

КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ «ОСЛАБЛЕНИЕ ОПАСНОСТИ ОТ ХРАНЯЩЕГОСЯ ОТРАБОТАННОГО ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ В США»

Аллан С. Бенджамин

Автор ранее занимал ведущее положение в технической группе Сандийской национальной лаборатории. Сейчас он руководит научной деятельностью в компании ARES Corporation, 851 University Boulevard, SE, Albuquerque, NM 87106, USA. Адрес электронной почты – abenjamin@arescorporation.com

Я один из рецензентов статьи «Уменьшение угроз от хранящегося отработанного топлива американских энергетических реакторов», а также основной автор доклада Сандийской национальной лаборатории (СНЛ), который несколько раз цитируется авторами статьи. Тема уязвимости бассейнов с отработанным топливом (БОТ) очень важна в современных условиях и мне приятно, что я смог внести в нее новое. Как я считаю, в статье правильно указана проблема, за которую стоит браться, а именно, тот факт, что потеря воды в БОТ с плотной упаковкой топлива может иметь серьезные последствия. Но я полагаю, что статья не коснулась всех соображений, связанных с проблемой. Некоторые из них способны повлиять на результаты анализа затрат и выгод, который применяется авторами для оправдания предлагаемого ими решения: изменение структуры стеллажей в бассейне для перехода к размещению с низкой плотностью упаковки и с открытыми решетками, а также удаление устаревшего топлива на сухое хранение в контейнерах. Короче говоря, авторы правильно отождествляют проблему, к которой следует обратиться, но они не достаточно демонстрируют, что предлагаемое решение рентабельно или оптимально.

Я согласен (и это положительная часть моей оценки) с авторским анализом того, что могло бы произойти в случае полной потери воды из БОТ, набитого от стенки к стенке топливом в циркониевой оболочке. Если часть этого топлива только недавно была удалена из активной зоны реактора, нет сомнений в том, что значительная часть продуктов деления попадет в окружающую среду. Наши анализы в упоминавшемся докладе СНЛ (1979 г.) действительно показывают, что наиболее горячая часть бассейна нагреется до температуры, когда циркониевая оболочка сначала растрескается, а затем загорится. В последующих экспериментах с циркониевыми трубками, которые нагревались электрическим током (эти результаты формально не опубликованы), было показано, что существует возможность распространения огня от более нагретых топливных сборок к более холодным. Впрочем, не ясно, охватит ли огонь весь бассейн или только его часть, но в любом случае результат окажется нежелательным.

В принципе, я согласен с вычислениями, которые приведены в статье и касаются возможных последствий такой аварии, за исключением того, что допущение о полном выбросе продуктов деления, содержащихся в отработанном топливе, в окружающую среду и предположение о том, что ветер будет дуть только в одну сторону (как допускается в статье) кажутся маловероятными. Хотя имеются четкие доказательства, что в такой ситуации часть топлива расплавится, мы не знаем, сколько именно. Поскольку мы не знаем этого, примем соответствующее допущение (с большим запасом прочности), что значительная часть содержащихся продуктов деления может быть выброшена в окружающую среду. Независимо от того, составит ли эта доля 20% или 100%, не изменится тот факт, что выброс окажется неприемлемым.

Будет также верным сказать, как указали авторы, что ситуация может оказаться еще хуже, если в бассейне останется некоторое количество воды, достаточное для того, чтобы покрыть днище стеллажа для хранения и сделать невозможной циркуляцию воздуха, но недостаточное для того, чтобы эффективно отводить тепло, которое генерируется в топливе всеми радиоактивными продуктами деления. Это обстоятельство также отмечалось в докладе

СНЛ¹.

Авторские оценки вероятностей происшествий также разумны, но в ограниченных рамках. Они верно отмечают, что вероятность аварии, приводящей к критической потере воды, очень мала (по подсчетам Комиссии по ядерному регулированию она ниже, чем 1:100 000 в год, в расчете на один бассейн). Вероятность такого же сценария, связанного с нападением террористов, неизвестна и поэтому авторы вводят диапазон значений. Авторы отмечают (и это достаточно разумно), что верхняя граница диапазона может оказаться значительно выше, чем значение для потери воды из-за аварии. Лично я считаю, что вероятность успешной атаки террористов очень мала и вскоре я представлю свои доводы. Тем не менее, авторы правы, когда отмечают, что возможность атаки террористов – это вопрос, требующий серьезного внимания.

Проблемы возникают, когда авторы утверждают, что эти цифры доказывают рентабельность предложенного ими решения. До того, как можно будет сделать суждение о рентабельности, следует принять во внимание ряд дополнительных соображений. Они охватывают все аспекты обсуждения: вычисление вероятностей происшествий, возникающие последствия, эффективность предлагаемого решения, вносимые этим решением конкурирующие виды риска и затраты на осуществление.

Давайте поговорим поначалу о вероятности нападения террористов. Предполагаемая ситуация заключается в том, что противник создает большую дыру в БОТ вблизи дна бассейна без разбрасывания топлива или без значительного повреждения структуры стеллажей. Такая ситуация очень маловероятна. При помощи взрывчатки или снарядов (включая умышленную аварию самолета) будет трудно добиться потери почти всей воды из бассейна без разрушения геометрии отработанного топлива. Значительный ущерб структуре стеллажей или разбрасывание топлива за пределы бассейна приведут к геометрии, которая лучше охлаждается потоками воздуха и менее восприимчива к распространению горения циркония, чем реальная геометрия хранилища.

Более того, противнику будет очень трудно добиться значительной потери воды путем осушения бассейна, если даже он каким-то образом получит прямой доступ к бассейну. Вентили и задвижки находятся достаточно высоко, чтобы не допускать опускания уровня воды до опасной отметки. Как впервые отмечалось в докладе СНЛ и как подтверждается в статье, примерно, 75 % размера топливных стержней не должно оставаться в воде, чтобы достигались условия перегрева.

Получение доступа к бассейну само по себе окажется очень трудной проблемой. Противнику придется разгадать путь, следуя которым он сможет избежать обнаружения оборудованием для мониторинга или локальными силами безопасности. Вероятность успеха в столь рискованной операции можно проанализировать при помощи существующих средств, но, судя по всему, этого не было сделано. Такие средства существуют в компании, где я сейчас работаю (ARES), и в лаборатории, где мне пришлось работать ранее (СНЛ). И в том, и в другом месте существуют методы для установления путей, по которым противник может добраться до цели, и для оценки вероятности его успеха, относящейся к каждому из путей.

Вывод в том, что требуется больше работы для объяснения того, как способ нападения противника изменит начальные условия анализа, и для расчета вероятности успеха противника.

А теперь обсудим последствия происшествия с потерей воды, которые в соответствии со статьей могут привести к потерям имущества «на сотни миллиардов долларов». Аккурат-

¹ Хотя приведенные в статье ссылки на доклад СНЛ в основном точны, первый абзац Введения в просмотренном мною варианте содержит два неверных определения. Прежде всего, оцененная в исследовании СНЛ авария заключалась во внезапной потере всей воды, а не во «внезапной потере водяного охлаждения». Потеря системы водяного охлаждения не вызывает последствия, которые цитируют авторы, так как вода остается в качестве значительного поглотителя тепла. Во-вторых, в докладе СНЛ не утверждалось, что сценарий с потерей воды приведет к «выбросу в воздух значительного количества продуктов деления». Хотя горение циркониевого сплава и плавление части топлива произойдут обязательно, в докладе СНЛ не было попыток ни количественной, ни качественной оценки продуктов деления, которые были бы выпущены в окружающую среду. Оба эти вопроса сейчас скорректированы в окончательном варианте статьи.

ный подсчет расходов и доходов требует наилучшей (а не наихудшей) оценки последствий. Обычно результат достигается путем установления распределения вероятностей, отражающего весь диапазон выброса радиоактивных веществ из БОТ и весь диапазон метеоусловий, которые могут повлиять на распространение этих веществ. Наиболее обычный результат такого анализа – это усредненное заключение, получаемое на основе случайной выборки из распределения вероятностей. Разумно ожидать, что среднее значение предполагаемых потерь имущества окажется значительно ниже, чем значение в наихудшем сценарии.

Перейдем теперь к вопросу оценок эффективности предложенных решений. Основное решение, приведенное в статье, заключается в том, чтобы удалить все топливо, возраст которого превышает пять лет, в контейнеры для сухого хранения, а также переделать все стеллажи в бассейнах для возможности размещения в них более свежего отработанного топлива в открытых решетках с увеличенными просветами между стержнями. Аргументы в пользу такого подхода выглядят привлекательными. Во-первых, гарантируется эффективность воздушного охлаждения, если даже вся вода вытечет из бассейна. Во-вторых, сокращаются запасы долгоживущих продуктов деления, остающихся в бассейне. Поэтому даже если бы все они были выброшены в окружающую среду, долгосрочные эффекты резко сократятся.

При этом не рассмотрены отдельные важные факторы. Прежде всего, как упоминалось выше, нападение противника с использованием взрывчатки, снарядов или авиакатастрофы (что достаточно серьезно, чтобы образовать большую дыру в БОТ) также приведет, по всей вероятности, к разбрасыванию топлива или, по крайней мере, к перестройке его геометрии. Поэтому конечная конфигурация не обязательно окажется более способной к охлаждению, чем БОТ с плотной упаковкой стержней, подвергшийся такому же воздействию. Только уменьшение запасов продуктов деления окажется характерным отличием, способным сократить потери, понесенные при происшествии.

Однако, результаты статьи, касающиеся радиоактивного загрязнения, имеют изъяны в силу того, что не рассмотрены короткоживущие изотопы. Наиболее заметны среди них иод-131 с периодом полураспада восемь дней и цезий-134 с периодом полураспада чуть более двух лет. Большая часть этих радионуклидов содержится в более свежем топливе, которое еще остается в БОТ. Хотя их вклад в долгосрочные потери собственности не так велик, как у цезия-137 с более высоким периодом полураспада, они более эффективно сказываются при ранних смертных случаях и при скрытых смертях от рака. Поэтому реальная оценка рентабельности предлагаемого решения должна содержать рассмотрение этих короткоживущих, но весьма неприятных радиоизотопов.

Затем возникает вопрос, насколько эффективными окажутся контейнеры для сухого хранения в течение длительного времени. В статье правильно допускается, что попадание самолета в группу контейнеров для сухого хранения может привести к выделению радионуклидов в окружающую среду. Допускается также, что при попадании самолета окажутся затронутыми всего несколько контейнеров из этой группы. С учетом надежной конструкции таких контейнеров эти замечания, возможно, верны. Но в статье не проводится обсуждение того, что многие материалы теряют свои свойства или становятся хрупкими после долгого облучения. Потеря качества или появление хрупкости могут вызвать утечку. Утечка из контейнеров в прошлом была проблемой у нескольких типов контейнеров для сухого хранения – это следовало бы признать в статье. При проведении анализа на рентабельность следует рассматривать риск, связанный с событиями, которые имеют высокую вероятность, но не очень серьезные последствия (например, утечка из контейнеров), наряду с риском от происшествий, имеющих малую вероятность, но значительные последствия.

Наконец, надо рассматривать конкурирующие опасности. Процесс удаления столь большого количества топлива из БОТ и его переноса в контейнеры для сухого хранения приносит с собой свой набор опасностей. При перевозке топлива, как вероятность аварии, так и уровень облучения в случае возможного нападения террористов выше, чем до перевозки или после нее. В статье предполагается, что перевозки займут более десяти лет. Кто-то должен просмотреть вопрос об уязвимости в течение этого периода.

Другую опасность можно сформулировать для предложенного авторами изменения конструкции, основанного на сделанных ранее в докладе СНЛ рекомендациях и сводящегося к установке аварийных разбрызгивателей воды. Авторы предлагают хранить самое горячее

топливо вдоль бортиков бассейна, где разбрызгивание окажется максимальным, даже если здание обрушится на крышу бассейна. Этот довод игнорирует тот факт, что удаление тепла при воздушном охлаждении наиболее эффективно, когда самое горячее топливо хранится в центре бассейна, а самое холодное – вдоль бортиков. Такое размещение способствует естественным конвективным потокам воздуха, а предложенное в статье препятствует им.

Что касается вопроса о затратах на осуществление, то я сейчас не готов заниматься им. Но замечу, что особо надо рассмотреть вопрос, можно ли осуществить сухое хранение столь большого количества топлива на всех реакторных площадках с учетом доступной площади и требований к безопасности.

Последнее, но кардинальное замечание состоит в том, что при оценке затрат и выгод надо рассматривать все правдоподобные альтернативные варианты уменьшения риска. Конечно, один подобный вариант связан с ускорением перемещения отработанного топлива из БОТ непосредственно в постоянное подземное хранилище. В статье утверждается, что этот процесс может занять десятилетия с учетом противоречивого статуса проекта Юкка Маунтин и текущих бюджетных ограничений. Но если на карту поставлен вопрос национальной безопасности, правительственные проекты могут быть ускорены. Хорошим примером служит проект Манхэттен. Может оказаться, что при учете всех видов риска и всех затрат непосредственное перемещение в подземное хранилище окажется более рентабельным, чем временное перемещение в контейнеры для хранения на реакторных площадках и переделка стеллажей в БОТ.

Если подвести итоги, авторы достойны похвалы за отождествление проблемы, которой надо заниматься, и за установление границ этой проблемы. Но они не сумели продемонстрировать, что предложенное ими решение рентабельно или оптимально.