

16. **Monitoring** and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. Safety Standards Ser. SSG-31. Vienna: IAEA, 2014.
17. **Caers J.** Modeling Uncertainty in the Earth Sciences. New Delhi, Wiley-Blackwell, 2011.
18. **Демьянов В.В., Савельева Е.А.** Геостатистика. Теория и практика. М.: Наука, 2010.
19. **Science** Based Nuclear Energy Systems Enabled by Advanced Modeling and Simulation at the Extreme Scale. Final Rep. on Integrated Performance and Safety Codes. Office of Science, Advanced Scientific Computer Research and the Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, 2009.

УДК 621.039.58

ПОЛНОТА РЕАЛИЗАЦИИ ФАКТОРОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Сидоренко В.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Развивая тему предлагаемой статьи, целесообразно уточнить и зафиксировать содержание основных понятий, что представляет собой повторение общеизвестных и принятых в среде специалистов представлений в тех формулировках, которые в достаточной мере, по мнению автора, сочетаются с последующим изложением и обсуждением.

Любая промышленная технология, в том числе энергетическая характеризуется опасностью, так как обладает возможностью вредного воздействия в различных формах на человека и окружающую среду. Опасности ядерной технологии наряду с общими для других энергетических технологий дополняются специфической опасностью, что обусловило особое внимание и особый подход к ее использованию. Это привело к тому, что после решения научно-технических проблем, определяющих реализацию этого технологического направления, при демонстрации экономической целесообразности использования ядерного топлива на центральное место вышла проблема обеспечения и признания ее безопасности.

Специфической опасностью использования атомной энергии (ядерной технологии) являются ядерное излучение (γ -, β -, α -, нейтронное) и возможность большого неуправляемого выделения энергии в установках, использующих делящиеся ядерные материалы. Помимо этих двух объективных факторов, обусловивших особый подход к формированию технической политики, есть и другие причины, потребовавшие особого подхода к нормативно-правовому регулированию использования атомной энергии. Обостренное внимание и обеспокоенность населения опасностью атомной энергии определяется, с одной стороны, исторически произошедшей демонстрацией последствий применения ядерного

оружия, с другой, уникально высокой возможностью средств обнаружения ядерного излучения, несравнимой с возможностями фиксации опасных факторов в других технологиях, а также нечувствительностью к ним естественных органов чувств человека. В результате в практической деятельности установлен несоизмеримо больший разрыв между опасными для здоровья и узаконенными предельно допустимыми количественными показателями опасности в ядерной области по сравнению со всеми другими технологиями. Это усиливает опасения и отрицательное отношение населения к ядерной технологии.

Еще одной важной причиной особого внимания и особых подходов к нормативно-правовому регулированию является возможность двойного применения ядерных процессов (гражданского и военного). Эта причина явилась первым стимулом того, что безопасность использования атомной энергии приобрела международный характер. В дальнейшем неизбежность международных усилий была подтверждена опытом гражданского применения в связи с трансграничным характером последствий аварий на ядерных объектах и резко выраженным влиянием аварийных событий на мировое общественное мнение. В результате регулирование ядерной безопасности развивается как самостоятельная область, отличающаяся в своих подходах от других технологий и технологических опасностей. Ее правовая и нормативная система не может следовать традициям и установкам системы, действующей применительно к другим технологиям.

Регулирование безопасности использования атомной энергии (как государственное, так и межгосударственное) стало важнейшим фактором ядерной технологии. Упомянутые обстоятельства естественным образом привели к тому,

что безопасность использования атомной энергии и конкретно ядерной энергетики из сферы научных и технических проблем распространилась на сферу политики и права как на национальном, так и международном уровне.

Основные понятия и цели. Особенности ядерного процесса получения полезной энергии формируют фундаментальные цели, технические функции и принципы ядерной безопасности. Источники ядерной опасности — прямое ядерное излучение, неуправляемое выделение энергии и образование радиоактивных веществ — формируют фундаментальные функции ядерной безопасности, структуру целей:

- защита от излучения во всех состояниях ядерной установки;

- удержание под контролем цепной реакции деления;

- отвод тепла, выделяющегося в процессе деления ядерного топлива и поглощения излучения образовавшихся радиоактивных веществ;

- удержание радиоактивных веществ в пределах соответствующих барьеров.

По мере развития ядерной технологии развивались и совершенствовались методы и средства осуществления этих функций. Формируя подходы к безопасности ядерной технологии (философию, концепцию ядерной безопасности), следует разделить прямые факторы опасности (в данном случае ядерное излучение, сопровождающее технологический процесс) и возможную опасность неуправляемого выделения энергии и аварийного распространения радиоактивных веществ, образующихся и накапливающихся во время работы ядерной установки и также являющихся источниками ядерного излучения. Реализация возможной опасности при нарушениях в работе ядерной установки имеет продолжительные последствия в виде долговременной опасности радиоактивных веществ. В соответствии с этим формируются две параллельные линии ядерной безопасности — защита от радиации и предотвращение возможной опасности. Первое направление наполняется содержанием вокруг нормативного понятия «радиационная безопасность», которое характеризует защиту человека и населения от радиации. Использование этого термина по отношению к ядерной установке обычно также характеризует достаточную защищенность человека от излучения, генерируемого данным объектом.

Второе направление исторически получило разное терминологическое оформление. По существу в ядерной установке первопричиной и источником опасности являются ядерные процессы, опасность в форме ядерного излучения, радиации, поэтому следовало бы обеспечение защиты от этой специфической опасности, ее предотвращение называть ядерной безопасностью, что сделано в английской терминологии (Nuclear Safety). В отечественной терминологии, сформировавшейся самостоятельно, исторически под ядерной безопасностью понималось предотвращение самопроизвольной неконтролируемой цепной реакции деления. Это было закреплено в названиях ведомственных и государственных контролирующих и надзорных органов, названных органами (комитетами) по ядерной безопасности и контролировавшими только невозможность самопроизвольной цепной реакции. На это были направлены правила ядерной безопасности (ПБЯ). Контролем излучения и защиты человека от радиации занимались другие структуры — санитарные органы, системы здравоохранения, формировавшие целенаправленную систему норм и правил защиты от радиации, санитарные правила, правила радиационной безопасности.

При формировании в стране единой системы норм и правил ядерной энергетики не разрушили сложившийся набор понятий и для характеристик безопасности ядерной установки стали использовать сочетание двух терминов: «ядерная и радиационная безопасность». Это порождало и порождает путаницу и нечеткость в понятиях как в назначении нормативных документов, так и в полномочиях органов надзора. В некоторых практических случаях вынуждены идти на дополнительные определения целевой направленности правил и разделения полномочий контролирующих органов. В частности, в санитарных правилах атомных электростанций регулируются и пределы облучения, и технические решения, которые определяют характеристики систем безопасности, контролируемые разными надзорными органами.

В сложившихся условиях в качестве центрального содержания понятия «ядерная безопасность» становится нейтрализация возможной опасности и представляется целесообразным применительно к ядерному объекту использовать термин «ядерная безопасность».

Обеспечение ядерной безопасности в предлагаемом понимании этого термина возможно лишь посредством нейтрализации всех видов технологических нарушений и тем самым всех разновидностей технологической опасности — технической (предотвращение разрушения конструкций и оборудования), пожарной (предотвращение и прекращение горения) и др. Подход к достижению цели должен быть в принципе системным, невозможно и недопустимо решать каждую задачу отдельно. Отсюда вытекает и недопустимость разделения областей регулирования и структуры надзорных органов.

Радиационная безопасность. Во всех эксплуатационных условиях она базируется на измеряемых показателях источников ядерного излучения и количественно обоснованной эффективности средств радиационной защиты, составляющих элементы конструкции и сооружений установки. Мерой приемлемости защитных мер является сопоставление уровней излучения в конкретных местах и конкретных условиях с допустимыми (безопасными) для человека.

Аналогичным образом ограничиваются эксплуатационными системами очистки от радиоактивных веществ газовые выбросы и жидкие сбросы, поступающие в окружающую среду. Ограниченные количественно измеряемые выходящие во вне радиоактивные вещества сопоставляются с их допустимой (безопасной) концентрацией во всех природных компонентах. Достигаемые на практике результаты в нормальных эксплуатационных условиях позволяют ядерным установкам, в первую очередь, атомным станциям претендовать на место наиболее экологически чистых источников энергии. Объективно существующей проблемой в этом направлении безопасности ядерной установки является ограниченное понимание механизма воздействия излучения на организм и связанная с ним возможная некорректность необходимых количественных допустимых уровней излучения и радиоактивного загрязнения. Этим по мере накопления новых знаний вызывается периодическое изменение нормативных ограничений. Консерватизм в установлении нормативных значений способствует обеспечению радиационной безопасности и оставляет возможность оптимизации технических решений по мере повышения достоверности медико-биологических знаний.

Потенциальная опасность. Безопасность ядерной установки по отношению к возможной опасности определяется эффективностью предотвращения аварийных ситуаций, в результате которых радиоактивные вещества могут выйти за границы устройств, в которых протекают управляемые ядерные процессы. Возможность и характер аварийных ситуаций определяются разными факторами, связанными с характеристиками и конструкцией установок, их обслуживанием, и в ограниченной степени поддаются целенаправленному управлению. В итоге предотвращение и ослабление опасности ядерной установки становится центральным содержанием обеспечения ядерной безопасности. Эта цель реализуется выбором принципиальных проектных решений, надежностью конструкции установки, условиями эксплуатации, ее оснащением специальными системами и устройствами безопасности, тщательным обслуживанием и контролем. Все эти элементы определяют также содержание и направленность специальных норм и требований ядерной безопасности.

Основные принципы и факторы, обеспечивающие достижение целей безопасности. Для эффективного осуществления каждой из сформулированных функций ядерной безопасности и, как следствие, нейтрализации возможной опасности декларируются два принципа с соответствующей расстановкой приоритетов:

принцип предотвращения аварий. В обеспечении безопасности первоочередное внимание уделяется предотвращению аварий, особенно аварий, которые могли бы привести к серьезному повреждению активной зоны;

принцип ослабления аварий. На станции и за ее пределами предусмотрены и разработаны меры ослабления, которые могут существенно уменьшить выход радиоактивных веществ и последствия аварийного выхода. Эта система мер и средств формирует процесс «управления авариями».

Отталкиваясь от названных принципов, обозначим факторы, влияющие на достижение целей ядерной безопасности. На вершине пирамиды этих факторов находятся нормативное регулирование и управление безопасностью, которое имеет две составляющие — управление технологическими процессами и структурами, обеспечивающими безопасное использование ядерной энергии и государственное регулирование ядерной безопасности. В предлагаемой статье в

некоторой степени затронуто управление ядерной энергетикой. Государственное регулирование ядерной безопасности и нормативное регулирование могут быть темой отдельного обсуждения. Далее следуют факторы, определяющие технологическую стратегию, обеспечивающую достижение целей безопасности.

Последовательная реализация принципов предотвращения аварий и ослабления их последствий формирует стратегию глубокоэшелонированной защиты. Она предусматривает наличие в ядерной установке нескольких последовательных барьеров на пути возможного распространения радиоактивных веществ, а также меры и средства для защиты барьеров, которые обеспечивают их эффективность и формируют последовательно несколько уровней защиты, ориентированных на выполнение каждой технической функции безопасности при возникновении и возможном развитии аварийной ситуации. Наиболее осязаема физическая многобарьерность — в конструкции ядерной энергетической установки есть последовательный ряд барьеров, удерживающих радионуклиды и в нормальных, и в аварийных условиях. Барьеры могут повреждаться лишь в результате развития и наложения аварийных условий. Вероятность такого развития событий тем меньше, чем больше физических барьеров теряют свою эффективность в ходе аварий.

Типичная структура защитных барьеров и уровней защиты четко представлена в действующих нормах и правилах, регламентирующих ядерную безопасность. С уровнями защиты увязаны требования к системам нормальной эксплуатации, специальным системам безопасности, обеспечивающим эффективное выполнение технических функций безопасности после нарушения нормальных условий, а также к средствам управления авариями.

Цель предлагаемой статьи — отталкиваясь от достаточно широко известных в среде специалистов положений, отметить важность учета и эффективной реализации всего набора обеспечивающих безопасность ядерной установки факторов, которые в значительной мере сконцентрированы в стратегии глубокоэшелонированной защиты. Опыт развития ядерной энергетике дает для этого серьезные основания. Прежде всего выделим две группы источников исходной опасности: внутренние опасности и возможные внешние воздействия.

Внутренние опасности. Они проявляются в возможности аварийных нарушений нормальной эксплуатации ядерной установки. Применительно к аварийным условиям необходимо нейтрализовать возможную опасность, которая выделена в качестве центрального содержания понятия «ядерная безопасность». Должна быть достигнута цель нейтрализации опасности распространения радиоактивных веществ во всех условиях нарушения нормальных условий эксплуатации и возможных аварийных. По всем звеньям основной технологический процесс должен быть достаточно устойчив к нарушениям в работе оборудования и другим отклонениям от нормы. При необходимости должны быть разработаны и реализованы средства, поддерживающие процесс в безопасных пределах. Разрабатывая меры, позволяющие поддерживать процесс в безопасных пределах в случае повреждения или других нарушений нормальной эксплуатации, решается направленность этих мер и определяется понятие «безопасный предел» по отношению к каждому конкретному нарушению. Безопасный предел развития нарушения может формироваться для достижения разных целей:

- полная нейтрализация нарушения и сохранение установки в работе;

- предотвращение развития нарушения и его перерастания в более опасное повреждение или аварию, что может сопровождаться выводом всей установки из работы;

- предотвращение опасного воздействия на эксплуатационный персонал;

- предотвращение опасного воздействия на население или загрязнения среды.

Очевидно, что при увеличении масштаба первичного нарушения техническая сложность и стоимость защитных мер возрастают и неизбежна тенденция перехода от мер, сохраняющих установку в работе, к направленным лишь на защиту населения.

Естественное распределение усилий и внимания разработчиков атомных станций, технология изготовления, возможности контроля и порядка эксплуатации оборудования приводят к тому, что вероятность повреждения уменьшается с увеличением его масштаба, а это означает, что экономически целесообразные меры обеспечения надежности атомных станций применительно к «большим» нарушениям перестают быть тождественными мерам обеспечения без-

опасности, т.е. защиты населения. Экономически нецелесообразно усложнять конструкцию и увеличивать стоимость станции в целях предотвращения возможного ее простоя из-за такого нарушения или повреждения, которое может не произойти за все время ее существования. Опасность для населения того же повреждения или нарушения определяется исходя из других критериев, и требования к защитным мерам с точки зрения безопасности могут оказаться другими. Однако даже при таком одностороннем назначении техническая сложность и стоимость защитных мер, безусловно, возрастают с увеличением масштаба нарушения. Практически это приводит к тому, что в каждом конкретном проекте атомной станции устанавливается предельное рассматриваемое нарушение, последствия которого могут быть надежно локализованы предусматриваемыми мерами, ограничивающими радиационное воздействие на население безопасным уровнем.

В настоящее время применительно к водоохлаждаемым реакторам максимальным проектным нарушением, последствия которого нейтрализуются предусмотренными в ядерной установке специальными средствами и системами безопасности, считается разрыв трубопровода максимального диаметра. Естественно, что при возникновении нарушения, превышающего по своим масштабам максимальную проектную аварию, предусмотренные защитные устройства могут оказаться недостаточно эффективными и последствия аварии выйдут за пределы, предусмотренные проектом. Процессы нейтрализации последствий специальными средствами безопасности как в рамках проектных аварий, так и аварий, выходящих за рамки проектных, — процессы управления авариями. Для эффективного управления запроектными авариями и возможными тяжелыми последствиями в конкретных ядерных установках могут предусматриваться специальные средства. Пример таких средств в корпусных водяных реакторах — ловушки расплавленной активной зоны. Целесообразность их сооружения или отказ от такого решения должны определяться убедительным анализом достаточной эффективности других путей управления авариями. Применительно к этому примеру — обоснованным надежным вводом тепла в границы корпуса реактора, предотвращающим его повреждение. Неопределенность в назначении «максимальной проек-

тной аварии» с точки зрения безопасности населения может быть компенсирована выбором площадки для атомной станции на достаточном расстоянии от больших популяций населения.

Следует отметить, что требования к характеристикам систем безопасности и управления авариями и их практическое исполнение определяются конкретными особенностями ядерной установки, формирующими ее исходную опасность. В иерархии ядерной безопасности уменьшение исходной опасности объекта присутствует как важная форма предотвращения аварий на первом уровне защиты, который обычно определяется как предотвращение опасных отклонений от нормальной эксплуатации. Цель уменьшения исходной опасности объекта достигается оптимальным выбором его конструкции, наличием необходимого комплекса свойств и характеристик. Свойства и характеристики объекта далее определяют возможную эффективность и стоимость защитных средств. В условиях неизменного повышения ожидаемого уровня безопасности (требований ядерной безопасности) и удорожания по этой причине мер безопасности и всей энергетической установки реальные успехи в движении к указанной цели становятся центральной задачей развития технологии. Происходившие аварии периодически обостряли значимость этого направления. Разработка новых энергетических установок для перспективного развития ядерной энергетики привела к активному развитию и практическому применению соответствующих технических решений. Охарактеризуем это направление как максимальное использование и развитие свойств внутренней самозащищенности (или внутренне присущей безопасности). К ним можно отнести такие группы технических свойств, решений и др.:

максимально возможное устранение и уменьшение опасных факторов (уменьшение запаса реактивности, снижение давления, температуры, химической активности теплоносителя, выбор соответствующих материалов, условий их работы, установление соответствующих запасов в эксплуатационных условиях и др.);

эффективные отрицательные обратные связи при отклонении процессов от нормы, обеспечивающие самогашение аварийных процессов;

использование естественных и саморегулируемых процессов, исключающих или умень-

шающих возможность исходных аварийных отказов, повреждений и др.;

максимально возможное повышение инерционности процессов, облегчающее и повышающее эффективность преодоления опасного развития событий, создающее дополнительные резервы времени для эффективного вмешательства оператора в процесс;

максимальное использование естественных процессов, самосрабатывающих устройств прямого действия и др. (непосредственно по режимному параметру или состоянию процесса и др.).

Аналогичным образом совершенствуются — повышается эффективность и надежность, удешевляются средства управления авариями в системах безопасности — максимально используются пассивные технические средства, т.е. средства, не требующие источников энергии или вспомогательных (инициирующих) механических устройств.

Взаимосвязь требований к задачам и характеристикам систем безопасности с внутренне присущими свойствами безопасности является основой для упрощения проектных решений и вследствие этого возможного удешевления ядерной установки. Важно, что требования к безопасности, эффективности предотвращения возможной опасности не снижаются, но достижение конечной цели опирается в большей мере на внутреннюю самозащищенность установки.

Своеобразно специфическим примером определения достаточной полноты нейтрализации факторов опасности можно назвать реакторную установку на расплавах солей делящихся материалов. В ней нет привычных для реакторов с твердым топливом двух первых барьеров. Кроме того, положительный вклад в повышение безопасности может внести непрерывное удаление из расплава радиоактивных продуктов деления. Наличие в исходном состоянии при рассматриваемой аварии расплавленной активной зоны должно быть компенсировано достаточно эффективными системами удержания рабочей среды и локализации последствий возможных аварийных событий. Необходима надежная доказательность практических решений.

Любой теплоноситель, используемый или предлагаемый к применению в реакторных установках, обладает своим набором опасных свойств. Это относится и к воде, и газу, и жид-

ким металлам — натрию, свинцу, свинцу—висмуту. Накоплены значительный опыт разработки и эксплуатации и доказательность нейтрализации факторов опасности воды и натрия, в существенно меньшей мере это относится к гелию и свинцу—висмуту и полностью отсутствуют по отношению к свинцовому теплоносителю. Декларируемое на стадии проекта отсутствие реактивных аварий и опасности потери теплоносителя из-за его низкого давления неизбежно должно подкрепляться опытом эксплуатации представительных экспериментальных устройств и освоением безопасной эксплуатации реакторных систем с жидким свинцом при высокой температуре.

Следует особо отметить, что последовательное осуществление стратегии глубокой изолированной защиты при создании ядерного энергоисточника должно быть основой обеспечения его безопасности при любом уровне использования внутренних свойств безопасности, уменьшающих исходную опасность объекта.

Следует выделить еще немаловажный аспект, который связан с внедрением в практику принципиально новых подходов, существенно изменяющих конструкцию или структуру систем ядерной установки. В принципах ядерной безопасности сформулирован важный принцип «использования апробированных решений», что подразумевает реализацию достаточно представительной формы такой апробации. Это в зависимости от характера и масштаба нового технического шага может быть представительное научное исследование или стендовое испытание, либо ресурсное испытание в условиях объекта. Степень новизны может требовать создания и эксплуатации установки (станции) — прототипа, призванного выявить скрытые проблемы нового решения и обосновать надежный переход к стадии промышленного внедрения.

Внешние воздействия. Цель защитить атомную станцию от внешних воздействий существовала и существует. К внешним воздействиям относятся как технические воздействия, так и природные. Критерии защищенности менялись. Изучались логически рациональные пределы защищенности в случае ядерного нападения. При этом сопоставлялись последствия ядерного взрыва и повреждения атомной станции. Изучалась роль заглубления среди других мер защиты. На уровень технических нормативных требований была выведена защищенность

от внешних технических событий: падения самолетов, внешних взрывов и др. Сейчас это направление углубляется формированием необходимой меры защиты от терроризма. В практике развития отечественной ядерной энергетики прорабатывались варианты и технология заглубленного размещения атомных станций теплоснабжения возле крупных городов. После аварии на Чернобыльской АЭС стремление строить атомные станции под землей приобрело поддержку у некоторых специалистов и особенно пропагандировалось специалистами, владеющими реальными технологиями возведения подземных сооружений для разных целей, в первую очередь, стратегических. Была активность и со стороны менее подготовленных, но весьма инициативных специалистов, в частности, горняков, предлагавших в разных вариантах использовать шахтные выработки. Последовательный анализ плюсов и минусов такого решения проблем безопасности АЭС, анализ эффективности нейтрализации факторов аварийной радиационной опасности не давал доказательности какой-либо целесообразности подобного решения для реальной ядерной энергетики, а не для отдельных энергоисточников, создаваемых для особых целей или по специфическим локальным критериям. Для решительного пересмотра развитой концепции безопасности нельзя было обойтись без создания и эксплуатации представительного объекта в подземном исполнении, в котором были бы решены все детали реализации декларируемых характеристик. Технологический приоритет оставался за усилением защищенности наземных сооружений.

В перечне природных воздействий рассматриваются все возможные факторы: климатические, землетрясения, наводнения, смерчи и др. В связи с аварией на японской АЭС «Фукусима» обострился вопрос об опасности внешних воздействий. При анализе развития аварии на АЭС «Фукусима» при мощном землетрясении, сопровождавшемся неординарным цунами, были выделены такие факторы тяжелого развития аварии:

несоответствующий выбранной площадке расположения АЭС учет внешнего воздействия (максимальная высота волны, неудачное расположение оборудования аварийного энергоснабжения);

недостатки аварийного планирования и системы управления аварией;

необеспеченность водородной безопасности на случай тяжелого развития аварий;

неэффективность государственного регулирования ядерной безопасности.

В мировой ядерной энергетике проявились две группы вопросов:

отступление от сформировавшейся к настоящему времени концепции ядерной безопасности и недостатки в проектах станций и системе обеспечения ядерной безопасности в стране. В каждой стране приняты меры по устранению или нейтрализации этих отступлений;

необходимость изменения или корректирования концепции ядерной безопасности. Международный анализ подтвердил необходимость последовательного осуществления общепризнанной концепции.

В плане повышения устойчивости АЭС к внешним воздействиям возрастание в современных условиях опасности терроризма дало основание к увеличению масштаба возможных воздействий от падения на ядерный объект самолета. Распространенный и обоснованный масштаб воздействия от падения самолета массой до 20 т в некоторых странах, планирующих развитие ядерной энергетики, был повышен, исходя из конкретных опасностей, до 400 т.

В группе опасностей внешних воздействий важным приоритетом в наборе положений глубокоэшелонированной защиты является фактор размещения ядерного объекта. Очевидна взаимосвязь проектных решений, обеспечивающих сохранность оборудования при внешних воздействиях и выбор площадки размещения.

Практический опыт. Для специалистов очевидно, что практический опыт — основная база как для формирования систем ядерной безопасности, включая ее законодательную и нормативную основу, так и для последующего совершенствования ее концепции и стратегии. На первом месте — опыт аварий. Особое место занимают тяжелые аварии. Первая — в 1979 г. на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США привела к разрушению активной зоны реактора, но основные принципы безопасности и проектные решения, препятствующие распространению радионуклидов за пределы станции, предотвратили человеческие жертвы и радиоактивное загрязнение местности. На основании этого опыта для предотвращения тяжелых аварий в будущем были разработаны и реализованы меры, направленные на лучший учет роли человеческого

фактора, использование вероятностных оценок безопасности, совершенствование систем безопасности и аварийного планирования. Вторая авария произошла в 1986 г. на Чернобыльской АЭС. Фактически это авария с максимальными возможными последствиями. Персоналу и аварийным командам удалось предотвратить ее распространение на три другие энергоблока АЭС. В результате погиб 31 человек, обширная территория подверглась радиоактивному загрязнению. Авария привела к повышенному числу заболеваний щитовидной железы и другим негативным последствиям для здоровья людей и оказала огромное психологическое влияние на общество.

Ядерное сообщество после извлечения уроков из этих аварий изменило подход к регулированию ядерной безопасности и проектированию АЭС, разработало принципы безопасности, внедрило в каждодневную практику фундаментальный принцип культуры безопасности. Был создан международный режим ядерной безопасности, опирающийся на Конвенцию о ядерной безопасности и другие международные соглашения. После аварии на Чернобыльской АЭС проявились важность фактора практического опыта и обмена информацией, роль структуры системы управления ядерной энергетикой, которая рассматривается как область высокой технологии, обладающая специфической опасностью.

Управление ядерной энергетикой. В момент аварии на 4-м блоке Чернобыльской АЭС все АЭС, кроме Ленинградской, были подконтрольны Минэнерго, Ленинградская АЭС управлялась как самостоятельный объект через систему Минсредмаша. В аварии на Чернобыльской АЭС отрицательные факторы проявились со стороны обоих управленческих структур: и Минэнерго, и Минсредмаша. Со стороны управленческих факторов Минэнерго в отрицательную сторону работали профессиональная ориентированность руководства станции (энергетики, не имевшие особого опыта в ядерной технологии), нацеленность на приоритеты хозяйственно-экономических целей (обширное хозяйство с объемным строительством новых энергоблоков), отдаление от организаций научной поддержки Минсредмаша и размывание специфики ядерной технологии в Союзатомэнерго, чрезмерная подчиненность требованиям энергосистемы и недостаточный внутриведомственный

контроль (практическое отсутствие ведомственного контроля ядерной безопасности в условиях, когда еще не сформировался в полном объеме вневедомственный государственный контроль ядерной безопасности).

В ряду отрицательных факторов, сработавших в этот период со стороны Минсредмаша, показательным стал один эпизод. После образования Госатомэнергонадзор предпринял усилия организовать межведомственную систему сбора и обработки данных об отказах, повреждениях и авариях на объектах ядерной энергетики (соответствующую базу данных) как основу накопления и обмена опытом эксплуатации и, самое главное, неудачным опытом эксплуатации, чтобы предотвратить повторение нежелательных и опасных событий на однотипных станциях. В межведомственном плане это было актуально, поскольку АЭС с РБМК эксплуатировались как в Минэнерго, так и в Минсредмаше. На Ленинградской АЭС с 1973 г. был накоплен значительный опыт, произошли аварии, уроки этих событий важно было использовать на других станциях. Среди аварий были серьезные, одна из них с сильной деформацией поля энерговыделения и повреждениями («пережогом») ТВС и каналов. Авария показала недостатки активной зоны РБМК и системы управления, что сделало необходимыми модернизацию системы управления и защиты реактора (усовершенствование локального регулирования и введение локальной аварийной защиты, изменение регламента пуска и др.) и улучшение физических характеристик активной зоны (изменение коэффициентов реактивности и повышение устойчивости нейтронного поля) путем увеличения обогащения топлива с 1,8 до 2%. Эта авария и ее причины были названы в последующей терминологии группы ИНСАГ МАГАТЭ «предшественниками аварии на Чернобыльской АЭС», которые особенно важны в плане использования опыта эксплуатации. Разработанная межведомственная система обмена опытом была заблокирована организацией главного конструктора, исходя из невозможности передачи в другое ведомство закрытых сведений о повреждениях и авариях, которые формально действительно считались секретными или закрытыми. Руководство Минсредмаша, согласовавшее создание этой системы обмена, не смогло или не посчитало важным преодолеть возражения. В результате межведомственный обмен опытом проходил

сложный путь через посредников-разработчиков проекта и фильтрацию характера передаваемой информации, как правило, в форме итоговых решений по изменению проекта или рекомендаций по эксплуатации. Результатом явилось слабое понимание эксплуатационным персоналом Чернобыльской АЭС важных характеристик реакторной установки, что и явилось одной из главных причин допущенных ими нарушений правил эксплуатации станции перед аварией. Об имевших место событиях на Ленинградской АЭС многие специалисты ядерной энергетики с удивлением узнавали после аварии на Чернобыльской АЭС.

В процессе ликвидации последствий аварии стало очевидно, что основной потенциал технологий, квалификации кадров, технических средств и другого, потребовавшегося в этот критический период, находится в Минсредмаше, а министерство, эксплуатирующее атомные станции, им владеет в очень малой степени.

«Человеческий фактор». Уже из опыта аварии в США были выявлены две проблемы, заслуживающие внимания:

процессы при маловероятных тяжелых авариях, разработка технических средств для ослабления их последствий, аварийное планирование;

подготовка, квалификация эксплуатационного персонала и условия управления энергоблоком.

Вторая из названных проблем — проблема человеческого фактора. И на АЭС «Три-Майл-Айленд», и на Чернобыльской АЭС действия эксплуатационного персонала оказались решающими в негативном развитии событий. Проявились неправильное понимание происходящих процессов, безответственность, недостаточность или непредставительность информации о состоянии оборудования. Стало очевидно, что это — то звено в системе, дефект в котором может сделать неэффективными сразу несколько барьеров безопасности. Вместе с тем квалифицированные действия специалистов позволили выйти из кризисной ситуации в неожиданных и непредсказуемых условиях. Поэтому человек должен рассматриваться одновременно и как один из главных факторов (гарант) обеспечения безопасности. В результате для создания безопасных условий оказываются важными уровень первичной подготовки и практика переподготовки персонала, противоаварийные трени-

ровки, готовность к управлению аварией и ликвидации ее последствий, техническая база подготовки и тренировки персонала — полномасштабные и целевые тренажеры, учебные центры, полноценная система поддержки оператора, опирающаяся на математическое моделирование эксплуатационных и аварийных режимов и достаточно мощную вычислительную технику. В техническом обеспечении на отечественных АЭС процесс шел с существенным отставанием от зарубежных партнеров.

Глубокое понимание важности человеческого фактора для безопасности ядерной энергетики привело к формулировке понятия «культура безопасности». При международном изучении аварии на Чернобыльской АЭС была сформулирована ее обобщенная причина: отсутствие культуры безопасности. Последующие годы были целенаправленно посвящены устранению дефицита культуры на всех этапах создания и эксплуатации атомных станций и у всех причастных к ядерной энергетике. В этом процессе достигнут очевидный успех. Следует обратить внимание на определенный дефицит такого фактора безопасности в органах государственного управления и власти, определяющих формы управления безопасностью.

Новые концепции ядерной безопасности.

За шесть десятилетий ядерной энергетики сформировалась устойчивая концепция ее безопасности, опирающаяся на изложенную в статье стратегию и нормативно-правовую базу. В то же время при рассмотрении будущего развития иногда предлагаются новые концепции, преподносимые как принципиально новые. Их внимательное рассмотрение позволяет констатировать, что все они (если оставить в стороне минимизацию радиоактивных отходов) сводятся к формированию конкретных (качественных и количественных) требований к конструкции и проектным решениям ядерно-энергетической установки, в которой должны быть реализованы в приемлемой степени свойства внутренне присущей безопасности, самозащищенности. В конечном счете, формулирование конкретных технических требований направлено на выбор таких конструкций и свойств, которые бы максимально возможным образом повышали надежность выполнения функций ограничения мощности, обеспечения теплоотвода и сохранения теплоносителя, удержания радиоактивных веществ, длительного отвода тепла. Важным

системным требованием к объектам развивающейся ядерной энергетики является обеспечение такого уровня безопасности, который исключал бы какие-либо дополнительные ограничения по их размещению по сравнению с объектами других энергетических технологий. Все это позволяет констатировать, что в целом направленность конкретных действий при создании установки для перспективной ядерной энергетики по своему содержанию не выходит за рамки сформулированной концепции ядерной безопасности.

Тем не менее по отношению к новым концепциям нечеткость в понятиях и неправомерность их применения создают основу для ложного понимания предлагаемых технических решений и дезинформации относительно их ожидаемой эффективности. К ним относятся такие понятия, как «естественная безопасность». В рамках «новой концепции» использование в установке конкретных, объективно «естественных» процессов в качестве базы формирования ее безопасности преподносится как общая характеристика результата — «естественная безопасность», что воспринимается неспециалистами и многими специалистами как «абсолютная безопасность». Может ли быть абсолютная безопасность? Естественный ожидаемый ответ, что нет. Такое понятие в научно-технической сфере недопустимо. Из положений новой концепции следует выделить тезис о переходе с вероятностного принципа обеспечения безопасности на детерминистический. Этот тезис является развитием тезиса о реакторах «естественной» безопасности. В конструкции и характеристиках реакторов, созданных на базе принципа детерминированной безопасности, якобы отсутствуют полностью опасные факторы. Использование в практике вероятностного метода для оценки результата последовательного применения всех предусмотренных уровней защиты установки в целях обеспечения ее безопасности преподносится критиками действующей концепции как вероятностная концепция, отличающаяся от детерминистической. Использование понятия «детерминированная» в качестве характеристики безопасности воспринимается как предопределенная и потому не требующая других действий и мер. Подобные понятия, как и естественная безопасность в качестве характеристики подходов и принципов обеспече-

ния ядерной безопасности и обозначения конечного свойства системы (безопасность), представляются лозунговыми по форме, рекламными по назначению и демагогическими по существу. Переход от широковещательных положений об изменении концепции к практическим действиям сводится к конкретным техническим предложениям и проектно-конструкторским решениям, эффективность которых в любом случае требует обоснований и доказательств.

Развитие ядерной энергетики как отрасли и конкретных технологий требует новых решений. При стратегическом планировании следует иметь в виду, что создание принципиально новых установок до их массового внедрения должно пройти этапы доказательства технической осуществимости (демонстрационные установки) и подтверждения потребительской приемлемости (опытно-промышленные установки). Сложность технологии и дороговизна разработок в некоторых случаях делают необходимой международную кооперацию для реализации новых решений в целесообразные сроки. Международный характер ядерной энергетики, в первую очередь, по фактору ядерной безопасности и наличие мирового рынка этой технологии диктуют неизбежность международной координации новых решений.

Заключение. Дальнейшее развитие ядерной энергетики требует устойчивого положительного отношения к этой технологии с пониманием и признанием ее безопасности. Убедительные гарантии безопасности — центральная проблема признания обществом ядерной технологии. Следует признать, что специфические факторы опасности сдерживают ожидание коренного перелома в общественном отношении к ядерной энергетике, хотя количественно процесс признания неуклонно идет. Нет оснований ожидать в близком будущем социальной приемлемости возможного ущерба от этой технологии на таком уровне, который общество считает приемлемым для широко применяемых технологий. Этот тезис можно рассматривать как основной мотив, определяющий неизбежность постоянных усилий в обеспечении безопасности применения рассматриваемой энергетической технологии. Важным условием для общественных гарантий безопасности ядерной энергетики является полнота эффективной реализации всех факторов, обеспечивающих ядерную безопасность.