

ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Спецкурс.

Лекция 24. УТИЛИЗАЦИЯ ОРУЖЕЙНЫХ НУКЛИДОВ

Содержание.

1. ВИДЫ ПЛУТОНИЯ	1
2. ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ	3
3. СПОСОБЫ РАЗОРУЖЕНИЯ	6
4. УРАН-ПЛУТОНИЕВООЕ ТОПЛИВО (ТОПЛИВО МОКС)	8
5. ТОРИЙ – ПЛУТОНИЕВООЕ ТОПЛИВО	15
6. ТРАНСМУТАЦИЯ ПЛУТОНИЯ И МАЛЫХ АКТИНИДОВ	15
7. РАДИОНУКЛИДЫ В ПРОЦЕССЕ РАЗОРУЖЕНИЯ	18

В США, России и некоторых других странах ядерного клуба основное назначение ядерной индустрии – создание новых видов оружия. При этом в задачи радиохимического производства входит наработка таких оружейных нуклидов, как уран-235, уран-233, плутоний-239 и некоторые трансплутониевые элементы (компоненты атомного оружия) и тритий (компонент некоторых видов термоядерного оружия). В настоящее время, однако, наблюдается тенденция к сокращению и даже полному прекращению производства большинства оружейных нуклидов. Более того, задействованы «обратные» технологии – демонтаж уже готового оружия, извлечение его компонентов и утилизация их. Утилизация оружейного урана (т.е. урана, обогащенного ураном-235 до 95%) не представляет собой серьезной проблемы – его можно разбавить и использовать как топливо в реакторах АЭС. Однако, утилизация оружейного плутония-239 (период полураспада которого составляет 24 тыс. лет, и который является высокотоксичным материалом) – серьезная проблема, поскольку до сих пор не удалось создать энергетический реактор, устойчиво работающий на плутонии. Сейчас при утилизации оружейного плутония реализуются две стратегии: 1) превращение ядерных компонентов в форму, негодную к употреблению, с последующим захоронением и 2) сжигание их в специальных реакторах с получением тепла и электроэнергии. Дело это оказалось сложным, и подходящих технологий пока подобрать не удалось. В данной лекции мы рассмотрим так называемую проблему оружейных нуклидов и некоторые подходы к ее решению.

1. ВИДЫ ПЛУТОНИЯ

Развитие широкомасштабной ядерной энергетики вошло в противоречие с концепцией нераспространения ядерного оружия. Сейчас в расширенное воспроизводство плутония вступают многие сотни тонн этого элемента, и при любом мыслимом контроле нельзя дать гарантий, что малая доля его не будет использована в бомбах.

Различают два типа плутония: военный (кондиционный) плутоний, нарабатываемый в реакторах-размножителях (как правило – в бланкетах) и «гражданский» (сильно загрязненный) плутоний, извлекаемый из ОЯТ энергетического реактора.

Изотопы плутония и трансплутониевых элементов нарабатываются самопроизвольно во всех типах ядерных реакторах на урановом топливе. (Напомним, что ^{238}U , поглощая нейтрон, превращается в ^{239}U , который затем вследствие двух β -распадов с характерным временем $\tau_{1/2}=2,5$ дня переходит в ^{239}Pu). Этим урановый реактор отличается от ториевого реактора, где подобные нуклиды или не образуются вообще, или образуются в незначительных количествах. С точки

зрения пригодности к использованию разных видов плутония для изготовления террористами атомного оружия, следует понимать, что в энергетике используется сильно загрязненный и разбавленный плутоний. «Гражданский» (энергетический) плутоний насыщен многими бесполезными изотопами. Он сильно загрязнен γ -излучающими нуклидами (в основном – изотопами самого плутония), трудно от него отделимыми. Конечно, и на этом плутонии можно сделать атомную бомбу не намного хуже, чем на ^{235}U . Но бомб на ^{235}U фактически нет. Реакторный плутоний имеет примерно втрое большую критическую массу, чем военный, в нем в 10 - 15 раз больше внутреннее тепловыделение, в 10 раз больше радиационный фон, включая ^{241}Am (продукт распада ^{241}Pu) с мощным гамма-излучением. Можно определенно утверждать, что это будет не бомба, а некий маломощный «уродец». Не случайно был придуман военный плутоний!

Кондиционный плутоний нарабатывался в промышленных реакторах на медленных нейтронах (как правило использовались не энергетические, а специальные реакторы с высокой плотностью нейтронов) и реакторами-бридерами на быстрых нейтронах.

Главная особенность реакторов на быстрых нейтронах состоит в том, что они открывают возможность использования не делящихся в реакторах на тепловых нейтронах изотопов тяжелых элементов. В топливный цикл могут быть вовлечены запасы ^{238}U и ^{232}Th , которых в природе значительно больше, чем ^{235}U — основного горючего для реакторов на тепловых нейтронах. В том числе может быть использован и так называемый «отвальный уран», оставшийся после обогащения ядерного горючего ^{235}U . Реакторы на быстрых нейтронах дают возможность расширенного воспроизводства ядерного горючего. Это значит, что, например, на 100 разделившихся ядер горючего в реакторах на быстрых нейтронах образуется примерно 120-140 новых ядер, способных к делению. Активные зоны реакторов на быстрых нейтронах (БН) весьма существенно отличаются от активных зон реакторов на тепловых нейтронах. Экономически необходимая средняя глубина выгорания уран-плутониевого топлива в БН должна составлять 100-150 МВт*сут/кг, т.е. она должна быть в 2,5 - 3 раза выше, чем в реакторах на тепловых нейтронах, что обусловлено высокой стоимостью топлива БН. Для достижения указанной глубины выгорания требуется высокая радиационная стойкость ТВЭЛ и ТВС БН, необходимая стабильность геометрических параметров, сохранение герметичности и пластичности оболочек ТВЭЛ, их совместимость с продуктами деления и устойчивость к коррозионному воздействию теплоносителя и т.п. Активная зона БН окружена в радиальном и осевом направлениях зонами воспроизводства (экранами), заполненными воспроизводящим материалом - обедненным ураном, содержащим 99,7 - 99,8 % ^{238}U . Главная же особенность использования уран-плутониевого топлива в БН состоит в том, что в его активной зоне процесс деления ядер быстрыми нейтронами сопровождается большим выходом (на 20 - 27 %) вторичных нейтронов, чем в реакторах на тепловых нейтронах. Это создает основную предпосылку для получения высокого значения коэффициента воспроизводства и обеспечивает расширенное воспроизводство ядерного топлива в реакторах-размножителях.

С началом эры ядерного разоружения реакторы-размножители, как вообще все быстрые реакторы, были остановлены.

Замечание. С точки зрения задач нераспространения ядерного оружия опасными являются не обычные, а так называемые сильноточные реакторы. В энергетических реакторах потоки нейтронов невелики (10^{14} н/см²*сек). При получении оружейного плутония реактор эксплуатируют около месяца (далее проводить ядерные реакции не имеет смысла, т.к. появляется в значительных количествах паразитный ^{240}Pu). Обычно отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}=5\%$. При возрастании потока нейтронов в 10 раз, время наработки плутония сокращается до дней и становится сравнимым со временем β -распадов, ведущих от ^{239}U к ^{239}Pu . При еще больших потоках, допустимая концентрация плутония-239 в уране возрастает в 13 - 14 раз. В соответствии с этим падает объем и время последующей химической переработки ТВЭлов или

бланкета для выделения плутония. Поэтому, с точки зрения разоружения высокоточные медленные реакторы гораздо опаснее быстрых реакторов-размножителей, с которыми так рьяно борются политики.

В свое время в СССР было создано масштабное промышленное производство оружейного урана и плутония. Было построено 13 военно-промышленных реакторов с графитовым замедлителем нейтронов и водным охлаждением (тепловая мощность около 2 тыс. Мвт). В настоящее время по межправительственному соглашению закрыты почти все российские и все американские реакторы по наработке оружейного плутония. Работают лишь три медленных уран-графитовых реактора типа РБМК (все – в России) АДЭ-4, АДЭ-5 (г.Северск, Томская обл.) и АДЭ-2 (г.Железногорск, Красноярский край). Причина уважительная: помимо плутония, они вырабатывают еще и тепло- и электроэнергию для населения больших городов. В Железногорске, к примеру, проживает 150 тысяч человек. Реактор АДЭ-2 вырабатывает 1 млрд киловатт-часов электроэнергии и 1 млн гигакалорий. Получается, что, несмотря на обязательство уничтожить 34 тонны оружейного плутония, Россия продолжает его нарабатывать. Остановка российских реакторов возможна только после того, как американская сторона профинансирует введение замещающих мощностей, чтобы сибирские города не остались без тепла и света. Три реактора – наработчика плутония будут находиться в эксплуатации до завершения строительства двух ТЭЦ, работающих на угле (примерно до 2010 г.). Для обеспечения безопасной эксплуатации реакторов разрабатывается программа их модернизации.

Итак, несмотря на то, что количество плутония, накопленного в мире, явно избыточно, он продолжает нарабатываться. Большое количество плутония не только излишне, но и опасно (особенно в связи с терроризмом и с угрозой распространения ядерного оружия по планете). В связи с мировой тенденцией к сокращению стратегического оружия, возникла проблема утилизации плутония, использования его в энергетических целях, в науке и технике. Это, однако, оказалось весьма тяжелой задачей. Гражданский плутоний сильно радиоактивен, работа с ним возможна только с использованием манипуляторов и роботов. Оружейный плутоний в этом смысле более пригоден к использованию в качестве ядерного горючего, но, к сожалению, ядерные реакторы на чистом плутонии работают крайне неустойчиво, поэтому необходимо создание нового, смешанного (уран-плутониевого) топлива, или нового типа ядерного реактора. Сейчас хранение плутония экономически разорительно (складирование требует значительных затрат на военную охрану), обезвреживание его путем смешения с радиоактивными отходами – дорогое и опасное мероприятие, сжигание в виде уран-плутониевого топлива в энергетических реакторах – экономически разорительно, а физически неэффективно. В то же время запасы урана в мире ограничены несколькими десятилетиями добычи, поэтому оружейный плутоний может уже в недалеком будущем стать ценным энергетическим источником. Представить себе широкомасштабное развитие атомной энергетики без вовлечения дешевого урана-238 в сферу деления (через плутоний) невозможно.

2. ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ

Сейчас плутоний нарабатывается на двух типах реакторов, использующих ядерное топливо - на тепловых реакторах (газо- и водоохлаждаемые) и на быстрых нейтронах (реакторы-бридеры, или "размножители"). Бридеры увеличивают количество делящихся материалов - после пребывания в реакторе в ТВЭЛах образуется больше делящихся материалов, чем было в свежем топливе. Преимущество бридеров - возможность использования не только уранового, но и уран-плутониевого, уран-ториевого и ториевого топлива.

Россия, как преемница СССР, обладает около 25-30 тысяч тактических и стратегических ядерных боеголовок (1995 г). В соответствии с международными соглашениями по сокращению стратегического и тактического ядерного вооружения, стране предстоит демонтировать 16-18 тысяч ядерных боеголовок. К 1997 г., Россия уже демонтировала около 50% боеголовок.

Расщепляющиеся материалы (уран и плутоний), извлекаемые при демонтаже из боеголовок, являются не только национальной, но и международной проблемой, с точки зрения как экологической безопасности, так и политики нераспространения.

Демонтаж ядерных боеголовок производится на заводах, которые их когда-то создавали: Екатеринбург-45, Пенза-19 и Златоуст-36. При полной загрузке эти предприятия способны демонтировать до 2000 боеголовок в год. Стоимость демонтажа одной боеголовки составляет 10-15 тысяч долларов США в зависимости от степени ее сложности. Общие затраты на ликвидацию запланированного количества боеприпасов с учетом транспортных и иных расходов составят около 2 миллиарда долларов США. В результате демонтажа из боеголовки извлекается таблетка ядерного материала, так называемый «пит», в котором используются ^{235}U (с обогащением 90%) и ^{239}Pu (с обогащением более 90%). Высокообогащенный уран может производиться на четырех заводах: в Екатеринбурге-44, Красноярске-45, Ангарске и Томске-7. Оружейный плутоний производился на заводе в Челябинске-65; на сегодня в эксплуатации находятся три промышленных реактора в Красноярске-26 и Томске-7, нарабатывающие плутоний. После демонтажа боеголовок должны высвободиться сотни тонн высокообогащенного урана (ВОУ) и десятки тонн плутония. В настоящее время запасы ВОУ в России оцениваются в 900 тонн, запасы оружейного плутония - 140-160 тонн и энергетического плутония - 30 тонн. Сюда не включены плутоний, который может быть извлечен из ядерного топлива, нарабатываемого реакторами АЭС, транспортными ядерными установками, а также промышленными реакторами.

Наработка плутония в ядерном реакторе - лишь начало технологического процесса. Основной проблемой является выделение и очистка требуемого изотопа плутония. Действительно, у плутония есть несколько изотопов, часть которых альфа-излучатели, а другие - гамма- и бета-излучатели. Без дорогого процесса очистки получаемый при переработке твэлов АЭС гражданский плутоний, содержащий смесь изотопов, является "высокофоновым", т.е. не только радиотоксичным, но и высокорadioактивным материалом. Если в топливе применить не сепарированный плутоний, то изготовление ТВЭЛов и обращение с ними будет весьма опасным. Обращение с гражданским плутонием требует использования манипуляторов, толстых экранов и других средств защиты, что существенно затрудняет работу с ним.

Производство плутония дорого и из-за сложной операции удаления из него ^{241}Am , возникающего в хранящемся плутонии в результате распада ^{241}Pu ($T = 14,4$ года). ^{241}Am - сильнейший γ -излучатель, легко распространяющийся с водой и накапливающийся в растениях.

Напомним, что в типичном реакторе типа ВВЭР электрической мощностью 1000 МВт ежегодно образуется 21 т отработанного ядерного топлива (ОЯТ) объемом 11 м^3 (1/3 общей загрузки топлива). В 1 т ОЯТ, только что извлеченного из реактора типа ВВЭР, содержится 950-980 кг урана-235 и 238, 5 - 10 кг плутония, 1,2 - 1,5 кг цезия-137, 770 г технеция-90, 500 г стронция-90 и 500 г нептуния-237, 120 - 350 г америция-241 и 243, 200 г иода-129, 60 г кюрия-242 и 244, 12 - 15 г самария-151, а также в меньшем количестве радиоизотопы селена, циркония, палладия, олова и других элементов. Эти элементы следует разделить в ходе переработки ОЯТ.

Чем дольше работает ядерное топливо в активной зоне реактора типа ВВЭР, тем больше в нем четных изотопов и тем ниже энергетическая ценность этого плутония для использования в качестве вторичного ядерного топлива. В реакторах на быстрых нейтронах делятся (выгорают) как нечетные, так и четные изотопы. Поэтому состав плутония в топливе «быстрых» реакторов относительно стабилен. В отработавшем топливе медленных реакторов содержится ориентировочно от 0,8 до 1 % невыгоревшего ^{235}U и от 0,95 до 1,2 % плутония; примерно 3 — 4 % массы топлива составляют продукты деления, остальные 94 — 95 % — ^{238}U . Плутоний неизбежно нарабатывается, «горит» в топливе АЭС и вырабатывает электроэнергию даже тогда, когда первоначально в реактор загружается только урановое топливо. Изотопный состав плутония в отработавшем топливе разных реакторов различен.

Как уже упоминалось, гражданский и оружейный плутоний существенно различающиеся по изотопному составу. В разных реакторах при разном выгорании топлива образуется плутоний, состав которого значительно варьируется. Кроме того, в мире существуют сотни различных исследовательских реакторов, отработавшее топливо которых может иметь совсем другой состав. Поэтому, если обнаружен, например, контрабандный плутоний, по его изотопному составу можно ориентировочно оценить, из топлива какого реактора он выделен и, что самое важное, имеет ли он отношение к ядерному оружию. Если состав отличается от приведенного, то, вообще говоря, идентифицировать источник такого плутония непросто. Каждый ядерный материал имеет «свое лицо». Он несет в себе отпечаток того завода, на котором получен, и тех задач, для которых предназначается. Дополнительную информацию о происхождении и истории плутония можно получить, измерив количество ^{241}Am , накопившегося в ядерном материале при хранении за счет распада ^{241}Pu : чем больше его превратилось в ^{241}Am , тем дольше лежал материал после переработки. В качестве «отпечатков пальцев» помимо изотопного состава могут быть использованы те свойства ядерного материала, которые меняются в зависимости от его предыстории: из какого соединения и как его получили, какие радиоактивные и нерадиоактивные примеси остались в нем после операций очистки и т.д.

После Второй мировой войны ядерными реакторами мира было наработано около 1200 тонн плутония. Для справки: 250 т — это оружейный плутоний, из которых 150 т принадлежит России, 85 т — США, 7,6 т — Великобритании, 6-7 т — Франции, 1,7-2,8 т — Китаю, 300-500 кг — Израилю, 150-250 кг — Индии. Было произведено более 200 т гражданского (энергетического) плутония: у Франции накоплено 70 т, у Великобритании — 50, у России — 30, у Японии — 21, у Германии — 17, у США — 14,5, у Аргентины — 6, у Индии — 1 и т.д. Япония располагает 48,2 т плутония, а к 2010 году будет иметь более 80 т. (Динамика изменения запасов плутония в мире представлена на **Рис.1**) Энергетический плутоний может быть использован для создания атомных бомб. Их конструкция будет сложнее, мощность на порядок меньше, но поражающие факторы, характерные для ядерного оружия, останутся. Таким образом, энергетический плутоний также является предметом политики нераспространения.



Рис. 1. Динамика накопления мировых запасов плутония в послевоенный период. 1. Все данные округлены либо до ближайшей круглой цифры, либо до ближайшего количества тонн, кратного 5. 2. Выделенный энергетический плутоний принадлежит государствам, до сих пор занимающимся его переработкой, или заключило контракты по его переработке с Великобританией и Францией. Страны обладающие собственными запасами плутония: Бельгия,

Германия, Италия, Нидерланды и Швейцария. Соединенные Штаты обладают относительно небольшими запасами энергетического плутония. 3. Помимо США, ни одно государство не рассекретило данные по производству плутония. Все остальные данные по военному плутонию являются приблизительными оценками. Оценки запасов по 1990 и 1995 гг. основаны на предположении, что российские запасы военного плутония составляли 150 т.

1633 тонны плутония существовали во всем мире в 2000 г.: 1384 т гражданского плутония и 249 т военного (сепарированного) плутония. Помимо этого сепарированного плутония большое его количество (до 67.5%) содержится в ОЯТ АЭС и может быть выделено в случае

необходимости. На долю США приходилось 85 т, России 100-165 т (точное число никогда не публиковалось). Россия на много десятилетий вперед обеспечена ураном и плутонием из расщепляемых десятков тысяч ядерных боеголовок при разоружении. Атомная энергетика – единственный вид энергетики, полностью обеспеченный топливом на все столетие. Ожидают к 2010 г увеличение общих запасов плутония до 2374 т, хотя скорее расти будут запасы гражданского плутония, чем военного. **Табл.1** отражает тенденцию накопления делящихся материалов в твэлах АЭС России.

Табл. 1. Оценка накопления делящихся материалов в российском отработанном ядерном топливе.

Год	Масса, тыс.тонн	Количество делящихся материалов, т	
		Плутоний	²³⁵ U
2000	15	90	140
2010	23	140	215
2025	33	240	350
2050	50	500	650

В 1995 США объявило об излишке 50 тонн оружейного плутония относительно своих потребностей и в 1997 за ней последовала Россия. В 2000 между США и Россией было достигнуто соглашение, обязывающее каждую сторону переработать по 34 тонны избыточного оружейного плутония, освободившихся при демонтаже ядерного оружия. Норма утилизации - 2 т в год, начиная с декабря 2007, предусматривает преобразование избыточного оружейного плутония в форму, непригодную для оружия.

В основе программы международного сотрудничества лежит тезис, что «разоруженный» плутоний не должен попасть в руки международных террористов и не будет заряжен в ядерные боеголовки России и США. Запад в страхе перед угрозой расползания оружейного урана и плутония по «террористическим режимам», согласился финансировать программу переработки оружейного урана и плутония. Соглашение, однако, не выполняется из-за недостатка финансирования, из-за разногласий по технической концепции (сжигать ли плутоний в только тепловых (США) или как в тепловых, так и быстрых реакторах (Россия)), а также из-за угрозы экологического риска.

Поэтому пока (2003) ни одной конверсионной фабрики не построено ни в США, ни в России.

3. СПОСОБЫ РАЗОРУЖЕНИЯ

Простейший способ обращения с оружейным плутонием – хранение его в специальных хранилищах.

Однако стоимость хранения плутония достаточно высока (5 дол. за 1 г в год). Специальных хранилищ для оружейного плутония в России нет, поэтому его накапливают в контейнерах и промежуточных хранилищах. Частично он сосредоточен на ядерных боеголовках, основная часть находится в промежуточных хранилищах. Он может храниться в трех различных формах. Во-первых, в виде недемонтируемых таблеток («пит»), которые представляют собой металлический плутоний, герметично запакованный в оболочку из тугоплавкого металла. Во-вторых, это может быть плутоний в металлической форме и, в-третьих, в виде оксида. В виде пит, плутоний может храниться длительное время, хотя при этом не исключается коррозия таблеток и нарушение герметичности металлической оболочки. Хранение металлического плутония может привести к самовозгоранию. Хранение в виде оксида относительно безопасно, но требует дополнительных затрат по переводу металлического плутония в оксид. Сразу после демонтажа боеголовки плутоний в виде пит поступает в хранилище предприятия по

производству и демонтажу боеголовок. По мере заполнения хранилища плутоний должен передаваться в специально оборудованное долгосрочное хранилище (которое существует при недостроенном пока комбинате РТ-2).

Таким образом, не вовлеченный в ядерный топливный цикл плутоний оказался в категории высокоактивных отходов, подлежащих хранению. Рассматриваются различные возможности утилизации плутония путем его перевода в форму, исключающую использование в военных целях, но нужно сразу отметить, что приемлемой концепции его утилизации пока нет ни в одной стране.

Экологическая опасность плутония и избыточные количества оружейного плутония поставили вопрос о планомерном его уничтожении. Рассматриваются перспективы захоронения плутония на одиноких атоллах, удаление в космос, уничтожение при подземных ядерных взрывах, помещение на большую глубину, где они за счет саморазогрева погружаются в глубокие слои земной коры, расплавляя окружающие горные породы, превращение на ускорителях в другие полезные радионуклиды в ходе ядерных реакций и др. Наиболее популярным вариантом является сжигание (трансмутация) плутония и трансплутониевых элементов в ядерном реакторе.

На сегодня в мире существуют две точки зрения на дальнейшее обращение с плутонием. В США большинство экспертов ранее склонялись к захоронению плутония в глубоких геологических формациях в остеклованном виде, смешанного с высокоактивными отходами. Россия всегда рассматривала плутоний, в первую очередь, как энергетический материал, который можно использовать в качестве топлива для АЭС. При этом наиболее приемлемым считается смешанное уран-плутониевое топливо, так называемое, МОКС-топливо. В настоящее время эксперты США склоняются к идеи сжигания плутония в тепловых энергетических реакторах. Исследования в области использования чистого плутония в качестве топлива в реакторах на быстрых нейтронах, проводившиеся с 60-х г.г. XX века, оказались безуспешными и, очевидно, будут прекращены.

Главная цель утилизации плутония состоит в превращении оружейного плутония, извлеченного из дезактивированных ядерных боеголовок, в формы, недоступные для производства ядерного оружия. Нужно сделать плутоний столь же недоступным как плутоний, находящийся в высоко радиоактивном ОЯТ, реализовав тем самым «стандарт отработанного топлива» введенный Академией Наук США. С этой целью, плутоний смешивают с источником гамма-излучения, например, с высокорadioактивными отходами. Этот процесс - «**иммобилизация**» - преобразовывает плутоний в продукт, подобный ОЯТ, который высоко радиоактивен, и с которым трудно работать. Другое направление – «**облучение**» - создание смешанного уран-плутониевого топлива (МОКС) с последующим сжиганием его в энергетических реакторах. МОКС - облучение и иммобилизация – сопоставимые по затратам средства достижения «стандарта отработанного топлива».

Иммобилизация. Существует два способа иммобилизации оружейного плутония с последующим захоронением его как отхода: отверждение его в матрице боросиликатного стекла (витрификация) или в керамической матрице (керамизация). Плутоний, загрязненный радиоактивными жидкими отходами высокого уровня радиации, замуровывается боросиликатную матрицу, формируемую в виде стеклянных шайб. Шайбы затем запечатывают в цилиндры из нержавеющей стали и отправляют в геологические могильники при хранилищах ядерных отходов. Керамическую иммобилизацию проводят в матрице титаната щелочноземельного металла. Оба подхода создают интенсивное радиационное поле вокруг плутония, что и соответствует «стандарту отработанного топлива».

МОКС облучение. МОКС топливо - смесь урана и плутония в пропорциях, позволяющих использовать ее как топливо в ядерных реакторах, первоначально рассчитанных исключительно на урановое топливо. Плутоний вводят в ядерное топливо, чтобы использовать запасенную в нем энергию. МОКС сжигают (облучают) в ядерных реакторах, образуя тем самым «закрытый

топливный цикл», в котором плутоний облучают, повторно обрабатывают и многократно используют. Облучение МОКС в реакторах дает большее количество плутония реакторного сорта, чем исходное МОКС -топливо, т.к. часть окиси урана в МОКС переходит в плутоний. Сжигание оружейного плутония устранил часть запасов расщепляющихся материалов в пяти ядерных государствах, принадлежащих к Соглашению о нераспространении ядерного оружия. При этом Россия, как государство, обладающее ядерным оружием, не имеет никаких юридических обязательств проводить такие действия под эгидой Международного Агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Тем не менее, МОКС - облучение оружейного плутония рассматривается США и Россией как ядерное разоружение.

Согласно первоначальным планам США собирались сжечь 25 т плутония в виде МОКС и иммобилизовать 9 т в виде высокорadioактивных отходов, тогда как Россия обещала сжечь все 34 т оружейного плутония как МОКС. Россия не брала на себя никаких обязательств по утилизации плутония методом иммобилизации. Соглашение запрещает любой стране выделять плутоний из облученного МОКС, до тех пор, пока эта страна не утилизирует все 34 т плутония. Для гарантии, что плутоний необратимо удален из ядерного оружия, обе страны осуществляют контроль и инспекционные действия. Российская программа включала строительство одного завода по производству МОКС, монтаж испытательной топливной линии для изготовления и тестирования топливных сборок для реактора ВВЭР-1000, модификацию оборудования по изготовлению таблетированного топлива для реактора БН-600 и завершающую демонстрацию конверсионного оборудования.

В 2002 г. был утвержден новый план действий, предусматривающий участие как тепловых, так и быстрых реакторов в утилизации оружейного плутония. Американцы отказались от иммобилизации (администрация даже приказала демонтировать оборудование по керамизации плутония в Ливерморской Национальной Лаборатории), решив весь оружейный плутоний перевести в МОКС и сжечь его в тепловых энергетических реакторах. Если при Клинтоне США выступали против коммерческой торговли плутонием и закрытого топливного цикла, то при Буше позиция США коренным образом изменилась.

4. Уран-плутониевое топливо (топливо МОКС)

Технология изготовления таблеточного оксидного уран-плутониевого топлива для твэлов энергетических реакторов предусматривает два варианта подготовки топлива для изготовления таблеток: 1) путем механического смешивания исходных порошков диоксидов урана и плутония; 2) путем изготовления таблеток из химически соосажденных порошков $(U,Pu)O_2$ в присутствии поверхностно-активных веществ (**Рис.2**).



Рис.2. Схема производства и «сжигания» МОКС-топлива в быстрых реакторах

В первом варианте применен смешивающий аппарат, что позволило сократить время смешивания до нескольких минут при одновременном измельчении и уплотнении частиц порошка. Этот вариант обеспечивает получение гомогенной структуры таблеток с повышенной плотностью. По второму варианту производится соосаждение солей урана и плутония из раствора с образованием малопылящих гранул. При прессовании таблеток

применена сухая связка — стеарат цинка, что позволило существенно улучшить технологический процесс и повысить качество таблеток. В настоящее время рассматривается возможность строительства установки промежуточной производительности для обеспечения МОКС восьми реакторов типа ВВЭР-1000 и быстрых реакторов БН-600 и БН-800. При масштабе производства ~ 1 тонны по плутонию в год стоимость МОКС почти вдвое превысит стоимость уранового топлива.

Минатом России разворачивает работы по утилизации российского плутония, извлекаемого из ядерного оружия, и использованию его в виде МОКС - топлива для реакторов различного типа, в том числе - на быстрых нейтронах. Предстоит переход от ограниченного использования технологий обращения с плутонием, извлекаемым из боеприпасов, к крупномасштабным работам по разборке боеприпасов, растворению плутония, конструированию и изготовлению МОКС-топлива, его промышленному использованию на АЭС с реакторами типа ВВЭР и БН, обращению с отработавшим МОКС и образующимися при этом РАО, а также к регулярным перевозкам плутоний-содержащих материалов.

В России четыре ВВЭР-1000 на Балаковской АЭС, реактор БОР-60 - экспериментальный быстрый реактор (Дмитровград) и БН-600 - быстрый реактор около Екатеринбурга будут сжигать МОКС. Реактор БН-600, работающий на высокообогащенном урановом и МОКС, пока лишь оттестирован. Минатом объявил о своем намерении построить БН-800 быстрый нейтронный реактор на Белоярской АЭС (способный перерабатывать до 3 тонн плутония в год) к 2009 г. БН-800 - модификация БН-600, и оба их можно использовать для утилизации плутония. Однако российские реакторы работают на топливе с более низкой долей МОКС, чем США.

Всего в России 10 реакторов типа ВВЭР. В одном таком реакторе может быть потреблено от 250 до 280 кг плутония в год. На данный момент проводится НИОКР по внедрению МОХ-топлива на основе оружейного плутония на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и продлению срока эксплуатации реакторов ВВЭР-1000. Статус работ по этим реакторам приведен в Табл. 2.

Табл.2. Основные характеристики энергетических реакторов, способных работать на МОКС-топливе.

Реактор	Потребление плутония	Статус работ по обоснованию использования топлива	возможности МОКС-	Примечание
БОР-60 (действующий)	30-50 кг/год	18-летний опыт эксплуатации		Ведется разработка программы возобновления использования МОХ-топлива
БН-600 (действующий)	60-70 кг/год (18 ТВС)240 кг/год (гибридная АЗ)1100 кг/год (100 % МОКС)	Ведется разработка техпроекта физические расчеты		Перевод на гибридную активную зону утвержден в Минатоме РФ
БН-800 (строящийся)	1650 кг/год (100 % МОХ)	Проект, лицензирован на строительство		Строительство на площадке БелАЭС или ЮУАЭС.
ВВЭР-1000 действующих и строящихся	(8 2) 250-280 кг/год (на 1 ВВЭР-1000, 30 % МОХ)	НИОКР		НИОКР по внедрению МОКС-топлива

Программа утилизации плутония в России предполагает проведение следующих работ:

- для утилизации плутония в России будут использоваться шесть реакторов: четыре легководных ВВЭР-1000 Балаковской АЭС, реактор-размножитель БН-600 на Белоярской АЭС и экспериментальный реактор БОР-60 в Дмитровграде.

- БН-600 должен будет переработать 15,048 тонн плутония, ВВЭР-1000 - 21,446 т, и БОР-60 0,45 т (всего 36,944 т). Это больше, чем заявленные в российско-американском соглашении 34 т, т. к. к плутонию будет добавлено 12% других веществ с целью изменить военные характеристики утилизируемого плутония.
- МОКС будет вырабатываться в четырех местах: Димитровград (ВВЭР-1000 - пробные МОКС-сборки, топливо "Vibgorac" (вибросборки) для реактора БОР-60 и БН-600); ПО "Маяк"(топливные таблетки для БН-600); Красноярск (топливо для БН-600) и Новосибирск (ТВС для ВВЭР-1000).
- ожидается, что на модификацию реакторов ВВЭР-1000 будет потрачено 52 млн долларов, БН-600 - 73,6 млн долларов, а на БОР-60 - 100 млн долларов.
- содержание МОКС в активной зоне реакторов ВВЭР-1000 "через некоторое время" достигнет 40 %.
- требуется лицензия на строительство или модификацию следующих предприятий: реакторы ВВЭР-1000 и БН-600, установка по конверсии плутония, предприятие по производству МОКС, пилотные установки по производству топлива, места для хранения отработанного топлива и отходов, цистерны и транспортные средства, перемещение материалов между предприятиями.
- конверсия плутония в оксидную форму начнется на демонстрационном предприятии пропускной способностью в 1,6 Мт (стоимость - 33,3 млн долларов), и продолжится на промышленном предприятии пропускной способностью в 34,8 Мт (стоимость - 252 млн долларов).
- одна треть программы будет потрачена между 2001 и 2006 гг. в соответствии с "амбициозным графиком проектирования и строительства". Эксплуатационные расходы в 2007 - 2019 гг. составят 90 млн долларов ежегодно.

Чтобы увеличить скорость утилизации плутония нужно или увеличить степень обогащения топлива российских реакторов, или российское МОКС экспортировать. Для экспорта, учитывая нежелание Минатома рассекречивать изотопный состав оружейного плутония, военный плутоний придется смешать с 12% реакторного плутония, чтобы скрыть его исходный изотопный состав.

Сейчас проблемы с облучением топлива МОКС в ядерных реакторах растут как снежный ком по всем направлениям: стоимости, реакторной безопасности и технологии трансмутации расщепляющихся материалов.

Затраты на производство МОКС -топлива. По оценке Министерства энергетики США, стоимость утилизации плутония в России - два миллиарда долларов. Эту величину можно уменьшить до \$1 миллиарда, если Западноевропейских стран, уже использующие МОКС, станут покупать российское топливо. При 4% содержании плутония, 34 тонны плутония превратятся в МОКС с 850 тоннами тяжелых металлов. Этот плутоний заместит слабо-обогащенное урановое топливо на западных АЭС. Однако производство МОКС в 2-3 раза дороже, чем стандартного топлива. Поэтому Минатом предложил сдавать **в аренду** Западной Европе и Восточной Азии МОКС, произведенное в России из оружейного плутония. При этом МОКС - топливо останется собственностью России. После использования, ОЯТ будет возвращено в Россию для переработки или захоронения. Это задержит закрытие Западных реакторов, которые получают субсидированное топливо, и будут посылать ОЯТ в Россию для переработки.

С экономической точки зрения военный плутоний имеет отрицательную стоимость, так как использование плутония в современных реакторах дороже привычных урановых твэлов, даже если полагать плутоний бесплатным. Поэтому освоение нового вида топлива для электростанций требует значительных затрат. Впрочем, всякое разоружение требует затрат. С учетом рекультивации радиоактивных земель и озер, расходы будут не меньше затраченных на создание ядерного оружия.

МОКС безопасность. Использование МОКС топлива, изготовленного как из гражданского, так и оружейного плутония, несет риски реакторной безопасности.

Изотопы плутония отличаются по своим ядерным свойствам от изотопов урана. Эти различия приводят к следующим последствиям для безопасности медленного реактора АЭС, работающего на МОКС-топливе:

- Уменьшение поглотительной способности материалов, используемых для поглощения нейтронов (стержней управления, бора, растворенного в хладагенте и т.п.). Это происходит из-за того, что МОКС-топливо сравнительно хорошо поглощает нейтроны низких энергий, поэтому средняя энергия нейтронов оказывается выше, а управляющие стержни поглощают быстрые нейтроны хуже, чем медленные. При этом затрудняется управление ядерными реакциями в котле и уменьшает интервал, доступный для благополучного выключения реактора. Из-за этого оказывается недопустимым размещать топливные сборки с МОКС-топливом в непосредственной близости от управляющих стержней.

- Использование МОКС-топлива в ВВЭР вносит различные важные для безопасности физико-нейтронные изменения, которые значительно влияют на поведение активной зоны в рабочем и аварийном режиме. В связи с тем, что при использовании МОКС-топлива доля запаздывающих нейтронов (параметр, определяющий скорость реакции мощности реактора на изменения внешних условий) меньше и значения коэффициентов реактивности менее благоприятны, события, ведущие к возрастанию реактивности, рассматриваются как более серьезные для реактора на МОКС, чем для реактора с обычным UO_2 топливом. У оператора меньше возможности контролировать переходные процессы, и меньше времени на реакцию. Использование МОКС в реакторе увеличит вероятность серьезной аварии из-за отказа блокировки. Из-за меньшей доли запаздывающих нейтронов и меньшего времени жизни мгновенных нейтронов в активных зонах с МОКС-топливом развитие некоторых аварийных ситуаций (таких, как неконтролируемое выведение стержня или избыточное охлаждение, например, при срабатывании системы охлаждения активной зоны) будет более быстрым. Эта особенность будет усиливаться при увеличении доли МОКС и степени обогащения плутония, а также с увеличением глубины выгорания ядерного топлива. Поэтому ВВЭР с МОКС приближается по нейтронным характеристикам активной зоны к реактору на быстрых нейтронах. Для этих типов зон наиболее опасны аварии, связанные с возрастанием мощности (с разрушением активной зоны или вводом положительной реактивности при срабатывании системы защиты)

- Поскольку использование МОКС-топлива приводит к повышению средней энергии нейтронов, это в свою очередь ускоряет процессы радиационного разрушения материалов реактора нейтронами. В результате сокращается срок службы внутрикорпусных деталей реактора, при этом наблюдается радиационное охрупчивание корпуса реактора, а также увеличивается количество продуктов коррозии в теплоносителе, что приводит к повышенной нагрузке на спецводоочистку первого контура и ведет к повышению радиоактивности теплоносителя.

- Физико-технические характеристики смешанного уран-плутониевого топлива (по сравнению с урановым топливом) в случае использования его на действующих АЭС оказывают негативное влияние на уровень безопасности самой станции. Отрицательное влияние оказывает более низкая температура плавления (ниже на 20-40 $^{\circ}C$); низкая теплопроводность; повышенный выход газообразных продуктов деления; повышенный выход не газообразных элементов; повышенное образование йода, трития, актинидов.

- Отработанный МОКС содержит больше актинидов (америций, кюри и плутоний) чем традиционное топливо. Многие из них - α -излучатели и радиотоксичны. В случае серьезных инцидентов Чернобыльского типа на АЭС, работающей на 40% оружейном МОКС число раковых поражений будет на 25% больше, чем в случае АЭС на урановом топливе.

Известно, что присутствие в отработавшем топливе долгоживущих изотопов плутония, америция, нептуния и кюрия существенным образом усложняет, во-первых, технологию рецикла смешанного топлива, во-вторых, решение проблемы долгосрочного захоронения отходов. Во многом эти проблемы связываются с накоплением в отработавшем топливе ^{241}Pu , удельная радиотоксичность которого в 40 раз выше радиотоксичности основного изотопа ^{239}Pu . При хранении ^{241}Pu превращается в еще более токсичный ^{241}Am с периодом полураспада 433 года, вносящий основной вклад в радиотоксичность трансурановых элементов отработавшего топлива после распада короткоживущих продуктов деления. При работе легководных реакторов на урановом топливе из общей массы нарабатываемого энергетического плутония 250 кг/(ГВт(эл)*г) около 30 кг составляет ^{241}Pu . Утилизация оружейного плутония в тепловых реакторах увеличивает его годовую наработку более чем в 3 раза по сравнению с наработкой ВВЭР на урановом топливе. В условиях вынужденного длительного хранения отработавшего топлива значительная часть ^{241}Pu превращается в ^{241}Am , что существенно затрудняет дальнейшее использование и захоронение отходов. Помимо нежелательного накопления ^{241}Pu утилизация оружейного плутония в ВВЭР приведет также к увеличению в несколько раз массы Am, Np, Cm по сравнению с ВВЭР на уране. В результате выжигания основного изотопа ^{239}Pu при утилизации оружейного плутония в ВВЭР на ПО «Маяк» накопилось бы нуклидов общей радиотоксичностью, превышающей более чем в 3 раза радиотоксичность трансурановых элементов, накапливаемых при работе ВВЭР такой же мощности, но на уране.

Есть беспокойство по поводу эксплуатации бридерных реакторов на МОКС топливе. Бридеры охлаждаются натрием, который становится горючим при контакте с водой и воздухом. Вероятность серьезных аварий растет при использовании МОКС.

Все вышесказанное негативно отразится на самой эксплуатации АЭС. На действующих энергоблоках АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 будет необходимо изменить уже существующие технологические схемы или/и спроектировать (смонтировать, достроить) новые.

Политический риск перехода на МОКС - топливо. Одна из главных проблем использования МОКС в энергетических целях – рост перевозок плутония и свежего МОКС. Эти материалы привлекают террористические группы и «государства-изгои» которые хотели бы создать ядерное оружие. Справочник МАГАТЭ «Глоссарий Безопасности» классифицирует МОКС как «материал прямого использования». Плутоний можно извлечь из МОКС в течение 1 - 3 недели и затем использовать для оружейных целей. Некоторые западные эксперты опасаются, что переход на МОКС обеспечит Россию технической инфраструктурой развитого плутониевого «закрытого топливного цикла». После окончания срока Международного договора, плутоний вновь будет выделен из МОКС и превращен в оружейную форму. Эти эксперты утверждают, что правительство США, рискует распространением плутония во всем мире, поддерживая утилизацию плутония как МОКС. Другая проблема, связанная с МОКС, относится к реакторам-бридерам. Конечно, поскольку БН-600 работает без бланкета, то он не производит большого количества плутония. Однако при работе реактора плутоний будет нарабатываться в его топливе. Стремление Минатома построить новый мощный реактор-бридер, БН-800 может привести к увеличению запасов плутония.

Многие эксперты России полагают, что сдача МОКС в аренду и возвращение его назад в отработанном виде неприемлемо из-за сложившейся в стране ситуации с переработкой и захоронением собственного ОЯТ. Действительно, в 1995 г. общая активность РАО на территории России составляла 6,5 млрд. Ки, причем ежегодно прибавляется около 700 т ОЯТ. Промышленность не справляется ни с переработкой, ни с хранением, ни с захоронением таких количеств ОЯТ. В настоящее время на предприятиях России отсутствуют достаточные мощности по утилизации радиоактивных отходов всех уровней активности. Свободные объемы для долговременного хранения ОЯТ при дополнительном ввозе его из-за рубежа на предприятиях ЯТЦ будут исчерпаны в течение 1-1,5 лет. Ввод новых хранилищ в ближайшее время (в течение

2-5 лет) не возможен. С ввозом зарубежного ОЯТ будет приостановлена программа переработки отечественного ОЯТ с АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Тем самым, существенно повышается риск возникновения аварийных ситуаций от накопления ОЯТ на площадках АЭС в Европейской части России. Кроме этого, прекращается вывоз ОЯТ с атомных подводных лодок Северного и Тихоокеанского флотов, где и так ситуация с ОЯТ является критической. Широкомасштабный ввоз зарубежного ОЯТ с использованием железнодорожного транспорта неминуемо приведет к аварийным ситуациям в виду того, что многие маршруты литерных проездов проходят по аварийным отделениям железных дорог РФ. С ввозом зарубежного ОЯТ возрастает риск проведения диверсионных и террористических актов, шантажа и вымогательства на предприятиях ЯТЦ и транспорте. Ввоз зарубежного ОЯТ на переработку и хранение крайне опасен с точки зрения соблюдения режима нераспространения ядерных расщепляющихся материалов.

«Зеленые» полагают, что лучшее решение по избыточному оружейному плутонию - конверсия его в «стандарт отработанного топлива» посредством иммобилизации. Иммобилизация требует меньше ресурсов, чем МОКС. Иммобилизация имеет преимущество хранения плутония на оборудованных и хорошо охраняемых полигонах, с последующим его геологическим захоронением. Иммобилизация также существенно затрудняет восстановление плутония для использования его в ядерном оружии, так что иммобилизация удалила бы годный к употреблению в оружии материал из обращения. Если считать, что предотвращение ядерного роста - одна из наиболее актуальных задач, стоящих перед миром, то использование МОКС добавит риск быстрого увеличения плутониевой опасности.

Противники иммобилизации полагают, что это будет пустой тратой плутония, т.к. не используется запасенная в нем энергия. Минатом рассматривает плутоний как ценный энергетический ресурс, который должен использоваться продуктивно. Сторонники МОКС говорят, что облучение обеспечит уничтожение как оружейного, так и гражданского плутония. Одновременно это даст топливо для ядерной промышленности Бельгии, Франции, Германии, Японии, России и Швейцарии, с получением экономической выгоды. Уже сейчас МОКС производит Великобритания (British Nuclear Fuels Limited, BNFL), Бельгия (Belgonucleaire) и Франция (Cogema). Можно ожидать, что скоро к этим странам присоединятся Россия и США. Согласно прогнозу, производство МОКС топлива, как в России, так и в мире в целом, в ближайшие годы существенно увеличится (Табл.3).

Табл. 3. Действующие и планируемые мощности по производству МОКС-топлива в странах мира (тыс т/год).

Страна	Завод	Годы			
		1998	2000	2005	2010
Бельгия	Дессель	35	40	40	40
Франция	Кадараш	35	40	40	40
	Маркуль(Melox)	120	160	160	160
Индия	Тарапур	5	10	10	10
Япония	Токай	15	15	5	5
	Рокассе	-	-	100	100
Великобритания	Селлафильд,MDF	8	8	8	8
	Селлафилд,SMP	-	120	120	120
Россия	По «Маяк»	-	-	10	50
Всего:		218	393	493	533

Минатом России не заинтересован в строительстве долговременных хранилищ плутония, предлагая хранение в форме, допускающей быстрое его использование в качестве топлива для АЭС. Временные хранилища плутония располагаются на площадках, где в дальнейшем будут построены (или уже строятся) заводы по производству уран-плутониевого топлива. Первый завод МОКС в Челябинске-65 на ПО «Маяк», с проектной мощностью 1,3 тонны плутония, введен в эксплуатацию в 2000 г. Второй завод по производству МОКС-топлива предполагается построить в Красноярске-26, но проект находится в начальной стадии разработки. МОКС-топливо будет использоваться на строящейся Южно-Уральской АЭС (расположенной в Челябинске-65), которая будет состоять из трех энергоблоков с реакторами типа БН-800. Экспериментальное использование плутония в качестве топлива было осуществлено в нескольких реакторах: В БР-10, БОР-60, БН-350 на Шевченковской АЭС в Казахстане и БН-600 Белоярской АЭС. Проект реактора БН-800 Южно-Уральской АЭС рассчитан на использование 2,3 тонн плутония для начальной загрузки и 1,6 тонн для ежегодной подпитки.

Минатом России разворачивает работы по утилизации российского плутония, извлекаемого из ядерного оружия, и использованию его в виде МОКС-топлива для реакторов различного типа, как тепловых, так и быстрых. Общая схема производства и сжигания топлива МОКС представлена на **Рис.2**. Предстоит переход от ограниченного использования технологий обращения с плутонием, извлекаемым из боеприпасов, к крупномасштабным работам по разборке боеприпасов, растворению плутония, конструированию и изготовлению МОКС, его промышленному использованию на АЭС с реакторами типа ВВЭР и БН, обращению с отработавшим МОКС-топливом и образующимися при этом РАО, а также к регулярным перевозкам плутоний-содержащих материалов. При этом особого внимания требует вопрос об обращении с радиоактивными отходами, содержащими соединения оружейного плутония.

Основные реакторы, которые предполагается использовать под топливо МОКС - ВВЭР-1000. При этом следует учесть, что физико-технические характеристики смешанного уран-плутониевого топлива в случае использования его на действующих АЭС могут оказать негативное влияние на уровень безопасности станции данного типа. Следует помнить, что и при обычном, урановом топливе система управления и защиты реактора недостаточно эффективна. Именно по этой причине на протяжении последних 6-ти лет была ограничена мощность действующих энергоблоков на Балаковской и Калининской АЭС. Из-за сильно выраженной гетерогенности МОКС-топлива (топливных сборок и всей активной зоны) по сравнению с зонами, загруженными окисью урана, неопределенность значительно возрастает, и параллельно возрастает риск появления дополнительных источников ошибок в расчетах по физике активной зоны, в частности, связанных с изготовлением топлива и загрузкой активной зоны. Применение МОКС-топлива может увеличить риск аварий по сравнению с чистым UO_2 , благодаря появлению новых источников и сценариев аварий. Последствия от аварий, связанных с расплавлением активной зоны, катастрофичны и для реакторов на урановом топливе. Если же реактор работает на МОКС-топливе, повышенный выброс активности приводит к тому, что для того же расстояния от реакторной установки доза оказывается в 2,3-2,5 раз выше. Во столько же раз усугубляется влияние радиации на здоровье проживающих там людей.

Сжигание МОКС-топлива в тепловых энергетических реакторах осложняет и радиохимические проблемы переработки ОЯТ. Помимо нежелательного накопления ^{241}Pu утилизация оружейного плутония в ВВЭР приведет также к увеличению в несколько раз массы Am, Np, Cm по сравнению с ВВЭР на уране. В результате выжигания основного изотопа ^{239}Pu при утилизации оружейного плутония в ВВЭР на ПО «Маяк» накопится нуклидов общей радиотоксичностью, превышающей более чем в 3 раза радиотоксичность трансураниевых элементов, накапливаемых при работе ВВЭР такой же мощности, но на уране.

Другое направление использования МОКС – сжигание его в реакторах на быстрых нейтронах (в этом российская программа отличается от американской, предусматривающей

сжигание МОКС исключительно в медленных реакторах). Утилизация плутония в реакторах на быстрых нейтронах происходит путем «сжигания» его в активной зоне, что превращает реактор из производителя плутония в его потребитель (необходимо принять во внимание, что это вовсе не означает, что потребляется весь плутоний: в отработанном топливе его содержится лишь немного меньше, чем в свежем). С точки зрения ядерного распространения одна из проблем, связанных с бридерами состоит в том, что ядерные материалы, входящие в ядерное топливо, могут быть использованы снова, что позволит использовать эти реакторы для производства большого количества плутония, включая оружейный. Концентрация плутония в МОКС-топлива для бридеров существенно выше, чем для легководных реакторов.

5. ТОРИЙ – ПЛУТОНИЕВОЕ ТОПЛИВО

В связи с трудно решаемыми проблемами, возникшими с уран-плутониевым (МОКС) топливом, Россия (на деньги США), занимается разработкой другого вида топлива, которое не только справится с уничтожением плутония, но и окажется вдвое дешевле затрат, требуемых для реализации программы МОКС. Основа нового топлива – торий и оружейный плутоний, смесь которых поставляется в виде топливных сборок на обычные ядерные реакторы, где она и сжигается, попутно производя электроэнергию. В отличие от схемы производства МОКС, производство ториевой комбинации не потребует каких-либо дорогостоящих модификаций и перестроек в реакторах, которые будут использовать ее в качестве топлива – именно это обстоятельство было одним из самых больших препятствий на пути осуществления программы МОКС. Разработчики альтернативной схемы уничтожения оружейного плутония говорят также, что свойства отработанного топлива, получаемого после сжигания в реакторах комбинации тория и плутония, исключают любую возможность вновь использовать оружейные качества, которые содержались в плутонии до его ликвидации в реакторе. Что же касается МОКС, то из отработанного топлива, получаемого после сжигания оксидов урана и плутония, можно вновь извлечь плутоний оружейного уровня и применить его для производства бомб. Новое топливо также хорошо тем, что его можно производить на уже имеющихся у России предприятиях. Сторонники проекта утверждают, что могут начать первый цикл сжигания ториевыхборок в обычных российских реакторах серии ВВЭР-1000 уже к 2006 году.

6. ТРАНСМУТАЦИЯ ПЛУТОНИЯ И МАЛЫХ АКТИНИДОВ

Как известно, помимо плутония, в ядерных реакторах нарабатываются и трансплутониевые элементы (Табл.4) При этом больше всего возникает **минорных актиноидов: нептуний, Нр, америций, Am, и кюрий, Cm**. Некоторые изотопы этих элементов весьма опасны, из-за осуществляемых в них процессов самопроизвольного деления, обеспечивающих возможность цепного процесса, что позволяет изготавливать небольшие по объему ядерные заряды, удобные для террористов. Например, одно время при создании новых видов оружия пристальное внимание уделяли изотопу ^{245}Cm из-за его уникальных делящихся свойств, позволяющих изготавливать на его основе не атомные бомбы, а снаряды, мины и даже пули. Однако выяснилось, что особых преимуществ у кюрия по сравнению с плутонием нет (в частности, из-за низкой плотности кюрия 13 кг/см^3 по сравнению с $19,6 \text{ г/см}^3$ для плутония): по стоимости и производительности кюрий уступает плутонию в несколько раз. Тем не менее, необходимо принимать строгие меры по предотвращению накопления и распространения минорных актиноидов.

Табл. 4. Концентрация актиноидов в ОЯТ энергетических реакторов, г/т U.

Нуклид ВВЭР-440 ВВЭР-1000 РБМК-1000

U^{235}	12700	12300	2940
U^{236}	4280	5730	2610
U^{238}	942000	929000	962000

Pu ²³⁸	75,6	126	68,6
Pu ²³⁹	5490	5530	2630
Pu ²⁴⁰	1980	2420	2190
Cm ²⁴⁴	14,8	31,7	5,66
Am ²⁴¹	517	616	293
Am ²⁴³	69,3	120	73,8

Превращение изотопов плутония и долгоживущих актинидов в короткоживущие радионуклиды или даже в стабильные изотопы посредством облучения в реакторе или на ускорителе можно рассматривать как заманчивую идею, позволяющую решить проблему их обезвреживания. Для ее осуществления необходимо разработать способ извлечения из высокоактивных отходов фракции актинидов и иметь в наличии высокопоточный реактор или ускоритель. Еще перспективнее – вообще отказаться от каких-либо процессов выделения, в том числе - процесса химического отделения плутония. Есть современные технологические схемы быстрых реакторов, которые выжигают топливо, включая ²³⁸U, на 50 - 60% без его переработки. Существует процедура, когда отделяется легкая часть топлива, а тяжелая – без разбивки на компоненты – вновь возвращается в активную зону реактора. Изучены непрерывные режимы, при которых на вход подается ²³⁸U, а на выходе возникает прогоревшее более чем на половину топливо. В замкнутом цикле нет выброса в окружающую среду долгоживущих элементов трансурановой группы и нет выделения плутония в чистом виде.

Под реакторной трансмутацией понимают «пережигание» наиболее опасных радионуклидов в поле интенсивного нейтронного облучения. При этом уничтожаемые элементы не обязательно вводить в топливо: достаточно через реактор пропустить трубу, по которой направить компоненты перерабатываемого твэла или пульпу РАО. Этот процесс переработки ОЯТ возможен поскольку добавление нескольких процентов ВАО в реактор не ухудшает заметно его характеристики. Трансмутация подходит лишь для радионуклидов с высоким сечением захвата нейтронов. Следует сразу указать, что существуют изотопы, которые принципиально нельзя переработать данным методом.

Трансмутация как метод обезвреживания радиоактивных отходов включает в себя не только их ядерное сжигание, но и комплекс иных мер, в том числе радиохимических. Принципиальными вопросами трансмутации малых (минорных) актинидов в области радиохимии, непосредственно влияющими на перспективы реализации этого метода, являются потери минорных актинидов при будущей переработке облученных мишеней и частота их рециклирования, определяющая дозовые нагрузки на оборудование и персонал. Указанные параметры зависят от ядерно-физического способа сжигания актинидов, поэтому их оценка может служить экономически обоснованным аргументом при выборе того или иного направления трансмутации.

Несмотря на множество концепций трансмутации и предлагаемых для их реализации устройств, основная физическая задача заключается в выборе нейтронного спектра - преимущественно быстрого или теплового, хотя в рамках каждого из этих подходов жесткость спектра может заметно изменяться. Сегодня наиболее реальными считаются два пути - сжигание нежелательных нуклидов в специализированных быстрых реакторах при условии повышения жесткости нейтронного спектра по сравнению с энергетическими или создание устройств с высокой плотностью потока тепловых нейтронов. Технически первый вариант является более простым и экономически выгодным, так как основан на усовершенствовании уже существующих быстрых реакторов. Привлекательность же высокопоточных тепловых выжигателей состоит в возможности попутной трансмутации ряда долгоживущих продуктов деления, в основном ⁹⁹Tc и

¹²⁹I. При этом ⁹⁹Tc может быть почти полностью переведен в стабильный ценный платиноид рутений.

С точки зрения радиохимии два этих способа различаются главным образом по степени выгорания мишеней, поступающих на переработку. Фактором, лимитирующим выгорание, является радиационная стойкость реакторных материалов, лежащая для большинства из них в пределах флюенса $10^{23} - 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Достигнутое в настоящее время выгорание топлива быстрых реакторов не превышает 20%. Однако содержащие минорные актиниды мишени являются гораздо более опасным объектом по сравнению со стандартным топливом и будут облучаться более жестким нейтронным спектром. Поэтому в проектируемых быстрых трансмутационных реакторов планируемое выгорание актинидных мишеней не превысит 5%. В устройствах с плотностью теплового потока более $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при флюенсе 10^{23} см^{-2} выгорание может составлять свыше 90% хотя необходимость столь высокой степени выжигания минорных актинидов за одну кампанию является дискуссионной. Это связано с экспоненциальным падением скорости сжигания нуклидов при увеличении выгорания, для поддержания которой требуются дополнительные организационно-технические меры, а также с относительно высокой стоимостью нейтронов, часть из которых будет бесполезно затрачиваться на активацию образовавшихся продуктов деления.

Полные потери минорных актинидов (МА) за счет собственно рециклирования мишеней составят:

$$W = \frac{w}{[(1-q)(1-w)]^{-1} - 1} * 100\%$$

где q - относительное количество сжигаемых за один топливный цикл МА, w - их относительные потери при переработке. (При учете неустраняемых при любых методах обращения с МА потерь w при их выделении из отработавшего топлива энергетических реакторов следует рассматривать

величину $W + w = \frac{w}{1 - (1-q)(1-w)}$ однако такой подход не совсем корректен). Так, при $w = 10^{-3}$

(коэффициент извлечения МА потерь 99,9%) для выгорания $q = 0,05$ (быстрый реактор) и $q = 0,9$ (высокопоточный тепловой реактор) полные потери W составят 1,9% и $1,1 \cdot 10^{-2} \%$ соответственно, при $w = 5 \cdot 10^{-3}$ (коэффициент извлечения 99,5%) - 8,6% и $5,5 \cdot 10^{-2} \%$ соответственно, т.е. будут отличаться примерно в 150-200 раз.

Элементарный состав облученных мишеней, поступающих на переработку, зависит от их выгорания. Мишени с малым выгоранием из быстрых реакторов будут содержать сравнимые количества Np , Pu , Am , Cm , в то время как радиохимическая переработка мишеней, облученных в высокопоточном тепловом реакторе, может быть ориентирована практически лишь на кюрий, что в некоторой степени упрощает задачу.

При больших выгораниях в окружающую среду будут попадать в основном изотопы Cm , более активные по сравнению с ²³⁷Np, который будет преобладать в потерях МА при малых выгораниях. Однако миграционная способность ²³⁷Np в биосфере высока и его вклад в дозовую нагрузку при внутреннем облучении человека является достаточно значимым среди других минорных актинидов.

Количество циклов облучения, необходимое для полного сжигания начальной загрузки МА при малых w составляет $\approx 1/q$, а необходимые перерабатывающие мощности в радиохимической промышленности при годовой наработке актинидов m составят m/q . В 1996 г в мире на атомных станциях произведено 263 ГВт/год электроэнергии, что соответствует наработке примерно 6 т изотопов Np , Am , Cm . Для радиохимического обеспечения трансмутации их в быстрых реакторах при $q=0.05$ потребовалось бы рециклировать в год 120 т МА, в высокопоточных тепловых при $q=0.9$ - менее 7 т. Следовательно, необходимые экономические

затраты и соответствующие дозовые нагрузки на работников этой сферы отличались бы в данном случае почти в 20 раз.

Таким образом, трансмутация плутония и минорных актинидов в быстрых реакторах, несмотря на относительно более низкую техническую проблемность, является радиохимически и экологически намного менее выгодной по сравнению с их сжиганием в высокопоточных тепловых.

Для существующей и перспективной крупномасштабной ядерной энергетики известны операции трансмутационного топливного цикла, позволяющие максимально приблизиться к радиационно-миграционной эквивалентности между долгоживущими и высокоактивными отходами и использованным природным ураном. Соизвлечение с ураном и расщепление радия и тория, достаточно высокие коэффициенты отделения U, Pu, минорных актинидов (Am, Cm, Np, Cf, Pa) для сжигания, Tc и йода для трансмутации, Sr, Cs для полезного использования и длительная (200 - 400 лет), контролируемая выдержка долгоживущих высокоактивных радиоактивных отходов перед окончательным захоронением являются основными операциями трансмутационного топливного цикла. Возможно передача актинидов в быстрые энергетические или специализированные реакторы-трансмутаторы для сжигания в качестве топлива.

Хотя метод трансмутации принципиально осуществим, современный уровень техники недостаточен для его успешной реализации. В существующих ядерных реакторах метод трансмутации не удастся осуществить полностью, так как наряду с процессами деления протекают и процессы захвата нейтронов с образованием тяжелых элементов с большими периодами полураспада. По-видимому, такой способ обезвреживания α -излучателей из отходов мог бы стать целесообразным при облучении в реакторе с плотностью потока нейтронов $10^{16} - 10^{17}$ нейтр./см²/с или в термоядерных реакторах. Однако такие реакторы пока не существуют.

7. РАДИОНУКЛИДЫ В ПРОЦЕССЕ РАЗОРУЖЕНИЯ

Проблема плутония – часть задачи снятия с вооружения атомного оружия. Другие аспекты разоружения связаны со снятием с «боевого дежурства» других радионуклидов. Коротко проанализируем общую картину «радиохимического разоружения».

Уран-235. Важной особенностью проблемы разоружения является необходимость утилизации оружейного урана-235. В 1994 г. инвентарное количество российского высокообогащенного урана (ВОУ) достигало 1270 т. При заданном условии дальнейшего развития ядерной энергетики, обращение с высокообогащенным ураном не является существенной проблемой. Этот материал может быть разбавлен до низкого уровня обогащения и использован в качестве топлива для АЭС.

Соглашение ВОУ-НОУ (1993 г.) между Россией и США предусматривает переработку оружейного урана в топливо для АЭС с реакторами на тепловых нейтронах с последующей поставкой его на американские атомные станции. Каждый год Россия получает по этому проекту около 500 млн долларов. Поставки рассчитаны на 20 лет и будут продолжаться до 2013 года. К 2000 г. Россия продала США 500 т урана из ядерных боеголовок, но еще 750 т осталось. В ядерном разоружении освобождается около двух тысяч тонн оружейного урана-235. Задача конверсии решается достаточно просто путем разбавления ²³⁵U природным (отвальным) ураном до концентрации, неприменимой для оружия, но пригодной для тепловыделяющих элементов атомных станций. В 2001 году из советского урана, прошедшего процедуру конверсии (из высокообогащенного он превращается в низкообогащенный) производилась десятая часть электроэнергии США. Американской фирме USEC принадлежит 70% рынка ядерного топлива США, причем на 50% сырьем ее обеспечивают российские поставщики. Ожидается, что всего «разоруженного» урана из России в США до 2013 года будет поставлено 150000 т. (в пересчете на исходный высокообогащенный уран – это 500 т.) на общую сумму \$12 млрд.

Тритий. Помимо плутония в бомбах (точнее – в малогабаритных артиллеристских атомных снарядах, внешняя неотличимость которых от обычных – главное условие) используют тяжелый

изотоп водорода – тритий, который также получают в реакторах. Тритиевые бомбы – «чистые» бомбы, поскольку в них не задействованы процессы деления ядер. Для стран с неразвитой ядерной промышленностью изготовление таких бомб намного проще, чем традиционных атомных или водородных, так как ни требуются ни уран-235, ни плутоний. Нужно лишь около 0,1 г трития в смеси с дейтерием, воспламеняемого с помощью обычной взрывчатки (1-2 т). При выходе нейтронов 10^{20} радиус поражения составляет сотни метров. Хотя такая истинно нейтронная бомба имеет выход нейтронов в тысячу раз меньше, чем атомная, но и в тысячу раз меньше расход дефицитного реакторного материала. Однако с точки зрения проблемы разоружения с тритием проще. Период полураспада плутония 24000 лет, для трития он всего лишь 12,6 года. Прекращение производства трития автоматически ведет к исчезновению вместе с ним наиболее опасных видов водородного оружия с темпом 20 раз за 50 лет.

Реакторы термоядерного синтеза. Часто утверждают, что термоядерные реакторы являются безопасными с военной точки зрения, так как не имеют дело с плутонием, не производят делящихся нуклидов, и, следовательно, бесполезны с точки зрения производства атомных бомб. На самом деле любой термоядерный реактор, использующий D - T реакцию, способен накапливать плутоний с производительностью в 10 раз большей, чем реактор деления той же мощности. Суть в том, что для восстановления израсходованного трития из лития или получения плутония из ^{238}U требуется медленный нейтрон, тогда как в D-T реакции рождается 14-МэВ нейтрон, который может быть размножен путем (n, 2n) – реакции на пассивных материалах (Be, D и т.п.). Возникает замкнутое по тритию производство с большим выходом плутония.