



NUCLEAR CONTROL
INSTITUTE

1000 CONNECTICUT AVE NW SUITE 804 WASHINGTON DC 20036 202•822•8444 FAX 202•452•0892

E-mail nci@access.digex.net Web <http://www.nci.org>

**РИСКИ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УРАНОВО-ПЛУТОНИЕВОГО (МОКС) ТОПЛИВА**

Обзорная статья

lyman@nci.org

Доктор Эдвин С. Лайман

Директор по научной работе Института Ядерного Контроля (США)

20 мая 2000 г.

Введение

В настоящее время Соединенные Штаты Америки и Россия находятся на завершающей стадии подготовки договора, в рамках которого будет создана система для удаления плутония, извлекаемого из ядерного оружия, причём объём перерабатываемого плутония составит около 34 тонн от каждой из стран. Согласно информации из правительственных источников США договор подразумевает, что 25 тонн оружейного плутония в США и 34 тонны в России будут использоваться для изготовления ураново-плутониевого (МОКС) топлива и сжигаться в промышленных ядерных реакторах. При этом МОКС заменит долю низкообогащенного урана, обычно используемого в качестве реакторного топлива. Оставшаяся часть оружейного плутония в США (9 тонн) будет присоединена к высокоактивным ядерным отходам после заключения в керамическую матрицу посредством технологического процесса, получившего название "иммобилизация".

В соответствии с этим договором в США и России должна будет создана инфраструктура, способная на начальном этапе перерабатывать по 2 тонны оружейного плутония в год. Поскольку Россия хочет сохранить изотопный состав своего оружейного плутония в тайне, около 12% реакторного плутония будет добавлено к оружейному до его включения в МОКС-топливо, при этом по условиям договора его объём достигнет 37 тонн. Таким образом, России понадобятся мощности по переработке около 2.3 тонн плутония в год.

Инфраструктура удаления плутония будет включать три основные составляющие: завод по переработке плутониевой начинки боеголовок в оксидный порошок, производство МОКС-топлива и установку иммобилизации. Помимо этого, вероятно, потребуются модификации ядерных реакторов, планируемых для использования МОКС-топлива.

Признавая, что в будущем ещё большее количество оружейного плутония будет выводиться из военной программы, договор будет предусматривать дальнейшее наращивание мощностей по его удалению до 4 тонн в год в каждой из стран, соответствующий план будет разработан в течение года. По информации, предоставленной Лорой Холгейт, директором Отдела удаления расщепляющихся материалов Министерства энергетики США, оба правительства надеются, что план по наращиванию мощностей будет своевременно разработан, немедленно принят к исполнению, и начальная стадия 2 т в год будет быстро пройдена. Источники финансирования выполнения этого договора в России, которое по оценкам должно составлять почти два миллиарда долларов, пока не определены, но в конечном итоге оно, несомненно, будет предоставлено США и другими странами Запада.

На первой стадии выполнения программы США будут использовать 4 водо-водяных реактора типа PWR - два на АЭС МакГвайр в Северной Каролине, ещё два - на АЭС Катаба в Южной Каролине. Обе станции принадлежат частной энергетической компании Дьюк Пауэр. Американская Комиссия по атомному надзору должна будет внести изменения в их лицензии на эксплуатацию для того, чтобы они могли использовать МОКС-топливо. Другая энергетическая компания, Вирджиния Пауэр, первоначально находившаяся в структуре частного консорциума, получившего заказ на выполнение программы по МОКС-топливу, вышла из него в марте этого года, объяснив, что участие в этой программе стало для неё экономически нецелесообразным.

Россия намерена использовать до 7 реакторов ВВЭР-1000, находящихся в эксплуатации (четыре в Балаково, два - на Калининской АЭС и один в Нововоронеже), аналогичных западным PWR, а также реактор на быстрых нейтронах БН-600 Белоярской АЭС. Для переработки одного и того же объёма МОКС-топлива России понадобится больше реакторов, чем США, т.к. она планирует использовать меньшее процентное содержание МОКС-топлива в своих реакторах. Для того, чтобы увеличить темпы переработки плутония в форме МОКС-топлива в рамках будущего договора России потребуются либо увеличение его содержания в реакторах, либо экспорт этого топлива в другие страны, например на Украину, в Западную Европу и Канаду. Альтернативой, предпочтительной для Российского министерства атомной энергии (Минатом), является строительство нового поколения реакторов на быстрых нейтронах (БН-800), но США продолжают относиться к такому решению отрицательно, т.к. оно чревато рисками распространения.

Строительство объектов иммобилизации оружейного плутония является альтернативным решением вопроса ускорения темпов удаления плутония, оно же является и более безопасным вариантом. Однако Минатом выступает категорически против такого подхода ввиду своей порочной убежденности в том, что оружейный плутоний представляет собой материальную ценность, которой "не стоит разбрасываться". Данный отчет предоставит доказательства того, что упорство Минатома в использовании МОКС-топлива может привести к катастрофическим последствиям в России и Восточной Европе.

Риски при использовании МОКС-топлива в западных реакторах PWR

Замена низкообогащенного урана МОКС-топливом в водо-водяных реакторах порождает серьёзные риски для безопасности, которые не получили пока должной оценки ни в США, ни в России. Эти риски, возникающие при применении МОКС-топлива, включающего как оружейный, так и реакторный плутоний, можно объединить в две категории.

Первая: при использовании МОКС может возрасти вероятность возникновения тяжелой аварии. В принципе, введение МОКС-топлива в водо-водяные реакторы снижает эффективность материалов, поглощающих нейтроны в активной зоне, таких как стержни управления и бор, растворенный в теплоносителе. Соответственно затрудняется управление ядерными реакциями в активной зоне и снижается коэффициент безопасности при останове реактора в случае возникновения проблем. Наряду с этим, "доля запаздывающих нейтронов" - параметр, определяющий быстроту реагирования уровня мощности реактора на изменения в условиях, имеет худшие показатели при использовании МОКС-топлива. Всё это означает, что оператор будет не только хуже контролировать переходные состояния, но и иметь меньше времени на корректирующие действия.

Некоторые компенсационные меры могут быть приняты по улучшению управления реактором, например, увеличение количества стержней управления и содержания бора в теплоносителе. Но это лишь частичное решение проблемы, которое, в свою очередь, может породить другие осложнения.

Вторая: последствия тяжелой аварии (с точки зрения смертности от раковых заболеваний и немедленных смертей от лучевой болезни) при потере герметичности контейнента¹ или его неэффективности (например, при разрыве трубы парогенератора) будут гораздо более серьёзными при наличии МОКС-топлива в активной зоне. Причиной этого является то, что МОКС имеет в своём составе гораздо более высокую концентрацию актинидов, включая изотопы плутония, америция и кюрия. Большинство из них излучает альфа-частицы, которые чрезвычайно опасны при вдыхании и попадании внутрь организма.

В одном из последних отчетов Института ядерного контроля (NCI) был проанализирован ряд вопросов, связанных с использованием оружейного плутония в американских реакторах PWR. ^[1] Приведенные расчеты показывают, что в случае тяжелой аварии масштаба Чернобыля при разрушении или потере герметичности контейнента PWR, в активной зоне которого находится 40% оружейного плутония, количество смертей от раковых заболеваний будет на 25% больше, чем при такой же аварии на реакторе PWR, работающем только на урановом топливе. Этим процентам соответствуют дополнительные сотни тысяч смертей от рака.

В отчете также приводятся примеры сугубо отрицательного воздействия МОКС на эксплуатационные условия PWR. Приведем три из них:

Переходные состояния, связанные с переохлаждением, и гидравлический удар в горячем состоянии.

Определенные явления, инициирующие аварии, такие как разрыв основного паропровода, могут привести к быстрому падению температуры в системе охлаждения первого контура. В реакторах PWR при падении

¹ Контейнмент - защитная оболочка реактора

температуры теплоносителя увеличивается реактивность (т.е. температурный коэффициент замедлителя становится отрицательным). Таким образом, даже при аварийном останове реактора (т.е. прекращении ядерных реакций с помощью введения стержней управления), реактивность и уровень энерговыделения активной зоны возрастают, приводя к срабатыванию автоматических систем безопасности.

Одним из потенциальных последствий переходных состояний, связанных с переохлаждением, является серьёзная авария, известная как гидравлический удар в горячем состоянии, которая особенно опасна для реакторов ВВЭР-1000 (см. ниже). Такая авария может произойти, если стальной корпус реактора стал хрупким вследствие нейтронного облучения. Если корпус реактора охлаждается ниже определенной температуры (здесь также важны материал корпуса, период облучения и другие факторы), находясь при этом под давлением, имеющиеся трещинки могут быстро разрастись, и корпус теряет герметичность. При этом топливо должным образом не охлаждается и становится возможным расплавление активной зоны. К тому же разрыв корпуса реактора может привести к повреждению контейнента, что приведёт к значительному выходу радиоактивности. При большом разрыве на главном паропроводе требуется активное вмешательство операторов для предотвращения ситуации, при которой может произойти такой гидравлический удар.

Существует ряд причин, по которым наличие МОКС-топлива может усугубить риск развития переходного состояния в тяжелую аварию. Во-первых, поскольку температурный коэффициент замедлителя более отрицателен в активных зонах с МОКС-топливом, а доля запаздывающих нейтронов меньше, скорость увеличения энерговыделения будет выше, что сокращает временной интервал, в течение которого должны вступить в действие системы безопасности.

Во-вторых, сам риск гидравлического удара будет больше при наличии МОКС-топлива в активной зоне, поскольку падение температуры будет проходить быстрее. Объяснением этому является то, что сразу после заглушения реактора остаточное тепловыделение МОКС-топлива ниже, чем для уранового. Анализ аварии с разрывом основного паропровода, проведенный компанией Вестингхауз показывает, что при частичном заполнении активной зоны МОКС-топливом, температура в течение шести минут падает до уровня, при котором возможен гидравлический удар, в то время, как для уранового топлива такой опасный температурный диапазон полностью исключен.^[2]

Наличие МОКС-топлива также увеличивает риск гидравлического удара в горячем состоянии, поскольку ускоряет нейтронное охрупчивание корпуса реактора, т.к. при расщеплении плутония 239 выделяется множество быстрых нейтронов, имеющих более высокую степень вероятности выхода из активной зоны, чем продукты деления урана 235. Хотя операторы реакторов могут попытаться свести эту проблему к минимуму, помещая топливные элементы с МОКС подальше от корпуса реактора (т.е. ближе к центру активной зоны), такое решение создает проблемы с распределением выделяемой энергии, поскольку поток нейтронов более интенсивен в центре активной зоны. Это уже создало проблемы, по крайней мере, на одной АЭС в Германии. К настоящему времени эффективное решение этой проблемы пока не выработано.

Аварии из-за роста реактивности. Гипотетический случай, когда при выведении стержня управления из активной зоны PWR внезапно увеличивается реактивность соседних топливных сборок. Это может привести к быстрому увеличению температуры и энерговыделения топливных стержней, результатом которого может стать разрыв оболочки топливного элемента, или, в худшем случае, фрагментация топлива. Такой исход, как минимум, приводит к попаданию продуктов деления в теплоноситель первого контура. В худшем случае выброс топливных частиц может заблокировать прохождение теплоносителя, что приведет к повышению температуры, дальнейшему повреждению топливных элементов и возможному расплаву активной зоны.

Документально доказано, что МОКС-топливо, производимое французской компанией Кожема, после пребывания в активной зоне более трех лет, становится более уязвимым к авариям, связанным с повышением реактивности, чем урановое топливо, имеющее такую же степень выгорания. (Кожема - один из основных членов консорциума по использованию МОКС в США, где она будет проектировать и эксплуатировать установку по производству МОКС-топлива. Кожема очень заинтересована в выполнении аналогичной функции в России). К таким выводам пришли в результате выполнения экспериментальной программы Кабри на реакторе во Франции, где испытывались две топливные кассеты - с МОКС и урановым топливом, предварительно подвергавшиеся облучению в течение четырех годовых циклов, при этом элемент с МОКС-топливом разрушился, а урановый прошел испытания. ^[3]

Объяснением ненадежности МОКС-топлива является неоднородность его состава, включающего фракции с высоким содержанием плутония. В них происходит чрезвычайно высокое локальное выгорание и, как следствие, накопление большого количества газообразных продуктов деления в небольших объемах. Увеличение реактивности топливного элемента может привести к быстрому выходу этого газа, при этом происходит фрагментация топлива и разрыв оболочки. Были выполнены также два эксперимента с МОКС-топливом меньшей степени выгорания. Хотя эти стержни не разрушились, количество газообразных продуктов деления, вышедших в пространство между топливом и оболочкой, было значительно большим, чем у урановых элементов с аналогичной степенью выгорания. Неоднородность топлива является основным недостатком французской технологии по производству МОКС-топлива.

Аварии, связанные с потерей теплоносителя и отключением питания станции. Вероятностными оценками безопасности, выполненными для западных PWR, было установлено, что аварии с потерей теплоносителя (при которых разрыв в системе теплоносителя первого контура приводит к сокращению объема воды, охлаждающей активную зону), а также отключение питания станции (при котором прекращается подача электроэнергии на станцию) являются одними из основных причин расплавления активной зоны и быстрого разрушения контеймента. Вероятность того, что эти события приведут к столь тяжелым последствиям, зависит от степени повреждения топливной оболочки до введения в действие систем аварийного охлаждения активной зоны. А поврежденность оболочки, в свою очередь, зависит от температуры в центре топливных стержней.

Температурный уровень в центре топливных стержней с МОКС-топливом на 50°C выше, чем у урановых топливных элементов при аналогичных условиях эксплуатации. Поэтому скорость коррозионного разрушения в начале развития аварии с потерей теплоносителя будет более высокой для МОКС-топлива, и

понадобятся более быстродействующие аварийные системы безопасности для того, чтобы предотвратить повреждение топливных сборок и расплавление активной зоны.

Риски при использовании МОКС-топлива в реакторах ВВЭР-1000

Согласно информации МАГАТЭ по сравнению с западными PWR реакторы ВВЭР-1000 имеют ряд конструктивных особенностей, делающих их более подверженными тяжелым авариям с выходом радиоактивности. Среди таких особенностей компоновка энергоблока, не обеспечивающая достаточное физическое разделение различных систем безопасности для предотвращения их сбоев по общей причине. Эти конструктивные недостатки усугубляются рядом других важных для безопасности вопросов, включающих тип и качество строительных материалов, надежность оборудования и систем управления, неадекватное техническое обслуживание ввиду сложной экономической ситуации, а также отсутствие подробной документации по безопасности, составленной с привлечением независимых экспертов (анализ аварий, планы действий в чрезвычайных ситуациях и руководства по управлению тяжелой аварией).

Хотя страны Запада совместно с Восточно-европейскими государствами и бывшим СССР объединили усилия для исправления недостатков реакторов советской конструкции, упор был сделан на реакторы РБМК или ВВЭР-440, которые считаются более опасными, чем реакторы серии ВВЭР-1000. Однако пока нет примеров того, чтобы Запад взял обязательства по доведению реакторов советского типа до уровня безопасности, соответствующего западным стандартам. По оценкам приведение к такому стандарту только одного реактора обойдется в сотни миллионов долларов (миллиарды рублей).

Поскольку общий запас безопасности реакторов ВВЭР-1000 меньше, чем у западных PWR, дальнейшее его сокращение из-за использования МОКС внушает ещё большие опасения по поводу этих реакторов.

Что касается последствий для здоровья населения от использования МОКС, данные по ВВЭР-1000 вероятно аналогичны приведенным для американских PWR - примерно 25% дополнительное увеличение смертности от раковых заболеваний после тяжелой аварии с нарушением целостности контейнмента. Относительно высокая концентрация актинидов в активных зонах с МОКС топливом по сравнению с урановым является свойством присущим водо-водяным реакторам. Недавние расчетные исследования, проведенные Курчатовским институтом, показали, что при уровне выгорания 60 000 мегаватт-дней на тонну в топливной сборке реактора ВВЭР-1000 с оружейным МОКС будет в два раза больше плутония и примерно в три раза больше америция и кюрия, чем в урановой сборке. ^[4] Эти результаты почти полностью совпадают с данными по американским PWR.

Фактически, последствия могут быть даже более серьезными, чем для американских PWR. Это объясняется тем, что Минатом планирует смешивать оружейный плутоний с примерно 12% реакторного плутония для сохранения в тайне изотопного состава российского оружейного плутония. При этом возрастет количество изотопов плутония в необлученном топливе. В результате этого, содержание америция и кюрия в облученном топливе будет более высоким, чем при использовании только оружейного плутония, и воздействие аварии на население будет соответственно более сильным.

Поскольку наиболее значительные последствия аварии на ВВЭР-1000, работающем на МОКС-топливе, будут иметь место при нарушении герметичности контейнмента, нерешенные вопросы, связанные с целостностью контейнмента и парогенератора ВВЭР-1000 встанут ещё более остро при использовании МОКС-топлива. Американское агентство по ядерной энергии (NEA) подняло вопрос о долговременной герметичности контейнментов ВВЭР-1000 из напряженного бетона, при этом упомянув о необходимости исследований "для разработки модели, прогнозирующей потерю эксплуатационных качеств в результате утраты напряженности бетона ...". [5]

Риск невыполнения контейнментом функции безопасности является значительной проблемой, в особенности в части обеспечения целостности коллекторов парогенератора. Протечка парогенератора создаёт соединение между системами теплоносителя первого и второго контуров и, следовательно, окружающей средой. В середине 90х у коллекторов парогенераторов ВВЭР-1000 случалось множество поломок и, несмотря на временные исправительные меры, NEA констатирует, что "обеспечение целостности коллектора парогенератора ВВЭР-1000 остаётся одним из наиболее важных вопросов безопасности".

Ряд недостатков ВВЭР-1000 внушает особую озабоченность при использовании МОКС-топлива:

Гидравлический удар в горячем состоянии. Здесь наиболее важен вопрос охрупчивания корпуса реактора и риск такого гидравлического удара.

По информации NEA, одним из наиболее важных вопросов безопасности ВВЭР-1000 является оценка герметичности корпуса реактора, при проведении которой "принимается во внимание действительное состояние материала корпуса в условиях эксплуатации". [6] Устойчивость материала корпуса к воздействию радиации в сильной степени зависит от состава стали, используемой для изготовления корпуса и сварных швов, а также от характера эксплуатационной истории реактора. Например, некоторые швы корпуса реактора ВВЭР-1000 содержат более 1.5% никеля и имеют пониженную радиационную стойкость. В частности, NEA говорит об отсутствии детальной информации об эксплуатационных условиях сварных соединений, неиспользовании методов неразрушающего контроля, которые помогли бы обнаружить микротрещины в корпусе и оценить степень его охрупчивания, а также об отсутствии надежных методов оценки возможности гидравлического удара.

Для решения этой проблемы российские инженеры разработали технологию, известную как "отжиг", при которой корпус и швы подвергаются термической обработке для восстановления сопротивляемости к растрескиванию. Однако нет бесспорных доказательств преимуществ отжига и долговечности результатов. Помимо этого, сам отжиг может вредно воздействовать на корпус, так как может привести к "сенсibilизации" нержавеющей стали, процессу значительно снижающему сопротивляемость к локальной коррозии.

Эти неопределенности по поводу целостности корпусов ВВЭР-1000 усугубляются отсутствием соответствующего анализа переходных состояний переохлаждения, способных инициировать гидравлический удар, таких как разрыв основного паропровода.

МАГАТЭ подтвердило свою озабоченность по поводу сохранения герметичности ВВЭР-1000 и риска гидравлического удара в горячем состоянии в отчете конференции 1999 г. ^[7] Автор данной статьи также получил информацию о том, что все корпуса ВВЭР-1000 охрупчены, в частной беседе с сотрудником Отдела ядерной безопасности МАГАТЭ. Более того, этот же специалист выразил своё скептическое отношение к эффективности отжига как средства решения этой проблемы.

При наличии таких опасений следует сделать соответствующую оценку увеличения риска гидравлического удара при использовании МОКС-топлива. Поскольку этот риск связан с длительностью срока эксплуатации станции, он будет возрастать, если срок эксплуатации будет продлен для осуществления программы удаления плутония.

Аварии из-за увеличения реактивности. Различия, существующие между топливными стержнями ВВЭР-1000 и PWR, могут усугубить проблемы сильно выгоревших стержней с МОКС-топливом, выявленные во время экспериментов Кабри по увеличению реактивности. В отличие от топливных элементов PWR у кассет ВВЭР-1000 имеется отверстие в центре. Оно предназначено для снижения температуры в центре элемента и отведения пространства для газообразных продуктов деления, и соответственного предотвращения высокого внутреннего давления в стержне. Однако на практике эта идея оказалась не эффективной. Поскольку центр топливной кассеты является наиболее высокотемпературной областью, скапливающийся здесь газ достигает температур более высоких, чем у PWR, поэтому "внутреннее давление в топливном стержне значительно выше, чем у среднего объема газообразных продуктов деления у стержней PWR". ^[8] По мнению МАГАТЭ "преимущества конструкции урановой топливной кассеты с отверстием, используемой в стержнях ВВЭР являются спорными". Наблюдался выход до 70% газообразных продуктов деления из значительно выгоревших топливных стержней ВВЭР-1000, для сравнения: характерной величиной их выхода из топлива PWR является не более 5%. ^[9]

Более высокая степень выхода газообразных продуктов деления из урановых топливных стержней ВВЭР-1000 по сравнению с PWR порождает вопрос, может ли МОКС-топливо использоваться в ВВЭР-1000 без значительных изменений в конструкции топливного стержня, поскольку можно ожидать, что выход газообразных продуктов деления из МОКС-топлива ВВЭР будет ещё выше. Это может привести к ещё более высокой опасности повреждения оболочки во время аварий с изменением реактивности и потерей теплоносителя, чем это наблюдалось для топлива PWR в экспериментальной программе Кабри.

Российские инженеры утверждают, что циркониево-ниобиевая оболочка, используемая для топливных стержней ВВЭР, более устойчива при авариях, связанных с увеличением реактивности, даже если речь идет о сильно выгоревшем топливе, поскольку этот сплав не ржавеет и не подвергается охрупчиванию от воздействия радиации столь же быстро, как обычная циркониевая оболочка. Даже если это и так, это

качество не предотвратит разрушение кассеты с МОКС-топливом, наблюдавшееся в экспериментах Кабри, поскольку разрушившийся топливный стержень не подвергался сильному окислению.

Выводы

Риск для здоровья и безопасности населения, связанный с использованием МОКС-топлива на американских реакторах PWR и реакторах ВВЭР-1000 в России и Украине, является значительным и подлежит тщательному рассмотрению до того, как принимаются планы по дальнейшему развитию этой программы.

По нашему мнению, эти дополнительные риски для здоровья и безопасности можно избежать при выполнении задачи по нейтрализации плутония из боеголовок. Альтернативное решение, иммобилизация, обеспечивает недоступность плутония без возникновения рисков, связанных с его сжиганием в реакторе. Однако близорукие технократы и бюрократы в США и России, поддерживаемые представителями атомной промышленности Западной Европы и Японии, по всей вероятности настроены на загрузку МОКС-топлива в реакторы не смотря ни на какие риски. Единственная надежда на приостановление этой опасной программы связана с принципиальной позицией граждан районов, которые могут сильно пострадать от аварии типа Чернобыля, случившейся прямо на их заднем дворе.

Эдвин Лайман, с 1995 г. является директором по научной работе Института ядерного контроля (NCI), в 1992 защитил диссертацию по физике в университете Корнелл. До работы в NCI вел исследовательскую работу в Центре энергетики и экологии Принстонского университета.

^[1] Edwin S. Lyman, Public Health Consequences of Substituting Mixed-Oxide for Uranium Fuel in Light-Water Reactors (Washington, DC: Nuclear Control Institute, 1999), accepted for publication in the Princeton University-based journal Science and Global Security.

^[2] Westinghouse Electric Corporation, Implementation of Weapons Grade MOX Fuel in Existing Pressurized Water Reactors, DOE/SF/19683--7, report prepared for the U.S. Department of Energy (Pittsburgh: Westinghouse Electric Corporation, 1996), 3-30.

^[3] J. Papin, F. Schmitz and B. Cazalis, "Further Results and Analysis of MOX Fuel Behavior Under Reactivity Accident Conditions in CABRI," in the Proceedings of the 27th Water Reactor Safety Information Meeting (Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1999), 355.

^[4] Margaret B. Emmet, Computational Benchmark Problems for VVER-1000 Mixed Oxide Fuel Cycle (Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 2000), 85-86.

^[5] Nuclear Energy Agency, Safety Research Needs for Russian-Designed Reactors (Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, 1998), 30.

^[6] Ibid, 25-28.

^[7] International Atomic Energy Agency, Report of the International Conference

on Strengthening Nuclear Safety in Eastern Europe, 14-18 June 1999, Vienna.

^[8] International Atomic Energy Agency, Design and Performance of WWER Fuel, Technical Reports Series No. 379 (Vienna: IAEA, 1996), 76.

^[9] Ibid, 42-43.