

## ОТВЕТ АВТОРОВ

A. Кумар и М.В. Рамана

Мы приветствует отклик Балдева Раджа на нашу статью<sup>1</sup>. Однако, он не отвечает удовлетворительным образом на затронутые в ней вопросы.

Во-первых, он не объясняет, почему 100 МДж было выбрано в качестве верхнего предела механической энергии, которая может быть высвобождена при аварии с разрушением активной зоны (АРАЗ). Радж заявляет, что исследования безопасности показали, что выделение механической энергии при прекращении потока охладителя вместе с отказом систем безопасности будет меньше 1 МДж. Это противоречит опубликованным исследованиям Департамента по атомной энергии (ДАЭ) по прототипу реактора-размножителя на быстрых нейтронах (ПРРБН)<sup>2</sup>, цитированным в нашей статье, которые показывают, что возможно выделение энергии порядка 1000 МДж. Ключевым предположением в этом расчете является скорость «введения» реактивности (которая зависит от того, какая доля активной зоны коллапсирует, в какой конфигурации, и как быстро); предел в 100 МДж основан на предположении, что в аварии участвует только часть активной зоны. Как мы показываем в нашей статье, анализ ДАЭ, в котором рассчитывается влияние иницирующих событий на размеры расплавления активной зоны, ограничен упущениями (игнорирование режимов разрушения оболочки и влияния выгорания на быструю обратную связь по реактивности, а также на теплофизические свойства топлива), и поэтому является необоснованно оптимистичным.

В отношении малого отношения выделения механической энергии в АРАЗ к тепловой мощности, оцененного для прототипа реактора-размножителя на быстрых нейтронах (ПРРБН) по сравнению с предыдущими реакторами на быстрых нейтронах Радж указал на другие недавние проекты с еще меньшими величинами. Проблема состоит в том, что реакторы, которые он предлагает как противоположные примеры, до сих пор еще не получили разрешения на строительство от соответствующих регуляторов безопасности в этих странах, а не только не были построены, мы не видим причин, по которым, например, французские регуляторы будут удовлетворены проектом реактора, который предлагает меньшую прочность защитного здания, чем у реактора «Суперфеникс», после серии аварий, которые на нем произошли. Единственным строящимся реактором в перечне, предлагаемом Раджем, является российский реактор БН-800. Однако, этот реактор был спроектирован с намного меньшим или отрицательным коэффициентом реактивности из-за пустот в натрии, и поэтому он не является наиболее соответствующей отправной точкой для сравнения с ПРРБН, у которого этот коэффициент имеет большое положительное значение<sup>3</sup>. Проект защитного здания БН-800 следует также рассматривать на фоне требований к безопасности в российской программе реакторов-размножителей. На самом большом построенном до сих пор реакторе БН-600 между 1980 и 1997 г.г. произошло 27 утечек натрия, 14 из которых привели к возгоранию натрия<sup>4</sup>. Представляется, что в большинстве случаев, если не во всех, реактор даже не выключался, а продолжал работать, когда разгорались пожары, что указывает на недостаточный приоритет, уделяемый безопасности.

Наконец, самый большой вопрос связан с тем, будет ли это отношение уменьшаться ниже того, которое было у предыдущего набора реакторов, построенных или сконструированных в 1970-80 г.г., учитывая то, что в исследованиях их аварий уже учитывалось влияние быстрой доплеровской обратной связи.

Радж подробно останавливается на различных аргументах в поддержку того, что вероятность возникновения такой аварии очень мала. Однако, существует много литературы, которая заставляет предположить, что трудно, если не невозможно, заранее предусмотреть все режимы аварии, потому что компоненты и системы реактора взаимодействуют непредсказуемыми способами («теория нормальных аварий»)<sup>5</sup>. Поэтому, несмотря на наилучшие

намерения проектантов и инженеров ДАЭ, все еще остается остаточная вероятность АРАЗ, и очень важно, чтобы мы понимали ее возможные масштабы в отношении того, что может выдержать защитная конструкция.

Второй аргумент Раджа заключается в том, что обратные связи из-за доплеровского смещения быстрых нейтронов и аксиального расширения топлива, обе из которых являются отрицательными, начнут действовать намного раньше начала кипения натрия и предотвратят появление положительного эффекта от пустот в натрии. Эксперименты на Юго-Западном экспериментальном реакторе на быстрых нейтронах с оксидным топливом (SEFOR), которые он цитирует, включали такую ситуацию, в которой увеличение индуцированной мощности компенсировалось влиянием отрицательной обратной связи, возникающим внутри топливных стержней<sup>6</sup>. Однако, ситуация отличалась от аварии с потерей теплоносителя, такой, которая происходит при выключении насосов теплоносителя; здесь нагревается теплоноситель и кипение может произойти до того, как температура топливных стержней возрастет достаточно для того, чтобы индуцировать отрицательное влияние на реактивность в активной зоне. Собственная статья ДАЭ по авариям с потерей потока на ПРРБН признает, что кипение охладителя произойдет даже тогда, когда система выключения будет действовать по сценарию, в котором время уменьшения потока вдвое равно 100 секундам, что намного больше, чем в проекте ПРРБН<sup>7</sup>. В нашей статье (Приложение 3) мы обсуждаем свидетельства в пользу того, что собственный анализ ДАЭ основан на заявлениях, что при такой аварии реактор может быть безопасно выключен. Более того, отказ системы отключения может только увеличить вероятность и масштабы образования пустот в теплоносителе и получающееся увеличение влияния положительной обратной связи, и представляется, что такая ситуация не была проанализирована ДАЭ. Кроме того, быстрая действующая обратная связь из-за расширения топлива, которую упомянул Радж, может становиться менее эффективной по мере прогрессирующего облучения топливных стержней в активной зоне, и на нее нельзя рассчитывать как на данную. Мы обсуждали это в нашей статье (Приложение 2).

Теперь мы перейдем к вопросу защитной конструкции. Мы соглашаемся с тем, что ДАЭ знает, как построить более прочные защитные конструкции, и его проекты реакторов с тяжелой водой под давлением служат этому подтверждением. Наше опасение состоит в том, что при выделении механической энергии более 100 МДж выброс натрия в защищенное пространство будет соответственно большим. На основании нашей оценки того, что АРАЗ может выделить несколько сотен МДж механической энергии, мы экстраполируем, что по крайней мере вдвое больше расчетного давления в защитной конструкции может быть получено от сгорания натрия<sup>8</sup>. Это основано на предположении, что резервуар под давлением останется целым, и его верхняя крышка останется на месте, как это полагал ДАЭ в своих исследованиях безопасности защитной конструкции. Если каждое из этих предположений будет неверным, давление в защитной конструкции может быть намного большим. Поэтому мы не будем обращаться к другим проектным соображениям для поддержки гораздо более прочной защитной конструкции для ПРРБН.

Наконец, институциональное опасение, которое требует разъяснения в соответствии со ссылкой Раджа на то, что проект ПРРБН был утвержден комиссией по безопасности. Организацией, ответственной за регулирование ядерной безопасности в Индии, является Регулятивный совет по атомной энергии (РСАЭ). Совет РСАЭ докладывает комиссии по атомной энергии (КАЭ), председателем которой является руководитель Департамента по атомной энергии (ДАЭ). Председатель корпорации атомной энергетики (КАЭн) также является членом КАЭ. Таким образом, и ДАЭ, и КАЭн обладают административными

полномочиями над РСАЭ. Регулятивный надзор еще более ослабляется недостатком технического персонала и испытательных установок в РСАЭ. Как отмечал бывший председатель РСАЭ,

«95 процентов членов оценивающих комитетов РСАЭ являются ученые и инженеры, получающие зарплату в ДАЭ. Эта зависимость целенаправленно используется руководством ДАЭ для влияния, прямого, или косвенного, на оценки и решения РСАЭ. Это влияние проявляется в снижении РСАЭ серьезности опасений по безопасности, согласии на откладывание серьезных ремонтов для соответствия с планами-графиками ДАЭ, и разрешении продолжения эксплуатации установок, когда общественные соображения по безопасности требуют их немедленного выключения и ремонта».

Действующим секретарем РСАЭ является Ом Пал Сингх, который проводил некоторые из анализов ПРРБН, которые мы критиковали. При таких обстоятельствах рассмотрение вряд ли будет строгим.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Japan Atomic Energy Commission (JAEC), "Long Term Plan for Research, Development and Utilization of Nuclear Energy," 1956, на японском языке.
2. В "замкнутом" топливном цикле материалы - участники цепной реакции, например, плутоний, выделяются из отработанного топлива и перерабатываются для повторного использования.
3. JAEC, "Long Term Plan for Research, Development and Utilization of Nuclear Energy," 1967, на японском языке.
4. JAEC, "Framework for Nuclear Energy Policy." October 11, 2006.
5. Report by the JAEC Roundtable Committee on Fast Breeder Reactor, "Basic Policy towards Development of FBR," December 1, 1997.
6. JAEC, "Long Term Plan for Research, Development, and Utilization of Nuclear Energy," 2000.
7. JAEC, "Framework for Nuclear Energy Policy", October 11, 2006. [http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/taikou/kettel/eng\\_ver.pdf](http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/taikou/kettel/eng_ver.pdf)
8. Ministry of Economy, Trade and Industry, Advisory Committee on Energy, Committee on Electricity Industry, Sub-committee on Nuclear Energy Policy, "Nuclear Power Nation Plan," August 2006. <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g60823a01j.pdf> (на японском языке).
9. "Влажная" переработка относится к вариантам процесса PUREX с азотной кислотой, первоначально разработанного в США, чтобы вернуть плутоний для своего ядерного оружия. Пиропроект – это пример "сухого", то есть, безводного процесса, где отработанное топливо растворяется в расплавленной соли, оксиды тяжелого металла восстанавливаются до металла при реагировании с литием, а затем выпавшие в осадок тяжелые металлы очищаются электролизом, и далее трансураны отделяются от урана.
10. Это отражает опыт Монжу. Стоимость постройки Монжу выросла от начальных 400 миллиардов иен до 590 миллиардов иен. Доля коммунальных служб, сначала была установлена на уровне 15 % от полной цены (примерно 60 миллиардов иен). В конце концов, службы согласились заплатить 100 миллиардов иен, что эквивалентно стоимости постройки легководного реактора (в расчете на кВт). Смотрите Eugene Skolnikoff et al., "International Responses to Japan's Plutonium Programs," MIT Working Paper, 1995, p.4.
11. Эта программа проводилась с 1997 года до 2006 года, изучая разные типы быстрых реакторов и технологический топливного цикла, чтобы отобрать технологии быстрых реакторов, жизнеспособные с коммерческой точки зрения. <http://www.jaea.go.jp/04/fbr/top.html>.