких реакторов много, и они разнообразны:

- учебные реакторы, используемые для проведения лабораторных работ;
- демонстрационные (выставочные) реакторы.

При плотности потока $\sim 10^4$ – 10^5 нейтр/см²с исследовательские реакторы третьего класса граничат с критическими сборками – лабораторными установками нулевой мощности. Однако критические сборки здесь рассматриваться не будут.

Режим работы

Под режимом работы подразумевается закон изменения мощности реактора во времени, во многом определяющий его экспериментальные возможности.

Стационарные реакторы. Предназначены для продолжительной работы на любом уровне мощности, от номинального до минимально контролируемого ($N_{\text{ном}} - N_{\text{мкум}}$).

Импульсные реакторы. Работают в режиме мощных взрывоподобных вспышек, разделённых продолжительными интервалами времени, в течение которых реактивность отрицательна. Как правило, отсутствует система принудительного отвода тепла, выделившегося в результате вспышки. Предельный случай импульсной работы – подземный ядерный взрыв.

Пульсирующие реакторы. По нейтронным процессам эти установки близки к импульсным, а по тепловым – к реакторам со стационарной мощностью. Импульсы нейтронов генерируются с частотой $\sim 10^2 \text{ с}^{-1}$, так что распределение температур в реакторе практически не зависит от времени. К пульсирующим реакторам относятся т.н. бустеры – подкритические системы, усиливающие генерированный внешним источником импульс нейтронов.

Последовательный выбор позиций – по одному направлению из каждого определяющего классификационного критерия (назначение, уровень плотности потока нейтронов, режим работы) даст 27 комбинаций, характеризующих возможные технические решения реакторных установок исследовательского типа.

Значительная часть из 27 комбинаций ($3 \times 3 \times 3$) перечисленных выше классификационных позиций, характеризующих основные свойства исследовательских реакторов, имеет практический смысл – соответствующие аппараты либо уже построены, либо будут построены в ближайшем будущем.

Долгое время реакторы были фактически единственным типом источника нейтронов в тех случаях, когда требуются нейтронные потоки с плотностью, превышающей 10^9 – 10^{10} нейтр/см²с. Однако в последнее время конкуренцию реакторам, особенно импульсным исследовательским, начинают составлять нейтронные источники другого типа. Это установки на базе ускорителей заряженных частиц, оснащённые генераторами нейтронов – конверторы высокоэнергетических заряженных частиц в нейтроны (ADS – системы). В настоящее время такие объекты не внесены в контрольный список ГЯП, но вопрос об их контроле обсуждается уже на протяжении нескольких лет.

Ядерные реакторы как объект пролиферации

Рассмотрим технические проблемы экспортного контроля на примере такого важного узла ЯТЦ, как ядерные реакторы – установки, среди которых есть работающие с обогащенным ураном и/или нарабатывающие плутоний. Наиболее важное свойство – любой реактор является источником плутония, который обязательно присутствует в отработавшем ядерном топливе и может быть использован в ядерном боезаряде.

Долгое время дискутировался вопрос о возможности использования в ядерных боеприпасах (ЯБП) плутония т.н. энергетического качества, т. е. плутония с расширенным изотопным содержанием этого элемента. Утверждалось даже, что плутоний, выделенный из отработавшего топлива энергетического реактора с существенной глубиной выгорания, невозможно использовать для производства ядерного боезаряда.

Однако по последним исследованиям, проведённым в области оценки потенциальной опасности отработавшего ядерного топлива с точки зрения распространения ядерных материалов, плутоний практически любого изотопного состава является делящимся материалом, попадающим в высший класс опасности относительно возможности производства из него ядерных боезарядов различной степени эффективности.

Для иллюстрации этого положения приведём результаты серии расчётов критических масс сфер без отражателя методом Монте-Карло. В табл. 4 приведены результаты расчётов критических масс для основных изотопов, входящих в состав плутония т.н. энергетического качества. Результаты расчётов показали, что все изотопы (кроме Pu-242) по величине критической массы попадают в первый класс опасности из четырёх, принятых в работе. К этому классу относятся делящиеся материалы, критическая масса которых менее 50 кг.

Таблица 4

Критические массы изотопов плутония

Изотоп	Критическая масса, кг
Pu – 238	9,2
Pu – 239	10
Pu – 240	44
Pu – 241	11,2
Pu – 242	92

В табл. 5 и 6 содержатся результаты расчетов критических масс оружейного и энергетического плутония разных составов, которые показывают, что все рассмотренные виды плутония также относятся к первому классу опасности.

Таблица 5

Составы и критические массы оружейного и энергетического плутония

Изотоп	Оружейный плутоний	Энергетический плутоний ВВЭР
Pu – 238	0,012	0,024
Pu – 239	0,938	0,584
Pu – 240	0,058	0,240
Pu – 241	0,0035	0,112
Pu – 242	0,00022	0,039
Крит. масса, кг	10,7	13,5

Таблица 6

Составы и критические массы в зависимости от глубины выгорания

Выгорание ГВт·сут/т	33	50	60	72	100
Pu – 238	0,16	0,029	0,038	0,050	0,078
Pu – 239	0,565	0,533	0,518	0,502	0,470
Pu – 240	0,238	0,233	0,230	0,226	0,217
Pu – 241	0,128	0,139	0,442	0,145	0,147
Pu – 242	0,054	0,066	0,072	0,078	0,088
Крит, масса, кг	13,7	13,9	14,0	14,0	14,1

Таким образом, закрывается вопрос о якобы невозможности военного использования плутония, выделенного из отработавшего ядерного топлива атомных электростанций и исследовательских ядерных установок. Однако открытым остаётся вопрос о степени привлекательности того или иного варианта ядерного топливного цикла для потенциальных участников процесса распространения ОМП.

Оценка значимости реактора, реакторного оборудования, материалов и технологий с точки зрения распространения ядерных материалов базируется на двух основных позициях:

- заявленная цель создания реактора;
- технические характеристики реактора.

Из технических характеристик значимость реактора в отношении распространения лучше всего представляет тип используемого топлива:

- природный уран – непосредственно в оружии не применяется, но считается, что большая часть наработанного к данному моменту оружейного материала получена в тяжеловодных реакторах с этим топливом;

- низкообогащенный уран – пролиферационная опасность та же, что и у природного урана (если в стране нет обогатительной промышленности). При наличии обогатительной промышленности – является для нее более эффективным сырьем, чем природный уран.

- высокообогащенный уран или плутоний – являются материалами оружейного использования.

Такое топливо имеет пролиферационную значимость как до, так и после облучения.

Тип замедлителя в ряде случаев также играет роль индикатора значимости:

- легкая вода не является чувствительным материалом;
- тяжелая вода представляет интерес для пролиферации по двум направлениям:

1) при облучении тяжелой воды образуется тритий, являющийся оружейным материалом;

2) при наличии у страны-импортера промышленности по переработке облученного реакторного топлива возможно извлечение наработанного плутония в тяжеловодном реакторе, работающем на природном уране;

- графит реакторного качества аналогичен тяжелой воде в части возможности получения плутония при облучении природного урана.

Коэффициент конверсии представляет собой отношение производимого в реакторе делящегося материала к используемому. По значению этого коэффициента реакторы делятся на выжигатели, конвертеры (переработчики) и бридеры (размножители). Выжигатели, например, легководные реакторы, имеют низкую пролиферационную значимость. Коэффициент конверсии у конвертеров близок к единице. Наибольшую потенциальную угрозу представляют бридеры, т. к. потенциально оружейный материал находится на площадке реактора как до, так и после облучения, что создает принципиальную возможность переключения.

При топливной перегрузке реактора делящийся материал становится уязвимым к переключению. Существующие два типа перегрузки (при остановленном реакторе и во время работы реактора) различаются по степени возможности переключения: перегрузка с остановом реактора поддается более строгому контролю, чем перегрузка без останова.

Несомненно, что реакторы с длительным выгоранием топлива имеют меньшее отношение к проблеме нераспространения, чем с коротким периодом облучения, т. к. при длительном облучении наработанный плутоний существенно загрязняется неделящимися изотопами (так называемый, плутоний реакторной чистоты). Таким образом, реакторы с низким выгоранием топлива создают бóльшую угрозу переключения. Энергетические реакторы, исходя из коммерческих интересов, работают, как правило, максимально длительными интервалами. Короткие интервалы между остановами характерны прежде всего для реакторов-наработчиков, предназначенных для наработки плутония, и исследовательских реакторов, где останovy диктуются условиями проведения экспериментов.

Таким образом, подводя итоги анализа значимости различных типов реакторов в отношении ядерного распространения, можно отметить следующее:

- отдельно взятый легководный энергетический реактор, делящийся материал которого находится под международными гарантиями, не представляет значимой угрозы распространения;

- тяжеловодный реактор в сочетании с имеющейся промышленностью по переработке отработавшего топлива становится опасным объектом с точки зрения режима нераспространения (наработка заметных коли-

честв плутония оружейного качества на базе использования природного урана, простота переключения по сравнению с LWR, получение трития);

- газоохлаждаемый реактор с графитовым замедлителем по ряду параметров соответствует тяжеловодному и также является привлекательным для пролиферации;

- реактор-размножитель (бридер) является опасным объектом с точки зрения распространения, т. к. плутоний и обогащенный уран присутствуют на всех этапах обращения с топливом.

Список литературы

1. Ядерное нераспространение. Учебник в двух томах. Т. 1. Глава 4. «Международный режим ядерного нераспространения: история создания и эволюция становления. Договор о нераспространении ядерного оружия». – ПИР-Центр, 2002.
2. А.Б. Колдобский, П.В. Пименов, Б.М. Тулинов, А.С. Василевский «Сравнительный анализ ядерных топливных циклов в контексте нераспространения оружия массового уничтожения». – МИФИ, 2006.
3. Ядерная энергия: миф или реальность. Юрген Кройшб, Вольфганг Нойман, Детлеф Аппель, Питер Диль / Ядерный топливный цикл, 2006. – № 3.
4. Калинина Н.И. Режим нераспространения и сокращения оружия массового уничтожения и национальная безопасность. Курс лекций. – М.: МФТИ, 2005.
5. Шидловский В., Кудрявцев Е., Петрова Л. Утилизация оружейного плутония / Ядерное общество, декабрь 2000. – № 5–6. – С. 64–67.
6. Дьяков А.С., Шаров Е.И. Экономика утилизации оружейного плутония в ядерных реакторах / Центр по изучению проблем разоружения, энергетики и экологии при МФТИ, 1998.
7. Кесслер Г. Ядерная энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Карпов В.А. Топливные циклы и физические особенности высокотемпературных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с. (Физика ядерных реакторов. Вып. 27).
9. <http://www.antiatom.ru/>

Учебное издание

БОЙКО Владимир Ильич
ДЕМЯНЮК Дмитрий Георгиевич
ИСАЧЕНКО Дмитрий Сергеевич

ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РЕЖИМ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 08.02.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 6,05. Уч.-изд.л. 5,47.
Заказ 160-11. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru