

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МАТЕРИАЛ

БН-800: МОЩНОСТЬ ДОЗЫ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА И СОГЛАШЕНИЕ ОБ УТИЛИЗАЦИИ ПЛУТОНИЯ

Фридерике Фрисс и Мориц Кутт

АННОТАЦИЯ

В 2000 году Россия и Соединенные Штаты подписали Соглашение об утилизации плутония о распоряжении каждой из сторон 34 тоннами объявленного избыточным оружейного плутония. Дополнение 2010 года позволяет России утилизировать свой оружейный плутоний в качестве МОКС-топлива в своих реакторах на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800 при условии, что в течение 30 лет после облучения отработавшее топливо все еще должно излучать по крайней мере один зиверт в час. В данном материале приводятся мощности доз для материалов топлива и зон воспроизводства после различных времен облучения и охлаждения, полученные в результате моделирования выгорания в реакторе БН-800. После полного времени облучения в 420 суток топливо будет удовлетворять критериям утилизации. Однако, это неверно для меньших времен облучения. Более того, мощность дозы от элементов зоны воспроизводства, в которых образуется оружейный плутоний, после облучения уменьшается еще быстрее. Для некоторых позиций элементов зоны воспроизводства стандарты отработавшего топлива не выполняются даже после 960 суток облучения. Чтобы обеспечить доверие к соглашению, России, Соединенным Штатам и Международному агентству по атомной энергии следует согласовать мониторинг мощности реактора и времена облучения для утилизации плутония в таких реакторах на быстрых нейтронах.

Фридерике Фрисс работает в группе ЯНУС Дармштадтского технологического университета, Дармштадт, Германия, и в Университете природных ресурсов и наук о живой природе, Вена, Австрия.

М.В. Рамана работает в Программе по науке и всеобщей безопасности, Принстонский университет, Принстон, штат Нью Джерси, США

Почтовый адрес для корреспонденций: Friederike Fries, Institute for Safety/Security and Risk Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences, Borkowskigasse 4, 1190 Wien, Austria.

Адрес электронной почты: friederike.friess@boku.ac.at

Статья получена 9 августа 2016 года и принята к публикации 23 августа 2016 года.

В подписанном Россией и Соединенными Штатами Соглашении об утилизации плутония (СОУП) обе стороны обязались утилизировать по 34 тонны избыточного оружейного плутония. Это количество составляет существенную часть запасов оружейного плутония обеих стран. Утилизация этого материала станет важным шагом на пути к ядерному разоружению. Первоначальное соглашение было заключено в 2000 году¹. В то время обе стороны планировали утилизировать большую часть плутония в смешанном оксидном топливе (МОКС-топливе), в основном предназначенном для реакторов на легкой воде.

В 2010 году соглашение было дополнено². В соответствии с дополнением Россия получила от Соединенных Штатов разрешение использовать свой избыточный оружейный плутоний в топливе для двух своих реакторов на быстрых нейтронах, БН-600 и БН-800. Реактор БН-800 – это самый новый российский реактор на быстрых нейтронах в Белоярске, который в настоящий момент является самым мощным реактором на быстрых нейтронах в мире. Реактор впервые достиг критичности в июне 2014 года, а в декабре 2015

года он был подсоединен к электрической сети. При работе на полной мощности этот реактор может вырабатывать 789 МВт. В течение первоначального цикла в активной зоне реактора также будет находиться топливо с высокообогащенным ураном, что связано с ограниченной мощностью производства МОКС-топлива в России.

Вновь построенное производство для изготовления МОКС-топлива было официально открыто в сентябре 2015 года на территории комплекса горно-химического комбината (ГХК) в Железногорске. Ожидается, что производство выйдет на полную мощность в 400 топливных сборок в год в 2017 году. При такой мощности производство сможет снабжать топливом несколько реакторов БН-800. Поскольку производство топлива получило эксплуатационный статус только после того, как БН-800 достиг критичности, первые элементы МОКС-топлива для БН-800 изготавливались в научно-исследовательском институте НИИАР в Димитровграде. Первое МОКС-топливо с Железногорского производства должно быть готово к первой перезагрузке реактора. На производстве смогут обрабатывать плутоний с любым изотопным составом.

В апреле 2016 года Россия критиковала Соединенные Штаты за остановку строительства американского завода для изготовления МОКС-топлива³. Далее в том же году глава Росатома Сергей Кириенко заявил, что Россия выполнит свои обязательства по соглашению⁴.

Соглашение СОУП определяет специальные требования к отработавшему топливу реактора в Разделе II Приложения «Технические спецификации»:

- Утилизированный плутоний считается утилизированным, если отработавшее плутониевое топливо, полученное при облучении в реакторах БН-600 и БН-800 отвечает указанным ниже четырем критериям:
- [...] 4. Уровень радиации от каждой отработавшей плутониевой топливной сборки таков, что он будет не меньше, чем 1 Зв/час на расстоянии в 1 метр от доступной поверхности на центральной линии сборки через 30 лет после того, как облучение будет закончено⁵.

Расчеты обеднения для реактора БН-800 позволяют провести детальный анализ изотопного состава облученного плутония⁶. На основании этих результатов были проведены расчеты мощности радиационной дозы для проверки того, будет ли соответствовать отработавшее топливо БН-800 установленным в СОУП требованиям, когда будет достигнуто требуемое минимальное отношение Pu-240/Pu-239, равное 0,1. Оценки мощности дозы проводились для трех различных участков активной зоны, имеющих различные доли плутония в МОКС-топливе (LEZ – низкая, MEZ – средняя, и HEZ – высокая), а также для облучаемых зон воспроизводства. Топливо облучалось в течение 420 суток. Согласно СОУП, реактор должен работать в режиме с коэффициентом воспроизводства меньше единицы, но может включать в себя зоны воспроизводства. Радиальные зоны воспроизводства облучаются в течение 960 суток (несколько больше двух циклов облучения топлива), а аксиальные зоны воспроизводства облучаются столько же, как и топливо (420 суток). Различные участки реактора указаны на рисунке 1, на котором показана половина активной зоны реактора. Для всех расчетов состав материала брался из предыдущих расчетов обеднения с применением различных периодов охлаждения перед расчетом мощности дозы⁷.

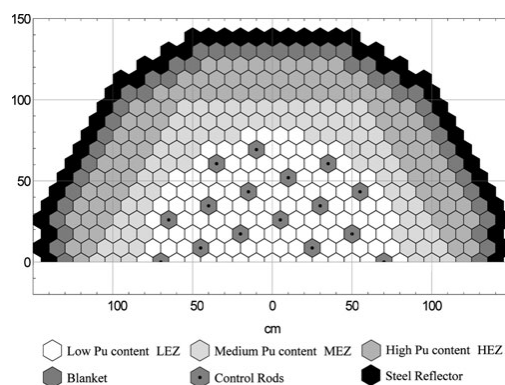


Рисунок 1. Сечение активной зоны БН-800, на котором показаны участки с различным содержанием плутония, и другие зоны реактора. Надписи под рисунком (слева направо и сверху вниз): 1 – низкое содержание Pu (LEZ); 2 – среднее содержание Pu (MEZ); 3 – высокое содержание Pu (HEZ); 4 – зона воспроизводства; 5 – управляющие стержни; 6 – стальной отражатель.

Предполагалась простая шестигранная геометрия топливного элемента, основанная на сообщавшейся ширине одиночного топливного элемента и длине активной зоны (88 см) реактора БН-800. При расчете доз радиации топливные элементы трактовались как размазанная смесь топлива и оболочки без натрия, окруженная воздухом. Было показано, что для полных топливных элементов однородные и неоднородные мощности дозы в средней осевой точке почти идентичны⁸.

Расчеты проводились с использованием программного пакета MCNPX 2.7 в режиме переноса гамма-излучения. Гамма-кванты источника генерировались с использованием параметра «PAR = SP» в исходных данных программы, который использует внутренние данные для генерации фотонов с энергиями, заданными для всех радиоактивных изотопов в заданном материале (в данном случае для отработавшего топлива). Для оценки гамма-спектра кольцевой детектор фотонов размещался в одном метре от поверхности элемента над вертикальным центром элемента. Отсчеты детектора анализировались по 25 интервалам энергетического спектра. Затем рассчитывались мощности дозы с использованием коэффициентов преобразования потока частиц в мощность дозы⁹.

Было обнаружено, что все отработавшее топливо БН-800 удовлетворяет требованию СОУП по минимальной мощности дозы. Рассчитанные мощности дозы для участков LEZ, MEZ, и HEZ соответственно составляют 2,15; 1,58 и 1,55 Зв/час после периода охлаждения в 30 лет. Однако, было обнаружено, что после периода облучения в 960 суток и последующего охлаждения в течение 30 лет элементы радиальной зоны воспроизводства будут создавать мощность дозы всего лишь в 0,13 Зв/час. В активной зоне БН-800 имеются дополнительные аксиальные элементы зоны воспроизводства под каждым топливным элементом, но ни одного элемента над ними. Этот материал может быть использован для выделения плутония после того, как он будет отделен от топливных стержней. Мощности дозы для аксиальных зон воспроизводства были рассчитаны для участков HEZ с максимально высоким содержанием плутония. Во время облучения этот участок получает минимальный нейтронный поток и поэтому у него будет наблюдаться минимальная мощность дозы. После 30 лет охлаждения аксиальные зоны воспроизводства будут излучать только 0,03 Зв/час, а уже через два года мощность дозы снизится менее, чем до 1 Зв/час (0,79 Зв/час).

Более короткое выгорание реакторного топлива, конечно, приведет к меньшим мощностям доз из-за образования меньшего количества продуктов деления. На рисунке 2 показаны мощности доз для различных периодов облучения. Периоды выбраны аналогичными для типичных интервалов перезагрузки БН-800. В это время реактор прекращает нормальные операции для замены топливных элементов в одной трети активной зоны на свежее топливо. Даже тогда, когда не предполагается более раннего извлечения, иногда может быть необходимо извлекать элементы на этой стадии по соображениям безопасности (например, из-за механических повреждений или утечки). Из рисунка видно, что требованиям СОУП не удовлетворяет никакое топливо, извлеченное после одной трети полного периода облучения. Топливо из участков с более высоким содержанием плутония (MEZ и HEZ) еле-еле достигает предела после двух третей периода.

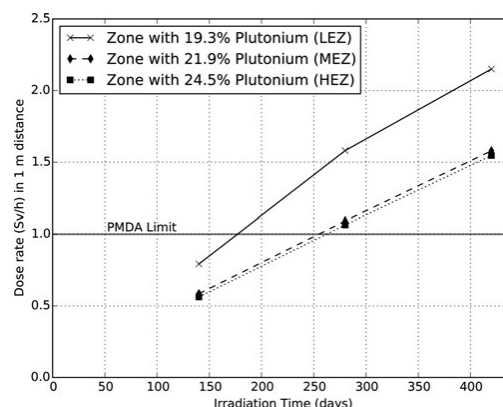


Рисунок 2. Расчетные мощности дозы отработавшего топлива БН-800 для различных периодов облучения; все значения были рассчитаны при периоде охлаждения в 30 лет. По горизонтальной оси отложено время облучения в сутках; по вертикальной оси – мощность дозы на расстоянии в 1 м в Зв/час. Сплошной линией показаны данные для участков с низким содержанием плутония (LEZ), штриховой линией – для участков со средним содержанием (MEZ), и пунктирной линией – для участков со высоким содержанием (HEZ).

Для иллюстрации влияния охлаждения на мощность дозы были проведены расчеты для различных времен охлаждения, результаты которых показаны на рисунке 3. Из результатов видно, что в первые годы после извлечения топлива из реактора мощности доз очень высоки. Как отмечалось выше, для топлива, которое облучалось в течение полного периода в 420 суток, мощность дозы никогда не опускалась ниже предела СОУП в течение 30 лет. Это неверно для топлива, которое облучалось всего одну треть стандартного цикла выгорания: для таких топливных сборок потребуется всего 10 лет, чтобы распалось достаточное количество продуктов деления для снижения мощности дозы ниже предела в 1 Зв/час. Для радиальной зоны воспроизводства мощность дозы сборок опустятся ниже требуемого предела уже через пять лет после выгрузки из реактора. Сборки из аксиальной зоны воспроизводства, отделенные от активной зоны, достигнут уровня ниже 1 Зв/час еще раньше, всего после двух лет охлаждения. Для периодов охлаждения более 30 лет не проводилось никаких расчетов. Очевидно, что мощности дозы будут продолжать уменьшаться.

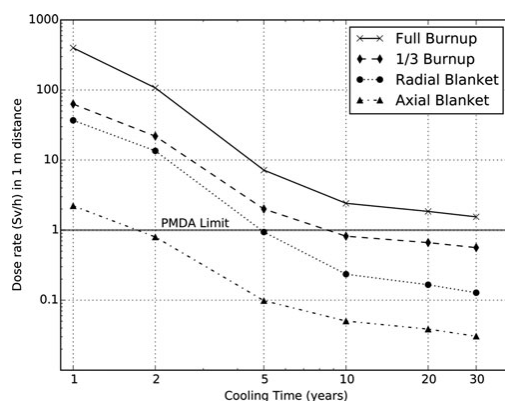


Рисунок 3. Мощности дозы для различных периодов охлаждения; наборы данных относятся к реакторному топливу из участка с высоким содержанием плутония (HEZ). По горизонтальной оси отложено время охлаждения в годах; по вертикальной оси – мощность дозы на расстоянии в 1 м в Зв/час. Сплошной линией показаны данные для полного цикла выгорания, штриховой линией – для одной трети от полного цикла, пунктирной линией – данные по радиальной зоне воспроизводства, и штрих-пунктирной линией – данные по аксиальной зоне воспроизводства.

Хотя специальное приложение по мониторингу и инспекциям является частью соглашения, оно оставляет многие подробности открытыми для последующих переговоров («процедуры будут согласованы сторонами») ¹⁰. Несмотря на то, что эти процедуры должны включать в себя способ подтверждения мощности дозы («подтвердить выполнение критерия, указанного в Приложении по Техническим спецификациям»), не ясно, как это должно быть сделано.

Мощности дозы отработавшего топлива измерить легко, но непонятно, как исправить положение с низким результатом. Наиболее вероятно то, что будет невозможно повторно использовать это топливо для дополнительного облучения без его переработки и изготовления новых топливных элементов. Поэтому было бы полезно контролировать времена облучения топлива и радиальной зоны воспроизводства. Почти непрерывное контролирование выходной мощности реактора может предоставить основу для хорошей оценки изменения изотопного состава плутония и концентрации продуктов деления.

К сожалению, статут дополнительного соглашения по мониторингу и инспекциям все еще остается открытым. В 2010 году Россия и Соединенные Штаты направили совместное письмо в МАГАТЭ, попросив агентство «принять на себя важную верификационную роль по дополненному Соглашению» ¹¹. В письме также упоминалась цель достижения юридически обязывающих соглашений в данном отношении до 2011 года. В 2012 году Анатолий Дьяков написал, что трехсторонний диалог все еще продолжается: «об этих консультациях известно не так много, но российские эксперты, участвующие в этом процессе, не ожидают серьезных трудностей» ¹². Вопрос верификации еще более усложняется тем фактом, что Соединенные Штаты могут изменить свой план утилизации от варианта МОКС до непосредственной утилизации. Если из-за такого изменения потребуются повторные переговоры, то они также смогут включать обсуждения международной верификации. Независимо от обсуждаемых и формально обязывающих верификационных мероприятий, для обеих стран было бы целесообразно достичь односторонней прозрачности в течение

всех этапов утилизации плутония. Такие мероприятия увеличат доверие между двумя сторонами, но также могут послужить примером для других стран и для будущих мероприятий по разоружению.

В заключение можно отметить, что соглашение СОУП является очень полезным соглашением и мероприятием по разоружению. Как показали последние события, прогресс достигается очень медленно, и иногда он более трудно достижим, чем казалось вначале. Представленные здесь расчеты мощности дозы показывают, что короткие периоды выгорания или зоны воспроизводства могут сократить трудности раннего извлечения содержащегося плутония. В этом контексте особые опасения вызывают зоны воспроизводства, поскольку в них содержится вновь образованный плутоний, а их радиационный барьер быстро понижается. Уровень мощности дозы менее 1 Зв/час достигается, по крайней мере для определенных позиций, уже через два года после извлечения из реактора. В целом, при проведении утилизации следует применять всесторонние механизмы мониторинга и инспекции.

Наилучший способ, вероятно, состоит во внимательном наблюдении за мощностью реактора и временами облучения.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Правительства Соединенных Штатов и России, "Соглашение об утилизации плутония (СОУП)," 2000, доступно по адресу <http://www.state.gov/documents/organization/18557.pdf>.
2. Правительства Соединенных Штатов и России, "Протокол к Соглашению об утилизации плутония," 2010, доступно по адресу http://dtirp.dtra.mil/pdfs/pmda_protocol_text.pdf.
3. Pavel Podvig, "Can the U.S.-Russia plutonium disposition agreement be saved?" *Bulletin of the Atomic Scientists*, Online Column, <http://thebulletin.org/can-us-russia-plutonium-disposition-agreement-be-saved9389>.
4. Bellona, <http://bellona.org/news/nuclear-issues/2016-06-russia-trumpets-dubious-success-in-weapons-plutonium-destruction-agreement>.
5. PMDA, "Annex on Technical Specifications," Section II.
6. M. Kutt, F. Frieß, and M. Englert. "Plutonium disposition in the BN-800 Fast Reactor: An Assessment of Plutonium Isotopics and Breeding," *Science & Global Security*, 22 (2014): 188-208, DOI:10.1080/08929882.2014.952578.
7. Там же.
8. T. Trumbull and D. Harris. "The Effect of Material Homogenization in Calculating the Gamma-Ray Dose from Spent PWR Fuel Pins in an Air Medium," Lockheed Martin Cooperation and Rensselaer Polytechnic Institute, 2005.
9. Коэффициенты взяты из таблицы A21 в International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation," ICRP Publication 74, *Annals of the ICRP*, 26 (1996): 3-4.
10. PMDA, "Annex on Monitoring and Inspections," Section II, Paragraph 1, Scope.
11. IAEA, "Communication from the Permanent Missions of the Russian Federation and the United States of America regarding a Joint Letter regarding the Agreement concerning the Management and Disposition of Plutonium Designated as No Longer Required for Defense Purposes and Related Cooperation," Information Circular 806, INFCIRC/806, September 2010.
12. Anatoli Diakov, "Disposition of Excess Russian Weapon HEU and Plutonium," UNIDIR Resources, February 2012.