

КОНВЕРСИЯ РОССИЙСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЛУТОНИЕВЫХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГРАЖДАНСКИХ ЦЕЛЯХ

Александр М. Дмитриев

Автор - начальник управления Госатомнадзора (Российского государственного комитета по радиационной безопасности), Москва.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЛУТОНИЕВЫЕ РЕАКТОРЫ В РОССИИ

Первый советский реактор, спроектированный для производства плутония оружейного качества, вступил в действие в июне 1948 г. Это был одноцелевой реактор с графитовым замедлителем и незамкнутым циклом водяного охлаждения: вода при температуре около 100°C сбрасывалась прямо в озеро. В дальнейшем было построено еще несколько реакторов такого типа.

В 1958 г. в Томске-7 начал работать реактор нового типа. Промышленный реактор с графитовым замедлителем был создан для работы в режиме двойного назначения, чтобы производить как плутоний оружейного качества, так и тепло и электроэнергию для местных жителей. Первый контур охлаждения реактора был замкнут, а на реакторной электростанции были установлены теплообменники парогенераторы и турбины для выработки электрической энергии. В 1961, 1964 и 1965 гг. вступили в строй еще четыре реактора двойного назначения - три в Томске-7 и один в Красноярске-26. Вскоре после ввода в действие на реакторе в Красноярске-26 была установлена система для передачи низкотемпературного тепла (т.е. нагретой воды, прошедшей через парогенераторы), чтобы удовлетворить потребности в отоплении. (Низкотемпературное тепло уже использовалось какое-то время в помещениях промышленных предприятий на площадках Томск-7 и Красноярск-26.) Сначала снабжение теплом было достаточно ограничено, но к 1968 г. было принято решение обогревать районы города Томска теплом, сбрасываемым от реакторов. В 1973 г. было завершено сооружение тепловой магистрали длиной в 17 км. В нее входили четыре трубопровода метрового диаметра, поддерживающие давление насосы и оборудование для обессоливания воды. По двум трубам подавалась горячая вода, а по двум другим она возвращалась обратно. Два промышленных реактора в Томске-7 (крупнейшие в России) имели общую систему теплообменников.

Эта уникальная установка успешно функционировала в Сибири с 1973 г. С этого времени у многих жителей Томска появились огороды, а в городе есть даже крупная оранжерея - и все они снабжаются отработанным теплом. На случай аварии была построена электростанция на мазуте, но ею никогда не пользовались в этом режиме, поскольку в зимнее время оба реактора никогда не останавливались одновременно.

Первый и единственный американский реактор двойного назначения был построен в Ханфорде в 1963 г. Этот реактор (названный N-реактором) был остановлен для усовершенствования в январе 1987 г. после аварии в Чернобыле, но с того времени его работа не возобновлялась.

Американский N-реактор и российские реакторы двойного назначения обладали тем сходством, что это были реакторы канального типа с графитовым замедлителем и с охлаждением водой под давлением, предназначенные для производства плутония оружейного качества. Во всех этих реакторах отработанный тепло использовалось для выработки электроэнергии. (Как уже указывалось, электростанции на российских ядерных реакторах поставляют

горячую воду для централизованного теплоснабжения населения.)

Между американскими российскими реакторами двойного назначения существуют заметные различия. В российских реакторах топливные каналы и оболочки твэлов сделаны из алюминия. Эти компоненты сохраняют прочность до температуры 300°C и плавятся при 650°C. Топливные каналы и оболочки твэлов у N-реактора сделаны из циркониевых сплавов, которые плавятся при 1700°C. Другое отличие состоит в том, что в конструкции графитовой кладки N-реактора предусмотрены специальные каналы для сброса воды и пара в случае утечек или прорывов в топливных каналах и для предотвращения тем самым роста давления внутри графитовой кладки реактора. В российских реакторах нет эффективных мер для удаления пара и воды из графитовой кладки. Таким образом, российские промышленные реакторы плохо оборудованы для того, чтобы справиться с утечкой теплоносителя из каналов. Опасность усугубляется и тем, что топливные каналы изготовлены из очень слабого материала, теряющего прочность даже при минимальном перегреве. Покрывающая графитовую кладку крышка реактора может оказаться сдвинутой с места, если давление превысит 2,5 атм, даже если принять во внимание, что полный вес ее превосходит 2000 тонн. Если крышка сдвинется, продукты деления смогут проникнуть в атмосферу. При чернобыльской аварии крышка четвертого блока на чернобыльской ядерной электростанции оказалась сдвинутой при возрастании давления, возникшем от прорванных топливных каналов и результате чего заметные количества урана, плутония и продуктов деления попали в атмосферу.

В то время как N-реактор обладает отрицательным паровым (паросодержание теплоносителя) коэффициентом реактивности без использования выгораемых поглотителей нейтронов в топливе из метилциклопентанового урана в российских промышленных реакторах, напротив, коэффициент реактивности становится положительным при потере теплоносителя. Если в системе теплоносителя появится крупная трещина, или дыра, произойдет нарастание мощности и увеличение реактивности по мере того, как выкипает вода и перегревается топливо с последующим быстрым возрастанием давления в шахте реактора. Впрочем, скорость такого скачка мощности будет значительно меньше, чем во время аварии в Чернобыле, поскольку значение парового коэффициента реактивности в 3 - 5 раз меньше, чем для реактора РМБК при аварии в Чернобыле.

Кроме того, промышленные реакторы с самого начала были спроектированы так, чтобы заглушаться гораздо скорее (и в этом их преимущество перед РМБК). Время ввода "быстрых" стержней составляет 4,5 - 5 с в промышленных реакторах по сравнению с 15 - 18 с для чернобыльского реактора. Система быстрых стержней была еще более усилена в период 1990-1991 гг., когда группа из 30 аварийных стержней в каждом реакторе была снабжена специальными улучшенными сервоприводами. Время ввода поглощающих стержней для этой группы сократилось до 2,2 - 2,5 с.

В худшем сценарии - внезапном разрыве всего трубопровода с теплоносителем произошел бы только короткий и небольшой скачок мощности. При

углом быстро была бы введена в действие резервная аварийная система для подавления цепной реакции в активной зоне. Ядерные специалисты утверждают, что реакторы с положительной реактивностью должны иметь две независимые системы аварийной остановки. Предпочтение отдается автоматическим системам, которым не нужны промежуточные измерения или определения мест сброса стержней, и которые не зависят от внешних систем измерительной аппаратуры и энергоснабжения.

В 1989-1991 гг. автор спроектировал такую автоматическую аварийную систему и руководил ее испытаниями и установкой на промышленных реакторах в Томске. Теоретически система делает невозможным внезапный скачок мощности даже при серьезной аварии, например, при разрыве в коллекторе контура теплоносителя. Путем загрузки блоков с соединениями бора в топливные каналы (для пассивного контроля над реактивностью) становится возможным предотвратить скачки мощности. При аварии соединения бора переносятся вместе с водой и паром в активную зону и подавляют нейтронную цепную реакцию. Улучшение контроля за реактивностью путем замены топливных стержней на новые управляющие стержни очень затруднительно, поскольку это потребовало бы крупных изменений в системах энергообеспечения и охлаждения контрольных стержней. В качестве альтернативы проблему управления реактивностью можно было бы решить путем подходящего выбора степени обогащения топлива, содержания урана, продолжительности топливного цикла и схемы перезарядки топлива.

Для предотвращения скачков мощности была установлена система безопасности автоматического реанимирования, запускающая отдельную маломощную группу из 30 быстрых стержней. Даже при этом в случае аварии с потерей теплоносителя ее последствия могли бы стать очень суровыми. Если серьезно разрушится первый контур, закипит и уйдет из активной зоны охлаждающая вода. Поскольку нет аварийной системы впуска воды под высоким давлением, вода из аварийных баков не дошла бы до центральных частей активной зоны, которые оказались бы защищенными паром. Рабочая температура графита близка к точке плавления алюминиевых сплавов и поэтому могла бы произойти следующая последовательность событий:

- 1) потеря теплоносителя благодаря разрушению топливных каналов;
- 2) попадание оставшегося теплоносителя на раскаленную графитовую кладку;
- 3) увеличение давления в корпусе реактора;
- 4) смещение крышки реактора;
- 5) в конце концов, плавление топлива;
- 6) выброс радиоактивных веществ в атмосферу.

Такие события могли бы произойти не только после разрушения коллектора давления, но и в результате менее серьезных аварий, например, при разрушении дополнительных коллекторов или крупного разрыва в любой секции первого контура. При этом может потребоваться больше времени для того, чтобы произошли такие события, но конечный результат мог бы оказаться аналогичным.

Российское управление по ядерному регулированию - Государственный комитет по радиационной безопасности или Госатомнадзор, не может из-за потенциальной катастрофы разрешить длительную работу этих реакторов без обширных улучшений и переделок. Даже хотя за последние 5 - 6 лет предпринимались крупные усилия для предотвращения скачков мощности в случае серьезных разрушений в первом контуре реактора, еще остаются нерешенные вопросы безопасности реакторов.

Тем не менее, российские эксперты пришли к заключению, что основные структуры реакторов - измерительное оборудование, электрическое оборудование, теплообменники, парогенераторы, турби-

ны и градирни могли бы свободно проработать еще 10 - 15 лет. Наиболее повреждена графитовая сборка в районе активной зоны, где велик флюенс нейтронов, вызывающих дефекты. Графитовая сборка покорибилась, что делает проблематичным удаление и установку топливных каналов. В связи с этой проблемой в колоннах закреплялись графитовые блоки. Графитовая сборка усиливается путем растяжения каналов и установки специальных балок. Нет указаний на вторичное разбухание графита. Поэтому, как считают российские эксперты, вероятность повреждения внутренних компонентов реактора, что могло бы привести к катастрофическим последствиям, мала. Госатомнадзор согласен с этим заключением.

Поэтому возможно, что реакторы будут продолжать поставлять тепло и горячую воду в город Томск. Действительно, сооружение системы обычного теплоснабжения - теплоцентрали № 3, идет очень медленно. Более того, жители Томска могли бы предпочесть систему теплоснабжения от реактора, заменившую свыше двухсот небольших угольных котельных в жилых районах Томска. Немногие в Томске захотят жить рядом с крупной теплоцентралей, сжигающей уголь низкого качества и оборудованной неподходящими устройствами для очистки газов.

К сожалению, работоспособность системы теплоснабжения недавно изменилась к худшему. Поскольку установка для обессоливания не смогла обессолить достаточно воды для нагревания, чтобы удовлетворить городским потребностям, часть воды не очищалась. В результате на внутренних поверхностях трубопровода образовался толстый слой минеральных отложений. Заметно возросло гидравлическое сопротивление трубопровода и поступление воды резко сократилось, как и количество поставляемого тепла.

КОНВЕРСИЯ ПРОИЗВОДИЩИХ ПЛУТОНИЙ РЕАКТОРОВ

Начиная с 1988 г. предпринимались усилия, чтобы добиться двух целей: остановить производство плутония оружейного качества без нарушения снабжения теплом и электроэнергией нуждающихся в этом городов и разработать возможность для использования расщепляющихся материалов, тринейтронных из оружий, в качестве топлива для промышленных реакторов.

При переделке реакторов следовало бы пожелать следующими:

1) При аварии с потерей теплоносителя паровой коэффициент реактивности должен оставаться существенно отрицательным, чтобы перекрыть все практические неопределенности.

2) Следовало бы использовать только те виды топлива, которые уже испытывались в промышленных реакторах с графитовым замедлителем. Должно быть хорошо налажено производство топлива, а уровень производительности должен обеспечивать его постоянное наличие.

3) Следовало бы избегать крупных усовершенствований структурных элементов реактора и систем управления и безопасности. (Например, поскольку каналы с управляющими стержнями имеют отдельную систему охлаждения, установка новых управляющих стержней привела бы к модернизации системы охлаждения и стала бы дорогой, сложной и требующей много времени.)

4) Дополнительные защитные системы должны быть простыми и содержать по возможности как пассивные, так и активные устройства.

5) Всегда следовало бы так установить распределение плотности энерговыделения в активной зоне, чтобы основная часть теплоносителя, выходящего из реактора, была достаточно горячей для удовлетворения требованиям теплоснабжения и энергоснабжения. Производимые в кампании реактора

операции по перезагрузке топлива не должны бы приводить к изменениям этих рабочих параметров.

6) Испытание нового режима работы не должно требовать крупных дорогих или длительных экспериментов.

7) В активной зоне можно было бы установить экспериментальные секции, а переход к новой компоновке активной зоны и новому рабочему режиму следовало бы проводить постепенно без длительных перерывов.

8) Аварийные системы реактора должны смягчать последствия, если произойдут опасные аварии.

9) Переработка облученных топливных стержней должна производиться на существующих промышленных предприятиях и основываться на проверенных технологиях. Если переработка не планируется, надо бы свести к минимуму требования к хранению и применять недорогие методы.

Технические аспекты перестройки реакторов обсуждались с сотрудниками Тихоокеанских северо-западных лабораторий (PNL). В одном из вариантов, оцененном в PNL, использовались твэлы, видоизмененные по отношению к твэлам N-реактора. N-реактор запитывался металлическим низкообогащенным ураном с делятельными добавками, помещенным в оболочку из сплавов циркония. Топливо предназначалось для длительного "мокрого" хранения без переработки. Много тонн такого отработанного топлива хранится в бассейнах на территории США.

Эксперты обеих сторон полагают, что если ввести в топливо для российских промышленных реакторов поглотитель нейтронов с большим резонансом в области энергии ниже одного электрон-вольта (например, эрбий) можно было бы поддерживать отрицательное значение парового коэффициента реактивности. Металлическое топливо N-реактора продемонстрировало возможность стабильно работать до уровня выгорания топлива 10 000 МВт-д/т, что по меньшей мере в 10 раз выше, чем в российских промышленных реакторах. Использование в топливе эрбия предлагает решение одной из самых трудных проблем при перестройке промышленных реакторов в России - компенсации реактивности.

Российские эксперты постепенно пришли к убеждению, что в качестве топлива для реактора следовало бы использовать высокообогащенный уран в виде оксида, распределенного в алюминиевой матрице. Такое топливо хорошо выдерживает высокие уровни выгорания без каких-либо заметных изменений формы. Существует обширный опыт работы с таким топливом на многих различных реакторах. После охлаждения переработка не представляет проблемы за исключением хранения высокоактивного плутония реакторного качества. Количество плутония, накопившегося в урановом топливе (с обогащением в пределах 20-90%) в процессе его облучения оказывается достаточно умеренным.

Единственное слабое место этого топлива связано с очень низкой температурой его плавления, близкой к температуре плавления алюминия. Впрочем, если видоизменить некоторые структурные компоненты в активной зоне, топливо могло бы оказаться лучше того, которое производится из металлического урана. Более того, такие коррекции могли бы смягчить последствия аварии.

Использование топлива с высоким обогащением имело бы значительные преимущества. Сократилась бы дополнительная обработка расплающихся материалов от оружия во время производства топлива. Кроме того, было бы сведено к минимуму производство плутония в реакторах, а в произведенном плутонии была бы более высокая доля Pu-240.

Для обеспечения отрицательных значений коэффициента реактивности применение высокообогащенного топлива должно компенсироваться использованием сильных поглотителей. В отличие от американского подхода с применением эрбия, требую-

щего однородного перемешивания с топливом, возможно неоднородное перемешивание поглотителя. Бор в составе стальных легированных и структурных элементов может быть таким поглотителем. Простейшее решение заключается в придании борным соединениям формы блоков, аналогичных цилиндрическим топливным элементам. Некоторые из таких блоков могут быть загружаться в специальные каналы и извлекаться по мере необходимости для компенсации потери реактивности при выгорании топлива. Другие могут помещаться в активную зону для обеспечения отрицательных значений реактивности в случае аварии с потерей охладителя.

Такая компоновка элементов поглотителя и топлива вызывает ряд проблем. Применение отдельных каналов для блоков поглотителя, компенсирующих недостаточность параметров системы контроля и безопасности приводит к потере общей мощности реактора и, что более важно, к уменьшению температуры выходящего охладителя. (Производство энергии в блоках поглотителя намного меньше, чем в топливе.) Уменьшение температуры на 30 - 40 C драматически уменьшает производство электроэнергии и тепла, так что ограничение числа содержащих поглотители каналов принимает критическое значение.

Улучшение утилизации тепла позволит довести допустимый период эксплуатации топливных элементов до 2 - 3 лет. При высоком обогащении возникает проблема высокого выгорания топлива в центре активной зоны. Оно приводит к сильному уплощению функции осевого распределения мощности, вызывая "прогибание" направленного вовнутрь потока в центре активной зоны. При этом сложными становятся все проблемы: кепионовая стабильность, запас температуры до точки кипения теплоносителя на выходе из канала, правильный контроль за распределением тепловыделения с учетом небольшого числа точек слежения за нейтронным распределением.

Хотя существуют разные идеи по конверсии, многое остается сделать. Первым шагом стала бы замена труб из алюминиевых сплавов в топливных каналах на трубы из циркония. Это значительно смягчило бы последствия потенциальной аварии. Топливные каналы из циркония достаточно ограничительно использовались в реакторах с графитовым замедлителем и в России недостаточно экспертов и предприятий для изготовления таких каналов. Замена могла бы проводиться постепенно без длительных перерывов. Такие трубы должны бы сохраняться до окончательного глушения реактора через 10-15 лет.

Конструкция твэлов является другой практической проблемой. В настоящее время наилучшим кажется топливо из высокообогащенного урана в виде оксида урана, размещенного в алюминиевой матрице. Конструкция топлива должна позволить производить одновременную загрузку в него нейтронного поглотителя, так чтобы поглотитель и топливо помещались в один и тот же топливный канал и находились близко друг к другу. Это принесло бы ряд выгод. Использование поглощающих элементов для выравнивания профиля размножения нейтронов позволило бы более широко использовать систему управления и безопасности для контроля за аварией и аварийного глушения реактора. Это позволило бы избежать уменьшения температуры теплоносителя на выходе из реактора (что важно в связи с ухудшением теплопритока, идущего от реактора к городу).

Наконец, приведенная выше конструкция топлива позволила бы использовать плутоний и тем самым сократить запасы плутония. Производство топлива на основе оксида плутония не потребовало бы никакой сложной металлургической обработки и могло бы быть быстро осуществлено на предприятиях в Томске-7. (По-видимому, нет альтернатив этим

предприятиям. В настоящее время топливо для промышленных реакторов производится в Новосибирске. Законы по охране природы и здравый смысл сильно затруднили бы производство плутониевого топлива в Новосибирске.) Хотя использование освоенного на плутонии топлива затруднено, промышленные реакторы могли бы хорошо подойти для этой программы, а процесс сжигания плутония можно было бы отработать за 2 - 3 года. Это единственный доступный для России метод, чтобы сжигать плутоний в ближайшем будущем.

В целом переделка российских реакторов двойного назначения является главным образом скорее общественной, нежели технической проблемой. Хотя эксперты, в число которых входит и автор, изучают эту проблему с 1989 г., фактически достигнут очень малый прогресс, поскольку Минатом России не взял на себя обязательство изучить и решить проблему конверсии. К счастью, последние политические события могли бы облегчить решение этой ситуации. В России есть множество технических решений, но содействие и поддержка со стороны США также приветствовались бы в самой большой степени.

ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКЦИИ: Мы попросили Даррелла Ньюмена из PNL в Баттлере прокомментировать статью Дмитриева. С согласия автора ниже приведены отрывки из этого комментария.

Дмитриев предоставил своевременную и авторитетную точку зрения на безопасность российских реакторов для производства плутония. Проведенная недавно и описанная в статье Дмитриева модернизация системы защиты не дает полной гарантии безопасности. Конечно, скачок мощности не приведет к поднятию крышки реактора, но разрушение трубопровода или коллектора все еще заставят расплавиться топливо в активной зоне. Хотя и имеется запасной источник теплоносителя под небольшим давлением (аварийные баки с водой; в управляющие стержни имеют отдельный от топливных каналов контур охлаждения), которого может хватить для отвода тепла от радиоактивного распада, любая авария (поднятие крышки или разрушение активной зоны) могла бы иметь серьезные последствия.

Девять целей конверсии дают верное представление о практических аспектах переделок. Реактор и оборудование для технологических процессов - вот все, с чем придется иметь дело; невозможны никакие дорогие усовершенствования активной зоны или вспомогательного оборудования. Оборудование и измерительные приборы не являются предметами для крупных перемен и я согласен с семью из девяти целей. Цель 5 выглядит так: "Всегда следовало бы так установить распределение плотности энерговыделения в активной зоне, чтобы основная часть выходящего из реактора теплоносителя была достаточно горячей для удовлетворения требованиям тепло- и электроснабжения. Производимые в период кампании реактора операции по перезагрузке топлива не должны приводить к изменениям этих рабочих параметров." Дмитриев рекомендует, чтобы теплоноситель, выходящий из активной зоны, оставался бы на существующем температурном уровне. Однако, может оказаться, что последнее решение приведет к чистому уменьшению тепловыделения в результате распределения мощности в конце рабочего периода конкретной партии топлива. Все еще можно будет реализовать отопление жилья, если построить параллельный теплопровод до города. (Это нарушает правило " без дорогих усовершенствований", но является простым техническим решением, которое не следовало бы отбрасывать.)

Неясно, как русские добьются цели 8: "Аварийные системы реактора должны смягчать последствия, если произойдут серьезные аварии." Топливные каналы и само топливо должны быть значительно более устойчивыми по сравнению с существующими конструкциями. Мне придется сделать некоторые допущения:

- Алюминиевым каналам придется уйти. Я согласен с автором, что надо идти по пути циркония и он должен сохраняться до конца кампании реактора.

- Топливо должно быть способным выдержать суровый переход - сброс теплоносителя с последующим заполнением от источника под низким давлением без значительных повреждений. Это может наложить некоторые рабочие ограничения в виде тепловых пределов.

Дмитриев не обращает ни к каким тепловым пределам за исключением предотвращения кипения на выходе. Как минимум, новое топливо не должно ни в какой мере быть менее чувствительным к авариям, чем современное топливо.

При сравнении всех предложенных типов топлива Дмитриев обращает внимание на устранение положительного парового коэффициента и прекращение производства плутония оружейного качества. После всех описаний однородных и неоднородных поглотителей его выбор топлива, как кажется, остановился на высокообогащенном уране в алюминиевой матрице. Концепция выгораемого поглотителя такая же, как концепция PNL. Сотрудники PNL провели вычисления и определили оптимальное соотношение между топливом и поглотителем.

Обращаясь к недостаткам PNL-топлива, Дмитриев утверждает, что большую заботу вызывает прочность системы управляющих стержней. Как он утверждает, эту проблему можно было бы решить путем "подходящего выбора степени обогащения топлива, содержания эрбия, продолжительности топливного цикла и схемы перезагрузки топлива". Анализ PNL указывает, что прочности стержней еще хватает и что это не является проблемой.

Прекращение производства плутония не кажется первоочередной задачей: безопасность переделки должна быть столь же, если не более важной. После любой конверсии выдержка топлива возрастает в 10 раз или более. Это означает, что накопление продуктов деления также увеличивается в 10 раз. При любой выдержке газовые продукты деления будут находиться при равновесной концентрации. Любая авария с расплавлением топлива оказалась бы более серьезной с возможным десятикратным выделением продуктов деления.

Если представить, что на одном из этих реакторов могла бы произойти авария до завершения их кампании наилучшим топливом может оказаться то, которое выделяет меньше всего летучих продуктов деления, даже если оно незначительно уменьшает производство плутония.

С точки зрения выбора топлива на замену топливо в алюминиевой матрице может оказаться в аварийных условиях хуже топлива из металлического урана. Топливо из металлического урана имеет хорошие переходные характеристики и более высокую температуру плавления. Когда я смотрю на это с практической точки зрения работы реактора, надо рассмотреть аварию с потерей теплоносителя. Работа реактора при пониженной мощности может стать решением для уменьшения риска. Сопутствующий результат состоит в том, что может оказаться нужным пойти на какие-то уступки в отношении полной мощности из-за тепловых пределов, что позволит топливу пережить аварию с потерей теплоносителя.

Даррелл Ф.Ньюмен