

УДК 621.039

К ВОПРОСУ О ДОСТИЖИМОСТИ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЯЭУ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2020 г. И. С. Слесарев¹, Е. О. Адамов¹, В. Н. Леонов¹, А. В. Лопаткин¹,
В. И. Рачков¹, *, Ю. С. Хомяков¹

¹АО «Прорыв», Москва, Россия

*e-mail: rvi@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.

После доработки 22.05.2020 г.

Принята к публикации 28.05.2020 г.

Устранение значимых рисков ядерного энергопроизводства является на сегодняшнем 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 мешают ее развитию, заставляют усложнять и излишне переусложнять дорогостоящие технические решения, тем самым 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. Также обсуждаются 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

DOI: 10.31857/S0002331020030061

ВВЕДЕНИЕ

Радикальное снижение рисков тяжелых аварий является непреложной компонентой концепции Естественной Безопасности [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 Естественной Безопасности и ее обновлении приняты во внимание следующие принципиальные соображения, учитывающие накопленный опыт развития науки и техники:

- Ядерная технология обладает высоким потенциалом, наукоемка, но и потенциально настолько опасна (особенно угрозой быстрых катастрофических разрушитель-

ных 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 самозащищенности и акцента на детерминированную устойчивость основных защитных барьеров против аварийных исходных событий может выступать опорой [2, 11, 12, 15, 16] в повышении доверия к уровню безопасности.

1. О РАЗВИТИИ КОНЦЕПЦИИ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учитывая международную рубрикацию ИНЕС-МАГАТЭ, под тяжелыми авариями подразумеваются неприемлемые происшествя на АЭС, приводящие к разрушениям реактора с глобальным/значительным социально-экономическим ущербом и необходимости мероприятий по защите персонала/эвакуации населения. Пост-аварийный 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 7-го (типа Чернобыльской и Фукусимской аварий) до 5-го (типа Три Майл Айленд) уровня.

На приобретение востребованной убедительности в устранении именно тяжелых аварий (ТА) направлено целеполагание развивающейся Концепции Естественной Безопасности и реализация ее решающих качеств.

Как правило, ядерно-энергетическая установка неизбежно содержит множество активных и пассивных компонент различной надежности, причем активные признаются научно-техническим сообществом заведомо менее надежными [9]. Количественно и достоверно выразить надежность всей совокупности активных компонент, как и роли человеческого фактора не только сложно, но и практически невозможно с приемлемой достоверностью. 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 компонент, участия человека в управлении ядерной энергетической установкой и его намеренных/случайных ошибок) является априорное допущение максимально неблагоприятных отказов наименее надежных активных компонент и действий человека с обязательной компенсацией последствий таких отказов, наделением реактора дополнительными и более надежными по природе свойствами/качествами природной самозащиты.

Если бы надежных свойств было достаточно, то можно было ставить сверхзадачу о приемлемой устойчивости ядерной энергетической установки (против тяжелых аварий) детерминистского типа. Вместо этого для подтверждения противоаварийной устойчивости ядерной энергетической установки нынешнего поколения из-за множественности потенциальных “провокаторов” тяжелых аварий с трудно предсказуемым характером их проявления приходится обращаться к набору требований формальной логики (заимствованных из традиционных сфер технической деятельности общества: следованию принципам “единичного отказа”, принципу “два из трех” и т.п.), излишнему и дорогому резервированию активных средств защиты. Более того, от рассмотрения ряда опасных исходных событий приходится даже вынужденно отказываться (считая их предельно редкими – “запроектными”), особенно в тех частых случаях, когда не удастся найти убедительных мер защиты. В целом, вынужденным решением проблемы достоверности сейчас является “перекладывание ответственности” на ма-

люю вероятность многих исходных аварийных событий. Вероятностная оценка человеческого фактора пока остается за пределами реальности. Еще раз подчеркнем, что доминирование формально-логического и вероятностного анализа (ВАБ), особенно в части формирования исходных событий, по существу, отражает слабость имеющихся средств самозащитности [3, 4, 15].

Итак, в ядерных энергетических реакторах до 4-го поколения включительно отсутствие необходимой достоверности в противоаварийной устойчивости до сих пор является основной причиной неуверенности в реальном уровне безопасности, снижения доверия, во многих случаях, приводящего даже к неприятию ЯЭ в целом [2–5], как происходит, например, в Германии и Японии.

Традиционный подход к обеспечению устойчивости против тяжелых аварий для АЭС предшествующих поколений строился по следующей логике:

для рассматриваемой ядерной энергетической установки из сложившейся “культуры управления” опасными событиями выбирались подходящие технические активные и пассивные средства снижения рисков. Далее искались оценки их надежности (за неимением последних приходилось вынужденно применять ВАБ). Поскольку оставшиеся риски тяжелых аварий оказывались высокими и не вполне доверительными, то делались попытки эволюционно повысить надежность по возможности всех используемых компонент и средств защиты. Если часть (как правило, наиболее опасных) аварий не удавалось надежно предотвратить, то они вынужденно классифицировались как условно приемлемые (запроектные) аварии, само существование которых, тем не менее, ставило в тупик независимых экспертов и перевозбуждало общественное мнение.

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

Вместо “эволюционных” попыток повысить доверительную надежность активных компонент ядерной энергетической установки и предсказуемость человеческого фактора все сомнительные по надежности компоненты/внутренние устройства ядерной энергетической установки целесообразно признать априорно ненадежными/провокативными, и тогда пассивным средствам/устройствам защиты высшей категории (априорная надежность которых исключительно высока [9] и доступна проверке в ходе формирования их паспортных характеристик) суждено служить ответственными средствами устойчивости против тяжелых аварий.

Однако, как правило, использование только пассивных средств оказывается недостаточным для достижения новых целей естественной безопасности, и тогда становится востребованной существенная помощь безотказных свойств/средств самозащитности – не только традиционных, но, по-видимому, и добавочно новых.

Такая стратегия обеспечивает (при низкой и верифицированной вероятности отказов пассивных средств высшей категории надежности) “технический детерминизм” устойчивости ядерной энергетической установки против тяжелых аварий. В этом случае появляется возможность исключения сценариев запроектных аварий.

Те ядерные реакторы, которые в обозначенной логике способны удовлетворить основным концептуальным требованиям естественной безопасности (см. далее Часть 5), несмотря на возможную “дисфункцию”/отказ активных компонент и негативное проявление человеческого фактора, могут быть признаны обладающими необходимым начальным потенциалом для реализации Естественной Безопасности.

При этом под отказом активных компонент понимается в первую очередь утеря именно тех их качеств, которые несут отличительные признаки “активности” в определениях, рекомендованных МАГАТЭ [9] (использование внешних источников энергии, предполагаемого перемещения механических частей и т.п.).

КОНЦЕПЦИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ была изначально предложена [1] как инновационная парадигма для 4-го поколения ядерных энергетических

установок, нацеленная на поиск и использование новых критериев и средств радикального снижения всей совокупности значимых рисков ЯЭ, в том числе и Тяжелых Аварий, а также на определение наиболее достоверных способов доказательства такого снижения.

Развитие ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ для ЯЭУ 5-го поколения подразумевает подход в следующем направлении:

Доминантой концепции Естественной Безопасности должно стать дальнейшее усиление средств самозащищенности до такой высокой степени, чтобы обеспечить устойчивость ядерной энергетической установки против тяжелых аварий даже при постулированных отказах активных компонент.

В этом же случае активные средства защиты, оставаясь полезными и практичными, призваны служить лишь подстраховочными средствами безопасности, которые в ряде случаев можно существенно упростить и даже теоретически упразднить.

Противоаварийная устойчивость понимается здесь и далее как доминантное использование для ее реализации прямых действий законов природы и только тех научно-технических принципов, которые опираются на верифицированные научно-инженерной практикой решения и могут быть практически детерминированы.

В соответствии с принятыми рекомендациями, ключевым (для подчеркивания специфики и объективного позиционирования) КАЧЕСТВОМ [8] Естественной Безопасности, выбраны

ДОСТОВЕРНОСТЬ в соответствии с известным консервативным детерминистским принципом по Лапласу – “*все что важное, но сомнительное по надежности – случается, все что важное и надежное – продолжает функционировать*”, со следующими компонентами “пристального внимания”:

ЗАЩИТНЫЕ БАРЬЕРЫ – ИММУНИТЕТ – ГРАНИЧНЫЙ КРИТЕРИЙ – НОВЫЕ СРЕДСТВА САМОЗАЩИТЫ,

а также

ДОВЕРИТЕЛЬНОСТЬ и ПРОЗРАЧНОСТЬ ИХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ, поддерживаемые максимально упрощенной аттестацией и “феноменологичностью” (то есть, с акцентом на выявление природной сущности явлений) итогового анализа с помощью верифицированных кодов аварийной динамики.

2. О ДОСТОВЕРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРОТИВ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ

Как отмечалось, в отличие от ядерных энергетических установок предыдущих поколений (с опорой на эффективность и надежность активных средств защиты) успех в обеспечении “естественного иммунитета” к тяжелым авариям может обеспечить достижение достоверной устойчивости против тяжелых аварий, а дорогую финансовую страховку от тяжелых аварий – позволит считать ненужным рудиментом.

2.1. Принцип защиты в глубину и ранжирование в рамках естественной безопасности

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” [14] компонент/устройств/элементов, окруженных защитными барьерами пассивного типа: топливной матрицы, оболочек твэл, контуров охлаждения, корпуса реактора, страховочного корпуса и т.п. в зависимости от конструкции ядерной энергетической установки.

Защита против тяжелых аварий традиционно включает в себя:

- активные компоненты, средства/системы защиты и управления мощностью,
- использование свойств самозащищенности,

- компоненты/системы/устройства Пассивного Прямого Воздействия на Реактивность (ППВР),
- базовые барьеры защиты (являющиеся по определению МАГАТЭ пассивными средствами) и прочие пассивные системы, поддерживающие противоаварийную устойчивость и снижающие итоговые ущербы.

Достоверное предотвращение/прекращение развития тяжелых аварий и конечный ущерб от них напрямую связаны с устойчивостью базовых защитных барьеров.

В целом, этот важный принцип построения противоаварийной защиты ядерной энергетики остается в силе и для концепции Естественной Безопасности, однако акцент переносится на детерминированное сохранение штатного функционирования 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 Естественной Безопасности предоставляется возможность аттестации безопасности по рангам, определяемым по “индивидуальной” устойчивости детерминистского типа каждого из защитных барьеров (см. далее Принципы Детерминированной Аттестации). 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.

В обратном порядке нумерации подобное ранжирование удобно применить и в случае анализа опасности аварийных событий внешнего происхождения [6], где угрозы изначально приходят через разрушение последних (по принятому ранжированию) барьеров и использование вероятностных оценок воздействия провокаторов такого разрушения представляется неизбежным.

2.2. Особенности Естественной Безопасности в сравнении с традиционным подходом к противоаварийной устойчивости. Базовые средства достоверной защиты

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

Прежде всего, ее реализация требует изначальной минимизации базовых потенциальных 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 неременного подбора, по крайней мере, всех пассивных компонент ядерной энергетической установки (включая основные барьеры защиты), отвечающих детерминистским паспортным характеристикам, которые позволяют обеспечить максимальную устойчивость [2].

Следующие определения важны для целеполагания и выбора акцентов при обсуждении инновационных средств естественной безопасности:

1. “Достоверность” устойчивости (против тяжелых аварий) детерминированного типа измеряется способностью защитных барьеров оставаться (даже в аварийных и поставарийных условиях) в пределах паспортных верифицированных допустимых интервалов.

2. Базовым достоверным средством защиты от тяжелых аварий должно стать радикальное усиление “природного иммунитета” ядерной энергетической установки к тяжелым авариям в соответствии с формулой:

“ПРИРОДНЫЙ ИММУНИТЕТ” ≡ СОВОКУПНОСТЬ:

{ СВОЙСТВ САМОЗАЩИЩЕННОСТИ
и
СРЕДСТВ СДЕРЖИВАНИЯ РАЗВИТИЯ и САМОПРЕКРАЩЕНИЯ
АВАРИЙ с ПОМОЩЬЮ ПАССИВНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫСШИХ
КАТЕГОРИЙ НАДЕЖНОСТИ

3. КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ТРАДИЦИОННОЙ И ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ. ИННОВАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА

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. Эти отличия складываются из представлений о прозрачности доказательства феноменологических причин для наиболее опасных сценариев, а также о способах достижения такого качества.

3.1. О выборе граничного критерия естественной безопасности

Представленные выше аргументы формируют нишу для разработки ядерной энергетической установки с инновационным подходом к безопасности, используя:

- *Определение “цифровой границы”, разделяющей традиционный (ТРАД) и инновационный (Продвинутый) подходы к обеспечению устойчивости против тяжелых аварий*

Учитывая многообразие 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 7-ой 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.

- *Аттестацию побарьерной поставарийной устойчивости, заключающуюся в детерминированном определении реализуемого ранга Естественной Безопасности с учетом принципов предельного консерватизма.*

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

3.2. О природе цифрового граничного критерия. Новые способы усиления самозащитенности

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 (с известной долей запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$, появляющихся из осколков деления) для интегральной по пространству и энергии плотности нейтронного потока $n(t)$.

С учетом перспективы использования предложенных недавно инновационных средств повышения самозащитенности в этом условии предусмотрена возможность реализации оригинальных способов замедления кинетики [5–8] быстрого реактора (например, пространственной диффузии значительной доли нейтронов, утекающих

из активной зоны в освобожденные от необходимости избыточного бридинга протяженные отражатели).

Такое замедление кинетики в быстрых реакторах актуально для радикального снижения аварийной скорости разгона мощности в реактивных авариях. Для тепловых реакторов подобная востребованность и возможности не столь актуальны из-за исходно удлиненного времени жизни нейтронов, но зато такие реакторы более опасны необходимостью резервирования гораздо больших запасов реактивности по совокупности известных причин.

Итак, в обобщенном случае, подходящее приближенное уравнение точечной кинетики реактора с отражателем и шестью группами запаздывающих нейтронов имеет вид:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - (\beta + \beta_*)}{l} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + \frac{\beta_*}{l} n(t - l_*), \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l} n(t) - \lambda_i C_i,$$

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

В уравнении (1) концентрация эмиттеров запаздывающих нейтронов из продуктов деления, скорость их распада и среднее время жизни загулявших нейтронов в активной зоне обозначены как обычно: C , λ , l_* , а введенная в критический реактор реактивность: ρ .

Возможность подобного уникального замедления кинетики в быстрых реакторах учтена в уравнении (1) вводом добавочных членов, обозначенных нижним правым индексом (*):

β_* – доля нейтронов, появляющихся с задержкой в результате “возвратной” диффузии в активную зону этих “загулявших” нейтронов отражателя соответственно. Задержка возврата загулявших нейтронов может привести к существенному росту (на несколько порядков величины) среднего времени жизни нейтронов в быстром реакторе по сравнению с мгновенными нейтронами деления и их среднему времени жизни l_p благодаря удлиненному времени жизни загулявших нейтронов l_* :

$$l_* \gg l_p,$$

и высокой их доле ($\beta_* \approx 20-40\beta$) из-за интенсивной утечки нейтронов из активной зоны в отражатель быстрого реактора.

Такое новое нейтронно-физическое “явление” существенно для практики, если протяженные слабопоглощающие отражатели быстрого реактора заставить служить своеобразными “аккумуляторами” загулявших в отражателях нейтронов.

Заметим, что соотношение $l_* \gg l_p$ как естественная и существенная “привилегия” свинцово-охлаждаемых быстрых реакторов (благодаря предельно слабому поглощению и замедлению нейтронов при использовании изотопного свинца-208 или свинцовых ториевых радиогенов в отражателях) может оказаться важным средством радикального усиления их самозащитности в сценариях быстрого аварийного ввода полного запаса реактивности [6, 7].

Если размежевать “факторы опасности” и “факторы сдерживания скорости аварийного разгона мощности реактора”, то из уравнений кинетики (1) и обратных часов, сравнивая периоды разгонов реактора с замедлением кинетики и без замедления, а также полагая ($\rho \equiv \rho_{\max}$), получим следующее приближенное и обобщенное выражение, ограничивающее сверху запас реактивности в ядерной энергетической установке

$$\rho_{\max} < \beta_* + \beta - l_p/l_* \quad (2)$$

которое и определяет ЦИФРОВУЮ феноменологическую границу принципиально различающихся классов безопасности.

В выражении (2) максимальная реактивность ρ_{\max} , которая может быть безаварийно быстро введена в реактор, включает в себя (в зависимости от базовых нейтронно-физических и тепло-гидравлических свойств ядерной энергетической установки и ее топлива):

$$\rho_{\max} \equiv$$

+ востребованный для штатной работы реактора запас реактивности на активных (быстрых) компенсаторах механического типа

+ сумма феноменологически максимальных аварийных быстрых плотностных эффектов положительной реактивности (типа пустотных, паровых и т.п.) с учетом реальных паспортных характеристик источника аварийного ввода реактивности

+ сумма положительных эффектов реактивности, связанных с быстрым изменением фазовых состояний компонент ядерной энергетической установки (например, от плавления топлива, возникновения “вторичной” критичности реактора, объемного закипания теплоносителя – если такие явления реальны для рассматриваемой ядерной энергетической установки)

+ сумма максимальных и опасных погрешностей различной природы (технологических, расчетных и т.п.)

– быстрый реактивностный температурный эффект Доплера (от температуры на минимально контролируемом уровне мощности до “паспортной” максимально-допустимой температуры, соответствующей началу массового разрушения первого барьера защиты – топливных матриц).

Выполнение условия (2): “категоричное НЕТ неприемлемо опасным разгонам мощности на мгновенных нейтронах” – полностью соответствует духу Естественной Безопасности, так как оно напрямую определяется физико-математическими законами ядерного способа энергопроизводства.

3.3. Путь к “аттестованной” Естественной Безопасности с оцифрованным рангом

Обозначенный выше формальный переход в область Естественной Безопасности через цифровую границу в соответствии с качественным соотношением (2) обязателен для обеспечения основных требований и получения привлекательных качеств Естественной Безопасности, 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 может привести к тяжелой аварии (рис. 1).

Следует также иметь в виду, что поведение только аварийной интегральной мощности не всегда определяет устойчивость защитных барьеров: здесь детерминистскими ориентирами являются максимальный темп роста температур компонент реактора, превышение предельно допустимых “паспортных” температур барьеров защиты и тепло-гидравлики, прочностных характеристик конструкций. Следовательно, возможность достоверного обоснования устойчивости к тяжелым авариям предстоит (см. далее) еще доказать.

Особое место в проблеме снижения риска тяжелых аварий внутреннего происхождения занимает нивелирование провокативности компонент реактора, где особо опасными признаны [9] активные компоненты.

Известны и в последнее время получили дальнейшее развитие несколько направлений [1, 5–8] существенного снижения провокативности компонент реактора и усиления самозащищенности, укладываемых в следующую ТРИАДУ:

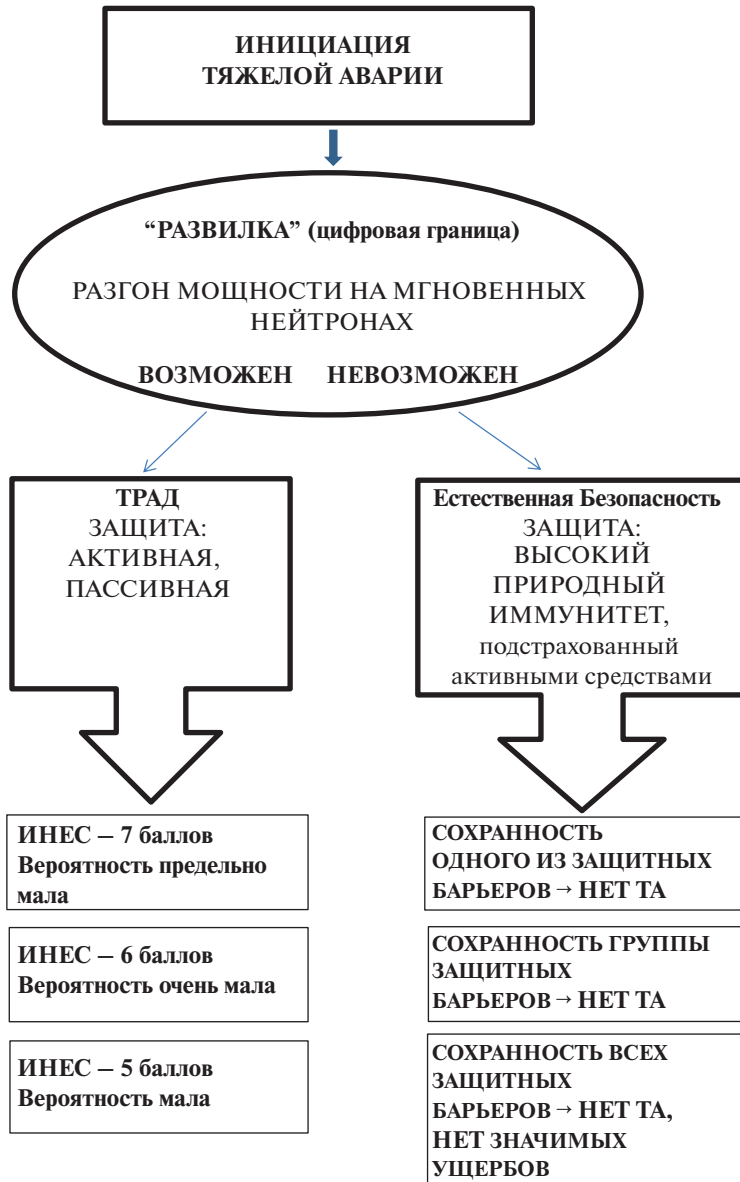


Рис. 1. Схема подходов к обеспечению устойчивости против тяжелых аварий.

1. ОПТИМАЛЬНЫЙ ТВЭЛ (“высокоскоростной” теплообмен, терпимость к быстрому росту скорости разгона мощности),
2. МИНИМИЗАЦИЯ ЗАПАСА и СКОРОСТИ ВВОДА БЫСТРОЙ РЕАКТИВНОСТИ (благодаря природной медлительности при подборе альтернативных способов ее ввода)

Примеры:

- минимизация изменения реактивности по кампании за счет топливного равновесия в замкнутом топливном цикле быстрых реакторов,

- максимальное снижение запаса реактивности на компенсаторах механического действия за счет более медленных и менее “провокативных” компенсаторов гидравлического типа,

- снижение величины потенциально опасных быстрых реактивных эффектов в ядерном реакторе.

3. ЗАМЕДЛЕНИЕ АВАРИЙНОЙ КИНЕТИКИ и ДИНАМИКИ, полезное для повышения устойчивости при аварийном возникновении быстрых эффектов реактивности, уменьшения угрозы теплового удара на топливо.

Первое из этих направлений предполагает применение улучшенного топлива и условий теплосъема так, чтобы в аварийной ситуации обеспечить повышенную устойчивость к росту скорости разгона мощности и т.п. Это оправдывает интерес, в частности, к моно-нитриднему топливу с быстропроводящим тепло подслоем, разделяющим топливо и оболочку ТВЭЛ.

Второе – снижение “быстрых провокационных” опасностей со стороны компенсаторов реактивности с механическим приводом и частичной заменой их на альтернативные – природно-замедленные механизмы компенсации.

Третье – использование нейтронно-физических способов замедления аварийной динамики, упомянутое выше.

Как определено, целеполагание Естественной Безопасности против тяжелых аварий (ЕСБ-ТА) реализуется выполнением условия (2) и достижением поставарийного сохранения хотя бы одного защитного барьера, а в желаемом пределе – всех защитных барьеров. В этом случае реакторы с подобными свойствами и соблюдением принципов аттестации, изложенных ниже, можно отнести к подклассу реакторов с “аттестованной” Естественной Безопасностью.

Качественной иллюстрацией пути достижения Естественной Безопасности с оцифрованным рангом Z (аттестованной Естественной Безопасностью ранга Z) служит пример (рис. 2) из кинетики **быстрого реактора** (без учета обратных связей) с усиленной самозащищенностью, реализуемой путем замедления кинетики. При этом расположение упомянутого выше подкласса аттестованной Естественной Безопасности ограничено неравенством (2) и минимальным периодом T_{\min} разгона мощности, которую выдерживает рассматриваемый барьер Z при вводе аварийной реактивности ρ_{\max} .

Практическую реализацию цели поставарийного сохранения барьеров можно интерпретировать как процесс “отползания от пропасти” посредством усиления самозащищенности (т.е. от наиболее опасной максимально быстрой тяжелой аварии реактивного типа к более медленным аварийным процессам с финальным достижением подобласти “аттестованной Естественной Безопасности”).

Окончательное решение о достижимости Естественной Безопасности зависит от результатов аварийной динамики реактора с учетом реальных обратных связей.

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

В техническом плане безоговорочная доверительность устойчивости к тяжелым авариям возникает, если удастся доказать непревышение допустимых рабочих параметров части или всех основных барьеров защиты в глубину при технических отказах любых компонент реактора, включая активные средства аварийной защиты.

В реалии такого добиться не удастся. Тогда, опираясь на рекомендации МАГАТЭ [9], предлагается следующий алгоритм инженерно-детерминистского типа, который отражает практический путь реализации Естественной Безопасности:

- условно разделить компоненты реактора на “надежные” и “сомнительные по надежности”;

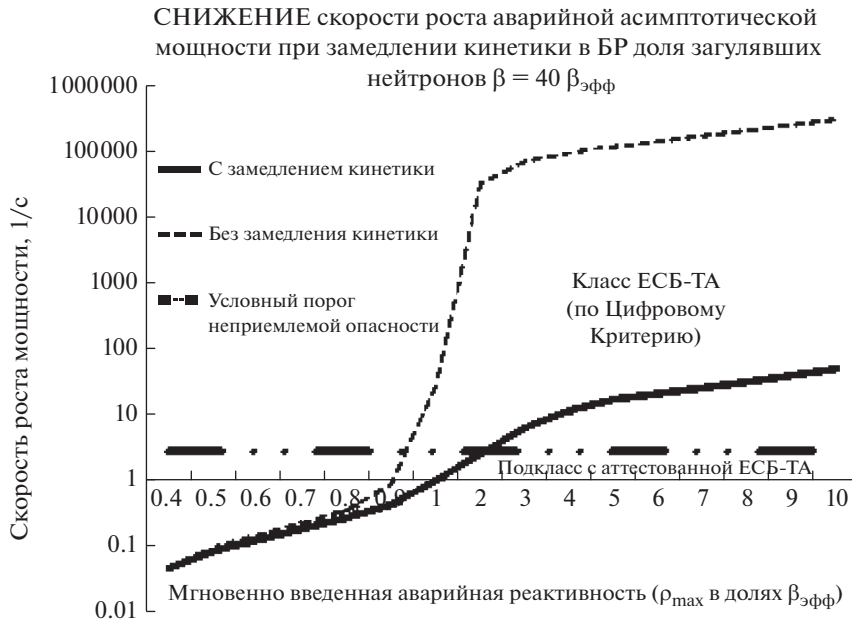


Рис. 2. Позиция подкласса ядерной энергетической установки с “аттестованной Естественной Безопасностью против тяжелых аварий – ЕСБ-ТА”.

- выбрать из всех пассивных компонент высшей категории надежности такие компоненты, вероятность отказа/разрушения которых мала/приемлема по величине. Проверив наличие такого качества, предлагается считать их аттестованными как “надежные”,
- все сомнительные по надежности активные компоненты (а также пассивные компоненты низших категорий) консервативно признать условно “ненадежными”, а их отказы считать вполне реализуемыми на практике по наиболее опасным сценариям,
- поставарийное сохранение/разрушение защитных барьеров (как правило, относящихся к пассивным надежным компонентам) считать результирующим критерием, который должен быть выявлен при анализе аварийной динамики.

Опорой доверительности выступает соответствие аварийных параметров компонент ядерной энергетической установки и основных Барьеров Защиты их допустимым паспортным техническим характеристикам.

Как отмечалось, представляется удобным ранжировать развитие аварий по *уровням* (начиная с нулевого — основные защитные барьеры пока не разрушены) в зависимости от последовательности отказа/разрушения основных Барьеров Защиты.

Принцип ДА-1 – для СВОЙСТВ САМОЗАЩИЩЕННОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, СДЕРЖИВАЮЩИХ АВАРИЮ:

“ЛАПЛАС: ВАЖНОЕ И НАИБОЛЕЕ НАДЕЖНОЕ”

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

Принцип ДА-2 – для ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ/УСТРОЙСТВ/СИСТЕМ/СВОЙСТВ, СДЕРЖИВАЮЩИХ АВАРИЮ:

“ЛАПЛАС: ВАЖНОЕ И НАДЕЖНОЕ”

пассивные элементы высших категорий надежности, признаются приемлемо надежными. “Потенциальная Аварийность” таких элементов и степень их разрушения так-

же определяется установленными и приемлемыми техническими паспортными характеристиками.

Уместно ввести понятие об уровнях развития тяжелых аварий, причем нулевым признать состояние без разрушения основных защитных барьеров, которые должны быть пассивными компонентами и, по определению МАГАТЭ, не могут являться провокаторами тяжелых аварий.

Здесь для количественных оценок противоаварийной устойчивости конкретных элементов применение ВАБ может оказаться и уместным и полезным, получая представление о целесообразности и результативности их применения (в том числе представление о противоаварийной устойчивости ядерной энергетической установки в целом). Однако такое применение является не обязательным и достаточно потребовать приемлемо малую дисперсию величин, определяющих паспортные характеристики использованных пассивных элементов.

Предполагается, что состояния свойств и элементов, сдерживающих аварии, в процессе начального развития аварий остаются в пределах рабочих паспортных характеристик (т.е. не способны к произвольному саморазрушению и не могут выступать инициаторами аварий, согласно определению МАГАТЭ [9]), по крайней мере, до разрушения любого из основных барьеров защиты.

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

ПРИМЕРЫ

1. Пассивные элементы/устройства/системы высших категорий надежности должны принадлежать к категории **A** (или совокупности категорий **A + B** при дополнительном обосновании надежности категории **B**) по признакам, предложенным в документах МАГАТЭ.

Пассивными элементами/системами/свойствами высших категорий надежности могут быть признаны (по INES-МАГАТЭ): основные защитные барьеры, ППВР мембранного типа, свойства естественной конвекции теплоносителя в определенных условиях и др.

2. Некоторые многокомпонентные системы в ядерной энергетической установке, будучи пассивными по форме могут частично утратить надежность при технической сборке своих составных пассивных компонент. К таковым относятся парогенераторы (ПГ) быстрых реакторов, состоящие из разветвленной системы труб. В этом случае, проявляя умеренный консерватизм, рекомендуется, не рассматривая полный и быстрый отказ/разрушение всей системы, допускать локальные/частичные отказы (обоснованные паспортными характеристиками и имеющейся статистикой) с соответствующей обязательной компенсацией (с запасом) свойствами самозащищенности.

Следующие принципы Детерминированной аттестации подчинены предельно консервативному недоверию к отказам провокативность активных компонент ядерной энергетической установки, способных инициировать аварийные сценарии.

Принцип ДА-3 – для ИНИЦИАТОРОВ АВАРИЙ ИЗНАЧАЛЬНОГО (НУЛЕВОГО) УРОВНЯ:

“ЛАПЛАС: ВАЖНОЕ, НО СОМНИТЕЛЬНОЕ”

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” – максимально быстрой.

ПРИМЕРЫ

• для системы активных компенсаторов наиболее опасным аварийным сценарием должен стать максимально быстрый ввод полной запасенной реактивности и особо опасной, если максимальная скорость такого ввода заметно превышает скорость компенси-

рующей пассивной системы воздействия на реактивность (ППВР). Этот тезис особенно важен для скоростных активных механических компенсаторов, в то время как для компенсаторов с гидравлическим принципом функционирования опасность ввода запаса реактивности обычно нивелируется существенно более медленной феноменологической скоростью гидродинамических процессов, сопряженных с такими компенсаторами.

Подобные гидравлические компоненты могут быть отнесены к категории типа *D* [9] полупассивных систем (*“активная инициация/пассивное исполнение”*) с надежно длительным временем отказа. В такой системе наиболее опасная дисфункция (возможность быстрого перемещения рабочего тела – поглотителя нейтронов) тормозится пассивным способом – изначальным подбором ограниченного проходного сечения трубопроводов и т.п.

- практически мгновенное внесение положительной реактивности при объемном вскипании теплоносителя (например, в реакторах БН большой единичной мощности).

Воздействия человеческого фактора также должны рассматриваться по соответствующим наиболее опасным сценариям.

Вслед за изначальными аварийными событиями (нулевого уровня, 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 И СВОЙСТВ/УСТРОЙСТВ:

“ЛАПЛАС: ВАЖНОЕ, НО ОЧЕНЬ СОМНИТЕЛЬНОЕ”

события с появлением последующих уровней провокаторов-инициаторов, являющиеся следствием разрушения барьеров защиты и/или приводящие к изменению агрегатных состояний компонент ядерной энергетической установки, влияющих на ее реактивность и теплогидравлику (после подтверждения таковых моделированием исходных аварийных событий и динамикой аварийных процессов), признаются недостоверно прогнозируемыми и, с учетом необходимого консерватизма, постулируются по наиболее опасным сценариям.

ПРИМЕР

К таким событиям может относиться аварийное мгновенное внесение положительной реактивности от *“вторичной”* критичности при объемном плавлении топливных матриц и последующего пространственного перемещения топливного расплава и т.п.

ПРИНЦИПАМИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ АТТЕСТАЦИИ ПДА-1–ПДА-4 задается спектр наиболее опасных иницирующих сценариев и одновременно обеспечивается консервативная научно-техническая прозрачность (см. Часть 4) доказательства устойчивости к тяжелым авариям, тем самым обходя трудоемкую и не прозрачную проблему верификации вероятностных оценок одновременно для всей детальной структуры *“дерева отказов”*.

Таким образом, развиваемые новые качества Естественной Безопасности при ее достижении эквивалентны такому высокому уровню *“иммунитета”*, который позволяет доказать устойчивость против тяжелых аварий даже при максимальном недоверии и опасной *“провокативности”* всех активных компонент ядерной энергетической установки (включая отсутствие помощи активных средств защиты) и пассивных компонент низших категорий надежности.

При таком жестком введении принципов аттестации Естественной Безопасности, достоверно доказать устойчивость к тяжелым авариям удастся, как подчеркивалось, далеко не для всех реакторов и под силу только инновационным реакторам с объективно высоким изначальным запасом самозащищенности, и все же, как правило, требующим дополнительного ее усиления и привлечения высоконадежных средств пассивного прямого и приемлемо быстрого компенсирующего воздействия на реактивность.

К подобным ядерным энергетическим установкам потенциально относятся, например, быстрые реакторы со свинцовым охлаждением [1].

5. 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” ядерных энергетических установок с Естественной Безопасностью:

- постулировать отказы активных компонент/средств функционирования ядерной энергетической установки и ее защиты (или групп схожих средств) по наиболее опасным сценариям,
- укрупнить отказы активных независимых устройств до уровня консервативно-феноменологических [10, 18] (например, вместо отказов активных компонент/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.

Прозрачность доказательства достижения Естественной Безопасности ядерной энергетической установки достигается на основе анализа аварийной динамики с упрощенным алгоритмом по перечню интегральных феноменологических исходных событий.

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 [2, 10]. Перечень подобных ФИИС, соблюдая принцип “скептического консерватизма”, предъявляет максимально жесткие требования к самозащищенности реактора, зато существенно упрощает, облегчает и с запасом верифицирует анализ устойчивости ядерной энергетической установки в целом, делая его консервативно прозрачным.

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 пред-аварийных событий – ATWS [10] нулевого уровня, адаптированный к нынешнему пониманию проблем безопасности для инновационных БР.

Этот перечень (предполагая принципиальную возможность его расширения с учетом особенностей конструкции реактора) включает основные технические возможные интегральные исходные значительные события нулевого уровня, такие, например, как:

- быстрый аварийный ввод полного запаса реактивности*,
- переохлаждение или перегрев теплоносителя из-за любого технического сбоя в активной системе охлаждения,
- дисфункция активных компонент в системе принудительного стока тепла в окружающую среду*,
- недостаточность аварийного естественного расхолаживания ядерной энергетической установки,
- любые ошибки/несанкционированные действия операторов или посторонних лиц (опасный “человеческий фактор”)*,

- обесточивание (Blackout) ядерной энергетической установки, а также
- реальные комбинации перечисленных явлений и событий* и др.

*в нынешнем парке Ядерной Энергетики такие аварии обычно относят к запроектным с характерной значительной вероятностной дисперсией.

Приведенный перечень, ориентированный здесь на быстрые инновационные реакторы, достаточно короток для восприятия экспертов. Тем не менее, он “перекрывает” реальный набор опасностей с востребованным консерватизмом, что повышает доверительность анализа, и вкупе с Принципами Детерминированной Аттестации является неотъемлемой компонентой “Феноменологической Динамики” [10], служащей поверочной процедурой. Этим убирается необходимость широкого использования ВАБ и при формировании перечня исходных аварийных событий нулевого уровня. Одновременно исчезает за ненадобностью отдельный и будоражащий общественность перечень незащищенных “запроектных” аварий [16, 17].

Таким образом, достоверная доказательность достижимости Естественной Безопасности реализуется по следующей схеме:

ПОЛНАЯ ПРОЦЕДУРА ДОКАЗАТЕЛЬНОСТИ Естественной Безопасности →

Преодоление феноменологической Цифровой Границы класса Естественной Безопасности

+

Детерминированная Аттестация с использованием Принципов ДА 1-4

+

Анализ ФИИС с помощью верифицированных кодов аварийной динамики ядерной энергетической установки с целью демонстрации сохранения основных защитных барьеров в аварийных и пост-аварийных режимах

6. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЛОГИКА И КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Для подтверждения верности пути к “аттестованной Естественной Безопасности” воспользуемся классическими положениями математической логики Аристотеля, которая затем вошла в систему логики Евклида-Гильберта, и нашего современника в области теории ядерных реакторов – А. Вейнберга [10].

В рамках такой системы построения математически строгих доказательств критериальными (*необходимыми и достаточными*) требованиями [13] 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* и 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 не-

кой 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.

“МЕРИЛОМ” достижения целей Естественной Безопасности относительно тяжелых аварий является доказанное на основе “Феноменологической аварийной Динамики” с ПРИНЦИПАМИ детерминированной аттестации и феноменологическими интегральными исходными аварийными событиями ФИИС неукоснительное соблюдение допустимых “паспортных” пределов устойчивости основных защитных барьеров (в зависимости от востребованного уровня Естественной Безопасности) [19]. При этом целесообразно избегать необходимости применения Принципа ДА-4, удачный успех которого остается априорно сомнительным из-за практической сложности предсказания последствий каскадных разрушений основных барьеров защиты. В этом смысле достижение Естественной Безопасности высшего ранга (с сохранением всех защитных барьеров) представляется наиболее приоритетной задачей как по важности ее целеполагания и простоты решения, так и достоверности доказательства достижимости, не требующего сложных исследований, дорогостоящего моделирования процессов и множества последствий разрушения ядерно-энергетической установки.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическая разработка ядерных энергетических установок невозможна без использования активных компонент, неуправляемые отказы или разрушение которых зачастую являются основными “провокаторами” тяжелых аварий внутреннего происхождения.

Представленная стратегия достижения в ядерно-энергетической установке Естественной Безопасности 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.

Более сжато она формулируется следующим образом:

отказы активных устройств не должны приводить к тяжелым авариям, и такое новое качество должно быть достигнуто за счет усиления самозащитенности реактора.

В случае реализации Естественной Безопасности 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 (7-ой по шкале ИНЕС и самой опасной среди категорий тяжелых аварий), устраняющая разрушающий аварийный тепловой удар по структуре реактора. **Последующий социально-психологический вывод благоприятен для мирового развития ядерной энергетики,**

- техническая устойчивость детерминистского типа против тяжелых аварий (в диапазоне 4–6 шкалы ИНЕС в зависимости от ранга Естественной Безопасности),

- ясность понимания, отсутствие сомнений в приемлемости достигаемой противоаварийной устойчивости,

- снятие проблем управления тяжелыми авариями и необходимости аварийных мер по эвакуации населения.

При таком подходе вероятностные оценки надежности устойчивости против тяжелых аварий оставаясь лишь ограниченно полезными и уместными, перестают вносить заметную неопределенность и сомнительность в доказательствах безопасности ядерных реакторов.

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”*) и

- прозрачность (с опорой на расчетный аппарат феноменологической динамики для доказательности востребованной устойчивости ядерной энергетической установки против тяжелых аварий: *“исходные аварийные события интегрируются по максимально опасным сценариям”*).

Перечисленные новые и важные качества позволяют упразднить за ненадобностью такие разграничительные термины, как *“проектные и запроектные аварии”*, упростить и процедуру самих доказательств безопасности, освободив ее от громоздкой и “запутывающей” детализации.

Существенное повышение экономической конкурентоспособности ядерных энергетических установок при достижении Естественной Безопасности высшего ранга (то есть без разрушения барьеров защиты ядерного реактора) реализуемо благодаря:

- обоснованному отсутствию необходимости затратного страхования от ущербов тяжелых аварий,

- удешевлению активных средств защиты и мер по обеспечению высокой надежности систем управления и защиты,

- упрощению и даже полной отмене запроектных подстраховочных инженерно-технических средств безопасности (типа ловушек кориума, сложных конструкторских мер против возможности образования “вторичной критичности” и т.п.).

Как отмечалось, для достижения Естественной Безопасности по отношению к тяжелым авариям важен изначальный выбор подходящих типов ядерных реакторов, свойств теплоносителя, топлива и топливного цикла. Уже на этом этапе проявляются преимущества быстрых реакторов и их базовых свойств [2, 6], которые существенно усиливаются предложенными инновационными средствами самозащищенности [1, 5–8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Слесарев И.С. и др. Ядерные реакторы повышенной безопасности. Энергоатомиздат. М., 1993.
3. Ковалевич О.М., Румянцев А.Н. Необходимые аспекты решения проблемы погрешностей и неопределенностей. Ядерная и радиационная безопасность. 2009. № 4(54).
4. Ковалевич О.М. Совершенство правил безопасности с точки зрения ответственности за их нарушение. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 4.
5. Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Ансэ В.А. Улучшение ядерной безопасности быстрых реакторов за счет замедления цепной реакции деления. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия. Hindawi Publishing Corporation Intern. J. Nuclear Energy. Article ID 373726. 2014. P. 19.
6. Slessarev I. Innovative Intrinsically Secure Fast Reactors with Dense Cores. Annals of Nuclear Energy 34 issue 11, 2007.

7. 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.
8. Slessarev I., Alekseev P. New-quality nuclear power without substantial threats and risks: vital risk free fast reactors and fuel cycles. Proc. Int. Conf. IAEA on Fast Nuclear Reactors, Kyoto, Dec. 07–11, 2009.
9. Safety related terms for advanced nuclear plants. IAEA-TECDOC-626. – Vienna, IAEA, 1991.
10. Spiewak I., Weinberg A.M. Inherently Safe Reactors. *Ann. Rev. Energy*. 1985. V. 10. P. 431–62.
11. Wade D. LMR Core Design for Inherent Safety. NEACRP Meeting Proceeding, Paris, Sept., 1986.
12. Wigeland R., Cahalan J. Mitigation of Severe Accident Consequences Using Inherent Safety Principles. Proc. Int. Conf. IAEA on Fast Nuclear Reactors, Kyoto, Dec. 07–11, 2009.
13. Nelson E. Quantum Fluctuations, Princeton University Press, Princeton, 1985.
14. Гольдберг А.С. Энергетический словарь. М., 2006.
15. Шенфилд Дж. Математическая логика. М.: Наука, 1975.
16. Слесарев И.С., Сироткин А.М. Расчет гетерогенных реакторов методом вложенных элементов. *Журн. Атомная Энергия*. 1975. Т. 38. С. 6.
17. Гордон Б.Г. Ядерная и радиационная безопасность. 2005. Т. 3. № 2.
18. Букринский А.М. Управление запроектными авариями в действующих нормативных документах России. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2010. Т. 21. № 1.
19. Детерминистический анализ безопасности атомных электростанций. Серия норм МАГАТЭ по безопасности № SSG-2 13-17034_PUB1428_R_cover.indd 1-3 2014-03-04.

To the Question of Reachability of Natural Safety of the Fifth Generation Nuclear Power Plant

I. S. Slesarev^a, E. O. Adamov^a, V. N. Leonov^a, A. V. Lopatkin^a,
V. I. Rachkov^{a, *}, and Yu. S. Khomyakov^a

^aJSC “Proryv”, Moscow, Russia

*e-mail: rvi@proryv2020.ru

The elimination of vital risks of nuclear power production is the necessity and purpose that defines its development in the near future. Of particular importance is the problem of maximum credibility and convincing evidence of the resistance of nuclear power to serious accidents. The lack of clear logic, transparency and guarantees in the reliability of the announced nuclear safety interfere significantly with its development, make expensive technical solutions more complicated and unduly overextended, thus hindering the competitiveness of nuclear power. The originally proposed concept of Natural Safety set out to solve the problems noted above, however, so far its specific content has not been explicitly presented, allowing many competitors to apply its terminology to advance projects that are not directly related to the “spirit and letter” of Natural Safety. The work presented is intended to fill this gap. It is proposed to implement Natural Safety: – with total denial of trust in all “doubtful, compensated for the more” reliable “(in philosophical terminology), – due to levelling of “agility” on the part of the “doubtful” component of the nuclear reactor and its fuel cycle by the growth of “immunity” against severe accidents (in medical and biological terminology) and to finish – with the procedure of an conservative analysis of the dynamics of emergency processes by final conclusions about non-exceeding of “passport” limits of sustainability of the main reactor protection barriers (in concrete-practical representation). The conditions of generation and development of new means of self-protection of new generation nuclear reactors, as well as phenomenological and technical bases for their implementation on the deterministic formalism are discussed.

Keywords: nuclear energy, heavy accidents, safety, competitiveness, self-protection, fast reactors