

7 моль/кг наблюдается характерное плато, что, по-видимому, связано с особенностями формирования соединений данного фазового состава. На рис. 6, б показана структурная схема устройства, позволяющего реализовать акустический метод контроля количества вещества, внедренного в пирографит. Образец пирографита помещается между звукопроводами и ориентируется так, что ось С графита совпадает с продольной осью звукопроводов. Генератор радиоимпульсов вырабатывает электрические импульсы, поступающие на пьезоизлучатель, который преобразует их в акустические. Пройдя через первый звукопровод, образец и второй звукопровод, акустические импульсы поступают на вход приемно-усилительного блока, проводящего селекцию по времени и усиление полезных акустических импульсов, т.е. импульсов, прошедших через образец. Работой приемно-усилительного блока управляет блок, который вырабатывает импульсы, по длительности немного больше излучаемых и задержанные на время прохождения акустических импульсов через звукопроводы и образец. Усиленные электрические импульсы поступают на один из входов блока контроля, на его второй вход поступают импульсы с генератора, задержанные на время прохождения акустического импульса через звукопроводы. В блоке контроля измеряется время задержки акустических импульсов через образец, по которому и определяется скорость звука.

Применение акустического метода контроля количества сорбируемого вещества в действующих конструкциях детекторов требует высокой точности сопряжения контактирующих поверхностей звукопроводов и исследуемого материала, а также сложной электрической схемы измерения.

Авторы выражают глубокую благодарность Н.Н. Пономареву-Степному за постановку задачи и полезные обсуждения результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каландаришвили А.Г. Источники рабочего тела для термоэмиссионных преобразователей энергии. М.: Энергоатомиздат, 1993. 304 с.
2. Каландаришвили А.Г., Кучухидзе В.А., Сордия Т.Д. и др. Детекторы щелочных металлов на основе графита для ЯЭУ. — Атомная энергия, 1992, т. 73, вып. 5, с. 402—404.
3. Антипов В.В., Зайончковский В.А., Каландаришвили А.Г. и др. Исследование средств контроля эксплуатационной герметичности жидкометаллического контура ЯЭУ. — Там же, 1993, вып. 3, с. 184—188.
4. Гвердцители И.Г., Каландаришвили А.Г., Зайцев В.П., Шартава Ш.Ш. Электросопротивление интеркалированных соединений пиролитического графита с цезием. — Журн. техн. физики, 1981, т. 55, вып. 1, с. 164—167.
5. Каландаришвили А.Г., Клубин В.А., Ковалев Е.А. и др. Устройство для автоматического управления процессом получения слоистых соединений графита. Авт. свид. СССР № 1009013. — Открытия. Изобретения, 1985, № 7.

Поступила в Редакцию 10.11.98

УДК 621.039.58

О КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Сидоренко В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Необходимость особого внимания к безопасности новой ядерно-энергетической технологии определялась специфическими, присущими ей факторами: образованием радиоактивных веществ, возникновением ионизирующего излучения и возможностью большого разового энерговыделения, граничащего со взрывом. Понимание этого безусловно базировалось на том, что технология прямо примыкала к ядерному оружию и была рождена как естественное развитие оружейных работ.

ФОРМИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ

Попытаемся охарактеризовать то, что сегодня можно назвать концепцией безопасности, и лишь кратко остановимся на этапах, которые прошло это формирование.

Диктуемый упомянутыми факторами процесс шел сходным образом во всех странах, начавших осваивать ядерную технологию, вырабатывался и некоторый общепринятый международный подход, процесс в нашей стране нередко отставал, а иногда и опережал устанавливающиеся тенденции ядерной безопасности.

На начальном этапе особое целевое внимание в отечественной атомной промышленности уделяли двум направлениям, формирующим безопасность:

специальное техническое нормирование, базирующееся на повышенных требованиях к качеству и освоению новой технологии и имеющее конечную цель достижения высокого уровня надежности. При этом можно было говорить о повышении показателей качества и надежности во много раз по сравнению, например, с традиционной теплоэнергетикой;

формирование радиационных норм и правил, специальной практики обращения с радиационно опасными процессами и веществами.

Третье направление оказалось самостоятельным этапом — создание иерархии норм и правил, подчиненных единой цели и формирующих систему безопасности.

Все эти направления отражают международную практику, формировавшуюся в данной области, с той существенной разницей, что в зарубежной практике создание единой системы и иерархии требований шло параллельно или опережало развитие двух первых направлений (техническое и радиационное нормирование). Как правило, в зарубежной практике процесс начинался с создания законодательной базы безопасного применения атомной энергии. В первую очередь это диктовалось необходимостью государственного регулирования любых взаимоотношений и процессов, связанных или смежных с созданием ядерного оружия, но затрагивающих любую деятельность, направленную на мирное использование атомной энергии. В отечественной практике осознание необходимости специального закона об использовании атомной энергии и начало работы над таким законом оказалось содержанием заключительных этапов формирования общей концепции ядерной безопасности. Началась эта работа в рамках Советского Союза (еще до аварии на Чернобыльской АЭС) и завершилась лишь в Российской Федерации.

Заключительные этапы содержали еще два важных элемента:

участие в интенсивном процессе обобщения международного подхода к безопасности ядерной энергетики после аварии на Чернобыльской АЭС. Следует обратить внимание на то, что первый этап интенсивных международных усилий по развитию концепции безопасности после аварии на американской АЭС «Три-Майл-Айленд» лишь в малой степени проявился в соответствующих действиях в отечественной атомной отрасли. Послечернобыльские международные усилия обобщены МАГАТЭ в серии документов Международной консультативной группы по ядерной безопасности (ИНСАГ), сформулировавшей основные общепризнаваемые принципы ядерной безопасности атомных станций. С ориентацией на эти положения были уточнены базовые нормативные документы в отечественной концепции;

присоединение к международной Конвенции по ядерной безопасности.

Последние два этапа по существу зафиксировали базовые элементы международной концепции безопасности атомных станций. Их дополняют разрабатываемые документы и соглашения по обращению с радиоактивными отходами.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ)

Следует прежде всего зафиксировать конечную цель концепции и одновременно содержание (определение) безопасности: «защитить отдельных лиц, общество и окружающую среду путем создания и поддержания на атомной электростанции эффективных защитных мер от радиологической опасности»; при этом «обеспечить, чтобы

при нормальной эксплуатации дозы облучения на станции и в результате любого выброса радиоактивного материала со станции находились на разумно достижимом низком уровне и ниже установленных пределов, и обеспечить уменьшение дозы облучения в результате аварий».

Допустимые пределы устанавливаются законодательным путем каждым государством на основе рекомендаций, вырабатываемых на международном уровне.

Возвращаясь к основным характеристикам современной концепции ядерной безопасности, следует выделить один важный элемент — обязательное наличие законодательного уровня в системе обеспечения безопасности. Законодательная база не может рассматриваться как некоторый самостоятельный независимый элемент всей деятельности в области использования атомной энергии, ее наличие представляет собой неперенный и важный элемент концепции ядерной безопасности. Возможно, в других видах технологии это может не иметь столь принципиального значения, но специфика атомной энергии диктует именно такое место закона. По этой причине на уровень закона вынесены некоторые конкретные положения, являющиеся основой концепции.

Законодательный уровень в пирамиде концепции ядерной безопасности формируется:

- наличием федерального закона об использовании атомной энергии, регулирующего обязательный характер взаимоотношений всех его участников, и законов, детализирующих положения базового закона, в частности, законодательства, регулирующего ответственность за ядерный ущерб;

- системой федеральных норм и правил по использованию атомной энергии;

- наличием государственной разрешительной системы в соответствующих областях деятельности.

Нелишне еще раз отметить, что это элементы концепции ядерной безопасности, а не просто элементы государственного устройства, административного управления и др.

Федеральный уровень основных норм и правил по использованию атомной энергии обеспечивается их подтягиванием под уровень закона участием правительства в формировании системы нормативов. Это учитывает сложившуюся в стране структуру правовой и юридической системы. В некоторых зарубежных странах действующая юридическая процедура непосредственно вводит аналогичные нормы и правила в ранг законов.

Необходимость специальной разрешительной системы в этой области отношений заменяет популярный демократический принцип «разрешено все, что специально не запрещено» противоположным — «запрещено все, что специально не разрешено».

В области использования атомной энергии введен принцип каналирования (концентрации) ответственности на эксплуатирующей организации. Этот общепризнанный и применяемый в мировой практике принцип имеет особенности и проблемы, определяемые законодательством страны, деталями организации и управления промышленностью и др.

Управление в нашей стране объектами государственной собственности на правах хозяйственного ведения формирует иную правовую основу деятельности эксплуатирующей организации, чем в странах, где обязательным условием производственной деятельности любого предприятия (и атомного в том числе) является наличие частного собственника. Имеются страны с некоторыми промежуточными или смешанными системами, но принцип концентрации ответственности на эксплуатирующей организации проводится по возможности до конца.

Государственное управление использованием атомной энергии в нашей стране и существование атомных станций в форме государственных предприятий требуют постоянного внимания к выбору оптимального правового статуса и рамок хозяйственной деятельности эксплуатирующих организаций, обеспечивающих наилучший результат в безопасности этих объектов.

Независимо от форм собственности на объекты атомной энергии одним из центральных элементов концепции их безопасности является независимое государственное регулирование безопасности, включающее формулирование требований и нормативной базы, а также государственный надзор за выполнением требований и осуществление процедур, предусмотренных разрешительной системой (в том числе лицензирование деятельности). Подразумевается обязательная независимость регулирующего органа от пользователей атомной энергии. Более четко такая система государственного регулирования безопасности строится и функционирует в странах и системах (или отраслях использования атомной энергии), где имеется четкое разделение полномочий пользователя (собственника) и государства. Некоторые проблемы (и специальные административные формы) возникают, когда государство является собственником ядерного объекта. Прежде всего это проявляется в военных областях.

В наших условиях вся область ядерного оружия вообще выпадает из сферы действия закона об использовании атомной энергии, а для государственного надзора за безопасностью ядерных объектов оборонного назначения формируются специальные органы за пределами общей системы. Тем не менее даже в области гражданской деятельности наличие, главным образом, государственной собственности на объекты атомной энергии и соответственно государственного управления ими создает сложности и требует специального внимания в реализации обязанностей государства по управлению и в государственном регулировании безопасности использования атомной энергии. Детальный анализ этих проблем и поиск оптимальных решений составляют особый предмет.

Концентрация ответственности на эксплуатирующей организации дополняется системой финансовой ответственности за ядерный ущерб. Возможности эксплуатирующей организации возместить возможный ущерб от радиационной аварии обеспечиваются системой установленных законом страховок, а также гарантиями государства. Государство становится субъектом финансовой ответственности при превышении определенного установленного уровня ущерба (предельного уровня ответственности эксплуатирующей организации). При наличии трансграничного ущерба вступают в силу международные соглашения. Наша страна присоединилась к Венской конвенции о гражданской ответственности за ядерный ущерб; к сожалению, этот факт еще не ратифицирован парламентом.

В последние годы сформулирована культура безопасности как самостоятельный и важный элемент концепции безопасности. Культура безопасности — это неперемнная расстановка приоритетов в деятельности каждого находящегося в сфере использования атомной энергии. Обеспечение безопасности — это первый приоритет при принятии любых решений, отборе и расстановке людей, формировании мотивов их поведения и понимания влияния любых действий на безопасность.

Культура безопасности — это важное наполнение человеческого фактора в безопасности. Человек может быть причиной опасных событий и богатым источником стабилизирующих действий и мер. Культура безопасности призвана устранять первое и обеспечивать проявление второго.

Культура безопасности — это прежде всего психологическая категория, но она имеет совершенно конкретные проявления в сфере как организации и управления, так и технической реализации, эксплуатации и обслуживания опасных объектов. Если попытаться сформулировать центральную причину крупнейшей катастрофы в ядерной энергетике — аварии на Чернобыльской АЭС, — можно уверенно назвать недостаток культуры безопасности, проявившийся во всех элементах и всех этапах, подготовивших и реализовавших это событие. В большой мере это же относится и к другой крупной аварии на американской АЭС «Три-Майл-Айленд».

Все, что было сформулировано относительно концепции безопасности, составляет ее организационный блок. Культура безопасности является некоторым связующим звеном всей концепции, присущим и организационному, и техническому (технологическому) блоку, который рассматривается ниже.

Многokратность барьеров против возможного распространения радиоактивных веществ. Этот принцип построения систем безопасности реализуется естественным образом при создании опасного объекта вследствие многообразия условий образования и существования (эксплуатационных условий) радиоактивных веществ, разнообразия возможных их форм и многообразия процессов, в ходе которых эти вещества могут мигрировать к месту вредного воздействия. Для наиболее распространенных ядерных реакторов констатируются следующие барьеры для осколков деления ядерного топлива: матрица, оболочка твэла, стенки оборудования контура циркуляции теплоносителя, защитное ограждение помещений реакторного оборудования, санитарно-защитная зона вокруг объекта, зона реализации противоаварийных мероприятий.

Защита барьеров. Для эффективного выполнения своих функций защитные барьеры должны быть устойчивыми (т.е. защищенными) в различных состояниях и при различном развитии процессов, происходящих в ядерной установке, и при разных внешних воздействиях.

Необходимость защиты в разных состояниях формирует набор эксплуатационных систем, выполняющих эти задачи: системы нормальной эксплуатации, аварийные системы (специальные системы безопасности). Возможное различие самих состояний (параметров среды, целостности конструкций и т.п.) формирует критерии выполнения функций защиты и различные цели защитных систем и устройств. В результате формируется иерархия последовательных средств защиты в соответствии с нарастающей тяжестью состояний (переход от нормального состояния за пределы безопасной эксплуатации и затем в аварийное состояние с дальнейшим нарастанием необратимости процесса и тяжести последствий), действующих в предположении неэффективности предшествующих защитных средств. Во всей системе защитных средств обеспечивается единство конечной цели: предотвратить или минимизировать распространение радиоактивных веществ и радиационный ущерб. Некоторые виды внешних воздействий формируют дополнительную систему защитных средств, определяемых особенностями возможного воздействия (падение самолетов, внешние взрывы, природные явления).

Последовательность реализации целей защиты формирует систему ее уровней: предотвращение повреждений, предотвращение перехода повреждения в аварию, ограничение масштаба возможных последствий.

Предотвращение аварий. Анализ возможной опасности ядерно-энергетической установки и опыт показывают, что фактическая опасность (как для населения, так и для персонала) реализуется при аварии, под которой понимается нарушение нормальной эксплуатации со значительными радиационными последствиями. Поэтому предотвращение аварий является приоритетной целью концепции.

Конечная цель концепции ядерной безопасности (устранение радиационной опасности) трансформируется в результате в техническую цель безопасности (ИНСАГ-3): «Предотвратить с высокой достоверностью аварии на атомных станциях, обеспечить, чтобы для всех аварий, учитываемых в проекте станции, даже для тех, вероятность которых крайне мала, радиологические последствия были бы малы или отсутствовали, и обеспечить, чтобы вероятность больших радиологических последствий тяжелых аварий была чрезвычайно мала». В общепризнанных принципах и нормативных документах в системе уровней защиты первые три уровня направлены на предотвращение нарушений нормальной эксплуатации, проектных аварий системами нормальной эксплуатации, запроектных аварий системами безопасности.

Первый уровень был основным предметом внимания на начальных стадиях формирования концепции безопасности. К нему следует отнести такие факторы:

выбор площадки, пригодной для размещения ядерной установки, на которой бы минимизировалась возможность аварии по внешним причинам, при этом учитывается как вероятность, так и масштаб возможных внешних воздействий и природного, и техногенного характера;

разработка проекта на основе консервативного подхода (техническая деятельность, осуществляемая на атомной электростанции, основывается на инженерно-технической практике, апробированной научными исследованиями, проверенной испытаниями и опытом);

максимальное использование и развитие свойств внутренней самозащищенности ядерно-энергетической установки;

обеспечение требуемого качества систем и элементов установки и выполняемых работ. От привычной для прошлой отечественной практики системы контроля качества перешли к развитой в современной международной практике системе обеспечения качества с иерархией программ обеспечения качества, что формирует четкую организационную основу управления качеством и гарантии качества;

эксплуатация в соответствии с требованиями нормативных документов, в которых отражена инженерно-техническая практика, проверенная опытом, технологических регламентов и инструкций;

поддержание в исправном состоянии систем и элементов, важных для безопасности, путем широкого внедрения систем диагностики дефектов и повреждений, принятия профилактических мер, замены выработавшего ресурс оборудования, организация эффективно действующей системы документирования результатов работ и контроля;

подбор и обеспечение необходимого уровня квалификации персонала для действий при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая предаварийные и аварийные ситуации, формирование культуры безопасности.

Все эти факторы безусловно важны и реализуются применительно к любой сложной и опасной технологии, но в ядерной технике они получили особое внимание и развитие и во многих случаях инициировали успехи в соответствующих направлениях.

Следует еще раз отметить значение культуры безопасности на стадии как создания установки, так и эксплуатации.

Следующие два уровня предотвращения связаны со средствами предотвращения перехода нарушения в аварию, в которой уже происходит прорыв защитных барьеров, и средствами и мерами нейтрализации произошедших аварийных событий, классифицируемых как возможные. На втором уровне действуют прежде всего системы диагностики событий и системы управления.

Технические средства третьего уровня формируют проектную базу систем безопасности, структура и эффективность которых позволяет остановить опасное развитие аварийного процесса. Достижение этой цели обеспечивается тщательным анализом возможных процессов и нормируемыми канонами в техническом исполнении таких систем: резервирование систем и элементов, устранение и учет общих причин отказов, упрощение устройств и средств управления, проверяемость функционирования систем и устойчивость (нечувствительность) к ошибкам при управлении ими.

Поскольку ожидаемые и рассматриваемые исходные события формируют проектную базу систем безопасности, их традиционно называют проектными авариями. В соответствии с этой терминологией соответствующие системы безопасности предотвращают перерастание проектных аварий в запроектные. При переходе от определенности ожидаемых (и учитываемых) событий к неопределенности развития их последствий изменяется характер требований к логике действия и эффективности систем безопасности: от безусловного выполнения определенных функций (для систем безопасности, ориентированных на проектные аварии) до возможности изменить процесс в благоприятную сторону в условиях неопределенности процесса. При выборе этой границы имеет значение уровень ожидаемой вероятности события и его сопоставление с допустимым риском ущерба. В равной степени это относится к маловероятным исходным (первичным) аварийным событиям (например, разрывы сосудов, которые изготавливаются в соответствии с самыми высокими требованиями по качеству и надежности) и столь же маловероятным внешним воздействиям, их нейтрализация разумными техническими средствами не представляется возможной, но возможно уменьшение негативных последствий.

В предшествующей практике формирование систем безопасности было ориентировано только на эффективную нейтрализацию заранее взвешенных и нормативно зафиксированных предельных событий, обозначенных как проектные аварии, что давало основание такой подход квалифицировать как детерминистский. Переход к сегодняшней практике (после тяжелых аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд» и Чернобыльской) включает в сферу технических мер нейтрализации и класс менее вероятных, но тем не менее качественно критических ситуаций (возможных или мыслимых сценариев развития аварий). Однако характер таких мер и технических устройств и целевые требования к их эффективности ближе находятся к звену «управление запроектными авариями», т.е. к уменьшению их последствий.

В этом развитии практики безопасности большое значение получил вероятностный метод оценки событий и процессов непосредственно в процессе проектирования, что дало повод назвать такой подход вероятностным. Наличие объективно слабых мест и высокая неопределенность результатов вероятностного анализа не позволяют ему занять основное место в формировании критериев и нормативной базы обоснования безопасности. Общеизвестная практика базируется на сочетании детерминистского и вероятностного подхода, где вероятностным методам отводится вспомогательная и аналитическая роль. Следует обратить внимание на то, что методически вероятностный подход в анализе безопасности был развит еще до аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд». Практическая роль количественных вероятностных анализов при реализации концепции безопасности состоит в ранжировке исходных событий и внешних воздействий и формировании проектной базы (перечня проектных аварий), формировании надежности всей цепочки технических решений (выявлении слабых мест, балансе показателей надежности и безопасности) и оценке уровней остаточного риска, сопоставлении уровня радиационного риска с финансовым и его приемлемым значением.

Уменьшение последствий — управление авариями. Часть систем безопасности, создаваемых в рамках проектной базы, направлена на ослабление последствий аварий, которые не удалось предотвратить. Задача этой группы систем безопасности — локализовать выделяющиеся радиоактивные вещества. Тем самым третий уровень защиты имеет двоякую направленность: предотвращение и ослабление.

Характер действий, которые предпринимаются для ослабления последствий на этом уровне, определяется понятием «управление авариями», в данном случае управление проектными авариями.

Логика последовательной цепи предположений о возможной неэффективности предшествующих защитных мер и средств приводит к понятию запроектных аварий и вводит четвертый уровень защиты: управление запроектными авариями. Задачей этого уровня является предотвращение развития запроектных аварий и ослабление их последствий. Конечная цель — вернуть атомную станцию в контролируемое состояние, при котором прекращена цепная реакция деления, постоянно охлаждается ядерное топливо и радиоактивные вещества удерживаются в определенных границах. Технические меры состоят прежде всего в защите герметичных ограждений установки от разрушения и поддержании их работоспособности, когда аварийный процесс выйдет за рамки проектной базы. К пятому уровню защиты относятся противоаварийные меры на промышленной площадке и за ее пределами.

Последовательное введение управления запроектными авариями в концепцию безопасности произошло после осмысливания аварии на «Три-Майл-Айленд» и затем на Чернобыльской АЭС. Развитие концепции в ее применении к станциям новых поколений, от которых ожидают демонстрации качественно нового уровня безопасности, привело к созданию и внедрению технических мер и средств, специально ориентированных на управление запроектным развитием аварии, тем самым происходит введение этих средств в проектную базу (характерным примером является введение в проект устройств по удержанию и охлаждению расплавленной активной зоны и т.п.).

Подобное наращивание элементов безопасности создает основу усложнения и удорожания станции и тем самым снижает конкурентоспособность ядерных энергоисточников в сравнении с традиционными на органическом топливе. Нейтрализация этого процесса происходит за счет усиления значения и эффективности других элементов безопасности.

Одним из основных индикаторов эффективности тех или иных элементов концепции ядерной безопасности является их восприятие общественным мнением, которое ждет гарантий безопасности этой энергетической технологии. В любых обоснованиях безопасности и взаимодействии с общественным мнением должно четко присутствовать признание невозможности абсолютной безопасности (и тем самым недопустимость использования такого понятия). Количественные характеристики типа малой вероятности ущерба помимо объективно существующей их неопределенности не воспринимаются общественным мнением в качестве убедительных аргументов. Практика последнего десятилетия показала, что наиболее убедительной является демонстрация того, что техническое устройство системы, возможности участвующих в технологическом процессе людей (оператора) позволяют повлиять на любую ситуацию (от нормальной до предельной), чтобы свести ее к приемлемому уровню. Этот завершающий фактор может быть назван управляемостью безопасности.

При методической и терминологической систематизации всех элементов технологической части концепции ядерной безопасности система защитных барьеров и уровней защиты формирует комплексную концепцию глубокоэшелонированной защиты. Ее практическая реализация всегда оставляет возможности эффективного взаимного дополнения отдельных элементов концепции и перераспределения их роли в достижении конечной цели, оставляя приоритет средств предотвращения нарушений нормальной эксплуатации, проектных аварий системами нормальной эксплуатации и за проектной аварии системами безопасности. Повышение эффективности методов предотвращения существенно влияет на структуру проекта, что особенно заметно в предлагаемых проектных решениях перспективных установок новых поколений. Однако остается обязательное присутствие всех перечисленных элементов как проявление преемственности и устойчивости развития технологии.

УМЕНЬШЕНИЕ ИСХОДНОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА

Подчеркивая важность системного фактора в практическом обеспечении безопасности ядерно-энергетических установок, следует на особое место в системе поставить цель уменьшения исходной опасности объекта, что 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 (требований) безопасности и удорожания по этой причине мер безопасности и всей энергетической установки реальные успехи в движении к указанной цели становятся центральной задачей развития технологии.

Аварии периодически обостряли значимость этого направления усовершенствований, проработка новых энергетических установок для перспективного развития ядерной энергетики привела к активному развитию и практическому применению соответствующих технических решений.

В иерархии системного подхода эта цель (уменьшение исходной опасности объекта) присутствует как важнейшая форма предотвращения аварий на первом уровне защиты. Мы ее охарактеризовали как максимальное использование и развитие свойств внутренней самозащищенности. Сюда можно отнести такие группы технических свойств, решений и т.п.:

максимально возможное устранение и уменьшение опасных факторов — уменьшение запаса реактивности, снижение давления, температуры, химической активности

(или соответствующего выбора) теплоносителя, выбор соответствующих материалов, условий их работы, 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 уменьшающих 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.

Аналогичным образом совершенствуются (повышается эффективность и надежность, удешевляются) средства управления авариями;

максимальное использование пассивных технических средств, т.е. средств, не требующих источников энергии или вспомогательных (инициирующих) механических устройств;

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

Следует выделить один немаловажный аспект, который связан с внедрением в практику принципиально новых подходов, существенно меняющих конструкцию или структуру систем ядерной установки. Принцип использования апробированных решений подразумевает реализацию достаточно представительной формы такой апробации. Это в зависимости от характера и масштаба нового технического шага может быть и представительное научное исследование либо стендовое испытание изделия, либо ресурсное испытание в условиях объекта, или степень новизны может требовать создания и эксплуатации установки (станции) — прототипа, призванного выявить скрытые проблемы нового решения и обосновать надежный переход к серии.

Принятие правильного решения затрагивает культуру безопасности в звене государственного и технического управления.

Большой практический шаг в разработке и внедрении реакторных систем с внутренней самозащищенностью и пассивными средствами защиты был впервые сделан при создании атомных станций теплоснабжения. Уместно отметить, что создание этих установок было завершено до аварии на Чернобыльской АЭС, а требования к ним были сформулированы и сами работы начались до аварии на американской АЭС «Три-Майл-Айленд», однако ввод в эксплуатацию вопреки технической логике был остановлен на волне антиядерных настроений после аварии на Чернобыльской АЭС и политических процессов перестройки.

Активное продвижение и пропаганда реакторных систем с внутренней самозащищенностью и пассивными средствами защиты сдерживались в послечернобыльские годы атомной промышленностью западных стран из соображений технико-экономической конъюнктуры и опасений негативной реакции общественного мнения. Форсирование нового подхода могло поставить под сомнение безопасность и приемлемость действующего парка атомных станций. Факторы необходимости общественного признания ядерной энергетики и складывающейся технической конъюнктуры в СССР и России, требовавшие после чернобыльского краха авторитета ядерной энергетики демонстрации качественно новых шагов в дальнейшем развитии отрасли, определяли другое отношение к новшествам. По этой причине уже ближайшее поколение атомных станций, которые, скорее всего, следует отнести к эволюционному направлению, должно обладать максимально возможным набором новых черт безопасности, которые характеризуются понятиями «внутренней» и «пассивной». Логика экономического развития страны в прошлые годы и соответственно логика развития ядерной энергетики диктовала ввод таких станций нового поколения (с ВВЭР-1000 и -640) до 2000 г. Реальный ход экономических реформ полностью изменил развитие событий в ядерной энергетике.

Реальный провал в поступательном развитии ядерной энергетики и остановка в реализации очередных практических шагов создали опасность потери преемственности в реализации ядерной безопасности. В некоторых случаях будущее развитие ядерной энергетики стало рассматриваться в полном отрыве от сегодняшнего состояния и предыдущего. При этом формулирование требований безопасности к ядерной энергетике следующего периода ее интенсивного роста в некоторых случаях сопровождается не только отрицанием технологических направлений и решений первого периода, но и игнорированием практического опыта и рожденной из него ядерной безопасности. Это аргументируется тем, что технологические решения, реализованные в указанный период, не могут выполнить требований, предъявляемых будущей ядерной энергетикой — большой по своей доле в энергообеспечении мира, экономически выгодной и безопасной.

Здесь мы коснемся лишь правомерности игнорирования сформированной всем предыдущим развитием ядерной энергетики концепции обеспечения ее безопасности.

Внимательное рассмотрение формируемых в настоящее время концепций безопасности будущей ядерной энергетики показывает, 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, самозапрещенности, пассивной безопасности. Особо отмечается важность очевидности и доказательности этих качеств. Из конкретных требований по опыту аварии на Чернобыльской АЭС на первый план выдвигаются требования исключения неконтролируемого разгона реактора на мгновенных нейтронах и катастрофических последствий чернобыльского класса. Последнее формулируется в терминологии исключения необходимости эвакуационных мероприятий и долговременного отчуждения земель. В количественных показателях приемлемые вероятностные значения опасных событий увязываются с ожидаемым масштабом развития ядерной энергетики и доверительными пределами применения вероятностного анализа. При этом сопоставляются также социально приемлемые уровни радиационного риска и приемлемые уровни финансового ущерба и их вероятность.

В конечном счете формулирование конкретных технических требований направлено на выбор таких конструкций и свойств, которые бы максимально возможным образом повышали надежность выполнения функций сохранения теплоотвода и удержания теплоносителя, удержания радиоактивных веществ, длительного отвода тепла, защиты от внешних разрушительных воздействий. Все это позволяет констатировать, что в целом направленность конкретных действий по перспективной ядерной энергетике по своему содержанию не выходит за рамки сформулированной концепции ядерной безопасности. Тем не менее остается беспокойство терминологического характера. Нечеткость в понятиях и неправомерность их применения создают основу для ложного понимания предлагаемых технических решений и дезинформации их ожидаемой эффективности. К ним относятся такие понятия, как «естественная безопасность», что воспринимается неспециалистами и многими специалистами как «абсолютная безопасность», и «детерминистическая безопасность», воспринимаемая как предопределенная и потому не требующая никаких других усилий и мер. Может ли быть абсолютная или предопределенная безопасность? Естественный ожидаемый ответ, что нет. Упомянутые понятия, по моему мнению, в научно-технической сфере недопустимы.

Может ли заменить максимально удачное использование свойств «внутренне присущей безопасности» и «самозащищенности» в предлагаемой конструкции весь комплекс подходов и принципов, составляющих концепцию ядерной безопасности? Я полагаю, что не может. В противном случае мы рискуем возвратиться на эмбриональную стадию развития ядерной энергетики, когда присутствовала уверенность, что особые требования к качеству изделий сами по себе могут обеспечить необходимую безопасность.

УДК 551.510.72+551.577.7

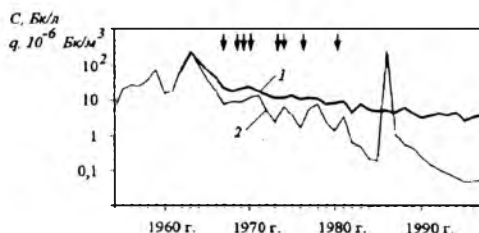
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТРИТИЯ И ^{137}Cs В АТМОСФЕРЕ

Махонько К.П., Ким В.М., Катрич И.Ю., Волокитин А.А. (НПО «Тайфун»)

К числу основных радионуклидов, остающихся в атмосфере после ранее проведенных ядерных взрывов, относятся ^{137}Cs и тритий. Поведение последнего, образующегося при термоядерных взрывах, отличается от поведения других продуктов деления. В процессе остывания огненного шара, возникшего после взрыва, раньше всего начинают конденсироваться пары тугоплавких химических элементов с наибольшей температурой кипения, поэтому образующиеся аэрозольные частицы обогащены этими радионуклидами и обеднены легкоплавкими. Температура конденсации паров трития наиболее низкая, поэтому он успевает подняться с потоками горячего воздуха на большую высоту. Пары начинают конденсироваться на низкотемпературной периферии радиоактивного облака, в частности, на его вершине в стратосфере, где скорость подъема со временем становится равной нулю [1]. Например, после взрыва, проведенного 16 октября 1980 г., в ноябре и декабре 1980 г. в приземной атмосфере были зарегистрированы короткоживущие ^{141}Ce , ^{95}Zr и рост концентрации долгоживущих ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{144}Ce в воздухе. Высокая концентрация трития в осадках появилась только на следующий год после весенней перестройки высоты тропопаузы, когда ледяные кристаллы, содержащие тритий, опустились из стратосферы до уровня дождевых облаков.

Кроме того, в стратосфере постоянно образуется тритий под действием космического излучения. До начала проведения ядерных взрывов в атмосфере концентрация трития космогенного происхождения в атмосферных осадках составляла $0,3 \pm 0,06$ Бк/л воды [2]. После термоядерных взрывов концентрация в осадках превышала это значение в десятки—сотни раз.

Систематические наблюдения за концентрацией в атмосферных осадках на глобальной сети станций Всемирного метеорологического общества проводятся с 1961 г. На территории СССР эти наблюдения на сети станций Гидрометеослужбы начались с июля 1969 г. Из рис. 1 видно, что в 1962 г. в северном полушарии концентрация трития в осадках составляла в среднем 20,4 Бк/л. После серии взрывов 1961—1962 гг. на Новой земле она в 1963 г. возросла примерно в 10 раз и достигла 224 Бк/л, плотность выпадения из атмосферы в среднем по СССР составляла 123 кБк/(м²·год). После 1963 г. в период моратория концентрация в осадках снижалась по экспоненциальному закону с периодом полууменьшения 1,2 года [3, 4], концентрация ^{137}Cs в приземной атмосфере — 0,82 года [5]. После этого концентрация трития в осадках, его выпадения и концентрация ^{137}Cs в воздухе увеличивались после каждого термоядерного взрыва, проведенного в КНР, первый из которых мощностью 3,3 Мт осуществлен 17 июня 1967 г. Несмотря на увеличение концентрации на следующий год после каждого взрыва, в период 1968—1973 гг. все же происходило общее уменьшение его концентрации и плотности выпадений, поскольку скорость поступления в атмосферу от взрывов в этот период оказалась меньше скорости ее самоочищения. Кажущийся период полувыведения трития из атмосферы в указанном интервале времени вследствие этого повысился и составлял 2,4 года [4, 5].



Р и с. 1. Изменение со временем концентрации трития (1) в осадках, ^{137}Cs в воздухе (2) в среднем по стране; ↓ — момент проведения термоядерных взрывов в КНР (на рис. 1—5 на оси x приведены данные на середину каждого года)