

## **ОСЛАБЛЕНИЕ ОПАСНОСТИ ОТ ХРАНЯЩЕГОСЯ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ В США**

*Роберт Альварец, Джен Бейеа, Клаус Янберг, Юнгимин Канг, Эд Лайман, Аллисон Марферлейн, Гордон Томпсон, Фрэнк Н. Фон Хиппель*

Из-за недоступности расположенного вне площадок хранилища отработанного топлива энергетических реакторов Ядерная регулятивная комиссия США разрешила высокоплотное хранение отработанного топлива в бассейнах, первоначально предназначенных для хранения намного меньших запасов. В результате практически все бассейны для отработанного топлива в США были переоборудованы для загрузки сборок отработанного топлива с плотностью, достигающей плотности в активных зонах реакторов. Для того, чтобы предотвратить возникновение критичности в отработанном топливе, топливные сборки разделяются друг от друга металлическими ящиками, стенки которых содержат поглощающий нейтроны бор. Уже более двадцати лет назад стало известно, что в случае потери воды в таких «плотно упакованных» бассейнах конвективное охлаждение воздухом будет относительно неэффективным. Отработанное топливо, недавно выгруженное из реактора, может относительно быстро нагреться до температуры, при которой оболочка топлива из циркония может загореться и из топлива могут выделиться летучие продукты деления, включая Cs-137 с периодом полураспада 30 лет. Пожар может распространиться на более старое отработанное топливо. Долговременные последствия загрязнения почвы в таком событии будут значительно хуже, чем после Чернобыля.

До сих пор подобных случаев не происходило. Тем не менее, последствия могут затронуть столь большую площадь, что должны быть исследованы и альтернативы хранению с плотной упаковкой – в особенности, в контексте опасений того, что террористы могут рассматривать ядерные объекты как привлекательные мишени. Для сокращения как последствий, так и вероятности пожара в бассейне с отработанным топливом, предлагается, чтобы все отработанное топливо перемещалось из влажных хранилищ в сухие в течение пяти лет после момента выгрузки. Стоимость сухого хранения в контейнерах на площадке дополнительных 35 000 тонн старого отработанного топлива оценивается в 3,5 – 7 миллиардов долларов, или 0,03 – 0,06 центов за киловатт-час электроэнергии, выработанной из этого топлива. Дальнейшая экономия может компенсировать некоторые из этих расходов, когда топливо будет удаляться с площадки. Переход на сухое хранение может быть осуществлен в течение десятилетия. Удаление старого топлива может сократить общее количество Cs-137 в бассейнах примерно в четыре раза, доведя его до уровня, примерно вдвое большего, чем в активных зонах реакторов. Это также сделает возможным возврат к хранению в открытых клетках для остающегося более недавно выгруженного топлива. При установке больших аварийных дверей или вентиляторов для обеспечения крупномасштабного потока воздуха в здании, окружающем бассейн, естественное конвекционное охлаждение отработанного топлива может стать возможным, если воздушный поток не будет заблокирован разрушением здания, или другой причиной. Обсуждаются также другие возможные мероприятия сокращения опасности.

Нашей задачей при написании этой статьи было сделать доступной эту проблему для обсуждения более широкой публикой, с целью способствовать дальнейшему публичному обсуждению и анализу. Более подробные технические обсуждения сценариев, некоторые могут привести к потере охладителя в бассейнах с отработанным топливом, и вероятности возникновения загорания отработанного топлива можно найти в опубликованных отчетах, подготовленных для Ядерной регулятивной комиссии в течение последних двух десятилетий. Хотя может оказаться необходимым сохранять конфиденциальность по отношению к некоторым особым видам уязвимости, мы полагаем, что общее обсуждение представленного здесь типа может и должно быть доступным, так чтобы заинтересованные эксперты и

обеспокоенная общественность могли оценить заявления Ядерной регулятивной комиссии, операторов атомных электростанций, и независимых политических аналитиков, таких, как мы.

Получено 9 декабря 2000 года, принято 22 января 2003 года.

Роберт Алварец, старший научный сотрудник Института политических исследований, 733 15 St NW, Suite 1025, Washington, DC. Адрес электронной почты: kitbob@erols.com

Джен Бейеа, консультант по общественным интересам, 53 Clinton St, Lambertville, NJ 08530. Адрес электронной почты: jbeyea@cipi.com

Клаус Янберг, 40 J.P. Melchiorstr., 40996, Ratingen, Germany. Адрес электронной почты: klaus@janberg.de

Юнгмин Канг, 101-1005 Chunggu Apt., Jamwon-dong, Seocho-gu, Seoul, South Korea. Адрес электронной почты: jmkang55@hotmail.com

Эд Лайман, Институт ядерного регулирования, Suite 410, 1000 Conn. Ave, NW, Washington, DC 20036. Адрес электронной почты: lyman@nci.org

Аллисон Макферлейн, Программа исследований по безопасности, Центр международных исследований, Массачусетский технологический институт, E38-620, 292 Main Street, Cambridge, MA 02139. Адрес электронной почты: allisonm@mit.edu

Гордон Томпсон, Институт исследований по ресурсам и безопасности, 27 Ellsworth Avenue, Cambridge, MA 02139. Адрес электронной почты: irss@igc.org

Фрэнк Н. фон Хиппель, Программа по науке и глобальной безопасности, Принстонский университет, 221 Nassau St, 2<sup>nd</sup> Floor, Princeton, NJ 08542-4601. Адрес электронной почты: fvhippel@princeton.edu

## ВВЕДЕНИЕ

Ядерная регулятивная комиссия США оценила, что вероятность потери охладителя из бассейна для хранения отработанного топлива будет настолько мала (около  $10^{-6}$  на бассейн в год), что не требуется предъявлять проектных требований для устранения последствий<sup>1</sup>. В результате Ядерная регуляторная комиссия продолжает разрешать перестраивать бассейны из конфигурации с открытыми клетками, в которых воздушное охлаждение конвекцией может быть эффективным, в конфигурации с «плотной упаковкой», которые фактически заполняют бассейны почти от стенки до стенки. Исследование 1979 года, проведенное для Ядерной регулятивной комиссии Сандийской национальной лабораторией, показало, что в случае внезапной потери всей воды из бассейна, плотно упакованное отработанное топливо даже через год после выгрузки, вероятно, нагреется до температуры, при которой его циркалоевая оболочка должна взорваться, а затем и загореться<sup>2</sup>. Это должно привести к выбросу массовых количеств продуктов деления в воздух.

До сих пор таких событий не случалось. Тем не менее, последствия могут быть столь серьезными, что должны быть исследованы альтернативы хранению с плотной упаковкой – в особенности, в контексте возрастающих опасений того, что террористы могут счесть ядерные объекты привлекательными мишенями.

Стандартный подход Ядерной регулятивной комиссии к оценке вероятности ядерных аварий основан на анализе отсутствия отказов. Этот подход включает количественные оценки вероятности сценариев выбросов в результате последовательности неисправностей оборудования, человеческих ошибок, и природных явлений. Однако, как заявил сотрудник Ядерной регулятивной комиссии на брифинге в июне 2001 года по вопросу опасностей, связанных с хранящимся отработанным топливом<sup>3</sup> «Не существует установленного метода количественной оценки вероятности проявления саботажа на ядерном объекте.»

Недавно Ядерная регулятивная комиссия отклонила петиции групп граждан, требовавших повышенной защиты от актов терроризма в отношении бассейнов с отработанным топ-

---

<sup>1</sup> [Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants (NRC, NUREG-1738, 2001) Executive Summary].

<sup>2</sup> Spent Fuel Heatup Following Loss of Water During Storage by Allan S. Benjamin et al. (Sandia National Laboratory, NUREG/CR-0649, SAND77-1371, 1979), fig. 14.

<sup>3</sup> (NRC, Secy-01-0100, June 4, 2001) pp. 3,5.

ливом реакторов<sup>4</sup>. В своем решении Ядерная регулятивная комиссия утверждала, что «возможность террористической атаки ... является спекулятивной и просто слишком удаленной от естественных или ожидаемых последствий действий агентства...»<sup>5</sup>

В поддержку своего решения Ядерная регулятивная комиссия заявила: «Конгресс понимает необходимость высокоплотного хранения отработанного топлива на площадках реакторов и поддерживает его,»<sup>6</sup> ссылаясь на закон 1982 года о политике ядерных отходов (NWRPA). На деле, хотя в законе о политике ядерных отходов (NWRPA) и упоминается необходимость «эффективного использования существующих хранилищ и необходимых дополнительных хранилищ на площадке каждого гражданского энергетического атомного реактора, согласующегося с общественным здравоохранением и безопасностью», в нем нет явно выраженной поддержки высокоплотного хранения<sup>7</sup>.

Хотя вероятностный анализ мало помогает при оценке опасности терроризма, Ядерная регулятивная комиссия и Конгресс США будут принимать решения по оценкам вероятности, которые используются в анализе затрат и результатов. Здесь мы предлагаем физические изменения в организации хранения отработанного топлива, которые помогут исправить наиболее очевидные уязвимости бассейнов по отношению к потере охладителя и пожару. Наиболее дорогое из этих предложений, перемещение топлива для хранения в сухих контейнерах в течение примерно 5 лет после выгрузки из реактора, будет стоить 3,5 – 7 миллиардов долларов для сухого хранения приблизительно 35 000 тонн старого отработанного топлива, которое в противном случае хранилось бы в американских бассейнах в 2010 году. Это соответствует примерно 0,03 – 0,06 цента за киловатт-час электроэнергии, произведенной из топлива. Некоторые из затрат могут быть возмещены позже, если это позволит сократить расходы на перевозку отработанного топлива с площадки на площадку долговременного или постоянного хранения.

Для сравнения, потери имущества от выпадения цезия-137 при пожаре отработанного топлива в бассейне, вероятно, могут достичь сотен миллиардов долларов. Перемещение старого отработанного топлива в сухие хранилища поэтому будет оправдано в рамках традиционного анализа затрат и результатов, если вероятность пожара в бассейне с отработанным топливом в США в течение следующих 30 лет не превысит примерно одного процента. Другие рекомендуемые ниже действия могут быть оправданы при гораздо меньших вероятностях.

Представляется маловероятным, что Ядерная регулятивная комиссия сама примет решение о требовании подобных действий. По мнению генерального инспектора, «Ядерная регулятивная комиссия, по-видимому, неформально установила необоснованно высокие требования абсолютного доказательства проблемы безопасности по отношению к разумному обеспечению поддержания общественного здравоохранения и безопасности...»<sup>8</sup>

Такая ситуация требует более явного вмешательства со стороны Конгресса. В то же время, главные прокуроры 27 штатов недавно подписали письмо к лидерам Конгресса, обращаясь с просьбой о законодательной поддержке «защиты наших штатов и общественности от террористических атак гражданских атомных электростанций и других важных ядерных объектов», в которой были специально упомянуты бассейны с отработанным ядерным топливом<sup>9</sup>.

---

<sup>4</sup> U.S. NRC, "In the matter of Dominion Nuclear Connecticut, Inc. (Millstone Nuclear Power Station, Unit No. 3)" Docket No. 50-423-LA-3, CLI-02-27, memorandum and order, Dec. 18, 2002.

<sup>5</sup> Там же.

<sup>6</sup> Там же.

<sup>7</sup> Nuclear Waste Policy Act, 42 U.S.C. 10,131 et seq, Subtitle B.

<sup>8</sup> *NRC's regulation of Davis-Besse regarding damage to the reactor vessel head* (Inspector General Report on Case No. 02-03S, Dec. 30, 2002, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/insp-gen/2003/02-03s.pdf>, accessed, Jan 4, 2003), p. 23.

<sup>9</sup> Письмо лидерам большинства и меньшинства в Сенате, спикеру и лидеру меньшинства Палаты представителей от главных прокуроров Аризоны, Арканзаса, Калифорнии, Колорадо, Коннектикута, Джорджии, Гавайев, Айовы, Мериленда, Массачусетса, Мичигана, Миннесоты, Миссисипи, Монтаны, Невады, Нью-Джерси, Нью-Мексико, Нью-Йорка, Северной Каролины, Огайо, Орегона, Пенсильвании, Род-Айленда, Вермонта, Западной Виргинии, Вашингтона и Висконсина, 8 октября, 2002.

Конгресс сможет сделать это, обновив закон о политике ядерных отходов для того, чтобы потребовать «глубокой обороны» для хранилищ в бассейнах, и минимизировать объемы хранения отработанного топлива в бассейнах. Второе требование должно включать перемещение в течение переходного периода, не превышающего десятилетия, всего отработанного топлива, выгруженного более пяти лет назад, в сухие, укрепленные хранилища.

Для того, чтобы создать основу для информированного и демократического решения по мероприятиям сокращения опасности было бы желательно иметь соответствующий анализ, доступный полному кругу заинтересованных сторон, включая правительства штатов и местные органы власти, и обеспокоенных граждан. Несмотря на необходимость сохранения конфиденциальности чувствительных подробностей, мы полагаем, что мы продемонстрируем в этой статье, что аналитик могут описать и обсуждать широкий круг мероприятий в открытом процессе. То же самое можно сделать и в области регулирования. Доказательные слушания, проводившиеся по правилам Ядерной регуляторной комиссии, уже подчинялись особым обязательствам по исключению подробностей по безопасности – наряду с частной и конфиденциальной информацией по персоналу – из официальных записей.

Подытоживая, мы рассмотрим:

- Огромные запасы долгоживущего летучего продукта деления цезия-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), которые накопились в американских бассейнах с отработанным топливом и последствия того, что запасы одного из этих бассейнов будут выброшены в атмосферу в результате пожара отработанного топлива.
- Различные виды событий, которые обсуждались в публичных записях, которые могут вызвать потерю охладителя и высокие уровни радиации, появляющиеся в здании над бассейном в результате потери радиационной защиты, обеспечиваемой водой.
- Ограничения различных механизмов охлаждения сухого отработанного топлива: теплопроводность, инфракрасное излучение, охлаждение паром, и конвективное охлаждение воздухом.
- Возможные мероприятия для сокращения уязвимости бассейнов для случая потери охладителя и для предоставления аварийного охлаждения при возникновении подобного события.
- Осуществимость перемещения отработанного топлива из бассейнов в хранилища с сухими контейнерами в течение 5 лет после выгрузки из реактора. Это позволит осуществлять хранение недавно выгруженного топлива в открытых клетках, которые делают более эффективным конвективное охлаждение воздухом в случае потери воды, и сократят общее количество  $^{137}\text{Cs}$  в американских бассейнах для отработанного топлива примерно в четыре раза.

В 31 штате США имеется 103 работающих коммерческих ядерных реактора на 65 площадках (рис. 1)<sup>10</sup>. Из них 69 являются водяными реакторами под давлением (ВРД), а 34 являются реакторами с кипящей водой (РКВ). В дополнение имеются 14 ранее работавших реакторов с охлаждением обычной водой на различных стадиях вывода из эксплуатации. У некоторых из этих реакторов бассейны объединены, так что всего имеется 65 бассейнов для ПВР и 34 бассейна для РКВ<sup>11</sup>. На рис. 2 показаны схемы «типичных» бассейнов с отработанным топливом для водяных реакторов под давлением (ВРД) и реакторов с кипящей водой (РКВ).<sup>12</sup> Для простоты при проведении иллюстрационных вычислений в этой статье мы будем использовать топливо и конструкцию бассейнов для водяных реакторов под давлением (ВРД). Однако, результаты подробных исследований, проведенных для Ядерной регуляторной комиссии, показывают, что наши качественные выводы применимы и к реакторам с

<sup>10</sup> Кроме того, Browns Ferry Unit 1 номинально является действующим. Но из него изъято топливо и он не работает.

<sup>11</sup> *Spent Nuclear Fuel Discharges from US Reactors 1994* (U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, report # SR/CNEAF/96-0, 1996).

<sup>12</sup> J. G. Ibarra, W. R. Jones, G. F. Lanik, H. L. Ornstein and S. V. Pullani, *Operating Experience Feedback Report: Assessment of Spent Fuel Cooling* (NRC, NUREG-1275, 1997), Vol. 12, figs. 2.1, 2.2.

кипящей водой (РКВ)<sup>13</sup>.



Рисунок 1

Расположение атомных электростанций в Соединенных Штатах. Кружками представлены площадки с одним реактором, квадратами представлены электростанции с двумя реакторами, и звездочками представлены электростанции с тремя реакторами. Полые символы представляют площадки с по крайней мере одним выключенным реактором. Два реактора выключены только на электростанции в Зионе, штат Иллинойс. Источник: авторы<sup>14</sup>.

### ОПАСНОСТЬ ОТ ВЫБРОСА ЦЕЗИЯ-137

Несмотря на то, что беспокойство вызывают несколько изотопов, мы обратим здесь внимание на продукт деления <sup>137</sup>Cs. Он обладает периодом полураспада 30 лет, является относительно летучим, и, вместе со своим короткоживущим продуктом распада, барием-137 (период полураспада 2,55 минуты), обеспечивает примерно половину активности продуктов деления в 10-летнем отработанном топливе<sup>15</sup>. Он представляет собой сильный загрязнитель

<sup>13</sup> См., например, Analysis of Spent Fuel Heatup Following Loss of Water in a Spent Fuel Pool: A Users' Manual for the Computer Code SHARP by Energy and Environmental Science, Inc. (NUREG/CR-6441/BNL-NUREG-52494, 2002).

<sup>14</sup> Список бассейнов с отработанным топливом приведен в *Energy Resources International*, 2002, "2002 Summary of U.S. Generating Company In-Pool Spent Fuel Storage Capability Projected Year That Full Core Discharge Capability Is Lost", June, 2002, (<http://www.nei.org/documents/Spent.Fuel.Storage.Status.pdf>, Dec.9, 2002). Широта и долгота площадок взяты из <http://geonames.usgs.gov/fips55.html>.

<sup>15</sup> Стронций-90 (период полураспада 28 лет) и продукт его распада иттрий-90 (64 часа) ответственны за оставшиеся 40% активности продуктов деления в течение 10 лет [M.Benedict, N.G.Pigford, and H.W.Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 2<sup>nd</sup> ed.(McGrow-Hill, 1981), Table 8.1]. Но стронций-90 обладает меньшей летучестью по сравнению с цезием-137 особенно в условиях окисления, которые типичны для горения отработанного топлива в бассейне. Стронций-90 и иттрий-90 не являются гамма-излучателями и поэтому представляют опасность в основном только при вдыхании.

почвы, поскольку 95% его распадов происходят в возбужденное состояние  $^{137}\text{Ba}$ , которое высвечивается с излучением проникающего гамма-излучения (0,66 МэВ)<sup>16</sup>.

Ущерб, который может быть нанесен большим выбросом продуктов деления, был продемонстрирован в Чернобыльской аварии в апреле 1986 года. Более 100 000 жителей из 187 населенных пунктов были выселены из-за загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ . Жесткие мероприятия по контролю радиационной дозы были предприняты в районах, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  до уровня более 15 Кюри/км<sup>2</sup> (555 кБк/м<sup>2</sup>). Общая площадь этой зоны радиационного контроля была огромной: 10 000 км<sup>2</sup>, что составляет половину площади штата Нью-Джерси. В течение следующего десятилетия население в этом районе уменьшилось почти вдвое из-за миграции в районы с меньшим загрязнением<sup>17</sup>.

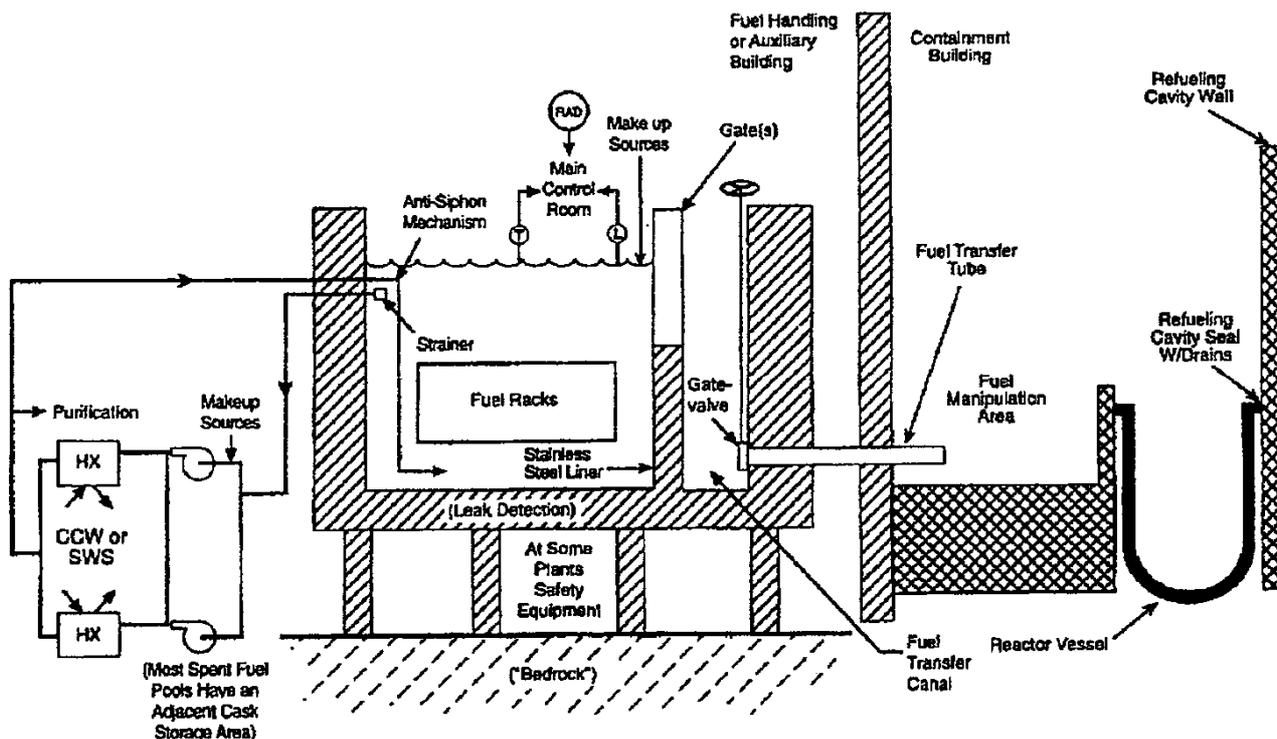


Рисунок 2а

Схема бассейна с отработанным топливом и системы перемещения для водяных реакторов под давлением (источник: NUREG-1275, 1997). Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): 1 – очистка; 2 – источники подпитки; 3 – у большинства бассейнов с отработанным топливом имеется прилегающая площадка хранения бочек; 4 – антисифонный механизм; 5 – фильтр; 6 – клетки для топлива; 7 – главный пульт управления; 8 – облицовка из нержавеющей стали; 9 – обнаружение утечки; 10 – на некоторых электростанциях оборудование для обеспечения безопасности; 11 – фундамент; 12 – обращение с топливом или вспомогательное здание; 13 – заслонка (заслонки); 14 – клапан заслонки; 15 – защитная оболочка реактора; 16 – канал перемещения топлива; 17 – площадка манипуляций с топливом; 18 – канал перемещения топлива; 19 – стенка полости загрузки топлива; 20 – уплотнение полости загрузки топлива с дренажной системой; 21 – резервуар реактора.

#### Количество Cs-137 в бассейнах для хранения отработанного топлива

Бассейны с отработанным топливом, прилегающие к большинству энергетических реакторов, содержат значительно большие количества  $^{137}\text{Cs}$ , чем 2 мекюри (МКи), которые бы-

<sup>16</sup> Table of Isotopes, 7th ed., C. M. Lederer and V. S. Shirley, eds. (John Wiley, 1978).

<sup>17</sup> " Annex J in Sources and Effects of Ionizing Radiation (UN, 2000) <http://www.unscear.org/pdf/annexj.pdf>, ("Exposures and effects of the Chernobyl accident," pp. 472–5).

ли выброшены из активной зоны блока № 4 Чернобыльской АЭС с электрической мощностью 1000 МВт<sup>18</sup>, или приблизительно 5 МКи в активной зоне легководного реактора с электрической мощностью 1000 МВт. Типичная активная зона водяного реактора под давлением (ВРД) содержит в своем топливе около 80 метрических тонн урана, в то время как типичный американский бассейн с отработанным топливом сегодня содержит около 400 тонн отработанного топлива (см. рис. 3; далее в этой статье любое упоминание о тоннах будет подразумевать метрические тонны). Более того, поскольку концентрация <sup>137</sup>Cs нарастает приблизительно линейно с ростом степени выгорания, то в среднем в тонне отработанного топлива его содержится примерно вдвое больше, чем в тонне топлива в активной зоне.

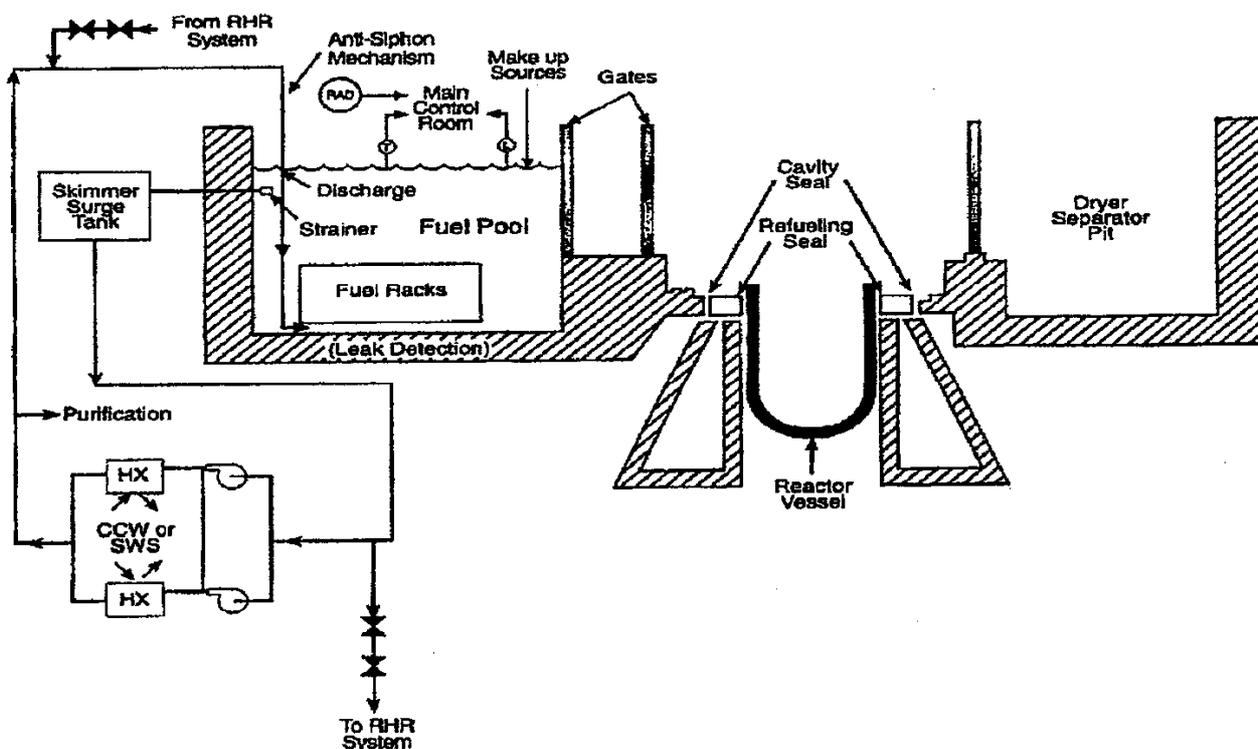


Рисунок 26

Схема бассейна с отработанным топливом и системы перемещения для реакторов с кипящей водой (источник: NUREG-1275, 1997). Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): 1 – бак пеноотделителя; 2 – очистка; 3 – из системы RHR; 4 – антисифонный механизм; 5 – сброс; 6 – фильтр; 7 – клетки для топлива; 8 – обнаружение утечки; 9 – к системе RHR; 11 – главный пульт управления; 12 – бассейн для топлива; 13 – источники подпитки; 14 – заслонки; 15 – уплотнение полости; 16 – уплотнение перезагрузки; 17 – резервуар реактора; 18 – помещение для осушителя и сепаратора.

Для среднего кумулятивного высвобождения тепловой энергии деления в 40 Мегаватт-день на килограмм урана, первоначально находившегося в топливе (МВт-день/кгU) и при среднем последующем времени распада в 15 лет, в 400 тоннах отработанного топлива энергетических реакторов будет содержаться 35 мекюри (<sup>137</sup>Cs)<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> См. [17], стр.457.

<sup>19</sup> При делении топлива из НОУ образуется 3.15 Ки цезия-137 на МВт-день выделяемого тепла. 1 Ки – это активность одного грамма радия ( $3.7 \times 10^{10}$  распадов/с). Один Беккерель (Бк) соответствует одному распаду/с.

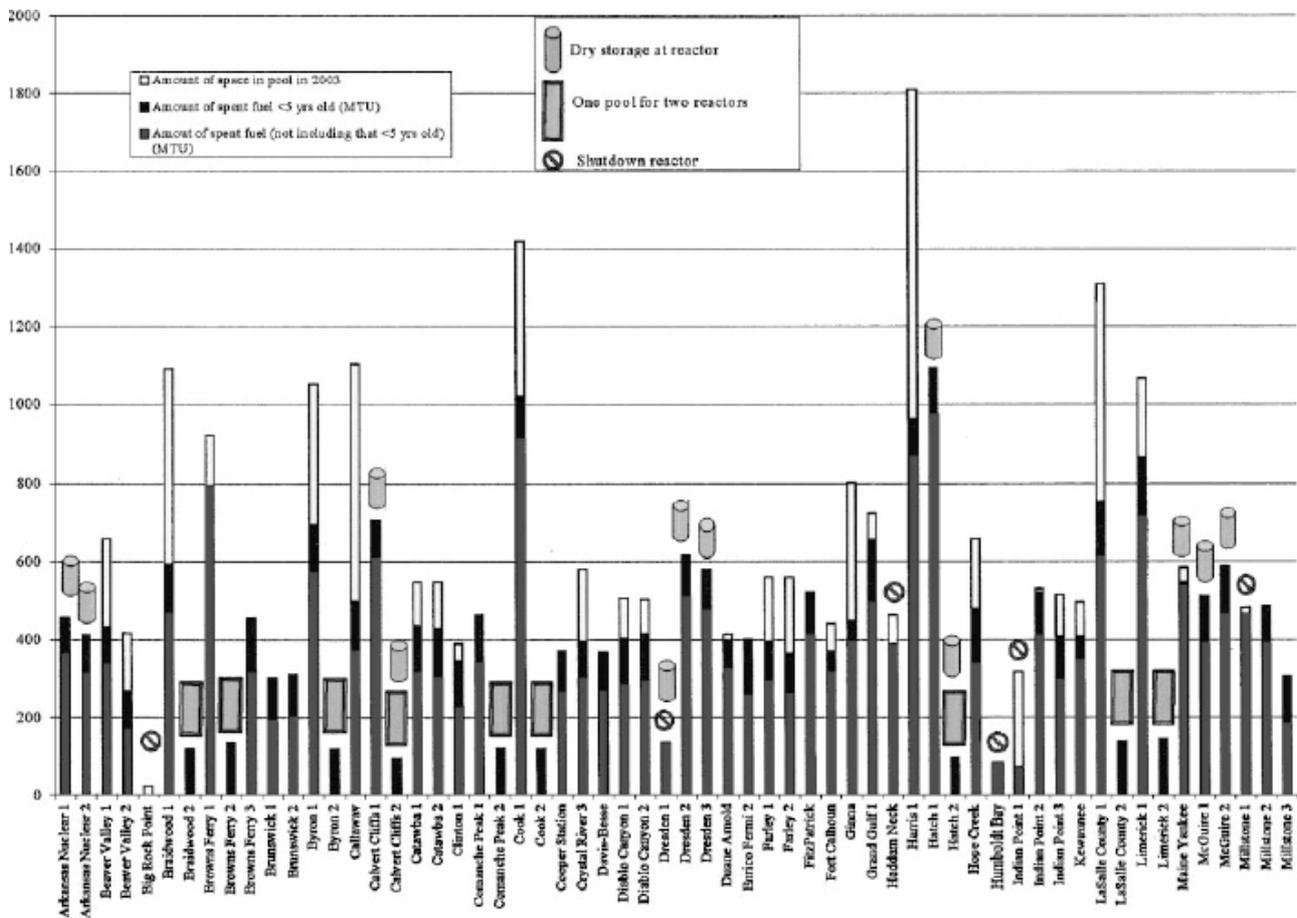


Рисунок 3

Оценка количества отработанного топлива в 2003 году для каждого из американских бассейнов с отработанным топливом, измеренное в метрических тоннах содержащегося урана. Высота столбца соответствует полной лицензированной вместимости (на 1998 год, с некоторыми обновлениями). Заштрихованная часть соответствует количеству отработанного топлива в бассейне в 2003 году. Темная штриховка соответствует оценке количества топлива, выгруженного из реакторов в течение последних 5 лет. Значок контейнера указывает на наличие сухого хранилища на площадке. Значок бассейна указывает на то, что реактор использует один и тот же бассейн с реактором слева. Источник: авторы<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> Большая часть данных взята из сведений, поданных в 1998 г. энергетическими компаниями в NRC и опубликованных заранее на их сайтах <http://www.nrc.gov/OPA/drycask/sfdata.htm>. После 11 сентября 2001 г. такие данные больше открыто не публикуются в Интернете. Вместимость бассейнов для хранения на некоторых АЭС увеличилась с 1998 г. в результате переделки стеллажей, которая привела к возрастанию плотности загрузки. Эта картина наблюдается у следующих реакторов: Crystal River 3 [“Florida Power Corporation, Crystal River Unit 3, Environmental Assessment and Finding of No Significance”, NRC, *Federal Register* (FR), v.85, n.177, pp.55059-55061, Sept. 12, 2000]; Callaway [FR, v.64, n.10, pp. 2687-2688, Jan.15, 1999]; Kewaunee [Fr, v.65, n.236, pp.76672-76675, Dec.7, 2000]. На трех других АЭС (Enrico Fermi 1, Comanche Peak, Vermont Yankee) была проведена переделка стеллажей но данных о вместимости нет и оценки влияния на окружающую среду для них не были проведены. Brunswick-1,-2, и Robinson отправляют отработанное топливо на АЭС Harris, которая находится также в Северной Каролине и принадлежит компании Carolina Light and Power. АЭС Nine Mile Point 2, Pilgrim 1, Summer и Three Mile Island 1 собираются провести переделку стеллажей для отработанного топлива в течение нескольких следующих лет (см. [10]). На крупных АЭС Rock Point, Browns Ferry 3, Diablo Canyon 1&2, Duane Arnold, Farley 1&2, Grand Gulf 1, Haddam Neck, Humboldt Bay, Palo Verdr 1-3, River Bend 1, San Onofre 1-3, Sequoyah 1&2, Washngton Nuclear и Yankee Rowe, некоторые из которых уже завершили работу, собираются добавить сухое хранение в течение нескольких ближайших лет (см. [10]). Предвари-

Если от 10 до 100%  $^{137}\text{Cs}$  в бассейне с отработанным топливом<sup>21</sup>, т.е. от 3,5 до 35 Мки, будет выброшено при пожаре отработанного топлива в атмосферу в факеле, однородно распределившемся в нижнем «слое перемешивания» атмосферы и будет разнесено по ветру в приближении «модели клина» при средних условиях (толщина слоя перемешивания 1 км, угол открытия клина 6 градусов, скорость ветра 5 м/сек, и скорость выпадения 1 см/сек), то 37 000 – 150 000 км<sup>2</sup> будет заражено до уровня более 15 Ки/км<sup>2</sup>, 6 000 – 50 000 км<sup>2</sup> будет заражено до уровня более 100 Ки/км<sup>2</sup>, а 180 – 6 000 км<sup>2</sup> будет заражено до уровня более 1000 Ки/км<sup>2</sup><sup>22</sup>. В табл. 1 и на рис. 4 показаны типичные площади загрязнения, рассчитанные при помощи программы MACCS2 для дисперсии гауссовского выброса, используемые в Ядерной регулятивной комиссии<sup>23</sup> для пожаров с тепловой мощностью 40 МВт<sup>24</sup>. Это соот-

дельный вариант этого рисунка появился в работе Allison Macfarlane “Interim storage of spent fuel in the United States”, *Annual Review of Energy and the Environment*, 26 (2001), pp.201-235.

<sup>21</sup> Оценки приведены в работе R.J.Travis, R.E.Davis, E.G.Grove and M.A.Azarm, *A Safety and Regulatory Assessment of Generic BWR and PWR Permanently Shutdown Nuclear Power Plants* (Brookhaven National Laboratory, NUREG/CR-6451; BNL-NUREG-52498, 1997), Table 3.2. Более детальный анализ представлен в работе V.L.Sailor, K.R.Perkins, J.R..Weeks and H.R.Connell, *Severe Accidents in Spent Fuel Pools in Support of Generic Safety Issue* (Brookhaven National Laboratory, NUREG/CR-4982 or BNL-NUREG-52038, 1987), Sections 3 and 4. Фактически весь цезий-137 выделится из отработанного топлива до того, как будет достигнута температура плавления циркония (1850°C). Смотрите «Доклад Американскому физическому обществу, подготовленный группой по изучению выделения радионуклидов при серьезных авариях на АЭС» (*Reviews of Modern Physics* 57, 1985, p.S64). Но существует вероятность, что часть старого топлива может не загореться и некоторое количество цезия-137 может осесть на холодных поверхностях внутри помещения.

<sup>22</sup> В «модели клина» уровень заражения  $\sigma$  (Ки/м<sup>2</sup>) определяется следующим соотношением  $\sigma = [Q/(\theta r R_d)] \exp(-r/R_d)$ , где Q - количество выделившегося изотопа в единицах Ки,  $\theta$ - угловой подветренный размер той области клина, где концентрация изотопа в воздухе считается однородной по ширине клина и по вертикали в пределах слоя перемешивания, d – подветренное расстояние (м), а  $R_d$  – «длина осаждения»:  $R_d = H v_w / v_d$ . Здесь H – толщина слоя перемешивания,  $v_w$  – скорость ветра, усредненная по слою перемешивания, а  $v_d$  – скорость осаждения аэрозоля. Отсюда определяется соотношение между концентрацией аэрозоля в воздухе и плотностью осаждения на грунт. Такой приближенный метод оценки был впервые применен в «Докладе Американскому физическому обществу, подготовленном рабочей группой по безопасности легководных реакторов» (*Reviews of Modern Physics*, 47, 1975, Supplement 1, p.S97). При однородной плотности населения радиационная доза для населения не зависит от  $\theta$ . Обширная дискуссия по образованию аэрозоля и его отложению представлена в журнале *Reviews of Modern Physics* (см. [20], стр.S69-S89). Сведения о частоте различных условий распространения в США и данные по скорости осаждения аэрозолей могут быть найдены в работе *Reactor Safety Study* (U.S. NRC, NUREG-75/014, 1975), Appendix VI-A. Смотрите также *Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis: Dispersion & Deposition Uncertainty Assessment*, (U.S. Nuclear Regulatory Commission & Commission of European Communities, NUREG-6244 and EUR-15855EN, 1995), Vols. 1-3.

<sup>23</sup> D.I.Chanin and M.L.Young, *Code Manual for MACCS2: Volume 1, User's Guide*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Sand97-0594, March 1997. В модели гауссова облака (с толщиной перемешивающего слоя H и постоянной скоростью ветра  $v_w$ ) проинтегрированная по времени концентрация аэрозоля в воздухе  $\chi$ , отнесенная к точке, проекция которой отдалена на расстояние y от центральной линии облака в поперечном направлении, а сама точка находится ниже центральной оси на расстоянии h, определяется следующим соотношением  $\chi = [Q/(\pi \sigma_y \sigma_z v_w)] \exp[-2y^2/(2\sigma_y)^2] \{ \exp[-2h^2/(2\sigma_z)^2] + \sum_{n=1-\infty} [\exp[-2(2nH-h)^2/(2\sigma_z)^2] + \exp[2(2nH+h)^2/(2\sigma_z)^2]] \}$ . Суммирование учитывает многократные отражения облака от перемешивающего слоя и почвы. Величины Q,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  зависят от подветренного расстояния. Величина Q – количество Ки в облаке, уменьшается из-за оседания аэрозоля. Концентрация выпавшего аэрозоля равна величине  $v_d \chi$ , где  $v_d$  – скорость оседания.

<sup>24</sup> В расчетах используются те же самые средние значения высоты перемешивающего слоя (1000 м), скорости ветра (5 м/с) и скорости оседания (0.01 м/с), как и в приведенных выше

ветствует продолжительности пожара в полчаса и пять часов соответственно для пожаров, в которых сгорает от 10 до 100% от 400 тонн отработанного топлива<sup>25</sup>. Аналогичные результаты были получены для более медленно горящих пожаров с мощностью в 5 МВт.

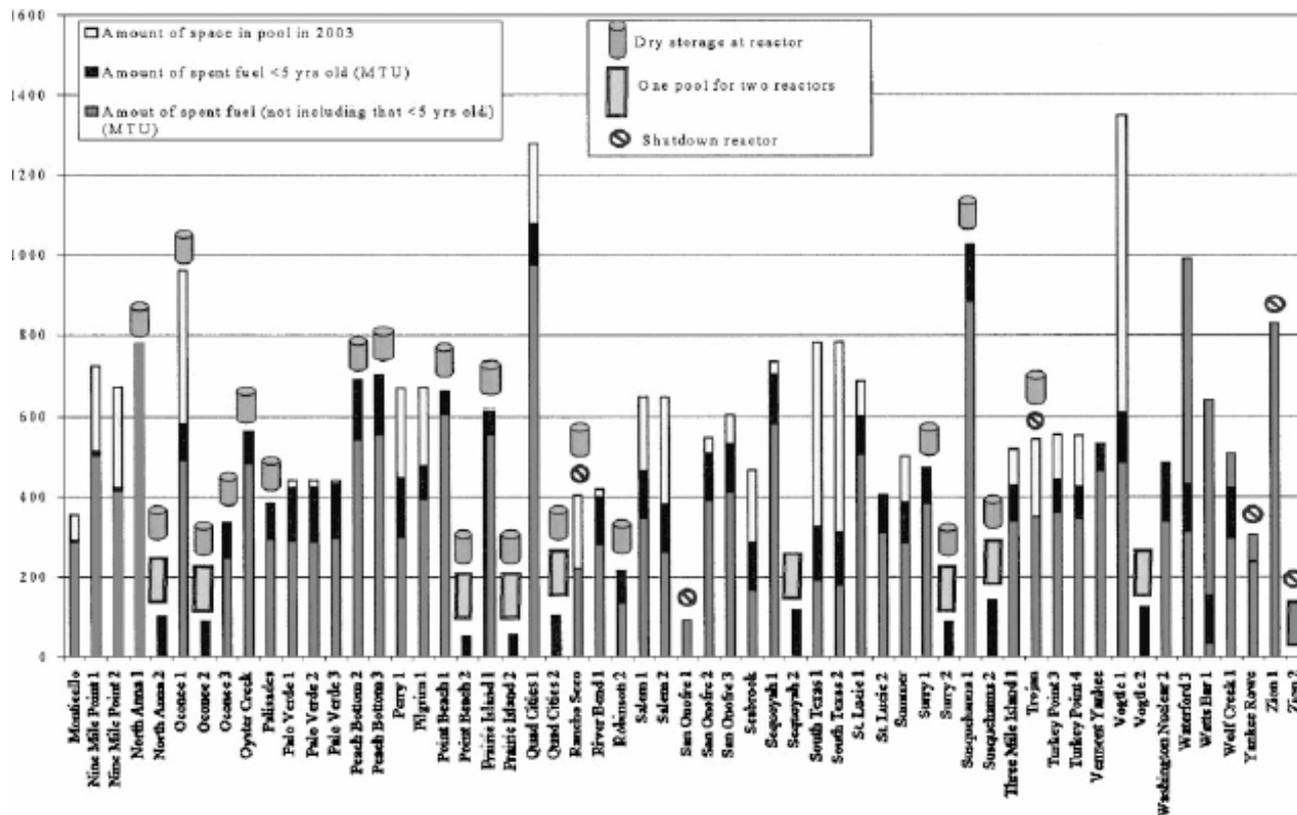


Рисунок 3  
(продолжение)

Из табл. 1 можно видеть, что для выброса 3,5 МКи рассчитанная площадь для заражения более 1000 Ки/км<sup>2</sup> в 5 – 8 раз больше площади, зараженной до этого уровня при выбросе 2 МКи при Чернобыльской аварии. Причиной этого является то, что в Чернобыле: 1) много Cs-137 было поднято до высот более 2,5 км во время начального взрыва и последующего высокотемпературного горения и поэтому было отнесено далеко по ветру<sup>26</sup>; и 2) выброс продолжался в течение 10 дней, во время которых ветер дул практически во всех направлениях. В результате более 90% <sup>137</sup>Cs из Чернобыля была распределено по площадям, в которых уровень загрязнения не превышал 40 Ки/км<sup>2</sup><sup>27</sup>. Напротив, в расчетах по клиновой модели для выброса 3,5 МКи около 50% <sup>137</sup>Cs распределено по площадям, загрязненным выше этого уровня.

Таблица 1. Типичные площади следа (в км<sup>2</sup>)

Выброс	> 100 Ки/км <sup>2</sup>	> 1000 Ки/км <sup>2</sup>
--------	--------------------------	---------------------------

расчетах по модели клина. Для совпадения со значения этой модели ( $\theta = 2.4$ ,  $\sigma_y = 11$  км при подветренном расстоянии 100 км) условия распространения выбраны в виде D-типа (по Пасквиллу), где параметры для программы MACCS2 имеют следующие значения:  $\sigma_y = 0.1474x^{0.9031}$  и  $\sigma_z = 0.3x^{0.6532}$ , а  $x$  – подветренное расстояние, выраженное в метрах.

<sup>25</sup> Теплота сгорания циркония равна 8.7 МДж/кг для горения в воздухе и 4.1 МДж/кг для горения в собственных парах. Предполагается, что в бассейне находится 80 тонн циркония, то есть 0.2 тонны на тонну урана.

<sup>26</sup> "Simulation of the Chernobyl dispersion with a 3-D hemisphere tracer model" by Janusz Pudykiewicz, *Tellus 41B* (1989), pp.391-412.

<sup>27</sup> См. [17], табл.8.

Чернобыль (2 МКи, горячий, всенаправленный)	≈ 700	
3,5 МКи (МАССS2)	3 500	200
3,5 МКи (модель клина)	6 000	180
35 МКи (МАССS2)	45 000	2 500
35 МКи (модель клина)	50 000	6 000

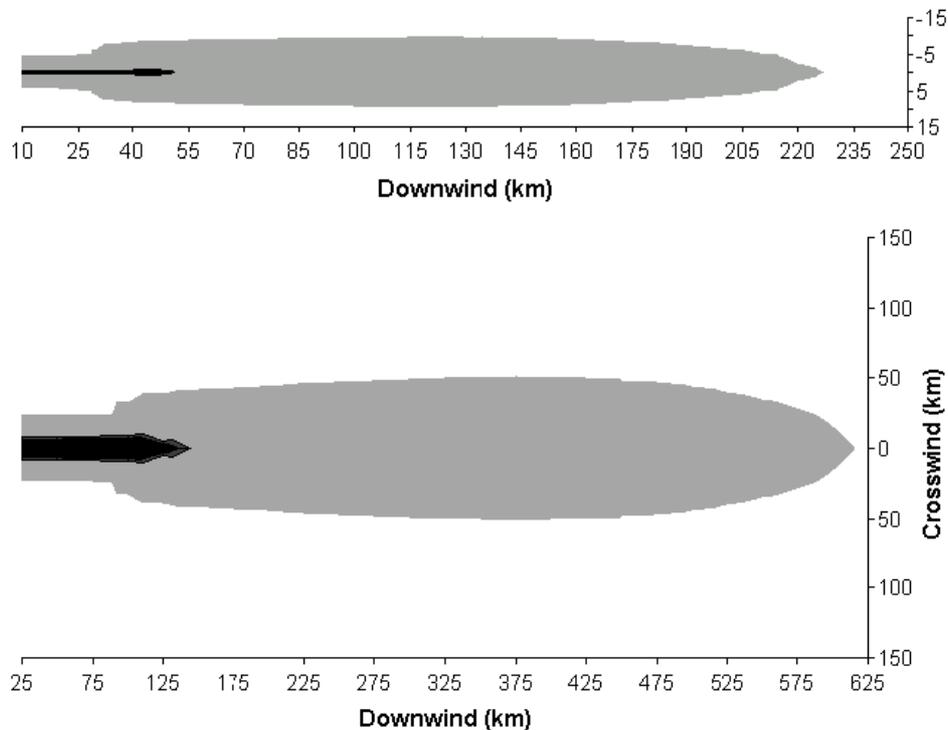


Рисунок 4

Типичные области, загрязненные выше  $100 \text{ Ки/км}^2$  (серые) и  $1000 \text{ Ки/км}^2$  (темные) для выброса 3,5 МКи (вверху) и 35 МКи (внизу). Дополнительная вероятность смерти от рака для лиц, проживающих в серой области, очень грубо оценивается в интервале от 1 до 10 процентов. Для лиц, проживающих в темной области, дополнительный риск будет более 10 процентов (т.е. «нормальная» 20% вероятность смерти от рака увеличится до более, чем 30%). Источник: авторы.

Расчетная доза облучения всего тела от внешнего излучения  $^{137}\text{Cs}$  для лиц, проживающих в течение 10 лет в районе, загрязненном до 100 или  $1000 \text{ Ки/км}^2$ , должна составить 10 – 20 или 100 – 200 бэр, с сопутствующим дополнительным риском смерти от рака в 1 или 10 процентов соответственно<sup>28</sup>. Дополнительный риск в 1 или 10 процентов увеличит средний

<sup>28</sup> Напомним, что 1 бэр равен 0.01 Зв. Для вычисления коэффициентов связи облучения и дозы см. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects (UN, 1982), Приложение E, табл. 27 (внешнее облучение) и табл. 33 (отношение внутреннего облучения к внешнему). При расчете внешнего облучения предполагается, что цезий-137 в результате погодного воздействия проникает в почву с экспоненциальным профилем, средняя глубина которого равна 3 см. По оценкам, экранировка зданиями уменьшает дозу на множитель 0.4 (деревянный дом) и 0.2 (каменный дом). В результате полная доза уменьшается на множитель, примерно равный 1/6. Считается также, что в результате собственной экранировки телом доза уменьшается на дополнительный усредненный множитель 0.7. Смотрите также работу K.F.Eckerman and J.G.Ryman, *Federal Guidance Report No.12: External Exposure To Radionuclides In Air, Water, and Soil* (Oak Ridge National Laboratory, EPA-402-R-93-081, 1993), Table II-6. Принято считать, что дополнительный риск смерти от рака составляет 1/1700 на бэр, куда включен рекомен-

риск смерти от рака за всю жизнь от 20 процентов до 21 или 30 процентов.

В исследовании, проведенном для Ядерной регулятивной комиссии в 1997 году, была получена оценка средних последствий пожара отработанного топлива водяного реактора под давлением (ВРД), с выбросом от 8 до 80 МКи  $^{137}\text{Cs}$ . Последствия включают в себя: 54 000 – 143 000 дополнительных смертных случаев от рака, отторжение 2 000 – 7 000 км<sup>2</sup> сельскохозяйственных угодий и экономические потери из-за эвакуации в 117 – 566 миллиардов долларов<sup>29</sup>. Это согласуется с нашими вычислениями с использованием программы MACCS2. Очевидно, что необходимо принять все практические меры для предотвращения возникновения такого события.

## СЦЕНАРИИ ПОТЕРИ ВОДЫ ИЗ БАССЕЙНА С ОТРАБОТАННЫМ ТОПЛИВОМ

Охлаждающая вода в бассейне с отработанным топливом может быть потеряна несколькими способами, в результате аварий или злоумышленных деяний. Для наших целей

---

двумый коэффициент уменьшения порядка двойки для риска от хронического облучения по сравнению с внезапным облучением типа Хиросимы и Нагасаки [“Epidemiological Evaluation of Radiation-Induced Cancer”, Annex I in *Sources and Effects of Ionizing Radiation* (UN, 2000), p.361]. Обратите внимание, что аргументы о справедливости линейной экстраполяции к малым дозам от больших доз, для которых имеются эпидемиологические факты, неприменимы в этом диапазоне доз. Средняя доза у большого числа больных, выживших в Хиросиме и Нагасаки и прошедших пожизненное медицинское обследование, составляет 21 бэр (см. табл.6 в предыдущей ссылке). Было обнаружено, что статистически значимый результат снижается до 5 бэр для рака тела, причем соотношение между дозой и эффектом для такого заболевания остается линейным примерно до 300 бэр [D.A.Pierce, Y.Shimizu et al., “Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 12, Part I. Cancer: 1950-1990”, *Radiation Research* 146 (1), p.10, 1996].

<sup>29</sup> Смотрите первую ссылку в [20]. Стоимость сельскохозяйственной земли составляет, как считается, 200 тысяч долларов за км<sup>2</sup>. Поэтому стоимость отчуждаемой земли оценивается в 0.4-1.4 миллиардов долларов. Остальную часть затрат составит, как предполагается, эвакуация населения: 74 тысячи долларов на каждого эвакуированного. Поэтому при таком сценарии будут эвакуированы на длительный срок 1.6-7.6 миллионов человек. Стоимость последствий событий, которые произойдут, как предполагается, на расстоянии более 80 км от АЭС, оценивается в 17-279 миллиардов долларов, если плотность населения равна 80 человек на км<sup>2</sup>. Это соответствует эвакуации с площади 1100-1900 км<sup>2</sup>. Мы провели расчеты с помощью программы MACCS2 и получили следующее. При выделении 3.5-35 миллионов Ки цезия-137 в облаке с тепловой мощностью 40 МВт ущерб оценен в 50-700 миллиардов долларов плюс 50000-250000 смертей от рака среди людей, остающихся на зараженной территории (2000 человеко-бэр на каждую смерть от рака, как приведено в работе NRC *Regulatory Analysis Technical Evaluation Handbook*, NUREG/BR-0184, 1997). Была принята средняя плотность населения 250 человек на км<sup>2</sup> (такая плотность типична для северо-востока США). Эвакуация подразумевается, если предполагаемая доза облучения превысит 0.5 бэр за год (это рекомендация EPA Protective Action Guide). Считалось, что затраты на эвакуацию равны 140 тысяч долларов на человека для фиксированного имущества, плюс 7500 долларов на человека для переезда и 2500 долларов на гектар покинутой земли (с учетом ожидаемого уровня заражения). Рассматривались два возможных фактора дезактивации обрабатываемой земли с соответствующими затратами 9000 и 20000 долларов за гектар (предполагается, что эта земля занимает около 20% всей площади). Расходы на постоянно проживающего лица для этих вариантов оценены в 19000 и 42000 долларов, соответственно (в варианте совместного пользования городской землей), не считая затрат на вывоз радиоактивных отходов. [Эти расходы подсчитаны на основе работы D.I.Chanin and W.B.Murfin, *Estimation of Attributable Costs from Plutonium Dispersal Accidents* (Sandia National Laboratory, SAND96-0957, 1996)]. На основе этих предположений о затратах сельскохозяйственные земли не будут дезактивированы, но приусадебные участки будут очищаться до уровня, дающего дозу до 4 бэр в год в течение всего срока временного переселения, который, как предполагается, будет длиться до 30 лет. Диапазон заражения цезием-137 площадей, на которых будет происходить дезактивация, составит от 2.5 до 80 Ки/км<sup>2</sup>.

не потребуются подробное обсуждение чувствительной информации. Ниже мы представим некоторую перспективу следующих общих случаев: выкипание, вытекание в другие объемы из-за открытия некоторой комбинации клапанов, заслонок и трубопроводов, которые удерживают воду в бассейне, пожар в результате падения большого самолета, и пробивание валом авиационной турбины или кумулятивным зарядом.

Поддержание отработанного топлива в холодном состоянии не так сложно, как поддержание в том же состоянии топлива в активной зоне работающего реактора. Через 5 минут после выключения ядерное топливо все еще выделяет 800 кВт тепла от радиоактивного распада на метрическую тонну урана (кВт/тU)<sup>30</sup>. Однако, после нескольких суток, теплота распада уменьшается до 100 кВт/тU, а через 5 лет ее уровень понижается до 2 – 3 кВт/тU (см. рис. 5).

В случае отключения охлаждения время, которое потребуется для выкипания бассейна с отработанным топливом до верхнего края отработанного топлива, превысит 10 суток, если самое последнее отработанное топливо было помещено в бассейн год назад. Если вся активная зона реактора была выгружена в бассейн с отработанным топливом всего через несколько суток после отключения, то это время может сократиться до одних суток<sup>31</sup>. Быстрое перемещение отработанного топлива в бассейны для хранения становится обычным по мере того, как операторы реактора сокращают длительность периодов выключения. Операторы часто перемещают всю активную зону в бассейн для того, чтобы ускорить перезагрузку топлива, или облегчить проверку состояния внутренности резервуара реактора под давлением и идентификации и замены топливных стержней, в которых имеется утечка продуктов деления<sup>32</sup>.

---

<sup>30</sup> Расчеты проведены с помощью компьютерной программы Origen 2.1 [ORIGEN 2.1: *Isotope Generation and Depletion Code Matrix Exponential Method*, CCC-371 ORIGEN 2.1, (Oak Ridge National Laboratory, Radiation Safety Information Computational Center, August 1996)].

<sup>31</sup> В 1996 г. сотрудники NRC сообщили о случае, когда кипение завершилось в течение 8 часов вместо 4.5 дней, потому что активная зона была загружена в бассейн для отработанного топлива через 5 дней после загрузки реактора, а не через 23 дня, как это произошло при предыдущей перезагрузке топлива. (NRC, "Briefing On Spent Fuel Pool Study", Public Meeting, November 14, 1996, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/tr/1996/19961114a.html>, accessed Dec.10, 2002, p.27). Это совпадает со следующими расчетами. Предположим, что типичный для водяных реакторов под давлением бассейн имеет площадь поверхности 61.3 м<sup>2</sup>, глубину 11 м и содержит около 600 тонн воды (как сказано в [1]). При более точных расчетах надо учитывать количество воды, вытесненное топливными сборками. Далее мы допустим, что масса урана в одной сборке равна 471 кг, размеры поперечного сечения сборки составляют 21.4 x 21.4 см, а высота – 4 м. В такой сборке содержится 59% воды по объему (*Nuclear Engineering Informational*, September 2001, p.24). Если в бассейне содержится 340 тонн топлива с возрастом 1-20 лет, оно испускает в среднем 3 кВт тепла от распада на тонну урана. Только что выгруженная активная зона массой 85 тонн урана будет выделять 120 кВт на тонну урана через 4 дня после выгрузки. Таким образом, полное количество выделяемого тепла в двух случаях (только старое топливо и смесь старого и свежего топлива) составит 1 или 11 Мвт. Теплоемкость воды равна 4200 Дж/кг·°C и поэтому ее температура поднимется от 30°C до температуры кипения через 50 или 4.4 часов. Скорость понижения уровня воды из-за испарения (скрытая теплота испарения равна 2.3 МДж/кг) составит при этом 0.026 или 0.29 метров в час. Если над топливом находится 7 м воды, то потребуется 11 дней или 1 день до того, как водяной слой радиационной защиты уменьшится до одного метра.

<sup>32</sup> В принципе, удаление части сборок отработанного топлива и перестановка остальных до введения свежего топлива должны производиться быстрее. Но любое отклонение от установленного режима перестановки (например, из-за обнаружения поврежденного топлива) потребует длительного перерасчета запаса подкритичности (частное сообщение Дэвида Лохбаума из Союза обеспокоенных ученых, 7 января 2003 г.).

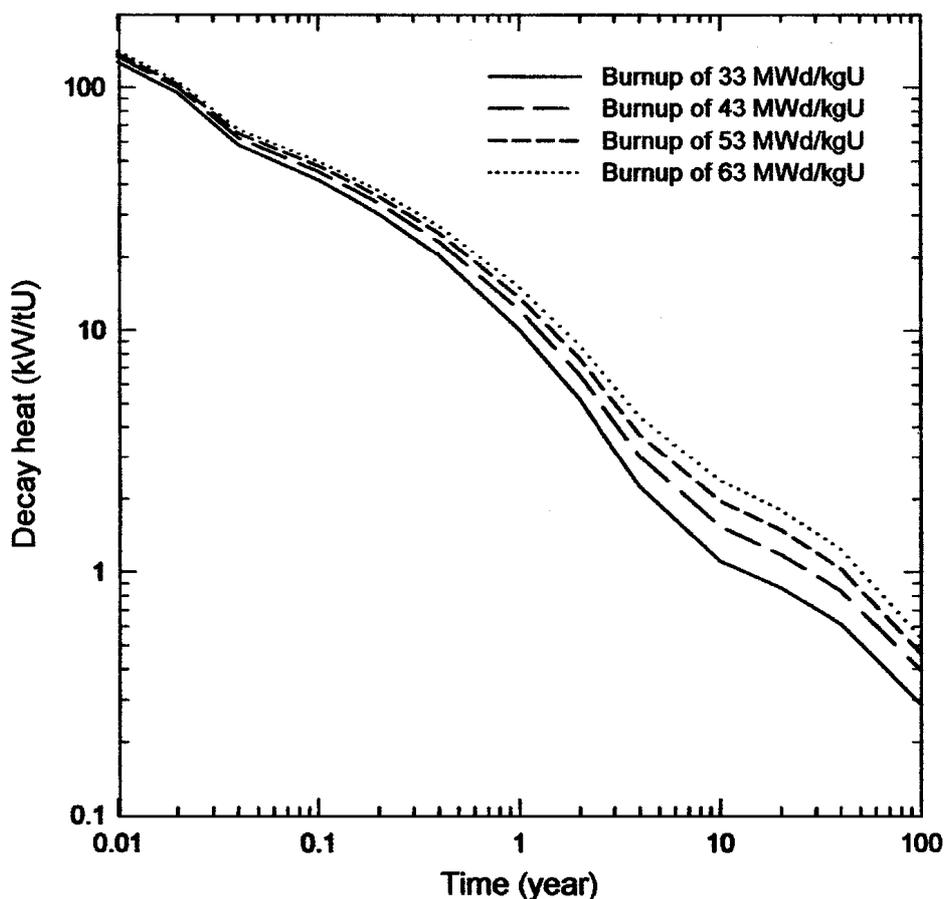


Рисунок 5

Теплота распада в зависимости от времени в интервале от 0,01 года (около 4 суток) до 100 лет для степени выгорания отработанного топлива в 33, 43, 53, и 63 МВт·день/кгU. Наименьшее выгорание было характерно для 1970-х годов. В настоящее время степень выгорания составляет около 50 МВт·день/кгU. Источник: авторы<sup>33</sup>.

Даже сутки являются достаточно большим периодом для осуществления аварийного охлаждения, если только операторам не помешает это сделать крупная авария или террористический акт, такой, как нападение на связанный с бассейном реактор с выбросом большого количества радиоактивности. В этой статье мы не обсуждаем сценарии, в которых горение отработанного топлива сочетается с последствиями выброса радиоактивности из реакторов. Мы поэтому сконцентрируемся на возможности аварии или террористического акта, при котором вода вытечет из бассейна до уровня ниже верхнего края топлива.

### Вытекание

Все бассейны с отработанным топливом соединены с помещением, в котором находится резервуар реактора под давлением, каналами для перемещения топлива. Во всех бассейнах может произойти частичное вытекание в результате неисправности системы соединительных трубопроводов, подвижных заслонок, или уплотнений, предназначенных для закрытия промежутка между резервуаром под давлением и полости, окружающей резервуар<sup>34</sup>.

<sup>33</sup> Рис.5 получен при помощи ORIGEN 2.1 в предположении, что начальные степени обогащения при выгорании 33, 43, 53 и 63 МВт-д/кг составляли 3.2, 3.7, 4.4 и 5.2%, соответственно. Использовались файлы PWRU.LIB и PERU50.LID со значениями поперечных сечений для подсчета скорости образования актинидов и продуктов распада в топливе для водяного реактора под давлением.

<sup>34</sup> "Сотрудники управления по регулировке ядерных реакторов (NRR) определили в ходе недавнего обзора всех энергетических реакторов,... что на некоторых площадках нет уст-

В докладе Ядерной регулятивной комиссии 1997 года следующим образом описываются два случая случайного частичного вытекания<sup>35</sup>:

Произошло два случая потери запаса охладителя бассейна с отработанным топливом, в которых понижение уровня в бассейне превысило 1,5 м. Эти события были прекращены действиями оператора, когда над хранящимся топливом оставалось примерно 6 м охладителя. Без вмешательства оператора потеря запасов продолжалась бы до тех пор, пока уровень в бассейне понизился бы до края хранящегося топлива, что привело бы к появлению таких полей радиации, которые запретили бы доступ к бассейну с отработанным топливом.

Как только уровень воды понизится до верхнего края топлива, уровень гамма-излучения возрастет до 10 000 бэр/час на краю бассейна и до сотен бэр/час в местах здания с бассейном отработанного топлива вне прямой видимости топлива из-за рассеяния гамма-лучей в воздухе и в конструкции здания (см. рис. 6)<sup>36</sup>. При нижнем уровне радиации летальная доза

---

ройств для отключения сифонов на потенциальных магистралях сифонного водосброса. При операциях перезагрузки топлива появляется магистраль к корпусу реактора и потери материала могут произойти через систему снятия остаточного тепла, системы химического и объемного контроля, а также через систему слива из шахты реактора или слива в контейнеры для отработанного топлива из бассейна. В таких ситуациях для многих конструкций избыток потерь материала ограничивается внутренними водосливами или поднятием уровня во внутренних водостоках, которые поддерживают уровень воды выше уровня хранимого топлива. Во время обзора сотрудники нашли, что в пяти бассейнах для отработанного топлива имелись трубы для перемещения топлива, которые расположены ниже верхнего уровня хранимого топлива и не имели соответствующих структур". (*Operating Experience Feedback Report: Assessment of Spent Fuel Cooling*, NUREG-1275, pp.5-6). В 1994 г. около 200 кубометров воды вытекли из труб, которые замерзли в неотопляемых участках системы переноса топлива в бассейн на закрытой станции Dresden I. Была отмечена потенциальная возможность «аварии проточных труб диаметром около метра, которая могла бы быстро снизить уровень воды в бассейне ниже верхушки хранимого топлива более, чем на метр». [*Dresden, Unit I Cold Weather Impact on Decommissioned Reactor (Update)*, U.S. NRC, January 24, 1994, pp.94-109].

<sup>35</sup> *Operating Experience Feedback Report: Assessment of Spent Fuel Cooling*, NUREG-1275, p. 32 and Fig. 3.2.

<sup>36</sup> Вычислялись дозы от сухого бассейна, содержащего 650 тонн отработанного топлива со степенью выгорания 43 МВт-д/кг, уложенных в квадратную решетку с шагом 1.4 см. Топливо неоднородно по возрасту и состоит из следующих групп: по 20 тонн со временами охлаждения 30 дней, 1 год и 2 года; 100 тонн с временем охлаждения 5 лет; 240 тонн с охлаждением в течение пяти лет и 250 тонн с возрастом 25 лет. Интенсивность источников гамма-лучей в топливе рассчитывалась при помощи программы ORIGEN2 с разделением на 18 энергетических интервалов. Эти данные по источникам излучения затем вводились в программу MCNP4B2 [*Los Alamos National Laboratory, Monte Carlo N-Particle Transport Code System (Radiation Information Computational Center, CCC-660 M CNP4B2, 1998)*], которая применялась для произведения расчетов по радиационному переносу, чтобы получить поток и энергетический спектр гамма-лучей на высоте 1 м от пола здания для радиусов 5, 10 и 15 м от его центра. Затем определялись дозы излучения с использованием "American National Standard for Neutron and Gamma-Ray Fluence-to-Dose Factors" (American Nuclear Society, ANSI/ANS-6.1.1, 1991) при усредненном коэффициенте самоэкранирования 0.7. Плотность бетона равнялась 2.25 г/см<sup>3</sup>, а состав (в процентах по весу) выглядел так: 77.5% SiO<sub>2</sub>, 6.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6.1% CaO, 4.0% H<sub>2</sub>O, 2.0% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.7% Na<sub>2</sub>O, 1.5% K<sub>2</sub>O, 0.7% MgO ("Los Alamos concrete", MCNP4B2 manual, pp.5-12). Если у здания нет крыши, дозы на расстоянии 10 и 15 м уменьшаются (соответствующие множители составляют 0.37 и 0.24) Аналогичные расчеты для 400 тонн отработанного топлива со степенью выгорания 33 МВт-д/кг (четыре равные по весу группы с временами охлаждения 30 дней, год, два года и пять лет) приведены в работе [2], Appendix C: «Доза облучения от отработанного топлива, помещенного в сухой бассейн».

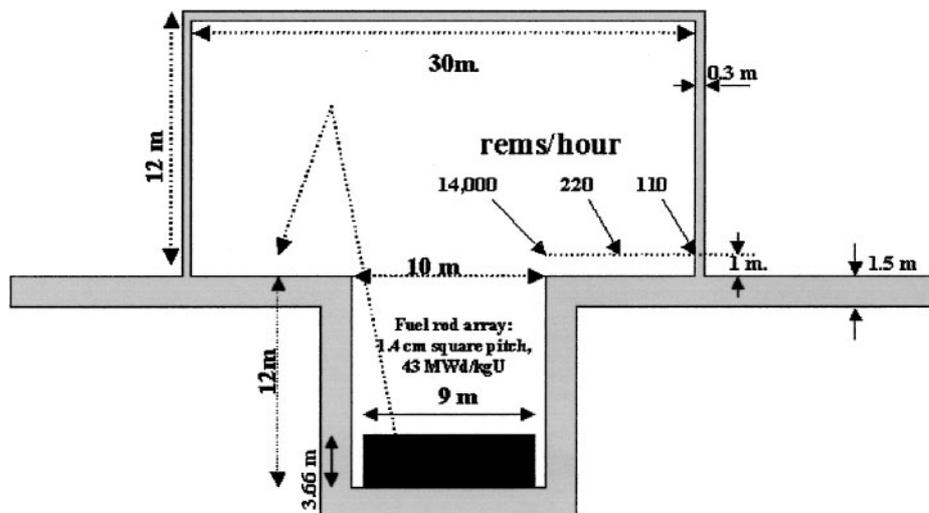
может быть получена примерно в течение часа<sup>37</sup>. При таких уровнях накопления дозы сотрудники Ядерной регулятивной комиссии предполагают, что дальнейшее вмешательство *на месте* будет невозможным<sup>38</sup>.

### Пожар

Падение большого самолета на бассейн с отработанным топливом вызывает опасения как в отношении пробивания (см. ниже), так и пожара. В отношении пожара исследователи в Сандийской национальной лаборатории, используя воду для моделирования керосина, провели эксперимент с ударами наполненных крыльев самолета по взлетной полосе. Они пришли к выводу, что при скорости более 60 м/с приблизительно 50% жидкости распыляется так мелко, что она испаряется еще до того, как достигнет земли. Если бы жидкость была топливом, то обязательно возник бы огненный шар, и в высокотемпературных условиях огненного шара испарится значительно большая доля массы<sup>39</sup>.

Взрывная волна, которая будет сопровождать взрыв топливно-воздушной смеси, может не разрушить бассейн, но она легко может обрушить верхнюю часть здания, затруднив доступ к бассейну и падению обломков в бассейн. В пространстве между некоторыми бассейнами может также возникнуть потенциально разрушительное быстрое горение воздушно-топливной смеси. Ожидается, что любой оставшийся керосин будет плавать на поверхности и гореть со скоростью около 0,6 см/мин, если будет обеспечен достаточный доступ воздуха<sup>40</sup>.

Сгорание 30 кубометров керосина – около одной трети от того, что может находиться в таком типе самолетов, которые атаковали Всемирный торговый центр 11 сентября 2001 года<sup>41</sup> – высвободит около  $10^{12}$  джоулей тепла, что достаточно для испарения 500 тонн воды. Однако, в большинстве случаев, только относительно малая часть этого тепла попадет в бассейн.



Доза составила около 300 рад/час на уровне пола на расстоянии 15 м от бассейна, имеющего прямоугольную форму со сторонами 10.6 и 8.3 м.

<sup>37</sup> Среди сотрудников, работавших в аварийных условиях в Чернобыле, смертные случаи наступали при дозах свыше 220 бэр. Среди тех, кто получал дозы в интервале 420-660 бэр, погибала одна треть. Только один сотрудник (95%) выжил среди тех, кто получил более высокие дозы (см. [17], табл.11).

<sup>38</sup> Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants, p. A1A-1.

<sup>39</sup> S. R. Tieszen, *Fuel Dispersal Modeling for Aircraft-Runway Impact Scenarios* (Sandia National Laboratory, SAND95-2529, 1995), p. 73.

<sup>40</sup> *Fuel Dispersal Modeling for Aircraft-Runway Impact Scenarios*, p. 70.

<sup>41</sup> *World Trade Center Building Performance Study*, (FEMA, 2002) Appendix E, <http://www.fema.gov/library/wtcstudy.shtm> (просмотрено 10 декабря 2002 года).

## Рисунок 6

Расчетные уровни радиации из вытекшего бассейна с отработанным топливом на высоте в один метр над уровнем пола в упрощенной цилиндрически симметричной конструкции здания бассейна с отработанным топливом. Даже за пределами прямой видимости отработанного топлива скорость накопления дозы от гамма-лучей, рассеянных воздухом, крышей и стенами, превысит сто бэр/час.

*Пробивание валом турбины авиационного двигателя, упавшим контейнером, или кумулятивным зарядом*

Как можно предположить из рисунка 2, многие бассейны с отработанным топливом располагаются над уровнем земли или над пустыми помещениями. Такие бассейны могут полностью вытечь, если будет пробито их дно, или частично вытечь, если будут пробиты их боковые стенки.

Опасения того, что вал турбины от разбившегося высокоскоростного истребителя или военные действия могут стать причиной пробивания стенки бассейна с отработанным топливом и вытекания охладителя привели к тому, что в 1970-х годах в Германии стали требовать, чтобы такие бассейны располагались вместе со связанными с ними реакторами внутри толстостенных защитных оболочек ядерных реакторов. Когда в Германии было решено организовать крупные хранилища отработанного топлива, удаленные от реакторов, там отвергли большие бассейны для хранения отработанного топлива и решили вместо этого использовать сухое хранение в толстостенных чугунных контейнерах, охлаждаемых снаружи конвективно циркулирующим воздухом. Контейнеры хранятся в железобетонных зданиях, которые обеспечивают некоторую защиту от ракет<sup>42</sup>.

Сегодня вызывают опасения и валы турбин крупных, медленно движущихся пассажирских и грузовых самолетов. После атак на Всемирный торговый центр 11 сентября 2001 года швейцарский ядерный регулятивный орган заявил, что:

С точки зрения строительной техники, атомные электростанции (во всем мире) *не* защищены от влияния военных действий или атак террористов с воздуха.. нельзя исключить возможность того, что топливные элементы в бассейнах для отработанного топлива или первичная система охлаждения будут повреждены, и это приведет к выбросу радиоактивных веществ [курсив в оригинале]<sup>43</sup>.

Сотрудники Ядерной регулятивной комиссии решили, что разумно предположить, что вал турбины большого авиационного двигателя может проникнуть в бассейн для хранения

---

<sup>42</sup> Правительство немецкой земли Нижняя Саксония выпустило 16 мая 1979 г. постановление относительно планировавшегося центра ядерного топлива в Горлебене. Одним из пунктов постановления стал отказ в выдаче лицензии на плотное хранение отработанного топлива в бассейне, в частности, из-за опасений попадания снарядов в военное время. За этим постановлением последовали слушания, где более 60 ученых, включая двух авторов работы (J.B. and G.T.), представили свои анализы. Третий автор (K.J.) отвечал за конструкцию бассейна и впоследствии осуществлял надзор за конструкцией сухих контейнеров, используемых сейчас в Германии [Klaus Janberg, "History and actual status of aircraft impact and anti-tank weaponry consequences of spent fuel storage installations", paper presented at the International Conference on Irradiated Nuclear Fuel, Moscow, IFEM, September 11, 2002]. Краткое описание (на немецком языке), фотографии и диаграммы центрального немецкого предприятия для хранения в сухих контейнерах, которые были установлены в Горлебене вместо бассейна для отработанного топлива, можно увидеть в *Brennelementlager Gorleben, BLG*,

<sup>43</sup> Смотрите меморандум швейцарского федерального инспектора по ядерной безопасности (HSK) «Protecting Swiss Nuclear Power Plants Against Airplane Crash», p.7. В этом документе приведены также швейцарские требования к защите (аналогичные немецким), [http://www.hsk.psi.ch/pub\\_eng/publications/other%20publications/2001/AN-4111\\_E-Uebersetz\\_Flz-absturz.pdf](http://www.hsk.psi.ch/pub_eng/publications/other%20publications/2001/AN-4111_E-Uebersetz_Flz-absturz.pdf), Jan.9,2003.

отработанного топлива, и осушить его<sup>44</sup>. На основании расчетов с использованием феноменологических формул, определенных в экспериментах со снарядами, попадающими в железобетон, проникновение нельзя исключить для высокоскоростного падения, но он представляется маловероятным для падения с низкой скоростью<sup>45</sup>. Это согласуется с результатами сильно ограниченного анализа, недавно опубликованными Институтом ядерной энергии<sup>46</sup>. Сам анализ не был направлен на независимую рецензию из-за «соображений безопасности». В соответствии с пресс-релизом Института ядерной энергии, однако, делается вывод о том, что двигатель самолета, движущегося с малой скоростью, такого, как самолет, упавший на Пентагон 11 сентября 2001 года (приблизительно 560 км/час, или 156 м/сек), не пробьет стенку бассейна. Столкновение с большей скоростью, такое, как было с южной башней Всемирного торгового центра (950 км/час, или 260 м/сек), при котором кинетическая энергия была в три раза больше, исключается из-за того, что «вероятность удара самолета в выделенную точку конструкции – в особенности такой небольшой, как атомная электростанция – становится значительно меньше при увеличении скорости». В пресс-релизе Института ядерной энергии имеется иллюстрация, показывающая гигантскую башню Всемирного торгового центра (63 метра шириной и 400 метров высотой) на первом плане и небольшой бассейн с от-

---

<sup>44</sup> «При оценках... катастрофического ущерба бассейнам с отработанным топливом при соударении с ними самолетов (то есть, бассейн настолько поврежден, что он быстро обезвоживается и не может быть снова заполнен водой от внутреннего или внешнего источника) персонал пользуется моделью с точечным источником и предполагает, что произошло прямое соударение с бассейном, имеющим размер 30x15 м. Это основано на работе *Evaluation of External Hazards to Nuclear Power Plants in the United States* (NUREG/CR-5042), где приведены следующие оценки: одного или двух самолетов хватит, чтобы преодолеть стену из железобетона толщиной 1.5 м ... Подсчитано далее, что повреждений бассейнов с отработанным топливом от 1-2 самолетов хватит, чтобы скинуть все покрытия с отработанного топлива. См. [1], pp.3-23.

<sup>45</sup> Смотрите доклад *Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facility* (U.S. Department of Energy, DOE-STD-3014-96, 1996), Appendix C. Мы применили эти формулы для турбинного вала самолета, весящего 400 кг, имеющего диаметр 15 см и движущегося со скоростью 156 м/с (это скорость самолета, попавшего в Пентагон) и 260 м/с (оцениваемая скорость самолета, попавшего в Южную башню Всемирного торгового центра (См. [41]). Эти формулы предсказывают, что подобный объект может продырявить стену из железобетона толщиной 0.8-1.8 м в зависимости главным образом от скорости при соударении. Возможно, что бассейн с отработанным топливом, содержащий воду, смешанную с плотными топливными сборками, может противодействовать проникновению скорее, как бесконечно толстая пластина. В этом случае диапазон глубин проникновения турбинного вала крупного самолета становится равным 0.4-1.3 м. Подробное рассмотрение, где демонстрируются значительная неопределенность эмпирических формул по проникновению и весьма ограниченный диапазон глубин, когда они эмпирично проверялись, приведено в работе *Review of empirical equations for missile impact effects on concrete* (Yan A.Teland, Norwegian Defense Research Establishment, FFI/RAPPORT-97/05856, 1998). Другую точку для сравнения дает заключение сотрудников NRC о том, что «если бы контейнеры упали на дно бассейна с отработанным топливом, вероятность потери их содержимого будет равна единице» (см. [1], p.A2C-3). При высоте падения 12 м (глубина бассейна) кинетическая энергия контейнера с массой 100 тонн (если пренебречь потерей энергии на вытеснение воды и разрушение стеллажей с отработанным топливом) составит около 10 МДж, что равно примерно энергии турбинного вала большого авиационного двигателя при скорости около 240 м/с. Поскольку контейнеру придется пробить большее отверстие, можно ожидать, что поглощенная структурой энергия также окажется больше. Следует также отметить, что вес всей авиационной турбины составляет около 4 тонн, а диаметр, включая лопатки, будет примерно таким же, как и у контейнера с отработанным топливом – поэтому кинетическая энергия при скорости 240 м/с окажется примерно в десять раз больше.

<sup>46</sup> *Aircraft crash impact analyses demonstrate nuclear power plant's structural strength* (Nuclear Energy Institute Press release, Dec. 2002, <http://www.nei.org/documents/EPRINuclearPlantStructuralStudy200212.pdf>, получен 5 января 2003 года).

работанным топливом (24 метра шириной и 12 метров высотой) на расстоянии. По-видимому, не было сделано анализа возможности падения, разрушающего подпорки под бассейном с отработанным топливом, или переворачивающего его. Следует провести менее ограниченный анализ под покровительством правительства США.

Атака террористов с применением противотанковой ракеты с кумулятивным зарядом также может привести к нарушению целостности бассейна – так же, как и падение на него контейнера для отработанного топлива<sup>47</sup>.

## **ПРОЦЕССЫ ОХЛАЖДЕНИЯ В ЧАСТИЧНО ИЛИ ПОЛНОСТЬЮ ОСУШЕННОМ БАСЕЙНЕ С ОТРАБОТАННЫМ ТОПЛИВОМ**

### **«Плотная упаковка»**

Размеры бассейнов для хранения в США – аналогично таким же в Европе и Японии – первоначально выбирались в предположении, что отработанное топливо будет сохраняться на площадке только в течение нескольких лет до тех пор, пока оно достаточно не охладится для перевозки на завод по переработке, где топливо будет растворяться, а уран и плутоний извлекаться для повторного использования. Однако, в 1974 году Индия испытала ядерное взрывное устройство, изготовленное из плутония, извлеченного «для мирных целей». Администрация Картера ответила в 1977 году остановкой лицензирования почти законченного американского завода по переработке. Смысл этого состоял в том, что переработка в США сможет легализовать получение выделенного плутония другими странами, заинтересованными в разработке ядерного оружия. Поэтому в законе о политике для ядерных отходов 1982 года правительство США обязалось предоставить альтернативное назначение для отработанного топлива, накапливающегося в бассейнах реакторов, построив глубокое подземное хранилище. В соответствии с законом приемка отработанного топлива в таком хранилище предполагалась начаться в 1998 году. Во время написания статьи Министерство энергетики США планирует открыть хранилище в Юкка Маунтин в 2010 году<sup>48</sup>, но Главное учетное управление определило несколько факторов, включая бюджетные ограничения, которые могут привести к задержке открытия до 2015 года<sup>49</sup>.

Операторы американских ядерных электростанций справляются с отсутствием назначения за пределами площадки для их накапливающегося отработанного топлива, упаковывая в свои бассейны для хранения так много топливных сборок, насколько это возможно, и тогда, когда бассейны заполняются, приобретают для избыточного топлива сухие контейнеры. Начальная проектная плотность отработанного топлива в бассейнах, связанных с водяными реакторами под давлением, соответствовала редкой квадратной решетке. Сегодня стандартное расстояние для новых плотно упакованных клеток равно 23 см, что совсем немного превышает расстояние в 21,4 см в активных зонах<sup>50</sup>. Это «плотно упакованное» топливо поддерживается в подкритическом состоянии за счет окружения каждой топливной сборки металлической коробкой, стенки которой содержат поглощающий нейтроны бор<sup>51</sup> (см. рис.

<sup>47</sup> *Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants*, p. A2C-3.

<sup>48</sup> *Analysis of the Total System Lifecycle Cost of the Civilian Radioactive Waste Management Program*, (U.S. DoE, Office of Civilian Waste management, Report # DOE/RW-0533, 2001), pp. 1–7.

<sup>49</sup> “Nuclear Waste: Uncertainties about the Yucca Mountain Repository Project”, testimony by Gary Jones, Director, Natural Resources and Environment, U.S. General Accounting Office, before the Subcommittee on Energy and Air Quality, House Committee on Energy and Commerce, 21 March 2002.

<sup>50</sup> Частное сообщение Чарльза Пеннингтона (компания NAC International), 2 декабря 2002 г.

<sup>51</sup> На недавно установленных стеллажах бор содержится в пластинах «Борал», состоящих из карбида бора ( $B_4C$ ) в алюминиевой матрице; эти пластины постоянно закреплены между алюминиевыми пластинами. Доказано, что такая конструкция более надежна, нежели предыдущая, где карбид бора смешивался пополам (по объему) с углеродом, образуя пластинки толщиной 6 мм, которые окружались нержавеющей сталью толщиной 3 мм (см. [2], стр.19).

7<sup>52</sup>).

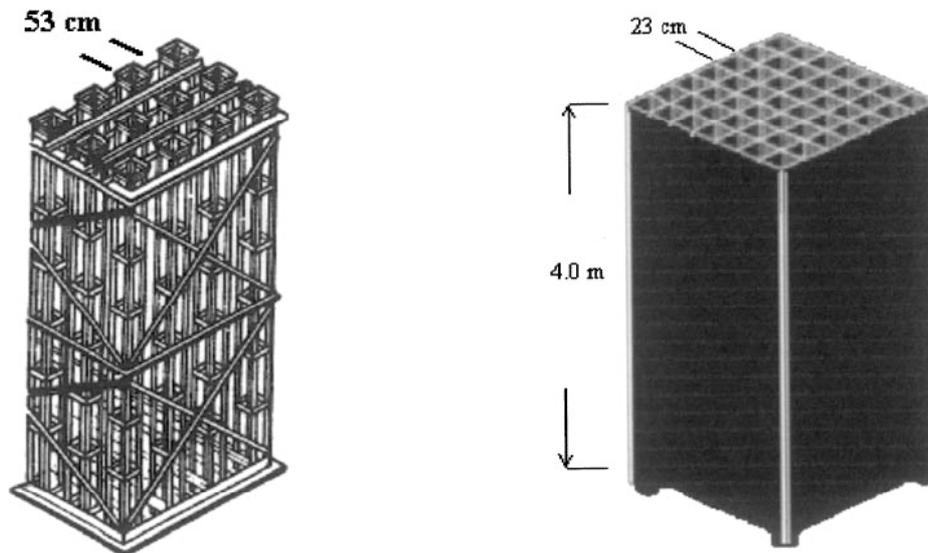


Рисунок 7

Открытая и плотно упакованная клетки для отработанного топлива водяных реакторов под давлением (источники: левый - NUREG/CR-0649, SAND77-1371, 1979; правый – авторы).

Эти содержащие бор перегородки блокируют горизонтальную циркуляцию охлаждающего воздуха в случае потери воды из бассейна, существенно уменьшая преимущества перемешивания недавно выгруженного топлива с более старым холодным топливом. Во время частичного раскрытия топлива отверстия в дне клеток для отработанного топлива будут покрыты водой, что полностью блокирует воздух от циркуляции через топливные сборки. Части, находящиеся над водой, будут охлаждаться в основном паром, образующимся за счет теплоты распада в находящимся под поверхностью частях топливных стержней в сборках и за счет теплового излучения<sup>53</sup>.

В отсутствие любого охлаждения только что выгруженная активная зона выделяет теплоту распада со скоростью 100 кВт/тU и адиабатически нагревается в течение часа до температуры около 600 °С, при которой ожидается, что оболочка из циркония разорвется под внутренним давлением гелия и газообразных продуктов деления<sup>54</sup>, а затем до 900 °С, при

<sup>52</sup> Описание поставщиком топливных стеллажей с более плотной упаковкой можно найти в Интернете по адресу <http://www.holtecinternational.com>.

<sup>53</sup> Эта проблема может быть облегчена до известной степени, если создать отверстия в стенках стеллажей с плотной упаковкой. Ограничения возникают из-за того, что для поддержания субкритичности отработанного топлива необходимо обеспечить значительное поглощение нейтронов в стенках. Отверстия помогут циркуляции воздуха через стеллаж над водной поверхностью. В отчете Сандийской лаборатории (1979 г.) содержится заключение, что такой подход может оказаться эффективным для топлива, возраст которого составляет год или более. (См. [2], стр.78).

<sup>54</sup> Это основано на том, что теплоемкости UO<sub>2</sub> и циркония равны 0.3 Дж/гU-°C [S.Glasstone and A.Sesonske, *Nuclear Reactor Engineering* (Van Nostrand Reinhold, 1967) Table A7]; кроме того, предполагается, что на грамм урана приходится 0.2 г циркония, и поэтому теплоемкость реакторного топлива составляет 0.4 Дж/гU-°C. При проведении в Брукхейвенской национальной лаборатории исследований (1997 г.) принималось, что «критическая температура оболочки» равна 565°С. Это температура, при которой «зарождалось повреждение оболочки» (это понятие было введено предыдущим семинаром по сценарию несчастного случая на транспорте), где «ожидаемое повреждение» было зафиксировано при 671°С. Брукхейвенская группа выбрала более низкую температуру для повреждения топлива при аварии с осушением бассейна для отработанного топлива, поскольку «потребуется значительное

которой оболочка начнет гореть в воздухе<sup>55</sup>. Мы увидим, что механизмы охлаждения в осушенном бассейне с плотно упакованным отработанным топливом будут настолько слабыми, что они только немного сократят скорость нагрева такого горячего топлива.

В 2001 году сотрудники Ядерной регулятивной комиссии следующим образом подытожили выводы своего самого последнего анализа потенциальных последствий аварии с потерей охладителя в бассейне с отработанным топливом:

Невозможно без многочисленных ограничений установить общий предел выделения теплоты распада (и, следовательно, времени распада), ниже которого возгорание циркония физически невозможно. Отведение тепла весьма чувствительно к ... таким факторам, как геометрия топливной сборки и конфигурация клетки бассейна с отработанным топливом ... которые зависят от конкретной электростанции и ... подвержены непредсказуемым изменениям после землетрясения или падения контейнера, которые осушают бассейн. Поэтому, поскольку значимые источники теплоты распада действуют в течение многих лет и поскольку невозможно обеспечить конфигурации, поддерживающие достаточный поток воздуха для охлаждения, возможность достижения температуры возгорания циркония нельзя исключить в общем смысле<sup>56</sup>.

Мы провели серию простых вычислений для того, чтобы попытаться понять результаты компьютерного моделирования, на котором базируются эти выводы. Мы рассмотрели теплопроводность, тепловое излучение, охлаждение паром, и конвективное воздушное охлаждение.

### *Теплопроводность*

Теплопроводность вдоль топлива без покрытия не может поддерживать его ниже температуры повреждения до тех пор, пока топливо не будет охлаждаться в течение десятков лет<sup>57</sup>.

---

время для восстановления топлива, починки бассейна или создания альтернативных способов долгосрочного хранения» (См. [20], стр.3-40.

<sup>55</sup> Для скорости ограниченного газовой диффузией окисления циркония можно написать уравнение  $dw^2/dt = K_0 \exp(-E_a/RT)$  в диапазоне температур 920-1155<sup>0</sup>C, где  $w$  – увеличение веса оболочки (г/см<sup>2</sup>), связанное с окислением,  $K_0$  – удельная скорость увеличения веса [ $5.76 \times 10^4$  (г/см<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/с],  $E_a$  – энергия активации (52990 калорий),  $R$  – газовая постоянная (1.987 кал/<sup>0</sup>K), а  $T_0$  – абсолютная температура (<sup>0</sup>K). (См. [2], стр.31-34). Поэтому при 920<sup>0</sup>C  $K_0 \exp(-E_a/RT) = 1.1 \times 10^{-5}$  (г/см<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/с. Оболочка топлива содержит цирконий в количестве 0.34 г/см<sup>2</sup>. Значит, значение  $w^2$  при полном окислении составит около 0.014 (г/см<sup>2</sup>)<sup>2</sup>. Поэтому характерное время для полного окисления будет составлять примерно 15 минут при 920<sup>0</sup>C – оно будет быстро уменьшаться при дальнейшем повышении температуры. Консультативный комитет по безопасности реакторов (ACRS) рассмотрел возможность того, что для топлива с высоким уровнем выгорания температура зажигания может оказаться значительно более низкой: «были случаи, связанные с образованием осадков гидроксида циркония в топливной оболочке, особенно тогда, когда топливо имело высокий уровень выгорания. Многие металлические гидриды могут спонтанно возгораться в воздухе. Спонтанное возгорание гидроксида циркония сделает устаревшими споры о температуре ‘зажигания’».... Кроме того, ACRS отметил, что азот реагирует с цирконием экзотермически и « это может легко объяснить хорошо известную тенденцию циркония к окислению с отслаиванием в воздухе в то время, как такой тенденции не наблюдается либо в парах металла, либо в чистом кислороде». [“Draft Final Technical Study of Spent Fuel Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plant,” Letter from Dana Powers, ACRS chairman to NTC Chairman Meserve, April 13, 2000, p.3].

<sup>56</sup> См. [1], p. x.

<sup>57</sup> Между 300 и 1200 <sup>0</sup>K продольная проводимость стержня оксида урана радиусом 0.4 см, помещенного в оболочку из циркониевого сплава (с внутренним радиусом 0.41 см и при толщине оболочки 0.057 см) составляет примерно  $k = 0.06$  Вт/(<sup>0</sup>C/см). Это основано на температурной зависимости проводимости оксида урана (она падает от 0.076 до 0.03 единицы) и циркония (она растет от 0.13 до 0.25 соответствующей единицы). [International Nuclear

## Тепловое излучение

Тепловое излучение приведет верхние поверхности топливных сборок в тепловое равновесие при температуре  $T_0 = [PM/(A\sigma)]^{1/4}$  °K, где  $P$  является мощностью теплоты распада (в ваттах), вырабатываемой на метрическую тонну урана,  $M$  является массой урана в топливной сборке (0,47 тонны),  $A = 500 \text{ см}^2$  является площадью поперечного сечения ячейки плотной упаковки, содержащей топливную сборку, и  $\sigma (= 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Т}^4_{\text{к}} \text{ Вт/см}^2)$  является постоянной Стефана-Больцмана. Мы предполагаем, что верхняя поверхность топливной сборки излучает как черное тело, т.е. с максимальной интенсивностью. Для  $P = 1 \text{ кВт/тU}$  или  $10 \text{ кВт/тU}$   $T_0$  соответственно равно 370 или 860 °C.

Однако, только при радиационном охлаждении температура в глубине топливных сборок будет намного выше, из-за того, что большая часть излучения из внутренней части топлива будет много раз перепоглощаться и переизлучаться другими топливными стержнями до тех пор, пока она не достигнет верхней части топливной сборки. Даже для  $P = 1 \text{ кВт/тU}$  (топливо с возрастом около 30 лет) температура в нижней части топливных сборок будет равна примерно 2000 °C<sup>58</sup>. Поэтому, хотя излучение и будет эффективно охлаждать открытые поверхности старых топливных сборок, оно не сможет эффективно охлаждать их внутренние части.

## Охлаждение паром

Охлаждение паром может быть эффективным до тех пор, пока уровень воды закрывает более нижней четверти отработанного топлива. Ниже этого уровня скорость образования пара будет все сильнее зависеть от скорости теплопередачи от отработанного топлива к воде через тепловое излучение. Скорость, с которой тепло непосредственно передается воде, будет уменьшаться по мере понижения уровня воды и увеличения температуры топлива, находящегося выше уровня воды. Когда вода находится вблизи дна топливной сборки то представляется маловероятным, что этот механизм сможет поддерживать максимальную температуру топлива ниже 1200 °C для топлива с выдержкой менее 100 лет<sup>59</sup>. Поскольку

---

Safety Center, <http://www.insc.anl.gov/matprop/uo2/cond/solid/thcsuo2.pdf>, Table 1; <http://www.insc.anl.gov/matprop/zircaloy/zirck.pdf>, Table 1, Dec.19, 2002]. Плотность урана в оксиде равна около 10 г/см<sup>3</sup>. Поэтому стержень длиной 400 см будет содержать примерно 2 кг урана. Если топливный стержень длиной  $L$  см содержит  $M$  кг урана и охлаждается в обоих концах до температуры  $T_0$  при скорости генерации тепла  $P$  Вт/кгU, однородно распределенной вдоль его длины, то разница температуры между центром стержня и его концами составит  $PML/(8k)$ , что примерно равно  $1700P$  °C. Если принять во внимание теплопроводность стальных ящиков и борала, окружающих топливные сборки, то при плотной упаковке эта расчетная температура понижается примерно до  $1000P$  °C.

<sup>58</sup> Внутри топливной сборки эффективный поток излучения в направлении  $z$  примерно равен  $F = -4f\sigma T^3(dT/dz)(\lambda_z)$ , где  $f$  – часть площади сечения сборки, находящаяся между стержнями (примерное значение 0.6), а  $(\lambda_z)$  – среднее расстояние, которое проходит излучение до повторного поглощения (это несколько сантиметров). Сделано приближение, что разница температур между точками излучения и поглощения может быть получена при помощи первой производной температуры. Предполагалось также, что скорость тепловыделения является постоянной величиной, равной  $PM/(AL)$  Вт/см<sup>3</sup> вдоль всей длины топливной сборки  $L = 400$  см. В таком приближении можно рассчитать профиль температуры в виде  $T = [1000PM/(A\sigma)]\{- (z/L) - z^2/(2L^2)\}L/(f\lambda_z) + 1\}^{1/4}$  °K, где  $z$  является отрицательной величиной и измеряется в см по направлению книзу от верхней части топливной сборки. Когда  $z = -L$ ,  $T(-L) = 600 \{P[1 + (0.8L/\lambda_z)]\}^{1/4}$  °K. При  $P = 1 \text{ кВт/тU}$   $T(-L) = 2300$  или  $1700$  °K, когда  $\lambda_z$  равно одному или трем см, соответственно.

<sup>59</sup> Предположим, что топливный стержень имеет длину  $L$ , содержит  $M = 2$  кг урана, выделяет распадное тепло со скоростью  $P$  Вт/кгU, имеет температуру  $T_{\text{макс}}$  в верхней части, а уровень воды находится на высоте  $z_w$ , где  $z=0$  соответствует дну бассейна (и нижнему концу стержня). В этом приближении, где скорость тепловыделения постоянна по длине топлива, общая скорость ввода тепла в воду от погруженной части топлива и от теплового излучения, попадающего на поверхность воды от остальной части стержня, будет составлять  $P = PMz_w/L +$

даже жаропрочные стали теряют практически всю свою прочность при температуре в 1000 °С, а циркаллой теряет свою прочность при 1200 °С, то ожидается, что верхние части начнут со временем ползти, когда будет достигнут этот уровень воды<sup>60</sup>.

### Конвективное воздушное охлаждение

После полной потери охладителя, когда воздух получит доступ к донной части топливных сборок, конвективное воздушное охлаждение будет зависеть от скорости течения воздуха через топливные сборки. Теплоемкость воздуха примерно равна 1000 дЖ/кг·°С, его плотность на уровне моря при входной температуре в донную часть топливной сборки в 100 °С (373 °К) примерно равна 0,9 кг/м<sup>3</sup>, поперечное сечение ячейки плотной упаковки, не занятой топливными стержнями, приблизительно равно 0,032 м<sup>2</sup>,<sup>61</sup> и каждая топливная сборка содержит около 0,47 тонны урана. Вертикальная скорость потока воздуха в донной части сборки при температуре воздуха, повысившейся до 900 °С (1173 °К) будет равна 0,023 м/сек на кВт/тU. Поскольку плотность воздуха обратно пропорциональна его абсолютной температуре, эта скорость увеличится примерно в 3 раза (1173/373) в верхней части топливной сборки.

Давление, ускоряющее воздух до такой скорости, возникает от дисбаланса плотности (и, соответственно, веса) холодного воздуха в пространстве между клетками с топливом и стеной бассейна («нижний угол») и теплого воздуха в топливных сборках. Если мы предположим, что плотность воздуха в нижнем углу равна 1 кг/м<sup>3</sup>, а средняя плотность в топливных сборках равна 0,5 кг/м<sup>3</sup>, то разница в весе создаст ведущую разность давления. В пренебрежении потерями на трение эта разность давления может придать скорость воздуху, входящему в донную часть топливной сборки, равную 2,7 м/сек, что достаточно для удаления теплоты, поступающей со скоростью 120 кВт/тU. Добавление потерь на трение уменьшает скорость воздуха примерно до 0,34 м/сек, однако, такая скорость не сможет поддерживать топливо водяных реакторов под давлением ниже температуры в 900 °С при уровне поступления тепла, большем 15 кВт/тU, что соответствует примерно годовому охлаждению<sup>62</sup>. До-

---

$P_{\text{ти-}}$ . Скорость выделения тепла топливом, находящимся выше уровня воды, составит  $P_+ = PM(1 - z_w)/L$ . Впрочем, охлаждение расположенного над водой топлива ограничено из-за наличия пара, образованного топливом, которое находится под водой. Скорость парообразования составит  $P_-/2300$  г/с. Когда величина  $z$  опустится ниже уровня дна топливной сборки,  $P_- = P_{\text{ти-}}$ . Приблизненно  $P_{\text{ти-}} = (A/264)\sigma(T_0 + 273)^4$ , где  $(A/264) = 2 \text{ см}^2$  – площадь, приходящаяся на каждый из 264 стержней топливной сборки, которые находятся в ящике, а  $T_0$  – температура днища топливной сборки. {См. [2], рис. В-1}. Подсчитано, что  $T_0 = 200^\circ\text{C}$  в точке, где  $T_{\text{макс}} = 900^\circ\text{C}$ , когда топливо находится на пороге повреждения. Отсюда следует, что  $P_{\text{ти-}} = 0.6$  Вт. При идеальной теплопередаче пар будет нагреваться до температуры  $T_{\text{макс}}$ , проходя через топливную сборку и поглощая примерно  $2.1(T_{\text{макс}} - 100)$  Дж/г. Поэтому для удаления мощности  $P_+$  и поддержания в тепловом равновесии топлива над водой требуется, чтобы  $P_+ < 2.1(T_{\text{макс}} - 100)P_{\text{ти-}}/2300M = 0.3 \text{ Вт/кгU}$  при  $T_{\text{макс}} = 1200^\circ\text{C}$ . Это означает, что топливо должно иметь возраст более 100 лет после разгрузки из реактора, чтобы охлаждение стало эффективным, если уровень воды опустится до днища топливной сборки.

<sup>60</sup> Информация о прочности стали при высоких температурах приведена в Интернете: <http://www.avestapolarit.com/template/Page2171.asp> (Jan.10, 2003). Трубки из циркониевого сплава в канадском реакторе КАНДУ теряли качество при 1200°С. (См. *CANDU Safety 17 – Severe Core Damage Accidents*, V.G.Snell, Director Safety and Licensing, <http://engphys/mcmaster.ca/canteach/techdoclib/CTTD-0014/CTTD-0014-17/17of25.pdf> (Jan.10, 2003).

<sup>61</sup> Подразумевается квадратный ящик с внутренним размером 0.225 м, содержащий топливную сборку с 264 стержнями диаметром 0.95 см. См. [14], табл. 2.1 и 2.2.

<sup>62</sup> Это можно вывести из уравнения сохранения импульса газа, имеющего следующий вид  $d(\rho v)/dt + d(\rho v^2)/dz + P_L = -dP/dz - \rho g$ , где  $\rho$  – плотность воздуха,  $v$  – скорость воздуха,  $P$  – давление,  $P_L$  – потери давления, связанные с трением в канале, а  $g = 10 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы

бавление охлаждения за счет теплопроводности и теплового излучения не изменит этот результат существенным образом.

Эти выводы согласуются с более точными численными вычислениями, которые учитывают потери на трение в нижнем углу и нагрев воздуха в здании над бассейном с отработанным топливом<sup>63</sup>. В отчете Сандии 1979 года получены аналогичные результаты. Было обнаружено также, в отличие от ситуации с хранением в плотной упаковке, что при хранении в

тяжести. При равновесии первый член исчезает. Интегрирование от дна отработанного топлива ( $z = 0$ ) до его вершины ( $z = L = 4$  м) дает следующий результат  $\rho_L(v_L)^2 - \rho_0(v_0)^2 + \int_0^L P_L dz = P(0) - P(L) - \int_0^L \rho g dz$ . Предположим следующие условия: давление постоянно на

уровне верхней части и уровне дна отработанного топлива; скорость газа постоянна под отработанным топливом; скорость воздуха равна нулю у отверстия сливной трубы; потери на трения в сливной трубе и под отработанным топливом пренебрежимо малы. Тогда можно вычесть уравнение сохранения импульса для сливной трубы (ст) из аналогичного уравнения

для топливной сборки (тс), в результате чего получаем  $\rho(v_L)^2 + \int_0^L P_L dz = g \int_0^L [\rho_{cm} - \rho_{mc}] dz$

(Уравнение А). Как указано в тексте,  $\rho_0 = 1$  кг/м<sup>3</sup>, первый интеграл справа равен приблизительно  $L\rho_0$ , а второй интеграл справа равен  $0.5 L\rho_0$ . Отсюда получаем  $\rho_L(v_L)^2 \cong 0.5g\rho_0L = 20$  Дж/м<sup>3</sup> (мы пренебрегаем членом с  $P_L$ ). Обратим внимание, что член  $d(\rho v)/dz$  – постоянная величина, а при постоянном давлении плотность  $\rho$  обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$ . Тогда  $\rho_L(v_L)^2 = \rho_0(v_0)^2(T_L/T_0)$ , где  $T_L = 1173^\circ\text{K}$  в точке воспламенения. Предположим, что  $T_0 = 100^\circ\text{C} = 373^\circ\text{K}$ . Затем получим соотношение  $3.1 (v_0)^2 = 20$  Дж/м<sup>3</sup>, откуда значение  $v_0$  составляет приблизительно 2.5 м/с. Величину  $P_L$  можно аппроксимировать в виде

сумму потерь, обусловленных как сжатием воздуха, проходящего через отверстие в донной плите, так и с трением о поверхность внутри топливной сборки:  $\int P_L dz = K_0\rho_0(v_0)^2 + (2D_H)^{-1}$

$\int f\rho v^2 dz$ . Здесь  $K_0 = 2(1-x)/x$ , а  $x = (A_H/A_f)$ , где  $A_H$  – площадь отверстия в донной плите, а  $A_f =$

$S^2 - 264\pi(D/2)^2$  – поперечное сечение воздушного потока вокруг топливной сборки внутри кожуха ( $S = 0.225$  м – внутренняя ширина кожуха, а  $D = 0.0095$  м – внешний диаметр топливно-

го стержня. При плотной упаковке топлива и диаметре донного отверстия 13 см величина  $x$  приблизительно равна 0.15, а примерное значение  $K_0$  составляет 11.3. Во втором члене для

потерь давления  $L = 4$  м соответствует высоте топливной сборки,  $f$  – коэффициент трения,  $D_H = 4A_f/P_w$  – “гидравлический диаметр” канала, а  $P_w = (4S + 264\pi D)$  – полный периметр всех

поверхностей в поперечном сечении {См. [14], стр. 4-7 и 4-16}. Для топливной сборки в нашем случае значение  $D_H$  примерно составляет 0.015 м. Коэффициент трения можно записать

в виде  $f = C/(Re)^n$ , где число Рейнольдса  $Re = \rho v D_H/\mu$  ( $\mu$  – вязкость воздуха, равная  $31 \times 10^{-6}$  Па·с при  $600^\circ\text{K}$ ). Показатель степени равен единице для ламинарного потока ( $Re < 2100$ ), что соответствует случаю топливной сборки, как мы увидим позднее. Значение коэффициента  $C$  составляет около 100 внутри топливной сборки в приближении, когда все

стержни трактуются как внутренние стержни {см. [14], стр. 4-7 и 4-16/17}. Поэтому  $\int P_L dz =$

$K_0\rho_0(v_0)^2 + \{C\mu/[2(D_H)^2]\} \int v dz \approx K_0\rho_0(v_0)^2 + 55v_0$  (Дж/м<sup>3</sup>), где выражение  $\int v dz$  приближенно за-

менено на  $2Lv_0$ , а  $v_0$  – скорость втекания воздуха на уровне основания топливной сборки. Если добавить этот член с трением от давления в уравнение (А), получим  $14.4(v_0)^2 + 55v_0 =$

$20$  Дж/м<sup>3</sup>, откуда следует, что  $v_0 \approx 0.33$  м/с. Приближение хранения в открытых стеллажах можно получить, отбросив член, связанный с плитой (то есть, положив  $x = 1$ ), и отбросив  $S$  в

члене с периметром. Тогда, если расстояние между центрами стержней в топливной сборке увеличить в  $5^{1/2}$  раз (что соответствует открытой решетке с плотностью топливной сборки в

пять раз меньше по сравнению с плотной упаковкой),  $D_H \approx 0.1$  м и приведенное выше уравнение примет вид  $3.1(v_0)^2 + 55v_0 = 20$  Дж/м<sup>3</sup>, откуда  $v_0 = 2.3$  м/с. Поэтому становится возмож-

ным охлаждать бассейн, наполненный топливом, которое выделяет около 100 кВт на тонну урана. Если горячее топливо окружить сборками более холодного топлива, то поперечный

поток от более холодных сборок к горячим обеспечит еще более сильное охлаждение.

<sup>63</sup> См. [14], рис. 6.3 и 6.5. Наш результат, полученный в [62], соответствует случаю с широким (20 см) отверстием для слива при постоянной комнатной температуре.

открытых клетках с расстоянием между топливными сборками в 53 см (т.е., при плотности примерно в одну пятую от плотно упакованного топлива) конвективное воздушное охлаждение в хорошо вентилируемом здании хранилища отработанного топлива может безопасно поддерживать помещенное в бассейн отработанное топливо ниже температуры повреждения оболочки даже всего лишь через 5 суток после выключения реактора<sup>64</sup>. Эти важные выводы следует подтвердить экспериментально, например, с электрически нагреваемыми топливными стержнями<sup>65</sup>.

### *Распространение пожара от горячего топлива к холодному*

Приведенное выше обсуждение было направлено на вероятность того, что недавно загруженное плотно упакованное топливо может нагреться до температуры возгорания в бассейне, частично, или полностью осушенном. Более трудно рассмотреть количественным образом распространение таких пожаров на соседние ячейки, содержащие холодное топливо, которое не может воспламениться само по себе. В отчете Брукхейвенской лаборатории 1987 года была сделана попытка моделирования соответствующих явлений и там был сделан вывод о том, что «при некоторых условиях предсказывается возникновение распространения в отработанном топливе, которое хранилось не менее 2 лет»<sup>66</sup>. Условием, при котором получается такой результат, является плотная упаковка с отверстиями диаметром 13 см на дне ячеек, т.е. типичная современная организация в США.

В отчете отмечается, однако, что

в их модели не рассматривается вопрос распространения окисления циркония после плавления оболочки и перемещения большей части топливных стержней, которые, как ожидается, будут падать на дно бассейна, и образуют слой обломков, которые будут оставаться горячим, и будет способствовать нагреву прилегающих сборок внизу; этот процесс, как представляется, станет дополнительным механизмом распространения окисления.

Поэтому в отчете делается вывод о том, что при оценке последствий пожаров в бассейнах с отработанным топливом должны рассматриваться последствия двух крайних случаев: 1) пожар топлива, загруженного совсем недавно, и 2) пожар всего топлива в бассейне<sup>67</sup>. Это то, что было нами сделано выше. Однако, мы можем добавить, что любое препятствие потоку воздуха в каналах охлаждения бассейна с плотной упаковкой обломками, остаточной водой, или провисание конструкции коробок может способствовать распространению пожара отработанного топлива<sup>68</sup>.

## **ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ БАСЕЙНОВ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА, ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ, И ИХ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Можно выделить ряд возможностей для сокращения опасностей, возникающих в бассейнах с отработанным топливом. Некоторые из них рассматривались в отчетах, подготовленных для Ядерной регулятивной комиссии до разрушения Всемирного торгового центра 11 сентября 2001 года и были отброшены из-за того, что оцененная вероятность случайной потери охладителя оказалась такой малой (около 2 шансов на миллион в год для одного реактора), что защита от них не считалась эффективной по стоимости<sup>69</sup>.

<sup>64</sup> *Spent Fuel Heatup Following Loss of Water During Storage*, fig. 3, p. 85.

<sup>65</sup> В [14] отмечается доступность только «ограниченных данных от одного эксперимента... на установку с тремя параллельными каналами» (стр. 5-1).

<sup>66</sup> *Severe Accidents in Spent Fuel Pools in Support of Generic Safety Issue 82* by V. L. Sailor, K. R. Perkins, J. R. Weeks, and H. R. Connell (Brookhaven National Laboratory, NUREG/CR-4982; BNL-NUREG-52093, 1987), p. 52.

<sup>67</sup> Там же, стр. 52, 53, 63.

<sup>68</sup> Впрочем, при полной блокаде появляется тенденция к тушению пожара.

<sup>69</sup> Смотрите, например, работу H.J.Jo, P.F.Rose, S.D.Unwin, V.L.Sailor, K.R.Perkins and A.G.Tingle, *Value/Impact Analyses of Accident Preventive and Mitigative Options for Spent Fuel*

Сейчас необходимо принимать во внимание потенциально высокую вероятность того, что атака террористов может привести к потере охладителя. Поскольку вероятность конкретных насильственных действий нельзя оценить заранее, то Ядерная регулятивная комиссия и Конгресс должны принять суждение о вероятности, которая должна использоваться в анализе затрат и результатов. Наиболее дорогие мероприятия из предлагаемых нами могут быть оправданы при использовании подхода Ядерной регулятивной комиссии к анализу затрат и результатов, если вероятность аварии или атаки на бассейн с отработанным топливом в США, которая приведет к полному выбросу запаса  $^{137}\text{Cs}$  в атмосферу будет принята равной 0,7 процента в течение 30 лет. *Эта величина представляет собой верхнюю границу диапазона вероятностей, оцениваемых сотрудниками Ядерной регулятивной комиссии для пожаров отработанного топлива, вызываемых только одними авариями.* Для выброса одной десятой запаса  $^{137}\text{Cs}$  вероятность разрушения увеличивается примерно до 5 процентов за 30 лет<sup>70</sup>.

Ниже мы рассмотрим более детально предложения для:

- Сокращения вероятности случайной потери охладителя из бассейна с отработанным топливом.
- Повышения устойчивости бассейнов к атаке.
- Обеспечения аварийного охлаждения.
- Сокращения вероятности пожара в случае потери охладителя.
- Сокращения запасов отработанного топлива в бассейнах.

Сюда включены три рекомендации, сделанные в исследовании последствий возможных аварий с потерей охладителя из бассейнов для хранения отработанного топлива, проведенного в Сандии в 1979 году<sup>71</sup>. К сожалению, все эти подходы предоставляют только частичное решение проблемы безопасности бассейнов с отработанным топливом. Эта проблема сопровождает всю историю эксплуатации атомных электростанций. Однако, вероятность пожара отработанного топлива может быть значительно уменьшена, так же, как и его наихудшие последствия. Некоторые из вариантов включают в себя компромиссы различных рисков, и поэтому требуют проведения дальнейшего анализа перед тем, как будут приниматься решения об их реализации.

Ниже мы обсудим специфические изменения по трем категориям: регулятивной, эксплуатационной, и проектной.

## Регулятивная категория

Правила Ядерной регулятивной комиссии в настоящее время не требуют ни квалифицированных, ни дублированных систем безопасности в бассейнах с отработанным топливом, и

---

*Pools* (Brookhaven National Laboratory, NUREG/CR-5281, 1989). Обсуждаемые меры были отвергнуты из-за ощущавшейся нехватки рентабельности (что связано, в частности, с хранением при низкой плотности и с распылителями воды). Рекомендации по управлению для уменьшения риска рассматривались в [1].

<sup>70</sup> Для вычисления 0.7%-ной и 5%-ной вероятностей мы сравнили инвестиции в размере 5 миллиардов долларов (среднее значение нашего диапазона затрат 3.5-7 миллиардов долларов) с диапазоном оцененных расходов при горении отработанного топлива. В [29] средний ущерб (включая смерти от рака, каждая из которых стоит 4 миллиарда долларов) от 10-100%-ного выброса Cs-137 из 400 тонн отработанного топлива оценивается в 250-1700 миллиардов долларов. Мы снижаем этот ущерб до 100-750 миллиардов долларов, потому что риск не может быть полностью исключен при помощи предлагаемых нами мер, а их смягчающий эффект сможет проявиться через десятилетия после инвестиций. Вероятность  $(0.6-2.4) \times 10^{-6}$  для загорания отработанного топлива в расчете на бассейн-год была подсчитана в [1], табл. 3-1. Она эквивалентна примерно 0.6% за 30 лет для всех 103 работающих энергетических реакторов в США.

<sup>71</sup> *Spent Fuel Heatup Following Loss of Water During Storage*, "Conclusions," p. 85.

возможностей аварийной подкачки воды<sup>72</sup>. Ядерная регулятивная комиссия должна потребовать от владельцев реакторов исправить эту ситуацию, и продемонстрировать способность эксплуатировать и ремонтировать бассейны для отработанного топлива и их вспомогательное оборудование в условиях аварии или после атаки. Эта способность должна стать составной частью глубинной обороны атомных электростанций и отработанного топлива<sup>73</sup>.

## Эксплуатационная категория

### *Минимизация перемещения контейнеров с отработанным топливом над бассейнами с отработанным топливом*

Исследование сотрудников Ядерной регулятивной комиссии «*Риск аварии с отработанным топливом*» привело к выводу, что «контейнеры с отработанным топливом достаточно тяжелы для того, чтобы катастрофически повредить бассейн при падении». В исследовании цитируются промышленные оценки того, что контейнеры обычно перемещаются «вблизи или над бассейнами с отработанным топливом на протяжении от 5 до 25 процентов от полного пути». Однако, было сделано заключение, что это не вызывает серьезных опасений, поскольку промышленный опыт и руководство Ядерной регулятивной комиссии привели к понижению вероятности падения до менее, чем  $10^{-5}$  на один реактор в год<sup>74</sup>. Тем не менее, мы рекомендуем рассмотреть возможность сокращения перемещений контейнеров с отработанным топливом над бассейнами. Мы также понимаем, что сокращение количества топлива в бассейне, как это рекомендуется ниже, в ближайшем будущем увеличит объем перемещений контейнеров – хотя в конце концов в любом случае все топливо будет удалено из бассейнов. Получающееся увеличение риска должно быть минимизировано в результате плана выполнения.

### *Минимизация количества случаев, когда вся активная зона перемещается в бассейн во время перерывов на перезагрузку*

Перерывы на перезагрузку происходят каждые 12 или 18 месяцев и обычно продолжаются около месяца. Времена высыхания бассейна драматически сокращаются, когда вся активная зона помещается в бассейн для хранения отработанного топлива всего через несколько суток после выключения реактора. В действительности в активной зоне действительно «отрабатывается» только от трети до четверти топлива. Остальная часть возвращается обратно в активную зону в новые положения, соответствующие уменьшенному количеству расщепляющегося материала. Для замены топливных сборок в их новых положениях не обязательно вынимать всю активную зону<sup>75</sup>. Даже тогда, когда понадобится проверить внутренность резервуара под давлением или проверить топливо на наличие утечки, в большинстве случаев будет достаточно удалить часть топлива. Единственное регулятивное требование для извлечения всей активной зоны относится к тем редким ситуациям, когда при выполнении работ имеется потенциальная возможность дренирования резервуара реактора под давлением. Так может быть, например, когда проводятся работы на трубопроводе между резервуаром под давлением и первым изолирующим клапаном на этом трубопроводе – или на самом изолирующем клапане<sup>76</sup>.

---

<sup>72</sup> *Operating Experience Feedback Report, Assessment of Spent Fuel Cooling*, NUREG-1275, Vol. 12, p. 27.

<sup>73</sup> Дальнейшее обсуждение глубинной обороны предоставлено в книге *Robust Storage of Spent Nuclear Fuel* by Gordon Thompson (Institute for Resource and Security Studies, Cambridge, MA, January 2003).

<sup>74</sup> *Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants*, pp. 3–16 and Appendix 2C p. A2C-3 and –4.

<sup>75</sup> Выше отмечалось, что важной мотивацией для загрузки в бассейн с отработанным топливом всей активной зоны была необходимость пересчета подкритичности активной зоны внутри автоклава на случай непредвиденных передвижений топлива. Эта проблема сама по себе заслуживает отдельного изучения.

<sup>76</sup> Дэвид Лохбаум, Союз обеспокоенных ученых, частное сообщение, 9 января 2003 г.

## Конструкционная категория

### Переход к хранению в открытой конструкции

Как уже отмечалось, в исследовании в Сандии было обнаружено, что для бассейнов с хранением в открытой конструкции в хорошо вентилируемых зданиях хранилищ (смотри ниже), отработанное топливо в осушенном бассейне для хранения не перегреется, если оно будет охлаждаться в течение по крайней мере 5 суток перед транспортировкой в бассейн. Более того, при частичном осушении, которое блокирует доступ воздуха снизу, открытая конструкция допускает конвективное охлаждение топливных сборок сбоку выше поверхности воды.

Простейшим способом освобождения места для хранения в открытой конструкции на существующих реакторах является перемещения всего отработанного топлива из влажного хранения в сухое в течение пяти лет после выгрузки из реактора. Следовательно, наше предложение для хранения в открытой конструкции связано с предложениями по сухому хранению, как это обсуждается ниже.

Хранилище с открытой конструкцией, рассматриваемое в исследовании Сандии, однако, может вместить лишь около 20 процентов топлива в современной плотно упакованной конфигурации. Следовательно, бассейн, который может вместить 500 тонн плотно упакованного отработанного топлива из блока с электрической мощностью в 1000 МВт, сможет принять в открытые клетки всего лишь около 100 тонн отработанного топлива, которое выгружается из реактора за 5 лет<sup>77</sup>. Однако, для предоставления достаточного пространства для размещения всей активной зоны реактора в хранилище с открытой конструкцией потребуются бассейн вдвое больших размеров. Если такое большое пространство будет недоступно, то случаи, в которых потребуются выгрузка всей активной зоны, будут оставаться опасными, хотя и менее частыми, если будет принята рекомендация о минимизации случаев выгрузки всей активной зоны.

Альтернативные подходы к отсутствию достаточного пространства для хранения в открытых клетках могут заключаться в перемещении отработанного топлива из бассейна ранее, чем через пять лет после выгрузки, или принятия плотностей упаковки, промежуточных между плотной упаковкой и Сандийской конфигурацией открытых клеток. Две интересные промежуточные плотности, которые бы следовало проанализировать, таковы: 1) конфигурация, в которой одна пятая топливных сборок извлекается в такой последовательности, чтобы каждая из оставшихся топливных сборок граничила с одной стороны с пустым пространством; 2) конфигурация, в которой из решетки удаляются ряды топливных сборок через один. В этих геометриях должны быть сделаны отверстия в стенках для того, чтобы позволить разрешить циркуляцию воздуха в ситуациях, когда в бассейне остается достаточно воды для того, чтобы блокировать отверстия в донной части коробок, или при полном удалении некоторых ячеек.

Одной из проблем хранения в открытой решетке является то, что она создает потенциал для возникновения критичности в свежем или частично выгоревшем топливе, когда разрушаются топливные коробки. На рисунке 8 показаны значения коэффициента размножения нейтронов  $k_{eff}$  для бесконечной квадратной решетки топливных стержней со степенью обогащения 4,4% при различных степенях выгорания в зависимости от расстояния между центрами стержней («шаг» решетки) в бассейне с водой без добавки бора<sup>78</sup>. Можно видеть, что

<sup>77</sup> Предположим, что эффективность преобразования тепла в электричество составляет 33%. Коэффициент использования реактора равен 85%, а выгорание топлива – 47 МВт·д/кг. В [2] рассматривалось топливо с выгоранием только 33 МВт·д/кг. Но, как можно увидеть на рис.5, распадное тепло при коротких временах распада (менее года или что-нибудь в этом роде) нечувствительно к выгоранию, поскольку тепло определяется прежде всего короткоживущими изотопами.

<sup>78</sup> Характеристики топливных стержней приведены для сборки «Вестингауз» (17x17 минус 25 стержней): плотность урана – 9.25 г/см<sup>3</sup>, радиус топливной таблетки – 0.41 см, расстояние между топливной таблеткой и оболочкой – 0.008 см, толщина оболочки – 0.057 см и внешний радиус оболочки – 0.475 см (*Nuclear Fuel International*, Sept.2001, pp.24-25). Состав топлива в

для выгорания, меньшего 50%, открытая решетка становится критической при шаге в 2,6 см, и что коэффициент размножения нейтронов возрастает при уменьшении шага примерно до 1,6 см.

Ситуация наиболее проблематична для топлива с низкой степенью выгорания. Одним из способов исправления этой ситуации для топлива с низкой степенью выгорания является установка поглощающих нейтроны пластин между рядами топливных сборок<sup>79</sup>. Это все еще может позволить свободную конвекцию воздуха между рядами. Другие конфигурации материала, поглощающего нейтроны, также могут согласоваться с допущением свободной конвекции. Подавление критичности может быть также достигнуто при помощи добавления растворимого соединения поглощающего нейтроны бора в воду в бассейне<sup>80</sup>. И, наконец, некоторые места в решетке с плотной упаковкой могут быть предоставлены для топлива с низким выгоранием. Если в бассейнах хранится свежее топливо, то оно определенно может быть добавлено в хранилище с плотной упаковкой, поскольку свежее топливо не выделяет заметного количества тепла.

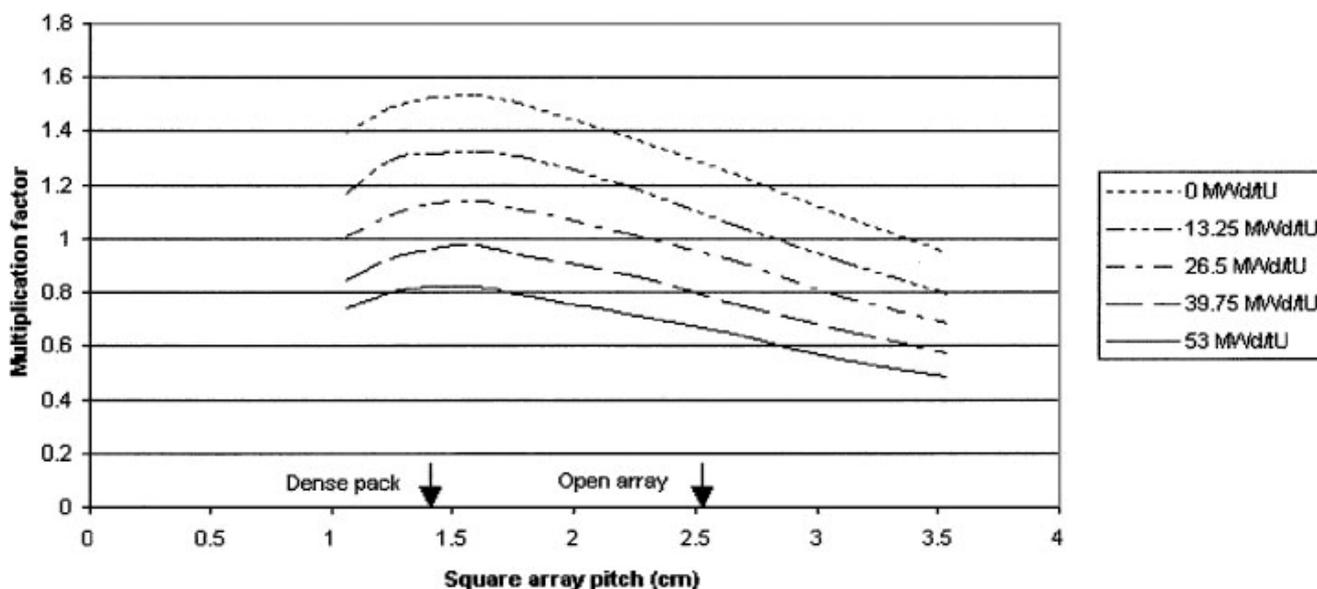


Рисунок 8

Размножение нейтронов в зависимости от шага решетки в бесконечной квадратной решетке топливных стержней со степенью обогащения 4,4% при проектной степени выгорания в 53 МВт·сутки/кгU для облучения 0, 25, 50, 75 и 100% (источник: авторы).

#### Предоставление аварийной вентиляции зданий для отработанного топлива

Стандартная скорость принудительной вентиляции в здании для хранения отработанного топлива соответствует двукратной замене воздуха в час<sup>81</sup>. Рассмотрим здание с объемом  $V$  и скоростью воздухообмена  $n$  объемов внешнего воздуха в час. Если отработанное топливо выделяет тепло со скоростью  $P$ , то увеличение температуры воздуха составит  $\Delta T =$

зависимости от выгорания был рассчитан при помощи программы ORIGEN 2.1, а вычисления критичности были проведены по программе MCNP4B2.

<sup>79</sup> Для обогащенного до 4.4% топлива с выгоранием 13.25 МВт·д/кгТМ введение борированной стали толщиной 1 см (1 % бора по весу) между топливными стержнями уменьшает максимальный коэффициент размножения нейтронов  $k_{эфф}$  от 1.33 до 0.91. Свежее топливо было бы слегка надкритичным ( $k_{эфф} = 1.05$ ) при промежутке около 2 см.

<sup>80</sup> Контроль за критичностью при помощи растворов бора вызывает, однако, опасность появления критичности, если теряющий воду бассейн наполнять чистой водой (без бора). Кроме того, вода на реакторах под давлением должна быть свободна от бора. Поэтому корпус реактора и водопроводная системы должны быть промыты после контакта с содержащей бор водой от отработанного топлива.

<sup>81</sup> *Spent Fuel Heatup Following Loss of Water During Storage*, p. 63.

$3600P/(nV\rho c_p)$ , где  $\rho$  является плотностью воздуха, входящего в здание (около  $1 \text{ кг/м}^3$ ), а  $c_p$  является теплоемкостью воздуха на килограмм при постоянном давлении (около  $1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ). Следовательно,  $\Delta T = 3,6P/(nV)$ . Рассмотрим случай, когда бассейн с отработанным топливом содержит 80 тонн только что выгруженного топлива, выделяющего  $100 \text{ кВт/кгU}$  теплоты распада (т.е.,  $P = 8 \text{ МВт}$ ) и объем  $V = 10000$  кубометров (например, в квадратном здании со стороной 30 м и высотой 10 м). В этом случае  $\Delta T = 2900/n \text{ °C}$ . Для уменьшения  $\Delta T$  до  $100 \text{ °C}$  потребуется обеспечить 30 смен воздуха в час.

В отчете Сандии предлагается, что в случае аварии с потерей охладителя следует открыть большие отверстия в боковых стенках и на крыше здания, чтобы допустить большую скорость конвективного воздушного обмена. Требуемая открытая площадь рассчитывается, приравнявая разность давлений снаружи и внутри здания на уровне пола здания высотой  $H$  метров из-за различия плотностей воздуха снаружи и внутри:  $\Delta p = gH(\rho_o - \rho_i)$  с суммой дросселирующих давлений через открытые пространства  $\Delta p_{th} = 0,5\rho_o(v_i/C_D)^2 + 0,5\rho_i(v_o/C_D)^2$ . Здесь  $v_i$  и  $v_o$  соответственно являются средними скоростями входящего и выходящего воздуха, а коэффициент разгрузки  $C_D \approx 0,6$  отражает уменьшение скорости воздуха из-за турбулентности, вызванной краями отверстия. Учитывая тот факт, что плотность воздуха меняется обратно пропорционально абсолютной температуре, минимальная площадь отверстий может быть рассчитана как<sup>82</sup>:

$$A = \{P/[C_D c_p \rho_o (2gH)^{1/2}]\} \{T_i(T_o + T_i)/[T_o(\Delta T)^3]\}^{1/2}$$

Для  $H = 10 \text{ м}$ ,  $T_i = 300 \text{ °K}$  и  $\Delta T = 100 \text{ °K}$  это уравнение превращается в  $A = 3,6 P \text{ м}^2$ , если  $P$  выражено в мегаваттах. Следовательно, если  $P = 8 \text{ МВт}$ , то  $A$  должно быть равно  $30 \text{ м}^2$ , например, отверстие длиной 10 м и высотой 3 м.

Конечно, такая система не предотвратит пожара в плотно упакованном бассейне из-за плохой циркуляции воздуха в ячейках с отработанным топливом. Она является дополнением к хранению в открытых клетках, а не заменой его.

Конструкция вентиляционной системой, предложенная в отчете Сандии, привлекательна, поскольку она является пассивной. Однако, встроить ее в существующие здания может оказаться сложным, система открытия дверей может оказаться неисправной, и она не сможет работать, если здание обрушится в результате аварии или террористического акта. Более того, если пожар начнется, то доступность вентилирующего воздуха может поддерживать огонь. Поэтому воздуходувки высокой мощности с дизельным двигателем следует рассматривать как альтернативу или дополнение к пассивной вентиляционной системе.

#### *Установка аварийной системы разбрызгивания воды*

В отчете Сандии предлагается также установить систему спринклеров<sup>83</sup>. Для 80 тонн отработанного топлива, выделяющего тепло с мощностью  $100 \text{ кВт/тU}$ , требуемое количество воды составляет 3 литра в секунду, если вся вода будет испаряться. Такой поток легко получить при помощи системы спринклеров с трубами умеренного размера<sup>84</sup>. Конструкция системы спринклеров должна обеспечивать гарантированную подачу воды и быть надежной и защищенной от падающих обломков. Она должна также управляться дистанционно, поскольку уровень радиации от открытого топлива может сделать невозможным доступ к отработанному топливу и работу с ним – в особенности, если здание будет повреждено. Самое горячее топливо должно храниться в местах, где будет происходить самое сильное разбрызгивание, даже если здание обрушится на верх бассейна (например, вдоль краев бассейна). Брызги должны достигать всего отработанного топлива в бассейне, в особенности в сценариях, когда разбрызгиваемая вода будет накапливаться на дне бассейна и заблокирует поток воздуха в ячейки плотной упаковки.

Другим обстоятельством, в котором разбрызгивание может ухудшить ситуацию, являет-

<sup>82</sup> Там же.

<sup>83</sup> Там же, стр.79.

<sup>84</sup> Поток воды  $1 \text{ л/с}$  можно поддерживать в стальной трубе с внутренним диаметром 2.5 см при падении давления  $0.015 \text{ атм/м}$  [ASHRAE Handbook: Fundamentals (American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, 2001), p.35.6].

ся такая, когда ячейки с отработанным топливом разрушены, или покрыты обломками. В таком случае пар, образующийся из воды, капающей на перегретое топливо, может реагировать с самим цирконием. Обстоятельства, при которых можно будет использовать разбрызгивание, требуют детального анализа сценария.

#### *Осуществление подготовки к быстрому заделыванию отверстий*

Небольшое отверстие, такое, какое может быть проделано валом турбины или броневой боеголовкой, может быть заделано. Отверстие в боковой стенке может быть заделано гибким щитом, сброшенным во внутреннюю часть бассейна<sup>85</sup>. Однако, в случае турбинного вала пространство может быть заблокировано, если вал пролетит через стенку в отработанное топливо, или же ячейки могут быть повреждены настолько, что они закроют пространство между собой и стенкой бассейна. Кроме того, если верхняя часть топлива уже открылась, уровень радиации в области бассейна будет слишком высоким, чтобы можно было проводить какие-либо операции, помимо заранее подготовленных и дистанционно управляемых.

При заделке снаружи придется работать против давления воды, оставшейся в бассейне (0,1 атм или 1кг/см<sup>2</sup> на метр глубины над отверстием). Однако, доступ отсюда может быть лучше и стенка бассейна может обеспечивать защиту, в особенности, если отверстие будет небольшим. Может оказаться полезной технология, разработанная для заделки отверстий в подводных туннелях<sup>86</sup>.

#### *Броня, устанавливаемая на внешних стенах и донных частях*

Вода и топливо в бассейне обеспечивают эффективную защиту от проникновения через стенки и пол бассейна с внутренней стороны. Можно предотвратить проникновение стенки кумулятивными снарядами снаружи при помощи отдельной стены на расстоянии примерно 3 метра, которая заставит струю расплавленного металла, образуемую кумулятивным зарядом, расширяться и значительно потерять свою проникающую способность перед ударом о стенку бассейна. В случае турбинного вала анализ Пеннингтона для сухих контейнеров показывает, что возможно также поглотить энергию вала толстым листом стали, который поддерживается таким образом, чтобы упруго растягиваться и поглотить кинетическую энергию снаряда (см. ниже).

### **СОКРАЩЕНИЕ ЗАПАСОВ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА В БАСЕЙНАХ**

Наше основное предложение заключается в перемещении отработанного топлива в контейнеры сухого хранения после того, как оно будет охлаждаться в течение 5 лет<sup>87</sup>. В дополнение к возможности возврата к хранению в открытых клетках, такое перемещение позволит

---

<sup>85</sup> Это может быть как раз то, что имел в виду комитет Национальной академии наук США, когда утверждал, что «аварийное охлаждение топлива в случае нападения может быть вероятно осуществлено при помощи низкотехнологичных средств, которые удастся применить без значительного облучения сотрудников» [*Making the Nation Safer: The Role of Science and Technology in Countering Terrorism* (National Academy Press, 2002), p.43]. Один из наших рецензентов указал, что прокол обшивки из нержавеющей стали в днище бассейна с отработанным топливом на ядерной электростанции Хэтч, вызванный падением болта из кожуха активной зоны (с весом 140 кг), был временно закрыт резиновым ковриком.

<sup>86</sup> Заслуживает дальнейшего исследования интересное предложение, сделанное одним из наших рецензентов. Речь идет о добавке к вытекающей воде такого вещества, которое применяется для изоляции охлаждаемых водой автомобильных двигателей. Этот герметик работает путем затвердевания при контакте с воздухом.

<sup>87</sup> Выбор возраста при перемещении топлива представляет собой компромисс между затратами и риском. Мы выбрали пять лет, основываясь на возможностях существующих систем сухого хранения.

сократить типичное количество  $^{137}\text{Cs}$  в бассейне примерно в 4 раза<sup>88</sup>, сокращая поэтому выброс наихудшего сценария примерно таким же образом. Контейнеры уже сейчас составляют все возрастающую часть емкости хранения на площадке. Из 103 работающих энергетических реакторов в США у 33 уже имеются сухие хранилища, а у 21 получение сухих хранилищ подготавливается<sup>89</sup>. В среднем для приема содержащегося в заполненном бассейне отработанного топлива с возрастом 5 лет или более потребуется примерно 35 контейнеров<sup>90</sup>.

Как уже отмечалось, это предложение в определенной степени противоречит более раннему предложению минимизировать перемещение контейнеров с отработанным топливом над бассейнами. Риск падения контейнеров следует учитывать при решении о выборе типа используемых контейнеров для перемещения в сухое хранилище.

## БЕЗОПАСНОСТЬ ХРАНЕНИЯ В СУХИХ КОНТЕЙНЕРАХ

Перевод бассейнов на хранение а открытых клетках потребует перемещения большого количества отработанного топлива, находящегося сейчас в бассейнах, в контейнеры сухого хранения. С контейнерами, лицензированными в настоящее время, это может быть сделано в тот момент, когда топливо охлаждалось в течение 5 лет. В принципе перевод отработанного топлива в сухое хранилище может быть сделан и раньше. Отработанное топливо, охлаждаемое в течение 2,5 лет, выделяет тепло в два раза сильнее в расчете на тонну, чем топливо через 5 лет после выгрузки (см. рис. 5). Такое отработанное топливо может храниться рядом со стенками контейнеров вместе со старым, более холодным, отработанным топливом, хранящимся во внутренней части.

Контейнеры не боятся потери охладителя, поскольку они охлаждаются естественной конвекцией, которая возбуждается теплотой распада самого отработанного топлива. Поэтому контейнеры сухого хранения отличаются от реакторов и существующих бассейнов отработанного топлива в том, что их охлаждение является полностью пассивным. Для того, чтобы произошел выброс радиоактивного материала, стенка контейнера должны быть пробита снаружи, или контейнер должен нагреться внешним пламенем до такой температуры, что его оболочка разрушится. Однако, для того, чтобы произошли очень большие выбросы, возможные сегодня в бассейнах с отработанным топливом, требуется одновременное разрушение или нападение на многие контейнеры. Тем не менее, поскольку общее количество  $^{137}\text{Cs}$  на площадке в нашем предложении не изменяется, важно рассмотреть безопасность хранения в сухих контейнерах, в представляющемся нам способе их использования.

Имеется два основных типа контейнеров для сухого хранения, лицензированных в настоящее время в США (см. рис. 9)<sup>91</sup>:

<sup>88</sup> Соединенные Штаты производят примерно 100 ГВт ядерной электроэнергии, или около 1 ГВт на бассейн с отработанным топливом. Ядерная консультативная комиссия (НАС) предсказывает, что к 2010 г. в бассейнах будет находиться 45000 тонн отработанного топлива [US Spent Fuel Update: Year 2000 in Review (Atlanta, Georgia: NAC Worldwide Consulting, 2001)], то есть, в среднем по 450 тонн на бассейн. За пять лет один ГВт электроэнергии создает около 100 тонн топлива.

<sup>89</sup> 2002 Summary of U.S. Generating Company In-pool Storage Capability Projected Year that Full Core Discharge Capability Lost (Energy Resources International, 2002), [www.nei.org/documents/Spent\\_Fuel\\_Storage/Status.pdf](http://www.nei.org/documents/Spent_Fuel_Storage/Status.pdf) (Dec. 14, 2002).

<sup>90</sup> В среднем по 350 тонн отработанного топлива придется удалить из каждого из ста бассейнов (см. [88]). Контейнеры для отработанного топлива обычно имеют емкость около 10 тонн.

<sup>91</sup> В настоящее время в США лицензированы следующие контейнеры для сухого хранения (<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part072/part072-0214.html>). К категории толстостенных относится Castor V/21 компании General Nuclear System. Категория с дополнительной транспортной тарой включает в себя следующие компании: Nuclear Assurance Corp. (<http://www.nacintl.com>) - контейнеры NAC S/T, NAC C-28 S/T для хранения и транспортировки, NAC MPS (это многоцелевые системы), универсальные системы для хранения NAC-UMS; Transnuclear (<http://www.cogema-inc.com/subsidiaries/transnuclear.html>) – горизонтальная модульная система хранения NUHOMS, контейнеры для сухого хранения TN-24, TN-32, TN-68; Holtec (<http://www.holtecinternational.com>) – контейнеры HI-STAR 100, HI-STORM 100; British

1. Контейнеры со стенками, достаточно толстыми для обеспечения защиты от радиации.
2. Тонкостенные контейнеры, предназначенные для помещения в бетонную оболочку, которая обеспечивает радиационную защиту с пространством между контейнером и оболочкой для конвективной циркуляции воздуха. Оболочки для перемещения и оболочки для транспортировки используются соответственно для перемещения на площадке и транспортировки за пределы площадки.

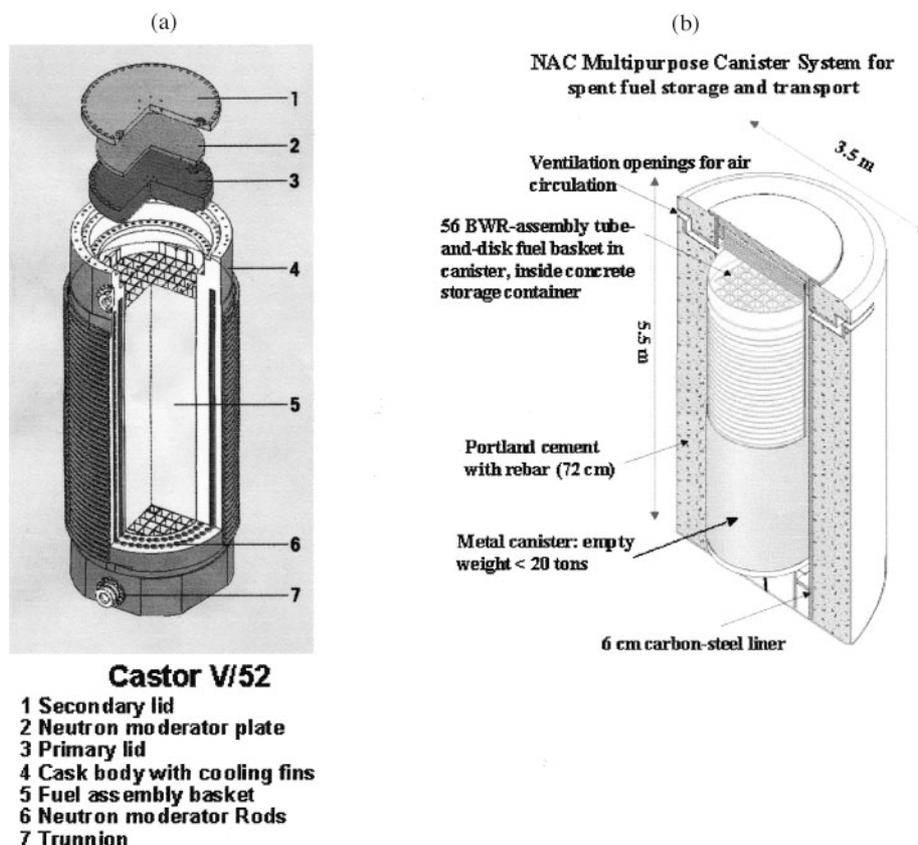


Рисунок 9

- а) Толстостенный контейнер CASTOR V/52<sup>92</sup>. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – вторичная крышка; 2 – пластина нейтронного замедлителя; 3 – первичная крышка; 4 – корпус контейнера с лопастями для охлаждения; 5 – топливо и пустая корзина; 6 – стержни замедлителя нейтронов; 7 – подвеска.
- б) Контейнер с оболочкой<sup>93</sup>. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – система многоцелевого

Nuclear Fuel Limited – контейнер для хранения W-150; Pacific Sierra (теперь BNFL Fuel Solutions) – система контейнера для хранения с вентиляцией VSC-24 (<http://www/bnfl/com>). Смотрите также *Information Handbook on Independent Spent Fuel Storage Installations* by M.G.Raddatz and M.D.Waters (Washington, DC: U.S. NRC, NUREG-1571, 1996).

<sup>92</sup> Контейнер изготовлен из ковкого чугуна и имеет следующие параметры: длина 5.45 м, внешний диаметр 2.44 м, длина полости 4.55 м, диаметр полости 1.48 м, толщина стенки 35 см, вес без груза 104 т, вес с нагрузкой 123 т. [*Transport and Storage Cask V/52* (GNS,1997), p.2,4]. Castor V/52 похож на модели V/19 и V/21 за исключением того, что эта модель спроектирована для размещения внутри 52 топливных сборок от реактора с кипящей водой.

<sup>93</sup> Металлический контейнер NAC-UMS изготовлен из нержавеющей стали и способен принять 24 топливные сборки от реактора под давлением или 56 сборок от реактора с кипящей водой. Его высота равна около 4.7 м, а диаметр –1.7 м при толщине стенок 1.6 см. Транспортировочная тара – это цилиндр из железобетона высотой около 5 м и внешним диаметром 3.5 м. Стенки тары изготовлены из стальной пластины толщиной 6.4 см и бетонного слоя толщиной 72 см. Обтекающий воздух проникает через отверстия в таре и охлаждает внешнюю часть металлического контейнера путем естественной конвекции.

контейнера NAC для хранения и транспортировки отработанного топлива; 2 – вентиляционные отверстия для циркуляции воздуха; 3 – корзина из труб и дисков для 56 сборок внутри цементного контейнера хранения; 4 – портланд-цемент с арматурой; 5 – металлический контейнер с весом менее 20 тонн; 6 – оболочка из углеродистой стали толщиной 6 см.

Возможными угрозами для таких контейнеров являются: ракеты с кумулятивными зарядами; валы турбин авиационных двигателей, и пожары.

### **Ракеты с кумулятивными зарядами**

Контейнеры сухого хранения в США хранятся на открытом воздухе на бетонных фундаментах. Ракеты, снабженные кумулятивными зарядами, разработанные для пробивания танковой брони, способны пробить такие незащищенные контейнеры для хранения и вызвать определенное повреждение находящегося внутри него топлива. Эксперименты с контейнерами типа CASTOR с втрое меньшей длиной, содержащих решетку размера 3 X 3 со сборками проводились в 1992 году на испытательном полигоне французской армии Министерством окружающей среды и ядерной безопасности Германии. Моделируемое топливо было изготовлено из необлученного обедненного урана, находящегося под давлением в 40 атм для моделирования нарастания давления от газообразных продуктов деления в отработанном топливе.

Частицы вещества, вылетевшие из отверстия, собирались и анализировались по размерам. Когда начальное давление внутри контейнера было равно атмосферному, то из отверстия при взрыве было выброшено около 3,6 грамма частиц с диаметром менее 100 микрон. При анализе радиологических последствий предполагалось, что, благодаря летучести  $^{137}\text{Cs}$ , будет выброшено его количество, эквивалентное 50 г топлива со степенью выгорания 48,5 МВт·сутки/тU<sup>94</sup>. В другом анализе предполагается, что выброс будет в 1000 раз больше<sup>95</sup>. Еще больший выброс может произойти, если контейнер будет атакован таким образом, чтобы инициировать и поддержать горение циркониевой оболочки в контейнере.

Было найдено, что можно заделать относительно небольшое отверстие в контейнере, сделанное кумулятивным зарядом в толстостенном стальном контейнере куском свинца до того, как может быть выделена значительная радиоактивность<sup>96</sup>. Заделывание отверстия станет значительно более трудным в случае тонкостенного контейнера, окруженного бетонной оболочкой.

В любом случае, если только не будет подожжена значительная часть топлива в контейнерах, выброс будет небольшим по сравнению с потенциальным выбросом при пожаре в бассейне с отработанным топливом. Тем не менее, германские власти требуют, чтобы контейнеры находились в защищенном здании. Стены здания могут быть пробиты кумулятивным зарядом, но жидкий металл распределится в пространстве между стеной и ближайшим

<sup>94</sup> F.Lange and G.Pretzsch, GRS mbH; E.Hoermann, Dornier GmbH; and W.Koch, Fraunhofer Institute for Toxicology, "Experiments to quantify potential releases and consequences from sabotage attack in spent fuel casks", 13<sup>th</sup> International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material, Chicago, Sept. 2001. Для заполнения сухих контейнеров часто применяется гелий из-за его очень высоких характеристик по теплопереносу и благодаря возможности обнаруживать течи. Проводились эксперименты в 80-е гг. для определения увеличения температуры в случае утечки гелия из контейнера Castor и замены его на воздух. Было найдено, что максимальная температура топливных стержней выросла от 400 до 460 градусов.

<sup>95</sup> Helmut Hirsh and Wolfgang Neumann, "Verwundbarkeit von CASTOR-Behaltern bei Transport und Lagerung", [www.bund.net/lab/reddot2/pdf/studie\\_castorterror.rtf](http://www.bund.net/lab/reddot2/pdf/studie_castorterror.rtf).

<sup>96</sup> Если дыра не закрыта, диоксид урана в треснувших стержнях окисляется до  $\text{U}_3\text{O}_8$ , что приводит к крошению топливных таблеток и к дополнительному выделению летучих продуктов деления, которые могут диффундировать из отверстия (см. работу Клауса Янберга «История и факты последствий падения самолетов и воздействия противотанкового оружия для установок, где хранится отработанное топливо» (на английском языке).

контейнером и поэтому станет относительно безопасным. Места хранения в сухих контейнерах в США в настоящее время не защищены таким образом, но контейнеры могут быть защищены оболочкой<sup>97</sup> и (или) бермой.

### Турбинный вал

Контейнер CASTOR переносит без пробивания удары под различными углами модельного веса турбинного вала, весящего около полутонны и окруженного дополнительными стальными навесками, движущегося со скоростью, близкой к скорости звука (312 м/сек)<sup>98</sup>. Недавно компания «NAC International» провела компьютерное моделирование удара турбины Боинга-747 по своему контейнеру в оболочке «Многоцелевая универсальная система» со скоростью 220 м/сек и пришла к выводу, что он не будет пробит. Этот результат должен быть подтвержден экспериментально<sup>99</sup>.

### Пожар

Теоретические исследования пожароустойчивости контейнеров Castor V/19 (водяные реакторы под давлением) и V/52 (реакторы с кипящей водой) для хранения и транспортировки были проведены Австрийским агентством по окружающей среде для ряда реакторных площадок в Германии из-за опасений того, что загрязнение от разрушения контейнеров может достигнуть пределов Австрии. Сценарий заключался в аварии крупного коммерческого авиалайнера над площадкой хранения. Предполагалось, что 80 тонн керосина прольется на контейнеры для хранения и будет гореть в течение 3 или 5 часов при температуре 1000 °С. Было оценено, что из-за большой теплоемкости толстых стенок контейнера уплотнения привинченных крышек начнут приходить в негодность только после 3 часов. Предполагалось также, что в это время начнет нарушаться оболочка топлива. И, наконец, предполагалось, что содержащийся <sup>137</sup>Cs будет находиться в наиболее летучей (элементарной) форме. На этих основаниях была получена оценка того, что после пожара длительностью 5 часов при температуре 1000 °С в хранилище с 135 контейнерами будет выделено 0,04 МКи <sup>137</sup>Cs из находящихся в хранилище 170 МКи<sup>100</sup>.

Очевидно, что выброс даже в такой наихудшей аварии будет незначительным по сравнению с в 100 или 1000 раз большими выбросами из рассмотренного выше пожара в бассейне с отработанным топливом. Тем не менее, хранилище отработанного топлива должно быть сконструировано, помимо всего прочего, таким образом, чтобы предотвратить разлив керосина вокруг контейнеров.

## ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ПЕРЕМЕЩЕНИЮ СТАРОГО ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА В ХРАНИЛИЩЕ С СУХИМИ КОНТЕЙНЕРАМИ

<sup>97</sup> Как сообщается в [96], керамическая система защиты от баллистического удара успешно прошла испытания в июне 1998 г. с контейнерами Castor на армейском полигоне в Абердине, США. Защита контейнера весом 100 т сама весит 50 т.

<sup>98</sup> См. [96].

<sup>99</sup> «Пластина из углеродистой стали толщиной 6 см раздувается и охватывает контейнер» (“Plane tough storage” by Michael McGough and Charles Pennington, *Nuclear Engineering International*, May 2002). Моделирование предполагает, что сталь растягивается на 37% под давлением 3400 МПа без разрыва. Кинетическая энергия вала весом 400 кг, движущегося со скоростью 220 м/с составляет около 10 МДж. Мы проверили правдоподобие этого результата, используя упрощенную геометрию, где плоский круглый диск толщиной 8 см (принимая во внимание толщину стенок контейнера и лайнера) и метрового радиуса вытягивается в конус, когда его края закреплены, а центральная точка подвергается давлению в направлении, перпендикулярном начальной плоскости пластины. Чтобы пластина поглотила 10 МДж при подобном растягивании, центральную точку приходится оттягивать на 0.3 м.

<sup>100</sup> В докладах австрийского Федерального агентства по окружающей среде приводятся сведения о реакторных площадках в Графенхайнфелде, Гундермингене, Изаре, Некаре и Филлипсбурге.

Как будет показано, при существующих мощностях изготовления контейнеров потребуется около десяти лет для того, чтобы переместить большую часть находящегося сейчас в бассейнах отработанного топлива в хранилища с сухими контейнерами. Практически все хранение будет сосредоточено на площадках реакторов в течение нескольких десятилетий, пока не станет доступно хранилище вне площадок. Подземное хранилище в Юкка Маунтин не откроется по крайней мере десять лет и по текущим планам отработанное топливо будет перевозиться в хранилище со скоростью 3000 тонн в год, всего на 1000 тонн в год больше, чем выгружается отработанного топлива из американских реакторов<sup>101</sup>. Если открытие Юкка Маунтин будет задержано на много лет, то примерно 2000 тонн отработанного топлива в год сможет перевозиться в предлагаемое большое централизованное хранилище в резервации Госхьют к западу от Солт Лейк Сити в штате Юта, если оно будет лицензировано<sup>102</sup>.

Для сравнения, количество отработанного топлива на площадках реакторов в США в 2010 году превысит 60 000 тонн, из которых 45 000 тонн будет находиться в наиболее плотно упакованных бассейнах<sup>103</sup>. Если все топливо, за исключением накопленного за последние 5 лет, будет храниться в сухих хранилищах, то из бассейнов надо будет выгрузить 35 000 тонн<sup>104</sup>. Поскольку неблагоприятно предполагать, что можно надеяться на перевозки за пределы площадок в Юкка Маунтин или в централизованное промежуточное хранилище для решения проблемы плотно упакованных бассейнов с отработанным топливом в скором времени, мы сосредоточимся здесь на вопросах снабжения и расходов, связанных с увеличением объема сухих хранилищ на площадках.

### Доступность контейнеров

Доступность контейнеров может стать ограничивающим свойством в перемещении старого отработанного топлива из бассейнов в сухие хранилища на площадках реакторов. В настоящее время производственные мощности изготовления контейнеров в США приблизительно составляют 200 контейнеров в год – хотя объем производства равняется примерно половине от этого. Две сотни контейнеров будут иметь вместимость, примерно равную выходу отработанного топлива на американских атомных электростанциях, составляющему около 2000 тонн в год. Тем не менее, согласно двум крупным производителям контейнеров в США, они могут в течение нескольких лет увеличить свою суммарную мощность

---

<sup>101</sup> Проектная вместительность наземного принимающего предприятия в Юкка Маунтин составляет 3000 т/г (Daniel Metlay, U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, частное сообщение, 12 ноября 2002 г.). Похоже, что темпы разгрузки отработанного топлива на американских реакторах лишь слегка уменьшатся в течение следующих десятилетий. Восемь станций уже получили продление на 20 лет лицензий от комиссии по ядерному регулированию, рассматриваются обращения еще 14 станций для продления и, как сообщает институт по ядерной энергии, еще 26 станций собираются подать документы к 2005 г. (<http://www.nei.org/doc.asp?catnum=3&catid=286>).

<sup>102</sup> Проектная вместимость составит 40000 т отработанного топлива. Возможность операций с топливом обеспечат 200 контейнеров (2000 т/г урана) (Max De Long, Excel Energy, частное сообщение, ноябрь 2002 г.).

<sup>103</sup> По оценкам ядерной консультативной комиссии, на конец 2000 г. запас отработанного топлива в США составил 42900 т, из которых 2430 т находились на сухом хранении. По расчетам запас США составит в 2010 г. 64300 т, из которых 19450 будут на сухом хранении (см. цитируемую работу в [88]). Небольшое увеличение планируемого хранения в бассейнах (на 4400 т) говорит о том, что большинство американских бассейнов с отработанным топливом уже достигло предела вместимости с плотной упаковкой.

<sup>104</sup> Мы предполагали, что среднее выгорание топлива в 2005-2010 гг. составит 43 МВт·д/кг (это приблизительно усредненное значение за последние годы), средний коэффициент использования – 0.85, а средняя эффективность преобразования тепла в электроэнергию – 33%. При таких допущениях количество отработанного топлива, выгруженного за пять лет, составит просто 100P, где P – установленная мощность производства электроэнергии (ГВт) всеми взаимодействующими АЭС.

производства до 500 контейнеров в год<sup>105</sup>. При использовании дополнительных 300 контейнеров в год для выгрузки 35 000 тонн отработанного топлива из бассейнов для хранения потребуется около 10 лет. Этот период можно несколько сократить, если разгрузка высокоплотных бассейнов будет рассматриваться как важный вопрос национальной безопасности. Соединенные Штаты обладают достаточными производственными мощностями, которые могут быть направлены на производства контейнеров с использованием существующих лицензированных конструкций. Также могут быть импортированы контейнеры, изготовленные в Европе и Японии. Тем не менее, при оценке того, насколько можно будет сократить период перемещения, следует рассматривать и другие потенциальные ограничивающие скорость факторы.

### Стоимость сухого хранения

Емкость хранения в контейнерах стоит американским производителям 90 до 210 долларов за килограмм урана<sup>106</sup>. Дополнительные капиталовложения для новых сухих хранилищ на площадке будут включать расходы на лицензирование Ядерной регулятивной комиссией, фундаменты хранилищ, системы безопасности, системы сварки контейнеров, контейнеры для перемещения, стропы, тракторы-трейлеры, и пусковые испытания. Эти расходы оцениваются от 9 до 18 миллионов долларов на площадку<sup>107</sup>. Тем не менее, на большинстве площадок эти расходы неизбежны, поскольку даже плотно упакованные бассейны заполняются. Капитальные затраты на перемещение 35 000 тонн отработанного топлива будут поэтому определяться стоимостью контейнеров и составят от 3,5 до 7 миллиардов долларов (100 – 200 долларов на килограмм урана). На гигаватт электрической мощности расходы составят 35 – 70 миллионов. Дополнительная стоимость на киловатт-час составит от 0,03 до 0,06 центов<sup>108</sup>. Это составляет 0,4 – 0,8 процента от средней отпускной цены электроэнергии в США в 2001 году<sup>109</sup>. Она также эквивалентна 30 – 60 процентам федерального налога на окончательное захоронение отработанного топлива (см. ниже).

Дополнительные расходы могут быть значительно сокращены, если контейнеры смогут быть использованы как для транспортировки, так и для окончательного захоронения. Для многоцелевых контейнеров со стационарной бетонной оболочкой дополнительные расходы будут связаны в основном с оболочкой (около 20% от полной стоимости) и с необходимостью приобретения контейнеров раньше, чем это было бы в случае отработанного топлива, остающегося в плотно упакованных бассейнах до тех пор, пока оно не будет перевезено в геологическое хранение. К сожалению, Министерство энергетики отказалось от идеи многоцелевых контейнеров и текущие планы предусматривают распаковку топлива из транспортных контейнеров и последующую упаковку в специальные контейнеры для утилизации<sup>110</sup>.

Расходы увеличатся из-за строительства зданий, берм и других конструкций, окружающих контейнеры и обеспечивающих дополнительное препятствие для возможной атаки противотанковыми ракетами или падения самолета. Здание в Горлебене, которое лицензиро-

---

<sup>105</sup> Компания NAC International может изготовить 180 контейнеров в год в течение 2-3 лет (Чарльз Пеннингтон, сотрудник компании, частное сообщение, ноябрь 2002 г.). Компания Holtec в настоящее время может изготавливать 200 контейнеров ежегодно и эта производительность может быть поднята 300 единиц в год (Крис Блессинг, сотрудник компании, частное сообщение, ноябрь 2002 г.). Мы считаем, что средняя вместимость составит 10 т на контейнер.

<sup>106</sup> Это основано на беседах с производителями контейнеров. Низшая граница диапазона соответствует тонкостенным контейнерам с транспортировочной тарой, сделанной из железобетона. Верхняя граница приведена для монолитных толстостенных контейнеров, оборудованных противоракетной защитой.

<sup>107</sup> Allison Macfarlane, "The problem of used nuclear fuel: Lessons for interim solutions from a comparative cost analysis", *Energy Policy*, 29 (2001), pp.1379-1389.

<sup>108</sup> В предположении, что выгорание равно 43 МВт·кгТМ, а коэффициент преобразования тепла в электроэнергию составляет 33%.

<sup>109</sup> *Monthly Energy Review, September 2002* [U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, DOE/EIA-0035(2002/09), Table 9.9].

<sup>110</sup> Мы благодарны рецензенту, указавшему нам на это.

вано для хранения 420 контейнеров, содержащих около 4200 тонн урана в отработанном топливе, будет стоить при строительстве в Соединенных Штатах дополнительно 20 – 25 миллионов долларов, или 6 долларов на килограмм урана<sup>111</sup>. Консервативно предполагая, что стоимость здания растет пропорционально квадратному корню из его вместимости (т.е., в пропорционально его длине), оно будет стоить примерно 12 долларов на килограмм урана для хранилища на 100 контейнеров, содержащих 1000 тонн урана в отработанном топливе, что примерно соответствует типичному запасу площадки с 2 реакторами, если наше предложение будет реализовано в 2010 году<sup>112</sup>. Бермы для площадки хранения типичных размеров могут стоить около 1,5 – 3 долларов на килограмм урана<sup>113</sup>.

## Вопросы лицензирования

В настоящее время Ядерная регулятивная комиссия лицензирует контейнеры для хранения сроком на 20 лет. Некоторые сухие хранилища в США достигнут 20-летнего возраста через несколько лет. Поэтому Ядерная регулятивная комиссия сейчас решает, какой анализ требуется для предоставления базы для продления лицензии.

По мере того, как операторы реактора повышают степень выгорания, контейнеры должны также лицензироваться на хранение топлива с высокой степенью выгорания. Текущие лицензии допускают степень выгорания до 45 000 МВт·сутки/т. Тем не менее, контейнер CASTOR V/19 уже лицензирован в Германии для хранения 19 топливных сборок типа Biblis, которые несколько больше и тяжелее, чем американские топливные сборки для водяных реакторов под давлением. Лицензия допускает хранение 15 пятилетнихборок со степенью выгорания 55 МВт·сутки/кг и еще 4 сборки со степенью выгорания 65 МВт·сутки/кг<sup>114</sup>. Американские контейнеры для хранения испытывались с топливом со степенью выгорания в 60 МВт·сутки/кг<sup>115</sup>.

И, наконец, некоторые операторы реакторов выражают сомнение в том, что Ядерная регулятивная комиссия в настоящее время не имеет достаточного персонала для того, чтобы ускорить процесс лицензирования сухих хранилищ на площадках. Тем не менее, в рассматриваемом здесь случае временных рамок почти все площадки успеют закончить лицензирование сухих хранилищ.

## Кто будет платить?

Ожидается, что операторы атомных электростанций будут протестовать против дополнительных расходов перемещения отработанного топлива из бассейнов в сухие хранилища на площадках. В результате сокращения объема вмешательства государства в экономику многие операторы более не могут переводить эти расходы на потребителей, не опасаясь конкуренции по стороны тепловых электростанций. Кроме того, многие электростанции были проданы за несколько процентов своей начальной стоимости строительства владельцам, которые организовали собственные корпорации для ограничения ответственности за стои-

---

<sup>111</sup> Стены и крыша в Горлебене сделаны из железобетона толщиной 50 и 15 см, соответственно.

<sup>112</sup> К 2010 г. США будут иметь 19450 т отработанного топлива на сухом хранении ([110]). Если добавить 35000 т более старого топлива из бассейнов, полное количество составит около 55000 т, или примерно 550 т на ГВт(э) производительности ядерной электроэнергии в США.

<sup>113</sup> Бермы для площадки на 300 контейнеров (АЭС Пало Верде в Аризоне) стоят 5-10 миллионов долларов (Чарльз Пеннингтон, Ядерная консультативная комиссия, частное сообщение, ноябрь 2002 г.).

<sup>114</sup> В соответствии с новыми правилами комиссии по ядерному регулированию (ISG11, rev.2), допускающими сухое хранение с максимальной температурой топливных стержней до 400<sup>0</sup>С, ожидается, что может быть развернут вариант, вмещающий 21 топливную сборку со средним выгоранием 60 МВт·д/кг (по сообщению Клауса Янберга).

<sup>115</sup> В 2000 г. проводились испытания контейнеров с топливом, имевшим выгорание до 60 МВт·д/кгТМ (Susan Shankman and Randy Hall, "Regulating Dry Cask Storage," *Radwaste Solutions* (July/August 2000), p.10.

мость самих заводов<sup>116</sup>. Поэтому для предотвращения длительной задержки в реализации сухого хранения федеральное правительство должно рассмотреть возможность предложения оплаты дополнительных контейнеров для хранения и любых улучшений безопасности, которые могут понадобиться для существующих сухих хранилищ.

По закону 1982 года о политике для ядерных отходов Министерство энергетики должно было заключить контракты с атомными электростанциями для начала перемещения отработанного топлива с атомных электростанций в национальное глубокое подземное хранилище в 1998 году. За это атомные электростанции должны были вносить плату в национальный фонд ядерных отходов в размере 0,1 цента за киловатт-час электроэнергии, произведенной их атомными электростанциями плюс одновременную выплату (которые некоторые электростанции все еще не выплатили полностью), зависящую от произведенной ими электроэнергии до вступления закона в силу. На 31 мая 2002 года на счете фонда находилось 11,9 миллиарда долларов. Начиная с 1995 года, на счет ежегодно поступает 600 – 700 миллионов долларов<sup>117</sup>. Министерство энергетики тратит около 600 миллионов долларов в год на Юкка Маунтин, но, в течение нескольких последних лет две трети из этой суммы выделялось со счета национальной обороны Министерства финансов США, потому что Министерству энергетики ранее недоплачивали за долю хранилища, которую будут занимать высокорadioактивные отходы от оборонных ядерных программ.

Поэтому в принципе имеется значительная сумма, которая может быть доступна из фонда ядерных отходов для сухого хранения. Тем не менее, при некоторых обстоятельствах все эти средства могут когда-то потребоваться для хранилища в Юкка Маунтин, стоимость которого оценивается в 57,5 миллиарда долларов<sup>118</sup>. Более того, использование фонда для промежуточного хранения блокируется законодательством об электростанциях<sup>119</sup>. Наиболее вероятно поэтому, что следует дополнить закон о политике для ядерных отходов для того, чтобы разрешить федеральному правительству принять на себя право на отработанное топливо сухого хранения и ответственность за хранение на площадке.

Альтернативный подход заключается в том, чтобы создать дополнительный налог на потребителя, аналогичный тому, который поступает в фонд ядерных отходов. Налог в 0,1 цента на один киловатт-час атомной электроэнергии позволит получить дополнительные 750 миллионов долларов в год, которые в течение 5 или 10 лет позволят оплатить расходы от

---

<sup>116</sup> Более 25 АЭС находятся сейчас во владении таких «корпораций с ограниченной ответственностью», и ожидаются дальнейшие корпоративные реорганизации [*Financial Insecurity: The Increasing Use of Limited Liability Companies and Multi-Tiered Holding Companies to Own Nuclear Power Plants*, by David Schlissel, Paul Peterson and Bruce Biewald (Synapse Energy Economics, 2002), p.1].

<sup>117</sup> *Monthly Summary of Program Financial and Budget Information* (Office of Civilian Radioactive Waste Management, May 31, 2002). В 2001 г. американские АЭС произвели 769 МВт·ч (*Monthly Energy Review, September 2002, Table 8.1*). С введением в жизнь с 1987 г. бюджетного закона Грэма, Холлингса и Рудмана и закона о регулировании бюджета (1990 г.) фонд ядерных отходов перестал быть обособленно обращающимся фондом. Впрочем, поступления размещаются на общем счете фондов в Министерстве финансов США и проценты нарастают так, как будто бы речь идет об отдельно обращающемся фонде.

<sup>118</sup> *Nuclear Waste Fund Fee Adequacy: An Assessment* (Department of Energy, DOE/RW-0534, 2001). Доклад приходит к заключению, что доходы фонда ядерных отходов должны быть адекватными, но могут возникнуть проблемы, если значительно упадет норма процента, или Министерство энергетики понесет большие судебные издержки из-за урегулирования, или же значительно возрастут расходы.

<sup>119</sup> Министерство энергетики (МЭ) вело переговоры с энергетической компанией ESO/Exelon, чтобы помечать ее отработанное топливо, когда оно еще находится в реакторе, и платить за сухое хранение деньгами из фонда ядерных отходов. Но апелляционный суд США (11 округ) постановил, что МЭ не может платить из фонда для покрытия нарушений по предыдущим обязательствам в рамках закона о политике ядерных отходов 1982 г., по которому МЭ должно было начать перемещение отработанного топлива от АЭС в глубокое подземное хранилище с 1998 г. (Melita Marie Garza, "Exelon rivals win waste-suite round," *Chicago Tribune*, September 26, 2002 and Matthew Wald, "Taxpayers to owe billions for nuclear waste storage," *New York Times*, September 26, 2002).

3,7 до 7 миллиардов долларов для перемещения 35 000 тонн отработанного топлива в сухие защищенные хранилища на площадке. Однако, такому налогу будут противодействовать операторы атомных электростанций.

## РЕЗЮМЕ

Как подытожено в табл. 2, мы предложили ряд возможных действий для исправления очевидной уязвимости бассейнов с отработанным топливом и уменьшения наихудших возможных выбросов, которые могут возникнуть в таких бассейнах. Эти рекомендации приведут к значительному улучшению текущей ситуации, но они могут быть также подвержены значительным ограничениям.

### Улучшения

- Будут уменьшены очевидные уязвимости бассейнов с отработанным топливом.
- Наихудший выброс  $^{137}\text{Cs}$  (изотопа, определяющего размеры долговременного заражения почвы) из типичного бассейна с отработанным топливом будет сокращен примерно в четыре раза. Оставшееся количество  $^{137}\text{Cs}$  в бассейне с отработанным топливом будет примерно вдвое больше, чем в активной зоне реактора.
- Наши рекомендации могут быть реализованы с использованием имеющихся технологий с расходами, примерно равными одному проценту от стоимости электроэнергии атомных электростанций.

### Ограничения

- В горячем отработанном топливе бассейнов для хранения останется значительное количество  $^{137}\text{Cs}$ .
- Террористы все еще смогут вызвать выбросы из модулей контейнеров сухого хранения, в которые будет перемещено выдержанное отработанное топливо, хотя трудно представить, каким образом они смогут выпустить большую часть всех хранящихся запасов без взрыва ядерного оружия.
- Наш анализ в основном ограничен авариями или террористическими актами, которые частично или полностью осушают бассейн, оставляя неизменной геометрию ячеек с отработанным топливом и здания. Пожары отработанного топлива могут возникнуть в бассейнах с открытым клетками, в которых циркуляция воздуха заблокирована разрушенным зданием. Такие ситуации требуют дополнительного анализа.
- Мы рассматриваем типичные бассейны водяных реакторов под давлением. При анализе конструкций специфических водяных реакторов под давлением и реакторов с кипящей водой могут возникнуть дополнительные вопросы.

И, наконец, все наши предложения требуют дальнейшего детального анализа, а некоторые из них могут включать компромиссов риска, которые также должны быть подробно проанализированы. В идеальном случае этот анализ должен осуществляться в ходе открытого процесса, в котором должны учитываться мнения как аналитиков, так и политиков. Этот процесс должен быть организован таким образом, чтобы сбалансировать потребность в демократических обсуждениях с потребностью ограничения публичного распространения информации, которая может способствовать ядерному терроризму. Мы полагаем, что наше исследование показывает, что такой баланс может быть достигнут.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотели бы поблагодарить за полезные комментарии и предложения Стива Феттера, Ричарда Гарвина, Дэвида Лохбаума, Хельмута Хирша, и ряд анонимных рецензентов.

Таблица 2. Сводка предложений

Тип	Действие	Примечания
<b>Регулирование</b>	<p>Конгресс должен определить вероятность вызванного террористами пожара, которую должна использовать Ядерная регулятивная комиссия в качестве основы правового анализа расходов и результатов.</p> <p>Ядерная регулятивная комиссия должна потребовать, чтобы операторы ядерных электростанций имели возможность эксплуатировать и ремонтировать бассейны с отработанным топливом в условиях аварии и после атаки.</p>	<p>В настоящее время Ядерная регулятивная комиссия не имеет базиса для определения предела того, как много может быть израсходовано на усиление защиты от террористических действий.</p> <p>При этом следует применять подход глубокой обороны Ядерной регулятивной комиссии для ядерных реакторов к бассейнам с отработанным топливом.</p>
<b>Эксплуатация</b>	<p>Минимизировать перемещение контейнером с отработанным топливом над бассейнами с отработанным топливом.</p> <p>Минимизировать случаи, когда в бассейн перемещается вся активная зона во время перерывов на перезагрузку.</p> <p>Перемещать отработанное топливо в хранилище в сухих контейнерах через 5 лет после выгрузки из реактора.</p>	<p>Это должно быть сбалансировано с предложением об удалении старого отработанного топлива из бассейнов.</p> <p>Технически возможно с некоторыми потенциальными неудобствами для получателей лицензии.</p> <p>Перемещение, возможно, может быть осуществлено несколько ранее. Реализация может потребовать от Конгресса разрешения использования фонда ядерных отходов или введения ретроспективного налога на потребителей электроэнергии, оцениваемого примерно в 0,03 – 0,06 цента на киловатт-час, произведенный из отработанного топлива.</p>
<b>Конструкция</b>	<p>Возвращение к хранению в открытых конструкциях, возможно, с дополнительными мерами контроля критичности.</p> <p>Обеспечение аварийной вентиляции зданий с отработанным топливом.</p> <p>Установка аварийных разбрызгивателей воды.</p> <p>Подготовиться к аварийному ремонту отверстий в стенках и дне бассейна.</p> <p>Установка брони на стенках и дне против снарядов.</p>	<p>Требуется анализ того, как управлять подачей воздуха при начале пожара.</p> <p>Разбрызгиваемая вода может блокировать циркуляцию воздуха в плотно упакованных бассейнах или при некоторых обстоятельствах подпитывать пожар.</p> <p>Для различных конструкций бассейнов осуществимость может изменяться очень сильно.</p>