

Специальный раздел

**КОНВЕРСИЯ РОССИЙСКИХ РЕАКТОРОВ, ПРОИЗВОДЯЩИХ ПЛУТОНИЙ**

Предисловие редактора

Статьи и комментарии для приведенного ниже обсуждения конверсии российских реакторов, производящих плутоний, были подготовлены весной 1997 г. После этого было проведено несколько совещаний с участием сотрудников Минатома, Госатомнадзора, Курчатовского института и Тихоокеанской Северо-Западной национальной лаборатории для обсуждения технических вопросов конверсии. Тем не менее, основные точки зрения авторов не отклонились от того, что представлено в этом выпуске. Похоже, все согласны с тем, что проект Курчатовского института приводит к необходимости иметь больше управляющих стержней, но все еще имеются некоторые расхождения относительно стоимости такого улучшения и времени, необходимого для его осуществления. Недавно проведенные инспекции реакторов породили надежду, что они останутся в рабочем состоянии еще 10-15 лет, хотя раньше считалось, что этот срок составит примерно 5 лет. Кратко упомянутая ниже проблема выбора высокообогащенного или низкообогащенного урана станет предметом последующей в будущем статьи. Весь раздел в целом представляет собой обновленный взгляд на проблему, которая в первый раз обсуждалась в нашем журнале в 1995 г. (А.М.Дмитриев, "Конверсия российских промышленных плутониевых реакторов для использования в гражданских целях"; журнал "Наука и всеобщая безопасность", т.5, вып.1, стр.20-23, май 1995 г.).

**ИСТОРИЯ ПЛУТОНИЕВОГО КОНВЕРСИОННОГО ПРОЕКТА**

Анатолий Дьяков

Автор - директор Центра по изучению энергетики, окружающей среды и контроля над вооружениями при Московском физико-техническом институте.

Происхождение проекта таково. Вице-президент США Альберт Гор и премьер-министр России Виктор Черномырдин подписали 23 июня 1994 г. соглашение, касающееся трех оставшихся промышленных российских реакторов. Основная цель соглашения заключалась в прекращении производства плутония оружейного качества на этих реакторах двойного назначения, два из которых продолжали работать в Северске (бывший Томск-7) и один - в Железногорске (бывший Красноярск-26). В настоящее время эти реакторы работают для производства тепла и электричества для местного населения. Два реактора в Северске дают примерно 30% тепла, потребляемого в Томске, а железногорский реактор обеспечивает всю потребность в тепле для местных жителей. В соответствии с соглашением обе стороны должны предпринять действия по сооружению новых источников тепла и электричества, заменяющих реакторы. Российская сторона понимала соглашение так, что США обеспечат финансовую поддержку для постройки новых источников энергии. Кроме того, в соглашения входят российские обязательства по размещению и использованию все еще производимого плутония.

Подписанное соглашение должно было вступить в силу после обмена дипломатическими нотами, подтверждающими, что все определенные процедуры выполнены обеими сторонами. Но на последующем этапе переговоров стороны не смогли достичь согласия по процедурам мониторинга, связанным с работой и остановкой реакторов, переработкой сработавшего топлива и подтверждением качества выделенного плутония. Процедуры мониторинга, предложенные американской стороной, казались для российской стороны чрезмерными и дискриминационными. Кроме того, Россия полагала, что США не полностью выполнили свои обязательства по обеспечению финансовой помощи для сооружения альтернативных источников энергии. В результате разногласий по верификации соглашение между Гором и Черномырдиным не вступило в силу.

Тем не менее, Минатом официально заявил, что, начиная с 1 октября 1994 г., никакая заново произведенный в России плутоний не был и не будет использован в военных целях. С этого времени российское министерство финансов перестало платить за плутоний, изготов-

ленный на трех упомянутых реакторах.

Обе стороны провели изучения осуществимости замены реакторов на электростанции с ископаемым топливом. В 1994 г. Курчатовским институтом и Тихоокеанской Северо-Западной лабораторией (ТСЗЛ) было начато совместное изучение вариантов конверсии активной зоны с участием Минатома и Госатомнадзора. Стороны пришли к выводу, что конверсия активной зоны промышленных реакторов позволит получать на них тепло и электричество без значительного производства плутония. Анализ различных вариантов показал, что конверсия активной зоны на самом деле является перспективной. Один из доводов в пользу конверсии заключается в том, что ее осуществление сохранит рабочие места, связанные с работой реакторов и улучшит социально-экономическую обстановку в соседних городах, способствуя косвенно обеспечению безопасного хранения накопленных в этих районах делящихся веществ. В сентябре 1995 г. совместная деятельность Курчатовского института и ТСЗЛ по конверсии активной зоны привела к соглашению, подписанному Минатомом и Министерством энергетики США, по которому российская сторона получила 1.9 млн.долл. от США для выполнения изучения возможности осуществления. Такое изучение привело к выводу, что конверсия всех трех реакторов обойдется в 160 млн.долл., а эти затраты следует разделить поровну между двумя сторонами. Последующее соглашение о продолжении работ по конверсии активной зоны было подписано министром Михайловым и секретарем О'Лири в январе 1996 г.

Впрочем, это январское соглашение и его финансирование создали некоторые трудности в американских правительственных учреждениях. Оно создало также трудности для России, поскольку США согласились внести свою долю затрат на проект при условии возможности иметь американский мониторинг над плутонием, произведенным в реакторах после 1 октября 1994 г. Еще одна проблема возникла из-за нового российского законодательства. В августе 1995 г. в России вступил в действие новый закон о международных соглашениях, по которому все виды соглашений (между странами, правительствами или организациями), связанные с национальной безопасностью России, должны быть ратифицированы российской Государственной Думой.

Ряд интенсивных переговоров, предпринятых обеими сторонами, привели к пониманию, что для продолжения работ по конверсии активной зоны необходимо новое американско-российское соглашение. Текст нового соглашения был составлен во второй неделе мая 1997 г. и обе стороны пошли на некоторые уступки. Участники переговоров с американской стороны согласились на текст, где не упоминались российские промышленные реакторы

или плутоний оружейного качества, что находится в соответствии с позицией Минатома, утверждающего, что эти реакторы больше не являются промышленными и их деятельность не связана с национальной безопасностью. В соответствии с такой интерпретацией для Думы может не оказаться необходимым ратифицировать соглашение о конверсии активной зоны. Если новое соглашение приемлемо для США, то существует реальная возможность, что Россия прекратит производство плутония оружейного качества к 2000 г.

### КОНВЕРСИЯ РОССИЙСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛУТОНИЕВЫХ РЕАКТОРОВ: ПЕРЕХОД КО ВТОРОЙ ФАЗЕ

Александр М. Дмитриев

Автор - начальник отдела Госатомнадзора (Российского государственного комитета по радиационной безопасности).

Работа российских промышленных плутониевых реакторов продолжает вызывать интерес у политических лидеров и общественности. Будучи спроектированными для производства плутония оружейного качества, идущего на изготовления ядерного оружия, эти крупные графитовые реакторы (два расположены в Томске-7 и один в Красноярске-26) используются также для снабжения электроэнергией и теплом местных жителей. Попытки заменить реакторы источниками энергии на ископаемом топливе начались несколько лет тому назад, но эти проекты развиваются столь медленно, что их нельзя рассматривать в качестве реального решения проблемы на ближайшее будущее (5-6 лет). Ни грамма плутония от этих реакторов не было использовано для производства оружия после 1 октября 1994 г., так что в принципе конверсия реакторов может быть начата немедленно. Под "конверсией" мы понимаем структурную перестройку и изменение схемы топливного цикла, которые необходимы для продолжения производства тепла и электричества без создания плутония оружейного качества. Мы хотели бы также свести к минимуму количество плутония оружейного качества, производимого в новом режиме.

В начале 1995 г. состоялись две встречи российских и американских экспертов для обсуждения технических вариантов конверсии. В российскую группу входили эксперты Минатома и представители ядерного бизнеса, т.е. владельцы реакторов, сотрудники российского научного центра "Курчатовский институт" (КИ) и Госатомнадзора России (ГАН) - аналога американской комиссии по ядерному регулированию. В американскую группу входили представители министерства энергетики (МЭ), Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории (ТСЗНЛ) и компании "Вестингауз". На этих встречах было достигнуто соглашение о предварительной фазе конверсионной деятельности. Работа финансировалась МЭ через ТСЗНЛ, а КИ был основным российским подрядчиком. К концу 1995 г. КИ подготовил техническое предложение о конверсии активной зоны, а ГАН переформулировал ряд требований к безопасности, которые должны применяться к этим реакторам после их конверсии.

Сначала в предложении КИ предполагалось, что реактор будет работать при пониженном в 3-4 раза уровне мощности, чтобы избежать плавления топливных каналов и топливных элементов в случае аварии с потерей охладителя. Автор показал, что даже такое уменьшение мощности не предотвратит разломов во многих алюминиевых топливных каналах, контакта воды с горячей графитовой кладкой и соответствующего роста давления, приводящего к сдвигу крышки реактора. Во время аварии реактора в Чернобыле такой сдвиг крышки привел к выделению радиоактивных продуктов деления из активной зоны в атмосферу и к ухудшению последствий аварии. Поэтому при критическом обсуждении предложения КИ, которое проходило в Вашингтоне в ноябре 1995 г., было принято решение заменить алюминиевый сплав в топливных каналах на циркониевый.

Рассмотрение возможности конверсии началось в Томске-7 в 1988 г. Все рассмотрения вариантов конверсии были проведены в предположении, что главный реактор не подвергнется крупным изменениям. Скорее, предлагалось приспособить топливо к более высоким уровням выгорания и переделать отдельные системы реактора для удовлетворения дополнительным требованиям по безопасности.

Сначала в качестве альтернативы были рассмотрены хорошо испытанные типы топлива для ВВЭР и РБМК. Но две проблемы привели к отказу от них: прежде всего, большое количество воды во всех возможных конфигурациях топливных элементов делало невозможным получить отрицательный "пустотный" коэффициент реактивности, а во-вторых, из-за большой длины топливных сборок ВВЭР и РБМК их пришлось бы выгружать через верхнюю часть активной зоны в центральный зал, а не сбрасывать вниз в наполненный водой бункер, как предусматривалось в начальной конструкции. Разгрузка через верх потребовала бы разработки значительного количества нового оборудования и она была признана более опасной, чем современная схема. Более того, разработка топлива в виде коротких пучков для разгрузки через низ повлекла бы за собой большое количество изготавливаемых элементов, а также очень большое число сварных швов, надежность которых оказалась бы под вопросом. Новому топливу придется затем пройти через полный цикл испытаний и сертификации, который обычно занимает 3-4 года.

Поэтому на первой фазе исследований в Томске-7 вариантов конверсии было принято решение остановиться на топливе, которое уже производится и было испытано. Формой топливных элементов остаются традиционные цилиндры слегка меньшего диаметра, чем диаметр топливного канала, с высотой менее 150 мм; топливо состоит из высокообогащенного урана (VOU) в алюминиевой матрице, помещенных в алюминиевый кожух. Действительно, хотя в центральной части активной зоны промышленных реакторов используются топливные стержни из естественного урана, подобное VOU-топливо в алюминиевом кожухе и алюминиевой матрице широко используется на периферии активной зоны для сглаживания распределения нейтронного потока и было показано, что оно надежно при высоком уровне выгорания. Такой состав топлива также широко использовался в большом числе исследовательских реакторов как в России, так и в других местах.

Были рассмотрены два уровня обогащения: 20% U-235 и 90% U-235. Различия в физике реактора и продолжительности кампании для этих уровней незначительны. Но уран с 90-процентным обогащением имеет преимущество в том, что в нем меньше U-238 и, следовательно, производится меньше плутония при захвате нейтронов. Тем не менее, предпочтителен уран с 20-процентным обогащением с учетом того, что уран с 90-процентным обогащением может быть использован для создания оружия.

В качестве средства уменьшения начального запаса реактивности была рассмотрена возможность заполнения ряда каналов поглотителем нейтронов вместо топлива. Затем можно относительно легко регулировать реактивность путем простой загрузки или разгрузки каналов с поглотителями - эта методика напоминает то, что использовалось в реакторах РБМК. Такой метод управления реактивностью нехорош по двум причинам: во-первых, принятый по ошибке за топливо поглотитель может оказаться губительным при разгрузке во время работы на полной мощности, а во-вторых, чтобы эта методика управления оказалась эффективной, пришлось бы заполнять поглотителем до 20-25% всех каналов, а это привело бы к столь значительному падению температуры на выходе, что реактор не смог бы выполнить свою основную задачу. Не только оказалось бы невозможным дальнейшее производство электроэнергии, но и прекратилась бы поставка тепла окружающему населению, поскольку нельзя было бы удовлетворить условию, чтобы в зимнее время вода имела температуру не ниже 125 С. Загрузка отдельных каналов поглотителем приведет так-

же к значительной неоднородности уровня мощности внутри активной зоны реактора.

Начальное изучение конверсии обратилось затем к другой возможности контроля над реактивностью - загрузке поглотителя и топлива в одни и те же каналы. Топливные и поглощающие элементы должны будут при этом иметь одинаковую форму и будут загружаться в определенном соотношении: например, один поглощающий элемент вместо каждого четвертого или седьмого топливного элемента (см. Рис.1). Это соотношение зависит от состава поглотителя и конкретного загружаемого топлива, то-есть от количества U-235 в топливе. Потеря охладителя (который действует также как замедлитель) приведет к ужесточению спектра тепловых нейтронов и уменьшению скорости деления в топливе относительно скорости захвата нейтронов в поглотителях. Хотя поглощающий эффект водяного охлаждения будет потерян в процессе выкипания, возрастающая эффективность элементов поглотителя уменьшит остаточную реактивность из-за ослабления отражения нейтронов от поглотителей с большим самоэкранированием.

Согласно современному предложению КИ вся активная зона будет загружаться оксидом ВΟΥ в алюминиевой матрице с алюминиевым кожухом. Цилиндрические топливные элементы будут иметь точно такие же размеры, какие используются в промышленных реакторах сейчас. Управление реактивностью будет достигаться путем загрузки элементов поглотителя и топлива в те же самые каналы, как было описано выше, в соотношении, которое сейчас рассчитывается с целью иметь уверенность в том, что реактивность можно удерживать в приемлемом диапазоне в течение всех операций, включая выгорание топлива и поглотителя. Но этот расчет очень сложен.

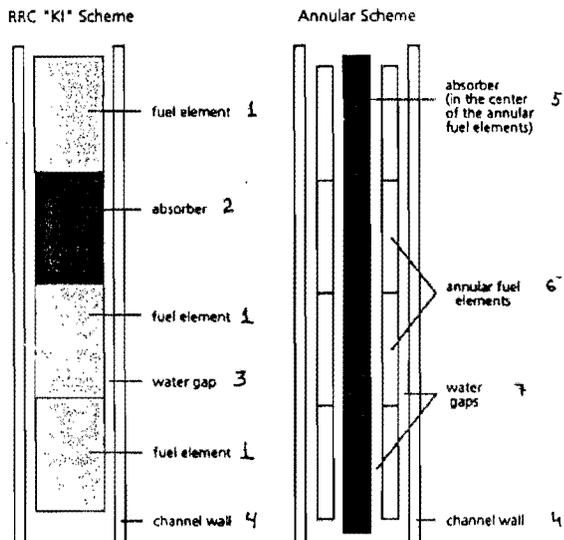


Рисунок 1: Размещение топливных и поглощающих элементов внутри каналов реактора для двух схем, обсуждаемых в тексте. Слева схема КИ, справа - кольцевая схема. Обозначения: 1) топливный элемент; 2) поглотитель; 3) промежуток для воды; 4) стенка канала; 5) поглотитель (расположен по центру кольцевых топливных элементов); 6) кольцевые топливные элементы; 7) промежутки для воды.

Проблемы с предложением о загрузке элементов топлива и поглотителя в один и тот же канал можно разделить на две вида. К первому относится правильное предсказание поведения реактора, которое, несмотря на значительное улучшение компьютерных моделирований за последние годы, остается тем не менее серьезной заботой. Даже если экспериментальные результаты, полученные при тестировании выбранной загрузки, вписываются в эти расчеты, остаются значительные неопреде-

ленности в изменении реактивности при нагреве, появлении нейтронных "ядов" и выгорании как топлива, так и поглотителя. Так как эксперименты можно проводить только для реактора с нулевой мощностью, они способны помочь уточнению расчетов для "холодных" (стартовых) условий со свежим топливом.

Второй вид проблем касается технических требований к безопасности, связанных с реактивностью и распределением мощности. При загрузке ВΟΥ-топливом контрольная система промышленных реакторов может изменить реактивность только примерно на 9-10%. По мере того, как графит нагревается, спектр тепловых нейтронов становится более жестким. Скорости захвата надтепловых нейтронов в карбиде бора и других нейтронных поглотителях в активной зоне возрастают по отношению к скорости теплового деления в топливе при более высоких температурах графита. Этот эффект может уменьшить реактивность на 5-6% при использовании ВΟΥ-топлива, а рост содержания продуктов деления, которые оказываются нейтронными ядами, уменьшает реактивность еще на 2-2.5%. Таким образом, проблема обеспечения достаточной подкритичности в условиях холодного реактора и одновременного управления рабочим запасом критичности по мере увеличения выгорания в течение многих месяцев является очень сложной.

Сохранение нужного распределения мощности в активной зоне также представляет из себя комплексную проблему. При нормальной работе распределение мощности по вертикали имеет характер косинуса, то-есть она максимальна в центре. Когда в реактор загружают ВΟΥ, топливо быстро сгорает в центре и фактически становится обедненным, что приводит к яме уровня мощности в этой области. Такое вертикальное распределение мощности очень неустойчиво и исключительно опасно. С учетом ограничения на положение контрольных стержней (они вводятся только сверху) выборочное уменьшение уровня мощности в верхней и нижней частях активной зоны потребует очень хорошей оперативной системы контроля за распределением плотности с конкретными механизмами для влияния на реактивность в нижней части активной зоны.

Конструирование надежной системы контроля за распределением мощности при одновременном сохранении средств для уменьшения реактивности является достаточно сложной проблемой. Если бы отдельные контрольные стержни были посвящены конкретно регулированию нейтронного поля в нижней части активной зоны, их придется исключить из общей системы остановки реактора. Как упоминалось выше, возможности этой системы остановки для контроля за реактивностью уже лежат на пределе.

Была разработана альтернативная концепция активной зоны реактора, учитывающая эти недостатки. Хотя продолжает применяться оксид ВΟΥ в алюминиевой матрице и алюминиевом кожухе, он примет форму кольцевых топливных элементов. Такие элементы широко использовались, например, в канальных графитовых реакторах. Для компенсации начальной избыточной реактивности ВΟΥ-топлива в центр кольцевой топливной колонны помещаются поглощающие элементы со специальным покрытием на всю длину топливного элемента (сейчас считается, что это будет алюминий). Таким образом, вода будет протекать между стенкой канала и внешней поверхностью топливного элемента, а также между внутренней стенкой топливного элемента и поглотителем (см.Рис.1). Как показывают предварительные расчеты, эта конструкция ячейки будет обладать следующими особенностями:

- (1) Из-за внешнего и внутреннего промежутков для воды кольцевые топливные элементы обеспечивают большую площадь для теплообмена, чем традиционные цилиндрические элементы: запасы теплового потока на внешних и внутренних поверхностях топливных элементов кольцевого типа до начала поверхностного испарения в 1.5-2 раза выше, чем на внешней поверхности цилиндрического топливного элемента.

- (2) Расчеты по физике нейтронов для такого устройства хорошо согласуются с экспериментом даже при использовании достаточно простой методики вычислений. Поэтому более надежными будут предсказания эффектов реактивности с учетом относительного выгорания топлива и поглотителя.
- (3) Отрицательный пустотный коэффициент реактивности может сохраняться в широком диапазоне загрузок конкретного топлива (диапазоне масс U-235 в топливе) и концентраций поглотителя.
- (4) Загрузка конкретным топливом, при котором пустотный коэффициент отрицателен, может оказаться в 2-3 раза меньше загрузки, необходимой в схеме чередующихся топливных и поглощающих элементов цилиндрической формы. Меньшая плотность U-235 в загруженном топливе уменьшит вероятность появления вторичной критичности в тех случаях, когда топливо плавится, что резко ослабляет последствия серьезной аварии.
- (5) Могут оказаться терпимыми гораздо более высокие уровни выгорания, что уменьшает стоимость производства тепла и электричества. Кольцевая схема позволит получить деление 45-50% U-235 вместо примерно 30% для схемы с чередованием цилиндрических топливных и поглощающих элементов.
- (6) Улучшенную недавно методику расчетов применили к боросодержащей (2%) стали и показали следующее: концентрация бора настолько велика, что он выгорает незначительно и поэтому недостаточно компенсирует потери реактивности, связанные с выгоранием топлива. Предварительные расчеты полагают, что необходимо иметь в 2-3 раза меньшие концентрации бора, чем в обычной двухпроцентной боросодержащей стали, для того, чтобы сбалансировать выгорание урана, и при этом флуктуации реактивности не превысят примерно 1.5%. Нет оснований полагать, что производство боросодержащей стали с концентрацией бора 0.5-0.8% составит какую-то проблему. Бор и боросодержащая сталь были исследованы раньше не только потому, что они дешевы и легко доступны, но и потому, что у нас есть практически опыт работы с ними. Можно также с успехом применять другие поглотители, например, оксид гадолиния.
- (7) Очень важная особенность кольцевой схемы заключается в том, что можно оптимизировать загрузку урана, плотность и геометрию поглотителя таким образом, что уменьшение реактивности при переходе от холодного старта к рабочим условиям составит 3-3.5% вместо 5-7% при загрузке каналов чередующимися цилиндрическими топливными и поглощающими элементами. Если эффективность системы быстрого реагирования составляет, как минимум, 9% и конечный запас подкритичности, требуемой правилами, равен в любой момент, по крайней мере, 1%, система смотрится удовлетворительно. Баланс реактивности выглядит так: 1% от резерва холодной остановки, 3.5% от нагрева активной зоны и 2.5% от нейтронных ядов, что дает в итоге запас подкритичности, равный 2% (9 - 1 - 3.5 - 2.5). Вычисления с учетом выгорания поглотителя показывают, что при кольцевой схеме конверсии можно будет удовлетворить существующим требованиям на остановку реактора в холодном состоянии и одновременно обеспечить приемлемую длительность рабочей кампании. Если для схемы с чередованием цилиндрических топливных и поглощающих элементов при переходе от холодного состояния к горячему используется шесть или более процентов возможностей контрольной системы для компенсации реактивности, то конверсия активной зоны становится невозможной без увеличения поглотителей в системе управления.

Кольцевая схема позволяет иметь большой дополнительный резерв порядка 2% для контроля за реактивностью, что следует сравнить с запасом -1.5% для схемы с чередованием цилиндрических топливных и кольцевых

элементов. Такие резервы желательны с учетом трудности, связанной с предсказанием характеристик реактивности промышленного реактора при загрузке его ВОО и сильными поглотителями. Общая неопределенность реактивности, составляющая около 0.5%, возникает из следующих параметров: начальный коэффициент размножения нейтронов, эффективность системы управления, влияние нейтронных ядов, влияние температуры на реактивность, влияние выгорания топлива на реактивность, сравнимое с образованием пузырьков в воде, и влияние выгорания поглотителя. К сожалению, коэффициент размножения нейтронов можно проверить экспериментально только в холодном случае при нулевом выгорании.

Хотя из-за своей симметрии кольцевая схема сводит к минимуму эти неопределенности, запас безопасности все еще важен. Аварии на Тримайл Айленд и в Чернобыле показали, что реакторная система должна обладать способностью прощать ошибки. Эти события показали необходимость перехода к новым реакторным системам с такими характеристиками, которые сделают невозможными серьезные аварии. Точно так же, ближайшая конверсия промышленных плутониевых реакторов должна включать в себя систему компенсации реактивности с возможностями прощать возможные ошибки и неправильные расчеты.

Простейшей возможной конструкцией поглотителя является цилиндр с такой же высотой, как и у топливного элемента, закрепленный по его оси специальными зажимами. У нас уже есть опыт изготовления кольцевого топлива и использования его в графитовых реакторах, хотя на практике в отверстии находится только вода, а не поглощающий стержень. Поглотитель будет смонтирован с топливным элементом и оба загружаются или выгружаются вместе.

В другом случае топливные элементы и поглотитель могут загружаться по отдельности, причем сначала вводится топливо. В этом случае поглотитель будет размещен внутри достаточно длинной трубы, которую можно закрепить в верхней части канала. Полная длина этой трубы будет составлять 14 м, а сам поглотитель займет нижние семь метров. Трубу установят после того, как кран загрузит топливные элементы из центрального зала реактора. Такая установка трубы поглотителя в загруженный канал и закрепление ее на верхней части канала были успешно выполнены. На внешней поверхности поглотителя можно установить ребра, чтобы гарантировать центровку трубы в канале, но расчеты показывают, что положение поглотителя относительно несущественно. Труба поглотителя будет находиться при той же температуре, что и охлаждающая вода, так что неконцентричность мало повлияет на реактивность или рабочую безопасность топливных элементов.

Независимая загрузка труб с поглотителем позволяет иметь широкий диапазон компенсации реактивности. При заданной загрузке топлива реальный запас реактивности, связанный с контрольными стержнями, может быть определен до начала работы реактора путем подходящего выбора числа, концентрации и диаметра поглощающих элементов. Поглощающие стержни могут также заменяться во время работы для корректировки уровня мощности. По мере того, как поглотители активируются, их можно выводить и заменять дистанционными методами (за биологической защитой), используя имеющееся и испытанное оборудование в центральном зале, и затем проверять экспериментально. Таким образом, существуют средства для компенсации различных расчетных и экспериментальных неопределенностей практически в любой момент во время работы. Например, можно отрегулировать температуру воды на выходе путем замены поглотителей в каналах с низкими или высокими значениями выходной температуры. Эта схема конверсии не только будет прощать расчетные ошибки, но и позволит оптимизировать мощность. Ненамеренная незагрузка топливного элемента не окажется опасной, потому что в канале остается поглотитель, обеспечивающий локальное уменьшение мощности. У этой конфигурации есть также значительное преимущество в случае маловероят-

ной серьезной аварии.

Использование в канале чередующихся цилиндрических топливных и поглощающих элементов очень затруднит настройку уровня поглощения в холодном состоянии, поскольку потребуются сложная и занимающая много времени разгрузка свежего топлива и поглотителей из канала в верхний зал. Такая настройка окажется невозможной в процессе работы из-за высокого уровня активации топливных и поглощающих элементов.

Первая фаза работ по конверсионному проекту была завершена в конце 1995 г. Она показала, что связанные с конверсией технические проблемы оказываются сложными, но с ними можно справиться. На этом основании мы ожидаем, что российско-американское сотрудничество по этому проекту будет продолжено. Вторая фаза будет включать в себя завершение окончательного проекта и полного анализа безопасности - она займет 1.5-2 года. Это исследование покажет, сможет ли план конверсии промышленных реакторов, уже достигших конца проектного срока жизни, удовлетворить требованиям к безопасности, сформулированным ГАН. Если это так, то сама конверсия, как ожидается, займет 12-16 месяцев.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Дмитриев А.М., "Конструкция активной зоны реактора для осуществления конверсии уран-графитовых промышленных реакторов: результаты вычислений основных параметров", Отчет о НИР, Сибирский химкомбинат (1992), стр.12.
2. Катков В.П., Андрущенко и др., "Измерение эффективности поглощающих стержней РБМК при разных составах на критичной установке УГ", отчет о НИР, ИАЭ, НИКИЕТ, (1992), стр.23.
3. Дмитриев А.М. и Хренников Н.Н., "Конверсия российских промышленных реакторов: альтернативная конструкция активной зоны реактора", отчет о НИР, Госатомнадзор РФ, (март 1996), стр.23.

#### КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ АЛЕКСАНДРА ДМИТРИЕВА "КОНВЕРСИЯ РОССИЙСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛУТОНИЕВЫХ РЕАКТОРОВ: ПЕРЕХОД КО ВТОРОЙ ФАЗЕ"

Даррелл Ньюман

Автор - менеджер проекта по конверсии активной зоны в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории (ТСЗНЛ).

В этой статье приводятся соответствующие новые данные по истории, эволюции и состоянию проекта по конверсии активной зоны российских промышленных плутониевых реакторов, появившиеся после статьи Александра Дмитриева [1], вышедшей в 1995 г. За это время Российская Федерация решила включить эти промышленные реакторы в сферу ядерного контроля со стороны Госатомнадзора (ГАН) над проектированием, переделками электростанций, производством топлива и работой реакторов, связанными с конверсией активной зоны. ГАН обеспечит надзор за гражданской ядерной безопасностью промышленных реакторов, которые в настоящее время принадлежат Минатому и управляются им. Как заместитель председателя ГАН, ответственный за анализ и сертификацию проекта конверсии активной зоны, ведущегося группой Минатома (во главе с Курчатовским институтом), Александр Дмитриев разрабатывает требования к ядерной безопасности для конверсии активной зоны. Его статья обеспечивает потенциальное проникновение в суть тех аспектов конверсии, которые Дмитриев определил в качестве важных.

Описанная Дмитриевым схема загрузки топлива была разработана на Сибирском химическом комбинате в 1992 г., где находятся два из трех промышленных реакторов. До назначения на нынешнюю должность в ГАН

Дмитриев отвечал за технические вопросы и работу промышленных реакторов на Сибирском химкомбинате, включая изучение осуществимости схемы загрузки кольцевого топлива с внутренним поглотителем. Опыт работы с промышленными реакторами обеспечил ему понимание и живой интерес к развитию процесса конверсии активной зоны. Когда совместная российско-американская группа по изучению осуществимости технических вариантов конверсии активной группы завершила свою работу в конце 1995 г., в качестве базовой концепции проекта была выбрана схема загрузки канала с чередованием топливных и поглощающих элементов. Конструктивные особенности схемы загрузки топлива, разработанной для Минатома с использованием чередующихся цилиндрических и поглощающих элементов в канале, не обсуждаются в статье Дмитриева, потому что проектная документация еще не была направлена в ГАН для просмотра.

Приведенные Дмитриевым примеры схем загрузки топлива, которые он проанализировал, показывают, как трудно удовлетворить более строгим требованиям безопасности, намечаемым для новых промышленных реакторов, когда предлагаются системы подстройки и изменения в схеме топлива для реакторов, находящихся сейчас в работе. В 1988 г. Минатом представит в ГАН для просмотра и утверждения окончательный доклад по анализу безопасности с вероятностной оценкой риска для конверсии активной зоны. Изменения систем реактора не начнутся до получения сертификата ГАН на конструкцию и анализа безопасности для конверсии активной зоны. Статья Дмитриева до известной степени необычна с точки зрения его нынешнего положения в ГАН, поскольку он поднимает технические вопросы, относящиеся к проектной группе Минатома, до того, как детали проекта и вспомогательного анализа были представлены в ГАН для просмотра.

В статье отмечаются два технических ограничения на конверсию активной зоны. Первое связано с правильным предсказанием поведения реактора, а второе - это требования на безопасность, связанные с реактивностью и распределением мощности. Ограничения институционального и экономического характера на конверсию активной зоны также должны быть приняты во внимание для успешного завершения проекта. Поскольку эти реакторы были введены в действие в начале 60-х гг., они приближаются к последним 10-12 годам полезной жизни. Если процесс конверсии активной зоны нельзя осуществить в ближайшем будущем, где-то в районе 2000 г., то рентабельность конверсии ставится под сомнение. Дмитриев указывает, что проектирование и анализ безопасности займут 1.5-2 года, а полный цикл испытаний топлива и получение сертификата потребует 3-4 лет. Он приходит к правильному выводу о необходимости воспользоваться существующей конструкцией топлива в преобразованной активной зоне, чтобы не выйти из графика.

Единственные две конструкции топлива, имеющие опыт использования в промышленных реакторах, что делает их кандидатами для конверсии активной зоны, основаны на оксиде урана в алюминиевой матрице, помещенными в алюминиевый кожух. У одной цилиндрическая геометрия, у другой кольцевая. Даже хотя кольцевое топливо не применялось в действующих реакторах, автор предпочитает его, поскольку оно обладает возможностью компенсировать рост отравления продуктами деления и манипулировать распределением мощности реактора и реактивности. Распределение нейтронного потока в активной зоне реактора можно менять вручную путем передвижения боросодержащей стали внутри кольцеобразного топлива.

Даже при сочетании бора и гадолиния, используемых в конвертированной активной зоне в качестве поглотителей, расчеты ТСЗНЛ показывают, что изменения реактивности за два года жизни активной зоны в режиме одноразовой загрузки превышают возможности существующих систем с управляющими стержнями. Это указывает на необходимость неавтоматического управления другими поглотителями в соответствии с предложением

автора. Кроме того, как отмечает автор при критике базовой концепции проекта, такое управление подвержено ошибкам, вызываемым незагрузкой поглотителя.

Фундаментальная трудность накладывается желанием работать в режиме однократной загрузки активной зоны. Этот режим характерен для работы российских реакторов, когда активная зона загружается свежим топливом и работает до двух лет без никаких замен топлива. Трудность появляется по той причине, что топливо и поглотители выгорают с разными скоростями. Изменения реактивности вызывают все проблемы, которые перечисляет автор: отсутствие запаса при остановке работы, плохое распределение мощности, большие изменения реактивности при переходе от холодных к горячим условиям и т.д.

На основе текущего режима работы российских промышленных реакторов, а также международного опыта работы с другими графитовыми реакторами и с коммерческими водяными реакторами простейшее решение состоит в регулярной замене топлива по частям. Например, треть реакторного топлива может заменяться каждые восемь месяцев. Выгорание топлива можно оптимизировать с целью повышения экономичности работы реактора. В сочетании с выбором выгораемого поглотителя реактивность активной зоны можно поддерживать почти на постоянном уровне. Сужение диапазона изменений реактивности увеличит безопасность работы реактора при сохранении отрицательного пустотного коэффициента реактивности.

Предварительные расчетные оценки ТСЗНЛ указывают, что окажется возможным сохранить изменения

реактивности в пределах 3% за восьмимесячный период. При 9%-ном диапазоне возможностей системы быстрого реагирования, 3%-ном изменении реактивности от отравления продуктами деления и 2.5%-ном изменении реактивности при переходе от холодных к горячим условиям конечный запас будет поддерживаться на уровне более 3.5% в течение всего времени без неавтоматического управления, предлагаемого автором.

В заключение скажем, что все поднятые Дмитриевым проблемы, связанные с реактивностью, справедливы и они озадачат проектную группу Минатома, как удовлетворить требованиям ГАН по работе и безопасности реактора. Автор предложил экстраординарные меры для компенсации больших изменений реактивности путем конструкции топлива и операций, новых для таких реакторов. Если можно будет избавиться от конструктивных ограничений, характерных для работы в режиме однократной загрузки активной зоны, то схема периодических загрузок и разгрузок топлива в разных частях активной зоны может удовлетворить требованиям экономичности и безопасности при одновременном использовании уже проверенного топлива для конверсии активной зоны в таких реакторах.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. А.М. Дмитриев, "Конверсия российских промышленных плутониевых реакторов для использования в гражданских целях", журнал "Наука и всеобщая безопасность", т.5, вып.1, (1995), стр.20-23.