

## ВЫДЕРЖКИ ИЗ ИССЛЕДОВАНИЯ "СВОДКА БЛИЖАЙШИХ ВОЗМОЖНЫХ ВЫБОРОВ ДЛЯ РОССИЙСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛУТОНИЕВЫХ РЕАКТОРОВ"

От редакций: Тихоокеанские Северо-западные лаборатории (Ричмонд, США) провели детальное исследование возможных выборов для конверсии российских промышленных реакторов. Материал (PNL-9982, July 1994) подготовили Д.Ньюман, К.Геш, Э.Лав и С.Хармс. Ниже приведены выдержки из этого исследования.

### ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация хочет остановить производство плутония оружейного качества. За последние несколько лет были закрыты десять промышленных реакторов с графитовыми замедлителями и водяным охлаждением. Но полному прекращению производства плутония оружейного качества мешает то, что три оставшихся действующих российских промышленных плутониевых реактора наряду с производством плутония поставляют тепло и электроэнергию для населения. Эти реакторы являются основными поставщиками тепла в районы сибирских городов Томска и Красноярска.

### Конструкции реакторов и их эксплуатация

Три действующих российских реактора по производству плутония расположены вблизи Томска и Красноярска в Сибири (см. рис. 1). Эти реакторы были спроектированы и построены в 60-х гг. Проектирование и эксплуатация проводились в закрытой обстановке, обусловленной требованиями секретности со стороны программы ядерного оружия. Ни один гражданин США никогда не посещал эти предприятия. Доступная Соединенным Штатам информация показывает, что эти реакторы обладают весьма уникальной конструкцией: единственные сравнимые с ними установки находятся на хэнфордской площадке в США.

На рис. 2 показана простая блок-схема реактора, построенная на основе доступной информации о конструкции. Реакторное топливо находится в технологических каналах, а активная зона расположена в центре графитовой кладки. На рис. 3 схематически изображена система поставки реакторного тепла и

электричества на томской станции. Показано, как петля охлаждения реактора связана с системой локального распределения тепла.

В результате закрытой обстановки, в которой существуют российские ядерные промышленные предприятия, у проектировщиков и операторов фактически не было никакой возможности воспользоваться выгодами значительной ядерной инфраструктуры, существующей сейчас на других ядерных электростанциях. Разработка и использование аналитических приборов, проведение и анализ экспериментов, а также сооружение и эксплуатация реакторов осуществлялись большей частью в полной изоляции.

Похуже условия существовали много лет в США на площадке в Хэнфорде. Ученые и инженеры Хэнфорда в обстановке значительной технической изоляции спроектировали, построили и осуществляли эксплуатацию восьми реакторов для производства плутония с графитовыми замедлителями и незамкнутыми контурами водяного охлаждения. Девятая установка - N-реактор, была энергоблоком двойного назначения, производящим плутоний оружейного качества и пар для выработки электроэнергии. N-реактор отличался также тем, что в процессе его проектирования были проведены некоторые постоянные экспертизы безопасности, а в течение эксплуатационного периода проводились значительные проверки безопасности и улучшения. Крупные усилия были потрачены на применение современных критериев безопасности к единственной в своем роде электростанции. Когда потребности США в плутонии оружейного качества уменьшились, эта установка стала работать только в режиме выработки энергии (с более высоким уровнем выгорания топлива) в течение около 10 лет.



Рисунок 1  
Карта России

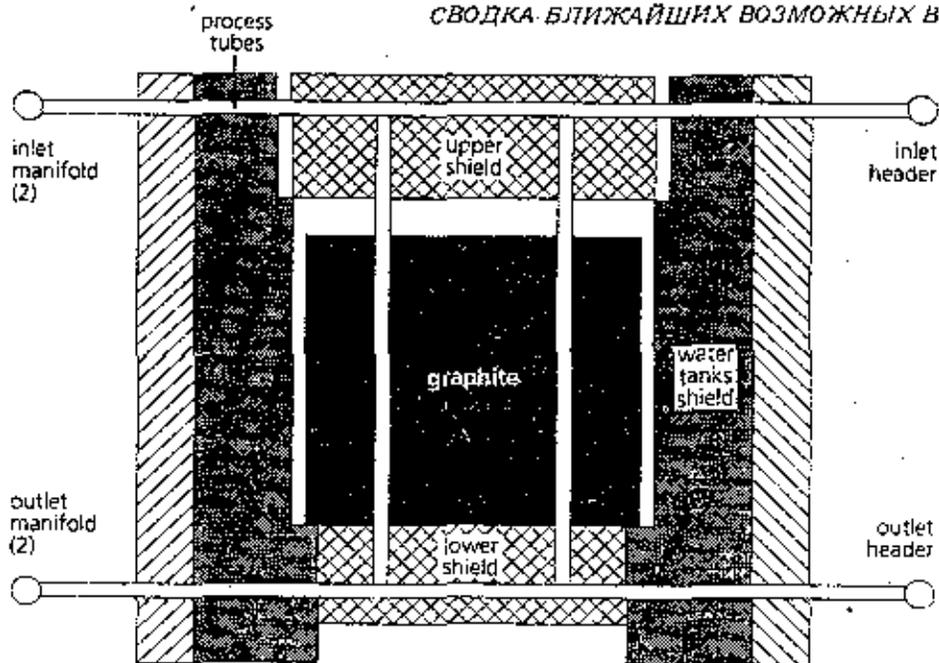


Рисунок 2  
Схема российского промышленного реактора

**ВЫБОР НА БЛИЖАЙШИЙ ПЕРИОД**

**Текущая ситуация**

Российские технические эксперты предоставили сотрудникам Тихоокеанских Северо-западных лабораторий (ТСЛ) достаточно информации о конфигурации промышленных реакторов, составе топлива и управляющих стержней, загрузке активной зоны и рабочих параметрах, чтобы начать изучение сравне-

ния альтернативных вариантов топливного цикла. Российские промышленные реакторы в настоящее время запитываются в основном топливом из естественного металлического урана. Топливные и управляющие каналы ориентированы вертикально в графитовых блоках в виде двумерной решетки с шагом 200 мм. В активной зоне реактора содержится около 300 тонн естественного урана и половина этого количества извлекается через каждые 30 эффективных суток работы на полной мощности (ЭСРПМ).

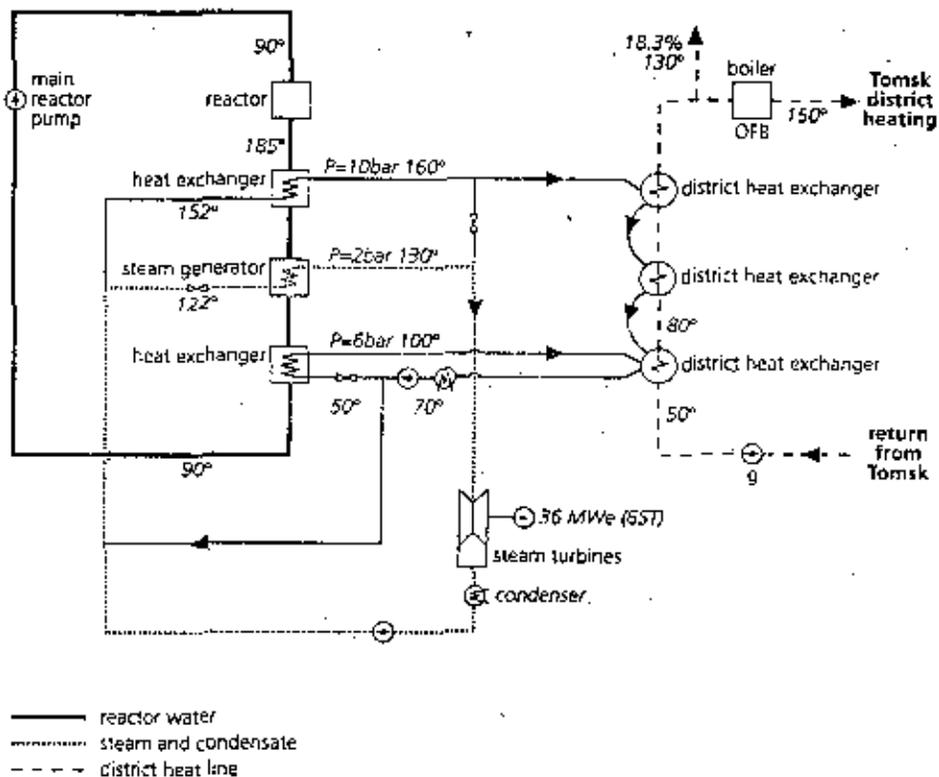


Рисунок 3  
Схема Томского промышленного реактора

Ежегодно из каждого реактора извлекается около 1200 тонн отработанного топлива. В центральной части активной зоны установлены управляющие стержни (по одному на участок решетки с 4x4 топливными каналами). Эта система управляющих стержней обладает полной реактивностью около восьми процентов при рабочих условиях. Реактивность топлива из естественного урана за время выдержки меняется менее чем на три процента. Основные вопросы безопасности, связанные с этим топливом, заключаются в том, что при свежем топливе реактивность возрастает примерно на 0.5% (что составляет около 70% от вклада запаздывающих нейтронов) из-за образования пузырьков пара в водяном теплоносителе. Положительная реактивность от них возрастает при выдержке, на что указывает температурный коэффициент реактивности теплоносителя. Переходные изменения реактивности из-за пузырьков пара в теплоносителе должны контролироваться 25 быстродействующими стержнями (имеющими общую реактивность порядка одного процента), которые могут быть введены за две секунды. Даже хотя естественный металлический уран обладает достаточной избыточной реактивностью, чтобы достигнуть уровня выгорания 360 ЭСРПМ (что сравнимо с топливом в N-реакторе), для российских промышленных реакторов не стало бы технически осуществимым работать при столь крупных проявлениях положительной реактивности из-за парообразования в теплоносителе при таких экспозициях топлива. Около плутония плутония оружейного качества выгружается ежегодно из каждого действующего реактора. Это топливо перерабатывается через год-два после выгрузки из-за тревог по поводу возможного падения качества алюминиевых оболочек на металлическом урановом топливе и последствий разложения облученного урана при "мокрой" хранении. "Сухое" хранение таких больших количества отработанного топлива было бы слишком дорогим. В результате отделение, извлечение и помещение на хранение дополнительных полутора тонн плутония оружейного качества продолжается каждый год при существующем топливном цикле, основанном на естественном уране.

#### Альтернативные топливные циклы

Была проведена оценка возможных альтернативных топливных циклов на основе следующих критериев:

- перевести промышленные плутониевые реакторы с военного на гражданское использование;
- удовлетворить потребности в тепле и электричестве для бытовых целей;

- устранить выгрузку плутония оружейного качества с отработанным топливом;
- устранить положительную реактивность от паросодержания в теплоносителе;
- уменьшить количество выгружаемого отработанного топлива;
- уменьшить количество выгружаемого плутония;
- устранить необходимость переработки отработанного топлива и извлечения плутония;
- обеспечить возможности длительного хранения отработанного топлива;
- использовать современную технологию и оказать минимальное воздействие на реакторы;
- удовлетворить требованиям ввода в действие в короткие сроки.

Как показано в табл. 1, была проведена оценка четырех видов топлива.

Все они удовлетворяют критериям отбора. Но металлокерамическое топливо из урана с умеренным обогащением может быть изготовлено на существующем российском заводе по производству топлива, который выпускает металлокерамическое топливо для краткосрочной загрузки в эти промышленные реакторы. Кроме того, при этой альтернативе нет оружейного материала в свежем топливе, а в отработанном топливе содержится в малых количествах только сильно выгоревший плутоний (где доля Pu-240 превышает 30%). В результате металлокерамическое топливо с умеренно обогащенным ураном было выбрано в качестве предпочтительного варианта.

*От редакции: В докладе ТСА детально разбирается предпочтительный выбор топлива, но этот анализ здесь не приводится. В Приложении С к докладу, приведенном ниже, кратко рассматриваются другие варианты, включая вариант долгосрочного "сухого" хранения.*

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя США и Россия имеют формальное соглашение о закрытии российских реакторов, производящих плутоний, не ожидается, что это будет осуществлено до конца нашего века. Тем временем Митнатом будет продолжать управлять этими реакторами для производства электроэнергии и бытового тепла.

Самая легкая возможность остановки производства плутония оружейного качества состоит в изменении топливного цикла в течение ближайших 2-3 лет. Такая замена топливного цикла даст возможность повысить присущие этим реакторам параметры безопасности путем добавки эрбия к топливу,

Таблица 1  
Четыре вида топлива, содержащие в качестве выгоравшего поглотителя естественный эрбий

	Состав свежего топлива <sup>a</sup>	Материал оболочки <sup>b</sup>	Количество отработанного топлива (на реактор)
Низкообогащенный уран (НОУ)	металлический уран (1.2% U-235) 0.5% эрбия	циркониевый сплав "циркаллоу-2"	2/3 активной зоны в год
Умеренно обогащенный уран (<20% U-235)	33% U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (19.9% U-235) 6% Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 61% Al (металлокерамика)	алюминий	1/4 активной зоны в год
Высокообогащенный уран (ВОУ, >20% U-235)	7% U (93% U-235) 6.9% Er 86% Al (сплав)	алюминий	1/3 активной зоны в год
Плутоний оружейного качества	20% Pu (6% Pu-240) 38% Er 42% Al (сплав)	алюминий	1/3 активной зоны в год

<sup>a</sup> Содержание приводится в весовых процентах.

<sup>b</sup> ТВЭЛ изготавливается путем выдавливания оболочки вместе с топливом.

что может устранить нежелаемый эффект положительной реактивности от парообразования в теплоносителе.

Наиболее нечувствительный к опасности распространения топливный цикл, который можно было бы осуществить быстро и надежно, содержит 33 весовых процента окисла урана (с обогащением 19.9%) и 6 весовых процентов окисла зрбия в алюминии (в виде металлокерамики), которые выдавливаются совместно с алюминиевой оболочкой. Такой топливный цикл был бы экономичным, сводил бы к минимуму производство топлива и требования к хранению отработанного топлива, повышал бы безопасность работы реактора и выдавал бы при разгрузке минимальные количества плутония реакторного качества с более чем 30 процентами плутония-240. Отработанное топливо подходило бы для длительного хранения в существующих бассейнах.

Американское содействие России потребует скорее всего для любой замены в ближайшем будущем топливного цикла в российских промышленных реакторах. Внедрение топлива, нечувствительного к распространению и содержащего зрбий, потребовало бы американской технической поддержки для изменений в производстве топлива, в режимах использования материалов, в методах определения реактивности и выгорания, а также в анализе безопасности.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ  
ДЛЯ РОССИЙСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
РЕАКТОРОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В РЕЖИМЕ  
ГРАЖДАНСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

В основной части данного доклада идет обсуждение предпочтительного варианта работы российских промышленных реакторов в режиме гражданской энергетики. Этот предпочтительный выбор был определен путем сравнения относительной чувствительности к распространению, параметров относительной безопасности и затрат. Но изучались и некоторые другие возможности выбора. Приложение служит документом, где приводятся результаты анализа других вариантов, кроме предпочтительного.

**ВАРИАНТЫ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

Было проанализировано четыре дополнительных варианта топливного цикла (см. табл. А-1):  
- долгосрочное "сухое" хранение;  
- переход к топливному циклу с НОУ-металлом в оболочке из циркониевого сплава (циркаллоя);

- переход к топливному циклу с неразмножающимся ВОУ в оболочке из циркаллоя;  
- переход к топливному циклу с неразмножающимся плутонием оружейного качества в оболочке из циркаллоя.

В результате продолжающихся операций каждый год выгружается около 1000 тонн отработанного топлива от каждого промышленного реактора. Реакторы будут продолжать работу и производство плутония с облучаемым сейчас топливом из металлического урана в алюминиевой оболочке, если не внедрить жизнеспособные гражданские топливные циклы.

Возможность хранения в воде отработанного уранового топлива в алюминиевой оболочке очень чувствительна к качеству воды. Опыт (например, в Аргентине, Венгрии и Италии) с отработанным топливом в алюминиевой оболочке показал, что при деионизации (обессоливания) воды срок допустимого хранения доходит до 24 лет. Доказательство цельности оболочки основано главным образом на измерении проникновения радионуклидов в бассейн. Предсказывается, что точечная коррозия проникнет через алюминиевую оболочку примерно через 30 лет хранения в бассейне с деионизованной водой (МАГАТЭ, 1992г.). Топливо в алюминиевой оболочке (марка А-1) портится в нечистой воде, в течение 10-15 лет. Бассейны для отработанного топлива на российских промышленных реакторах не обшиты нержавеющей сталью и вода в них не очищается от солей. Отработанное топливо хранится в этих бассейнах не более, чем 2-3 года из-за опасности нарушения целостности оболочки из алюминия марки А-1. Последствиями нарушения целостности оболочки во время "мокрого" хранения станут выделение радиоактивных веществ в бассейн и окончательное разрушение оболочки и экспонированного топлива. В конечном итоге в бассейне могут попасть радиоактивные макрочастицы.

В некоторых из проанализированных вариантов топливного цикла рассматривается использование топлива в циркониевых (а не в алюминиевых) оболочках. Такие топливные элементы, как показано, заметно не портят своих свойств в деионизованной воде в течение периодов хранения до 30 лет. Нет указаний, что топливо в циркониевой оболочке чувствительно к чистоте воды в бассейне.

Американская комиссия по ядерному регулированию выпустила правила, где разрешается "мокрое" хранение отработанного топлива в циркониевой оболочке в течение срока до ста лет. Ожидается, что топливо в циркониевой оболочке от российских промышленных реакторов могло бы сохраняться при "мокрой" хранении на такой же период времени без

Таблица А-1

Четыре вида топлива, содержащие в качестве выгораемого поглотителя естественный зрбий

	Природный U	НОУ	ВОУ	Плутоний	Кермет
Стоимость разработки топлива (в млн. долл.)	-	20	30	50	30
Срок пребывания в реакторе (в ЭСР11М)	60	360	750	750	1000
Чистый фактор сокращения стоимости производства	-	3.	6	2	8
Фактор сокращения стоимости уранового сырья	-	2.5	2	-	1.5
На сколько лет хватит современных бассейнов для хранения	3	18	На все время	На все время	На все время
Опасность распространения в начале цикла	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая
Опасность распространения в конце цикла	Высокая	Умеренная	Умеренная	Умеренная	Низкая
Прочие расходы		Модернизация охлаждения отработанного топлива			

особых трудностей.

Для реализации любого из альтернативных вариантов топливного цикла (за исключением "сухого" хранения) для промышленных реакторов потребуются, как ожидается, от трех до пяти лет разработки (конкретные продолжительности для конкретного варианта приведены ниже), чтобы оптимизировать конструкцию топлива, проверить модели топлива и технические условия, провести испытания на реакторе, демонстрации и изучение после облучения, а также проверить рабочие характеристики топлива и требования безопасности. Программа разработки приведет к одобрению со стороны регулирующих органов для полномасштабного осуществления производства и использования этого варианта в российских промышленных реакторах. Не ожидается, что цена производства варианта из уранового топлива окажется более чем в два раза выше по сравнению с ценой топлива из металлического естественного урана. Впрочем, во всех случаях количество производимого топлива сокращается по сравнению с топливом из естественного урана, что приведет к численному сокращению затрат на производство топлива.

#### ВАРИАНТ "СУХОГО" ХРАНЕНИЯ

Отработанное топливо от российских промышленных реакторов могло бы храниться вместо переработки для извлечения плутония. В течение первых 2-3 лет после выгрузки можно было бы использовать "мокрое" хранение в бассейнах для уменьшения размеров тепловыделения от радиоактивного распада до уровня менее чем 300 Вт на тонну. Затем отработанное топливо переправлялось бы в крупные металлические контейнеры для "сухого" хранения (например в GNS CASTOR-6) и оставалось в атмосфере инертного газа на долгосрочное хранение под наблюдением.

##### Ограничения на бассейновое хранение отработанного топлива

Если исходить из трехлетнего срока хранения в бассейне, то около 3000 тонн отработанного топлива хранилось бы под водой при каждом российском промышленном реакторе. Это не отличается от текущей практики и не наложит никаких новых ограничений.

##### Требования к "сухому" хранению

Вместо переработки охлажденного в течение трех лет при хранении в бассейне отработанного топлива будут использованы контейнеры для хранения отработанного топлива в инертной атмосфере. Сухое хранение в инертной среде получило лицензию в США и других странах для коммерческого отработанного топлива. Оно используется в Японии для хранения топлива в алюминиевой оболочке от испытательного реактора.

Для долгосрочного контролируемого хранения отработанного топлива можно использовать крупные металлические контейнеры сухого хранения (например, CASTOR-6, применяемый в США и Европе). Каждый из них весит в пустом виде около 100 тонн, внешний диаметр составляет около 2,5 м, а высота - 5 м.

Поскольку топливо из металлического урана в алюминиевой оболочке имеет плотность, почти вдвое превышающую плотность топлива коммерческих легководных реакторов (ЛВРов), в каждый контейнер можно было бы поместить около 20 тонн отработанного топлива от промышленного реактора. Вес контейнера с загрузкой (120 тонн) стал бы практическим ограничением с точки зрения грузоподъемности типовых кранов, имеющих на реакторных площадках. При интенсивности тепловыделения

от контейнера (менее 6000 Вт) металлическое топливо сохранится от быстрого окисления, если бы инертная атмосфера внутри контейнера пропала.

Цена таких контейнеров сухого хранения (при крупных заказах) составит около миллиона долларов за штуку. Ожидаемые затраты при приобретении контейнеров сухого хранения на каждый реактор составили бы около 50 миллионов долларов в год. На каждом реакторе пришлось бы добавлять к участку земли, отведенному под контейнеры сухого хранения, примерно по гектару в год.

##### Затраты на вариант "сухого" хранения

Кроме 50 миллионов долларов/(реактор-год) для приобретения контейнеров сухого хранения, потребуется железобетонная подушка толщиной в полметра для площадки сухого хранения стоимостью 2 миллиона долларов/(реактор-год). Затраты на контроль оцениваются в 10 миллионов долларов/(реактор-год). Таким образом, полные затраты на сухое хранение отработанного топлива от каждого реактора составят, как ожидается, около 65 миллионов долларов/год.

#### ВАРИАНТ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ НОУ В ОБОЛОЧКЕ ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА

Промышленные реакторы могли бы продолжить работу с топливом в оболочке из циркония, содержащим около 0,5 весовых процента эрбия и металлический уран, обогащенный изотопом U-235 до уровня 1,2%. Такое топливо можно было бы изготовить в процессе горячего выдавливания подобно тому, как это делалось для N-реактора. Отработанное топливо находилось бы на "мокрой" хранении и его можно было бы не перерабатывать в течение срока до ста лет.

##### Ограничения на сроки выдержки топлива в реакторе

Топливо, содержащее металлический уран с обогащением 1,2% и находящееся в оболочке из циркония, облучалось в N-реакторе при выдержке вплоть до 4400 МВт-д/т. Чтобы увеличить отрицательный температурный коэффициент реактивности и коэффициент паросодержания во время облучения с топливом из слабо обогащенного урана будет сплавляться эрбий (с весовым содержанием 0,5%). Эрбий действует также как выгораемый поглотитель, снижающий в минимуму изменения реактивности в течение выгорания. При максимальном превышении энерговыделения на оси активной зоны на 20% по отношению к среднему сказывается, что усредненная по каналу выдержка выгружаемого топлива составила бы около 3600 МВт-д/т, а это в шесть раз выше выдержки современного топлива из естественного металлического урана. В результате из каждого промышленного реактора выгружалось бы всего около 160 тонн отработанного топлива в год. В отработанном топливе находилось бы около 0,7 весовых процента плутония реакторного качества (более 17% Pu-240).

##### Ограничения на бассейновое хранение отработанного топлива

Выделяемое при радиоактивном распаде тепло для твэлов из металлического НОУ с эрбием будет примерно в пять раз выше по сравнению с отработанным топливом из естественного металлического урана. Поэтому пришлось бы усовершенствовать оборудование охлаждающих бассейнов для отработанного топлива, чтобы приспособиться к более высокому тепловому нагрузкам, связанным с более сильно выгоревшим топливом.

Требования к хранению отработавшего топлива

Поскольку топливо из металлического НОУ с арбим в объеме из фиркалота выгорало бы в течение 360 ЗСРПМ, в то время как топливо из естественного металлического урана выгорает сейчас только в течение 60 ЗСРПМ, количество вытравляемого в течение года отработавшего топлива "мокрого" хранения, предназначенные для содержания естественного урана, можно было бы приспособить для 18 ежегодных вытравки топлива из металлического естественного урана, которое было бы приспособлено для 18 ежегодных вытравок более сильно выгоревшего топлива из металлического НОУ с арбим в объеме из фиркалота.

Стоимость варанта с топливом из металлического НОУ

Существующие варианты со сжиганием в российских промышленных реакторах топлива на металлургическом НОУ потребует, как ожидается, программа ОКР сроком на два года со стоимостью 20 миллионов долларов. Объем производства металлического НОУ-топлива сокращается в шесть раз по сравнению с топливом из естественного урана, так что чистая стоимость производства топлива сокращается примерно на 70%. Стоимость НОУ, который также может продаваться как коммерческим путем для использования в ЛБР-1-235. Это соответствует примерно 75 000 долларов за тонну НОУ со степенью обогащения 1,2%. Потребности в заручке НОУ-топливом каждого производственного реактора составляют около 160 тонн в год. Заручка НОУ-топливом стоит примерно 12 миллионов долларов в год для каждого реактора. Это составляет всего 40% от ежегодных затрат на заручку топлива из естественного урана (около 1000 тонн/год) в каждый из реакторов для использования и естественное уран.

Скорость расширения

Поскольку топливо из НОУ-металла с арбим будет находиться в российских промышленных реакторах в течение 18 месяцев, каждый год из каждого реактора будет вытравляться 2/3 активной массы. Полное количество НОУ-металла, которое придется ежегодно накопить и затравить во все три реактора для поддержания их работы, могло бы составлять 5,1 тонн НОУ, разведенного 475 тоннами естественного урана.

ВАРИАНТ НЕРАЗМНОЖАЮЩЕГОСЯ ВОУ-ТОПЛИВА В ОБЪЕМЕ ИЗ ФИРКАЛОТ

Промышленные реакторы могли бы производить операции с неразмножающимся топливом, содержащим БОУ и арбим в алюминированной матрице и покрытым фиркалом. Такое топливо не производило бы значительных количеств плутония и большую часть его составили бы неактивные изотопы Pu-238, Uра-235, Uра-238. Отрабатываясь топливо находилось бы на "мокром" хранении без переработки в течение срока до ста лет. Ограничения на сроки вытравки топлива в реакторе

тановится равновесное содержание ксенона, реактивность возрастает в течение первых 480 ЗСРПМ, достигая максимума значения  $k = 1,12$  и затем спадает. Более 60% урана сгорает за рабочий цикл. Вытравляемый уран содержит менее 60% U-235 и более 27% U-236.

Связанные с безопасностью параметры

Неразмножающиеся ВОУ/Ер/А1-топливо с теми же размерами твэла (радиус 18 мм), что и для естественного урана обладает дополнительными коэффициентами безопасности. Коэффициент теплоносителя также становится не столь отрицательным по мере выгорания: от  $-1,2 \cdot 10^{-4}/K$  в начале рабочего цикла до  $-5 \cdot 10^{-5}/K$  в его конце. Эти значения гораздо более отрицательны, чем величина для естественного урана ( $-6 \cdot 10^{-6}/K$ ) в начале цикла. Изменяя реактивность по мере выгорания реактора увеличение на 4% числа ураноподобных стронция по сравнению с топливом из естественного металлического урана. Сравнение изменений реактивности по мере выгорания неразмножающегося топлива с 7%-ным уровнем содержания БОУ и арбим в течение первого года выгорания и топлива, предназначенного для использования в ЛБР-1-235. Это соответствует примерно 75 000 долларов за тонну НОУ со степенью обогащения 1,2%. Потребности в заручке НОУ-топливом каждого производственного реактора составляют около 160 тонн в год. Заручка НОУ-топливом стоит примерно 12 миллионов долларов в год для каждого реактора. Это составляет всего 40% от ежегодных затрат на заручку топлива из естественного урана (около 1000 тонн/год) в каждый из реакторов для использования и естественное уран.

Ограничения на безопасное хранение отработавшего топлива

Темп от радиоактивного распада в твэлах из неразмножающегося ВОУ-топлива примерно в 15 раз превышает темп теплового выгорания отработавшего топлива из естественного металлического урана. Поэтому надо было бы обновить оборудование в базах для охлаждения отработавшего топлива, чтобы приспособиться к более высоким температурам топлива, связанным с более сильно выгоревшим топливом. Поскольку сейчас топливо из естественного металла выгорает только 60 ЗСРПМ, количество урана вытравляется более чем в 12 раз. Предназначенные для "мокрого" хранения бассейны, специально выстроенные для производства сжигания отработавшего топлива, могут использоваться в течение трех лет, если бы приспособиться к разгрузке неразмножающегося ВОУ-топлива в течение времени жизни реактора.

Стоимость варанта с неразмножающимся ВОУ-топливом

Существующие варианты сжигания ВОУ в российских промышленных реакторах, как ожидается, потребуют программы ОКР на ближайшие три года со стоимостью 30 миллионов долларов. Количество производимого топлива уменьшится в шесть раз по сравнению с топливом из естественного урана, так что чистая стоимость производства топлива уменьшается примерно в шесть раз. Стоимость ВОУ, который может быть в этом случае разведен естественным ураном и продан для использования в ЛБР-1, оценивается примерно в 18 долларов за грамм U-235. Это соответствует около

17 миллионам долларов за тонну ВОО. Потребности в ВОО-топливе для каждого промышленного реактора, работающего на размножающемся топливе составят примерно 0,9 тонны/год, то-есть затраты на ВОО-топливо составят примерно 15 миллионов долларов/год на каждый реактор. Это составляет только половину ежегодных затрат на загрузочный материал из естественного урана (1000 тонн/год), которые приходится при нынешнем топливном цикле на каждый реактор.

#### ВАРИАНТ НЕРАЗМНОЖАЮЩЕГОСЯ ТОПЛИВА ИЗ ПЛУТОНИЯ ОРУЖЕЙНОГО КАЧЕСТВА В ОБОЛОЧКЕ ИЗ ЦИРКАЛЛОЯ

Российские промышленные реакторы можно было бы перезагрузить неразмножающимся топливом, содержащим плутоний оружейного качества и эрбий в алюминиевой матрице и покрытым циркаллоем. Отработанное топливо помещалось бы на "мокрое" хранение и не подвергалось переработке для извлечения оставшегося плутония реакторного качества в течение срока до ста лет.

#### Ограничения на сроки выдержки топлива в реакторе

Топливо с весовым содержанием 20% плутония оружейного качества и 38% эрбия, помещенных в алюминий, может выдерживать трехлетнее (750 ЭСРПМ) пребывание в реакторе. Потери реактивности у этого топлива по мере его выгорания составят только 7% за весь рабочий цикл. В отработанном топливе сохраняется около 80% начального количества загруженного плутония, но содержание Pu-240 возрастает до более чем 17% (почти так же, как в отработанном топливе на реакторах ВВЭР).

#### Связанные с безопасностью параметры

Неразмножающееся топливо с теми же размерами твэла (радиус 18 мм), что и у используемого сейчас топлива из металлического урана, обладает доплеровским коэффициентом, который остается практически постоянным и равным  $(-1,2 \cdot 10^{-5}/K)$ . Температурный коэффициент водяного теплоносителя изменяется линейно от  $(-1,6 \cdot 10^{-5}/K)$  в начале цикла до  $(-1,0 \cdot 10^{-5}/K)$  в его конце. Частичное разрушение как Pu-239, так и Eг-167, близко сопоставимы по мере выгорания топлива. Выгорание примерно одной четверти этих изотопов по существу компенсирует изменения их реактивности за время всего рабочего цикла. Более низкие начальные концентрации плутония и эрбия приводят к менее согласованным темпам разрушения и более короткой продолжительности рабочего цикла, прежде чем температурный коэффициент теплоносителя станет положительным.

#### Ограничения на бассейновое хранение отработанного топлива

Тепло от радиоактивного распада в твэлах неразмножающегося топлива примерно в 10 раз превышает тепловыделение отработанного топлива из естественного металлического урана. Поэтому надо было бы обновить оборудование в бассейнах для охлаждения отработанного топлива, чтобы приспособиться к более высоким тепловым нагрузкам, связанным с более сильно выгоревшим топливом.

#### Требования к хранению отработанного топлива

Поскольку неразмножающееся Pu/Eг/Al-топливо выгорало бы в течение 750 ЭСРПМ, в то время как применяемое сейчас топливо из естественного металлического урана используется только в течении 60 ЭСРПМ, количество производимого ежегодно отработанного топлива уменьшится более чем в 12 раз. Предназначенные для "мокрого" хранения бассейны, способные вместить топливо из естественного металлического урана, которое выгружается в течение трех лет, смогли бы приспособиться к нагрузкам неразмножающегося топлива в течение времени жизни реактора.

#### Стоимость варианта с неразмножающимся топливом из плутония оружейного качества

Осуществление варианта сжигания плутония в российских промышленных реакторах, как ожидается, потребует программы ОКР на ближайшие пять лет со стоимостью 50 миллионов долларов.

Стоимость производства содержащего плутоний топлива для ЛВРов в 4-5 раз выше стоимости уранового топлива, поскольку процессы следует проводить в стерильных камерах с перчатками, чтобы сдержать потенциальное распространение загрязнений. Поскольку требуется количество содержащего плутоний топлива в 12 раз ниже по сравнению с топливом из естественного металлического урана, чистая ежегодная стоимость производства топлива должна составлять менее половины того, что тратится сейчас.

#### Скорость распорядения плутонием

Поскольку неразмножающееся Pu/Eг/Al-топливо находилось бы в российских промышленных реакторах в течение трех лет, из каждого реактора ежегодно выгружалась бы одна треть активной зоны. Полное количество неразмножающегося топлива, которое пришлось бы готовить и загружать во все три промышленных реактора для поддержания их работы, будет содержать 8 тонн плутония оружейного качества. Около шести тонн плутония реакторного качества выгружалось бы ежегодно в годовой отработанный топлив.