

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЯЭУ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

И.С. Слесарев, Е.О. Адамов, В.Н. Леонов, В.И. Рачков, А.И. Орлов

АО «Прорыв»

107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8



Устранение значимых рисков ядерного энергопроизводства является на современном этапе необходимостью и целеполаганием, определяющими его развитие в ближайшем будущем.

Особое место занимает проблема максимальной достоверности и убедительной доказательности устойчивости ядерной энергетики к тяжелым авариям. Отсутствие четкой логики, прозрачности и гарантий в достоверности анонсируемой безопасности существенно мешает ее развитию, заставляет усложнять и излишне переусложнять дорогостоящие технические решения, тем препятствуя повышению конкурентоспособности ядерной энергетики.

Изначально предложенная концепция Естественной Безопасности ставила задачу решения отмеченных выше проблем, но до сих пор ее конкретное наполнение не было представлено в строгой форме, что позволяет многим конкурентам использовать ее терминологию для продвижения проектов, не имеющих прямого отношения к «духу и букве» Естественной Безопасности.

Представленная работа призвана заполнить такой пробел. Обсуждаются также условия генерации и развития новых средств самозащиты ядерных реакторов нового поколения, а также феноменологические и технические основы для их реализации на основе формализма детерминистского типа.

Ключевые слова: ядерная энергетика, тяжелые аварии, безопасность, конкурентоспособность, самозащита, быстрые реакторы.

ВВЕДЕНИЕ

Радикальное снижение рисков тяжелых аварий является непреложной компонентой концепции Естественной Безопасности (ЕсБ) [1], которая может и должна обеспечиваться за счет использования уже имеющихся и дополнительных целенаправленно подобранных феноменологических (смысловых) качеств (свойств) ядерного производства энергии. Такое обеспечение подразумевает выбор подходящих типов ядерных реакторов и топливного цикла, детальной разработки теоретических и практических основ усиления их самозащищенности, целенаправленного поиска и верификации полученных качеств, призванных радикально усилить устойчивость против тяжелых аварий.

При развитии концепции ЕсБ и ее обновлении приняты во внимание следующие принципиальные соображения, учитывающие накопленный опыт развития

© ***И.С. Слесарев, Е.О. Адамов, В.Н. Леонов, В.И. Рачков, А.И. Орлов, 2021***

науки и техники.

- Ядерная технология обладает высоким потенциалом, наукоемка, но и потенциально настолько опасна (особенно угрозой быстрых катастрофических разрушительных событий), что требует максимальной достоверности и убедительной доказательности ее безопасности, а значит, и поддержки сильной науки.

- Естественные и технические науки с их предметной областью инструментально измеримых явлений сильны адекватным пониманием природы именно там, где доля обоснованного детерминизма максимальна.

- Доминирование вероятностных сценариев тяжелых аварий внутреннего происхождения (по крайней мере, в общественных обсуждениях) является пока вынужденным в ЯЭ, но по сути неприемлемо из-за возникающих значительных неопределенностей в оценке последствий тяжелых аварий и их ущербов.

- Максимальное развитие самозащитности и акцента на детерминированную устойчивость основных защитных барьеров против аварийных исходных событий может стать опорой [1, 11, 12] в повышении доверия к уровню безопасности.

О РАЗВИТИИ КОНЦЕПЦИИ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Согласно международной рубрикации ИНЕС-МАГАТЭ, под тяжелыми авариями подразумеваются неприемлемые происшествия на АЭС, приводящие к разрушениям реактора с глобальным (значительным) социально-экономическим ущербом и необходимости мероприятий по защите персонала (эвакуации населения). Поставарийный ущерб от таких аварий как следствие использования принципа защиты ядерной энергетической установки «в глубину» определяется мерой разрушения защитных барьеров и оценивается шкалой ИНЕС в диапазоне от седьмого (типа Чернобыльской и Фукусимской аварий) до пятого (типа Три-Майл-Айленд) уровня.

Как правило, ядерно-энергетическая установка неизбежно содержит множество активных и пассивных компонентов различной надежности, причем активные компоненты признаются научно-техническим сообществом заведомо менее надежными [6]. Количественно выразить с приемлемой достоверностью надежность всей совокупности активных компонентов, как и роли человеческого фактора, не только сложно, но и практически невозможно. Именно это и вызывает основную неуверенность в результате анализа безопасности на фоне потенциально возможных громадных аварийных ущербов. Логическим выходом из такой ситуации (с учетом невозможности обойтись без активных компонентов, участия человека в управлении ядерной энергетической установкой и его намеренных или случайных ошибок) является априорное допущение максимально неблагоприятных отказов наименее надежных и зачастую провокативных активных компонентов и действий человека с обязательной компенсацией возможности таких отказов наделением реактора и в достаточной степени более надежными свойствами (качествами) природной самозащиты.

Выйти из концептуального тупика, как отмечалось, можно лишь радикальной сменой логики повышения устойчивости к тяжелым авариям. Развиваемая логика Естественной Безопасности [1] заключается в следующем.

Вместо «эволюционных» попыток повысить доверительную надежность активных компонентов ЯЭУ и предсказуемость человеческого фактора все сомнительные по надежности компоненты (внутренние устройства ЯЭУ) целесообразно признать априорно ненадежными (провокативными), и тогда пассивным средствам (устройствам) защиты высшей категории (надежность которых исключительно высока [6] и доступна априорной проверке в ходе формирова-

ния их паспортных характеристик) суждено служить ответственными средствами в достижении устойчивости против тяжелых аварий.

Однако, как правило, использование только пассивных средств оказывается недостаточным, и тогда становится востребованной разработка новых безотказных средств (средств) самозащитенности.

Такая стратегия обеспечивает «технически обоснованный детерминизм» устойчивости ядерной энергетической установки против тяжелых аварий.

Развитие Естественной Безопасности для ЯЭУ пятого поколения подразумевает подход в следующем направлении.

Доминантой концепции Естественной Безопасности должно стать дальнейшее усиление средств самозащитенности до такой высокой степени, чтобы обеспечить устойчивость ЯЭУ против тяжелых аварий даже при постулированных отказах активных компонентов.

О ДОСТОВЕРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРОТИВ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ

Как отмечалось, в отличие от ядерных энергетических установок предыдущих поколений тренд на радикальный рост «естественного иммунитета» должен обеспечить достижение достоверной устойчивости против тяжелых аварий. Тогда дорогостоящую финансовую страховку от тяжелых аварий можно будет считать ненужным рудиментом.

Принцип защиты в глубину и способ ранжирования ЯЭУ в рамках ЕсБ

Композиционное построение всей системы устойчивости к тяжелым авариям в нынешней ядерной энергетике (согласно МАГАТЭ) основано на строгом соблюдении принципа глубокого эшелонирования («защиты в глубину») и формально представляется системой последовательно «вложенных» компонентов (устройств, элементов), окруженных защитными барьерами пассивного типа: топливной матрицы, оболочек твэлов, контуров охлаждения, корпуса реактора, страховочного корпуса и т.п. в зависимости от конструкции ЯЭУ, а также комплексом необходимых мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций.

В целом этот важный принцип построения противоаварийной защиты ядерной энергетике остается в силе и для концепции ЕсБ, однако акцент переносится на детерминированное сохранение защитных барьеров в ходе аварии даже без учета возможной помощи со стороны активных средств защиты, поскольку надежность функционирования всех активных средств подвергается наибольшему сомнению.

В рамках концепции ЕсБ предоставляется возможность аттестации безопасности по рангам, определяемым по «индивидуальной» устойчивости детерминистского типа каждого из защитных барьеров. При этом предлагается установить «базовый» ранг, соответствующий сохранению противоаварийной устойчивости хотя бы одного из защитных барьеров, и «высший (нулевой)» ранг, отвечающий сохранению всех основных барьеров защиты. Остальные цифровые ранги могут быть присвоены в зависимости от номера старшего из сохраняющихся после аварии барьеров защиты.

Структура достоверности противоаварийной устойчивости

Представленные выше новые подходы в рамках концепции ЕсБ выглядят универсальными, но реалистичны они далеко не для всех типов ядерных энергетических установок.

Прежде всего ее реализация требует изначальной минимизации базовых потен-

циальных угроз, таких, например, как опасность накопленной неядерной энергии – повышенного давления сред, близости рабочих режимов к разрушительным возможностям экзотермических химических реакций, к закипанию теплоносителя, а также непереносимого подбора, по крайней мере, всех пассивных компонентов ЯЭУ (включая основные барьеры защиты), отвечающих детерминистским паспортным характеристикам, которые позволяют обеспечить максимальную устойчивость [1, 8, 9].

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ТРАДИЦИОННОЙ И ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ. ПРИМЕРЫ ИННОВАЦИОННЫХ СРЕДСТВ

При определении ниши естественной безопасности в море различных подходов к ее обеспечению важным является обозначить качественные признаки отличий ЕсБ от сложившегося представления о способах обеспечения устойчивости реактора против тяжелых аварий [13]. Эти отличия складываются из представлений о прозрачности доказательства феноменологических причин для наиболее опасных сценариев, а также о способах достижения такого качества.

О выборе граничного критерия Естественной Безопасности

Представленные выше аргументы формируют отдельную нишу для разработки ЯЭУ с инновационным подходом к безопасности. Для этого необходима реализация трех действий.

- *Определение «цифровой границы», разделяющей традиционный и инновационный подходы к обеспечению устойчивости против тяжелых аварий.*

С учетом многообразия возможных аварийных ситуаций выбор границы должен отражать принципиальную способность к устранению, в первую очередь, наиболее опасной по ущербам тяжелой аварии, отстраняясь от частных инженерно-конструкторских решений и их деталей – лишь по феноменологическим концептуальным свойствам ядерной энергетической установки. Таковой является самая тяжелая «реактивная» авария седьмой категории по шкале ИНЕС. Условие «феноменологического» исключения самых опасных разгонов мощности реактора на мгновенных нейтронах является важным не только для оценки потенциального ущерба, но и для адекватного психологического восприятия принципиальной возможности устранения глобальной опасности ядерного энергопроизводства.

- *Аттестация побарьерной поставарийной устойчивости, заключающаяся в детерминированном определении реализуемого ранга ЕсБ с учетом принципов предельного консерватизма.*

- *Обеспечение убедительной простоты доказательства устойчивости против тяжелых аварий.*

Пример нового способа усиления самозащищенности.

О природе цифрового граничного критерия

Условие феноменологически достоверного отсутствия разгонов мощности на мгновенных нейтронах, позволяющее устранить разрушающий тепловой удар по конструкции и первым защитным барьерам ядерной энергетической установки, можно получить из приближенного уравнения кинетики реактора [14] (с известной долей запаздывающих нейтронов, появляющихся из осколков деления) для интегральной по пространству и энергии плотности нейтронного потока $n(t)$.

С учетом перспективы использования предложенных недавно инновационных средств повышения самозащищенности инновационных быстрых реакторов в этом

условии предусмотрена возможность реализации оригинальных способов замедления кинетики [2 – 5] (например, пространственной диффузии значительной доли нейтронов, утекающих из активной зоны, «загулявших» в отражателях и освобожденных от необходимости участвовать в избыточном топливном бридинге [1]).

В обобщенном случае подходящее приближенное уравнение точечной кинетики реактора с отражателем и шестью группами запаздывающих нейтронов имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{\rho - (\beta + \beta^*)}{l} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + \frac{\beta^*}{l} n(t - l), \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{l} n(t) - \lambda_i C_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где l – среднее время жизни всех нейтронов в изначально критическом реакторе (до аварийного ввода реактивности ρ).

В системе (1) концентрация эмиттеров запаздывающих нейтронов из продуктов деления, скорость их распада и среднее время жизни «загулявших» нейтронов в активной зоне обозначены как λ , l^* , а введенная в критический реактор β^* – доля нейтронов, появляющихся с задержкой в результате «возвратной» диффузии в активную зону этих «загулявших» нейтронов отражателя соответственно. Возможность подобного уникального замедления кинетики в быстрых реакторах учтена в системе (1) вводом добавочных членов, обозначенных нижним правым индексом (*).

Если размежевать «факторы опасности» и «факторы сдерживания скорости аварийного разгона мощности реактора», то из уравнений кинетики (1) и обратных часов с учетом быстрых обратных связей, запасов на обеспечение работоспособности реактора и технологических (расчетных) погрешностей ограничение на допустимый полный запас реактивности ρ_{\max} получим в виде следующего приближенного выражения:

$$\rho_{\max} < \beta^* + \beta - \frac{l_p}{l^*}, \quad (2)$$

которое и определяет цифровую феноменологическую границу принципиально различающихся классов безопасности в отношении реактивных аварий.

Пути к естественной безопасности с оцифрованным рангом

Обозначенный выше формальный переход в область ЕсБ через цифровую границу в соответствии с соотношением (2) обязателен для обеспечения основных требований и получения привлекательных качеств ЕсБ, но сам по себе еще не гарантирует целеполагающее сохранение барьеров защиты, а лишь представляет необходимое условие достоверного обоснования такой гарантии.

Движение от этой границы в сторону повышения противоаварийной устойчивости обеспечивается и ростом β^* (утечки нейтронов из активной зоны в отражатель, которая определяется качеством нейтроники топлива), и ростом l^* (т.е. уровнем замедления кинетики).

Очевидно, что недостаточное снижение скорости изменения мощности от «разгонной на мгновенных нейтронах», как и отсутствие своевременного пассивного противоаварийного ввода компенсирующей реактивности, также могут привести к тяжелой аварии.

Следует иметь в виду, что поведение только аварийной интегральной мощности не всегда определяет устойчивость защитных барьеров – здесь детерминистскими ориентирами являются максимальный темп роста температур компонентов реактора, превышение предельно допустимых «паспортных» температур барьеров защиты

и теплогидравлики, прочностных характеристик конструкций. Следовательно, возможность достоверного обоснования устойчивости к тяжелым авариям предстоит еще доказать.

ДОВЕРИТЕЛЬНОСТЬ. ПРИНЦИПЫ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ АТТЕСТАЦИИ АВАРИЙНЫХ СОБЫТИЙ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Принцип ДА-1 для свойств самозащищенности ядерной энергетической установки, сдерживающих аварию

Свойства самозащищенности признаются *доверительно надежными* в рамках установленных инженерно-физических условий (в том числе аварийных) их проявления как законов природы.

Принцип ДА-2 для свойств пассивных элементов (устройств, систем), сдерживающих аварию

Пассивные элементы высших категорий надежности, признаются *приемлемо надежными*.

Опора на паспортные характеристики компонентов ядерной энергетической установки является важным эквивалентом практического использования знаний науки и накопленного технического опыта (с надежностью, близкой к законам Природы).

Принцип ДА-3 для инициаторов аварий изначального уровня

Работоспособность активных элементов (устройств, систем) ядерной энергетической установки и пассивных элементов (устройств, систем) низших категорий надежности консервативно признается *минимально доверительной*.

В пределе все активные средства постулируются в аварийных сценариях способными на отказ, а их техническая провокативная «инициативность» полагается максимально быстрой.

Вслед за изначальными аварийными событиями (когда все основные барьеры защиты еще кардинально не повреждены) потенциально могут последовать «сопутствующий» каскад разрушений многих защитных барьеров, что сильно усложняет анализ, поскольку ведет к значительному расширению списка инициаторов.

Для оценки таких инициаторов, свойств и устройств предусмотрен следующий принцип ДА-4.

Принцип ДА-4 для «сопутствующих» инициаторов аварий, свойств и устройств

События с появлением последующих уровней провокаторов-инициаторов, являющиеся следствием разрушения барьеров защиты и (или) приводящие к изменению агрегатных состояний компонентов ЯЭУ, влияющих на ее реактивность и теплогидравлику (после подтверждения таковых моделированием исходных аварийных событий и динамикой аварийных процессов), признаются *недостаточно прогнозируемыми* и с учетом необходимого консерватизма постулируются по наиболее опасным сценариям.

Принципами детерминированной аттестации ПДА-1 – ПДА-4 задается спектр наиболее опасных иницирующих сценариев и одновременно обеспечивается консервативная научно-техническая прозрачность доказательства устойчивости к тяжелым авариям, тем самым обходя трудоемкую и непрозрачную проблему верификации вероятностных оценок одновременно для всей детальной структуры «дерева отказов».

При таком жестком введении принципов аттестации ЕсБ достоверно доказать

устойчивость к тяжелым авариям удается, как подчеркивалось, далеко не для всех реакторов и под силу только инновационным реакторам с объективно высоким изначальным запасом самозащищенности [11].

ПРОЗРАЧНОСТЬ УСТОЙЧИВОСТИ К ТЯЖЕЛЫМ АВАРИЯМ: ОТ ТРАДИЦИОННОГО ДЕРЕВА ОТКАЗОВ (FAULT TREE ANALYSIS) К ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИМ ИНТЕГРАЛЬНЫМ ИСХОДНЫМ СОБЫТИЯМ

Перенос приоритета на усиление природного иммунитета позволит осуществить следующую стратегию прозрачности доказательства противоаварийной устойчивости, доступную для «аттестованных» ядерно-энергетических установок с ЕсБ:

- постулировать отказы активных компонентов (средств) функционирования ядерной энергетической установки и ее защиты (или групп схожих средств) по наиболее опасным сценариям;
- укрупнить отказы активных независимых устройств до уровня консервативно-феномено-логических [7] (например, вместо отказов активных компонентов (частей) циркуляционного насоса постулировать отказ работоспособности всего насоса по наихудшему сценарию, скажем, в форме его максимально быстрого отказа);
- включать в анализ противоаварийной устойчивости реальные одновременные отказы независимых устройств, содержащих активные «провокативные» компоненты (например, отказы всех насосов по общей причине);
- повысить внимание на обеспечение и верификацию пассивных защитных систем и барьеров под воздействием феноменологических исходных событий нулевого уровня, вызванных прямыми отказами активных устройств в корпусе реактора и воздействием человеческого фактора.

Итак, при выявлении возможных сценариев тяжелых аварий приоритет отдается максимальному укрупнению «дерева» исходных предаварийных событий (отказов) и формированию перечня так называемых «феноменологических интегральных исходных событий» (ФИИС), ответственных за физическую сущность аварийных процессов [1, 7].

В качестве рекомендованного для обеспечения максимального упрощения и, следовательно, повышения консерватизма в обеспечении прозрачности доказательства безопасности подходит приведенный ниже перечень ожидаемых и не защищенных активными средствами переходных предаварийных событий – ATWS [7] нулевого уровня, адаптированный к нынешнему пониманию проблем безопасности для инновационных быстрых реакторов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЛОГИКА И КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В рамках такой системы построения математически строгих доказательств критериальными (необходимыми и достаточными) требованиями [10] достижения в ядерной энергетической установке аттестованной Естественной Безопасности ранга Z должны являться

- в качестве необходимого условия – выполнение цифрового критерия (2) по феноменологической невозможности разгонов мощности реактора на мгновенных нейтронах – самых быстрых и разрушительных аварийных событий – за счет, например, генерации «загулявших» нейтронов со средним временем жизни, заметно превышающим среднее время мгновенных нейтронов;
- в качестве достаточного условия – сохранение работоспособности барьера Z

защиты ядерной энергетической установки в соответствии с изложенными принципами детерминированной аттестации при любых технически возможных феноменологических интегральных исходных аварийных событиях (ФИИС).

В пределах обозначенного математического формализма построение достоверного, доверительного и прозрачного доказательства устойчивости к тяжелым авариям для некой композиции ядерно-энергетической установки, претендующей на противоаварийную устойчивость класса «аттестованной Естественной Безопасности», сводится к

- целенаправленному усилению природного «иммунитета» к тяжелым авариям;
- соблюдению принципов детерминированной аттестации (ПДА);
- верификации соблюдения доверительных «паспортных» пределов устойчивости для барьеров защиты при всех ФИИС.

Реакторная установка, построенная и верифицированная по предложенному алгоритму, может быть признана естественно и технически устойчивой к тяжелым авариям внутреннего происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная стратегия достижения в ядерно-энергетической установке ЕсБ против тяжелых аварий построена на усилении противоаварийного природного иммунитета до такой высокой степени, которая позволяет нивелировать «аварийную провокативность» активных компонент реактора, человеческого фактора и доказать противоаварийную устойчивость даже без помощи активных средств аварийной защиты.

Она переворачивает «пирамиду» традиционной структуры безопасности ЯЭУ – вместо заведомо неподъемного доказательства приемлемой надежности активных средств защиты на основе ВАБ признание возможности полных отказов всех активных компонент реактора, не приводящих к тяжелым авариям.

В случае реализации ЕсБ ожидаемые преимущества (в сравнении с ядерными энергетическими установками предшествующих поколений) в безопасности ядерной энергетики ближней перспективы важны и многочисленны. К таким преимуществам относятся

- феноменологическая невозможность разгонов мощности на мгновенных нейтронах (седьмой по шкале ИНЕС и самой опасной среди категорий тяжелых аварий), устраняющая разрушающий аварийный тепловой удар по структуре реактора;
- отсутствие сомнений в приемлемости достигаемой противоаварийной устойчивости;
- снятие проблем управления тяжелыми авариями и необходимости аварийных мер по эвакуации населения.

Более того, исходно выбираемый высокий потенциал безопасности реактора и меры его целенаправленного усиления позволяют приобрести такие инновационные качества безопасности ядерного производства энергии, как

- достоверность (обеспеченную законами Природы – ядерной физики, теплофизики и гидравлики – и признанной математической логикой);
- доверительность (посредством предложенных принципов детерминированной аттестации по Лапласу: «все что важное, но сомнительное по надежности – случается, все что важное и надежное – работает максимально долго»);
- прозрачность (с опорой на расчетный аппарат феноменологической динамики для доказательности востребованной устойчивости ядерной энергетической установки против тяжелых аварий внутреннего происхождения: «исходные аварийные

события интегрируются по максимально опасным сценариям»).

Литература

1. *Адамов Е.О., Лопаткин А.В., Орлов В.В., Рачков В.И., Слесарев И.С., Хомяков Ю.С.* Ядерная энергетика с естественной безопасностью: смена устаревшей парадигмы, критерии. // Известия РАН. Энергетика. – 2016. – № 1. – С. 92-105.
2. *Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Апсэ В.А.* Улучшение ядерной безопасности быстрых реакторов за счет замедления цепной реакции деления. // Intern. Journal of Nuclear Energy. – 2014. – Article ID 373726. – P. 19.
3. *Slesarev I.S.* Innovative Intrinsically Secure Fast Reactors with Dense Cores. // Annals of Nuclear Energy. – 2007. – Vol. 34. – Iss. 11. – PP. 883-895.
4. *Шмелев А.Н., Куликов Г.Г.* О факторах и их сочетании, влияющих на внутренне присущую безопасность ядерного реактора на быстрых нейтронах. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2015. – Т. 6. – № 9-10. – С. 442-450.
5. *Slessarev I.* Paradigm Shift: Vital Risk Free Nuclear Power. // J. Nucl. Energ. Sci. Power Generat. Technol. – 2013. – Vol. S1. DOI: <https://doi.org/10.4172/2325-9809.S1-008>.
6. Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants. IAEA-TECDOC-626. – Vienna: IAEA, 1999.
7. *Spiewak I., Weinberg A.M.* Inherently Safe Reactors. // Ann. Rev. Energy. – 1985. – No. 10. – PP. 431-462.
8. *Wade D.* LMR Core Design for Inherent Safety. NEACRP Meeting Proceeding. Paris, Sept. 1986.
9. *Wigeland R., Cahalan J.* Mitigation of Severe Accident Consequences Using Inherent Safety Principles. // Proc. of the Int. Conf. IAEA on Fast Nuclear Reactors. Kyoto, Dec. 07-11, 2009. – INL/CON-09-15898 Preprint.
10. *Nelson E.* Quantum Fluctuations. – Princeton: Princeton University Press, 1985. – 160 p., ISBN 9780691083797.
11. *Гольдберг А.С.* Энергетический словарь. – М.: РУССО, 2006. – 587 с.; ISBN 5-88721-302-7.
12. *Шенфилд Дж.* Математическая логика. – М.: Наука, 1975. – 527 с.
13. *Гордон Б.Г.* Безопасность ядерных объектов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 383 с.
14. *Букринский А.М.* Управление запроектными авариями в действующих нормативных документах России. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2010. – Т. 21. – № 1. – С. 16-25.

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.

Авторы

Слесарев Игорь Сергеевич, главный научный сотрудник

E-mail: sis@proryv2020.ru

Адамов Евгений Олегович, научный руководитель проектного направления «Прорыв»

E-mail: slp@proryv2020.ru

Леонов Виктор Николаевич, начальник отдела главного конструктора

E-mail: lvn@proryv2020.ru

Рачков Валерий Иванович, научный руководитель НИОКР

E-mail: rvi@proryv2020.ru

Орлов Александр Игоревич, советник научного руководителя НИОКР

E-mail: oai@proryv2020.ru

UDC 621.039

THE CONCEPT OF INHERENT SAFETY OF GENERATION V NUCLEAR POWER PLANTS

Slesarev I.S., Adamov E.O., Leonov V.N., Rachkov V.I., Orlov A.I.

JSC Proryv

2/8 Malaya Krasnoselskaya Str, 107140 Moscow, Russia

ABSTRACT

Elimination of significant risks in nuclear power production is at the present stage a necessity and goal-setting that determine its development in the near future.

Of particular importance is the problem of maximum credibility and convincingly substantiated resistance of nuclear power plants to serious accidents. The lack of clear logic, transparency and guarantees in the reliability of the announced nuclear safety significantly hinders its development, unnecessarily overcomplicating expensive technical solutions and thereby weakening the competitiveness of nuclear energy.

The originally proposed Concept of Inherent Safety set the task of solving the above problems; however, so far its specific content has not been explicitly presented, which allows many competitors to use its terminology to promote projects that are not directly related to the «spirit and letter» of Inherent Safety.

The present paper is intended to fill this gap. The authors also discuss the conditions for the generation and development of new self-protection means for innovative nuclear reactors as well as the phenomenological and technical aspects for their implementation based on the deterministic formalism.

Key words: nuclear power, heavy accidents, safety, competitiveness, self-protection, fast reactors.

REFERENCES

1. Adamov E.O., Lopatkin A.V., Orlov V.V., Rachkov V.I., Slesarev I.S., Khomyakov Yu.S. Nuclear Power with natural Safety: Change of Obsolete Paradigm, Criteria. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2016, no. 1, pp. 92-105 (in Russian).
2. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A. Improvement of Nuclear Safety of Fast Reactors by Slowing the Fission Chain Reaction. *Intern. Journal of Nuclear Energy*. 2014, Article ID 373726, p. 19.
3. Slesarev I.S. Innovative Intrinsically Secure Fast Reactors with Dense Cores. *Annals of Nuclear Energy*. 2007, v. 34, iss. 11, pp. 883-895.
4. Shmelev A.N., Kulikov G.G. On Factors and their Combination Affecting the Intrinsic Safety of a Fast Neutron Nuclear Reactor. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*. 2015, v. 6, no. 9-10, pp. 442-450 (in Russian).
5. Slesarev I. Paradigm Shift: Vital Risk Free Nuclear Power. *J. Nucl. Energ. Sci. Power Generat. Technol.* 2013, v. S1; DOI: <https://doi.org/10.4172/2325-9809.S1-008>.
6. Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants. IAEA-TECDOC-626. Vienna, IAEA, 1999.
7. Spiewak I., Weinberg A.M. Inherently Safe Reactors. *Ann. Rev. Energy*. 1985, no. 10, pp. 431-462.
8. Wade D. LMR Core Design for Inherent Safety. *NEACRP Meeting Proceeding*. Paris, Sept. 1986.
9. Wigeland R., Cahalan J. Mitigation of Severe Accident Consequences Using Inherent Safety Principles. *Proc. of the Int. Conf. IAEA on Fast Nuclear Reactors*. Kyoto, Dec. 07-11, 2009, INL/CON-09-15898 Preprint.
10. Nelson E. *Quantum Fluctuations*. Princeton. Princeton University Press, 1985, 160 p.,

ISBN 9780691083797.

11. Goldberg A.S. *Energy Dictionary*. Moscow. RUSSO Publ., 2006, 587 p.; ISBN 5-88721-302-7 (in Russian).

12. Shenfield J. *Mathematical Logic*. Moscow. Nauka Publ., 1975, 527 p. (in Russian).

13. Gordon B.G. *Safety of Nuclear Sites*. Moscow. National Research Nuclear University «MEPhI» Publ., 2014, 383 p. (in Russian).

14. Bukrinsky A.M. Management of Beyond Design Accidents in Current Russian Regulatory Documents. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost'*. 2010, v. 21, no. 1, pp. 16-25 (in Russian).

Authors

Slesarev Igor Sergeevich, Chief Researcher

E-mail: sis@proryv2020.ru

Adamov Evgeny Olegovich, Scientific Director of the Project Direction «Proryv»

E-mail: slp@proryv2020.ru

Leonov Viktor Nikolaevich, Head of the Department of Chief Designer

E-mail: lvn@proryv2020.ru

Rachkov Valery Ivanovich, Scientific Director of R&D Proryv JSC

E-mail: rvi@proryv2020.ru

Orlov Aleksandr Igorevich, Advisor to Research and Development Director

E-mail: oai@proryv2020.ru