

В. Г. Здановский, д-р техн. наук (ГУ «ННИИПБОТ»)

АСПЕКТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Несмотря на большие проблемы с традиционным органическим топливом, и, особенно, с углеводородными энергоносителями, производство и потребление электрической энергии постоянно возрастает и за последние 30 лет практически удвоилось. Как свидетельствуют данные Международного энергетического агентства (далее – МЭА) и Международного агентства по атомной энергии (далее – МАГАТЭ), основной прирост происходит за счёт использования энергии обогащенного урана на атомных электростанциях (далее – АЭС). В тридцати с лишним странах мира в эксплуатации находятся свыше 440 атомных энергоблоков, в т.ч. в Европе – 180, большинство из них – единичной мощностью 1 млн кВт и более. Атомная энергетика, несмотря на свою значительную сложность и стоимость, а также большую потенциальную опасность, стала неотъемлемой частью цивилизации и научно-технического прогресса. Поэтому основной задачей всех государств, которые имеют на своей территории АЭС и другие объекты атомной промышленности, является всеобъемлющее обеспечение радиационной безопасности.

В условиях постепенного истощения органических энергоносителей при существующих объёмах потребления энергии и темпах их роста научно-технический прогресс не может обеспечить экономику и жизнедеятельность социума без использования ядерного топлива. Прогнозы – дело неблагодарное; однако в ближайшие 50...60 лет, пока не произойдут масштабные изменения в применении возобновляемых источников энергии, водородной энергетике и других прорывных технологий, а также в кардинальном решении проблем энергосбережения в мировом масштабе, полностью отказаться от атомной энергетике никак не удастся. Поэтому, хотим мы этого или нет, при среднегодовом потреблении человечеством свыше 4000 млрд киловатт-часов электроэнергии альтернативы эксплуатации АЭС при условии её максимально возможной безопасности на сегодняшний день и на ближайшие десятилетия нет.

Атомная энергетика имеет свои преимущества в конкретных условиях и содержит серьёзные потенциальные опасности, которые могут превратиться в реальность. Поэтому, много лет изучая проблемы атомной энергетике, автор статьи не является апологетом её развития и вынужден заниматься проблемами безопасности социума в условиях существования атомной энергетике в силу острой необходимости.

Что касается Украины, то в условиях жесткой зависимости от монополиста-поставщика нефтегазовых энергоносителей, преимущественное использование электроэнергии, в том числе от АЭС, является одним из приоритетов государственной стратегии с точки зрения энергетической независимости на ближайшие 15...20 лет. По сравнению с Францией, где на АЭС вырабатывается свыше 70 % электроэнергии, доля наших АЭС в общей мощности электроэнергетики не так уж и велика – 24 %. В то же время, четырнадцатью нашими энергоблоками АЭС вырабатывается свыше 45 % от потребляемого электричества – около 90 млрд кВт-час [1]. Для их выработки ежегодно тепловым электростанциям (далее – ТЭС) необходимо было бы дополнительно около 35 млн тонн высококачественного угля, или эквивалентное количество мазута / природного газа, которых у нас и так недостаточно.

При том, что в условиях нормальной эксплуатации атомные электростанции являются намного более экологически чистыми, нежели ТЭС, особенно угольные, проблем с безопасным использованием урана чрезвычайно много – от добычи до надёжной эксплуатации ядерных реакторов, сбережения отработанных топливных кассет и их утилизации, захоронения ядерных отходов, продления ресурса реакторов и вывода из работы энергоблоков. Таким образом, главное направление развития ядерной энергетики связано с обеспечением непрерывного цикла: добыча и обогащение урана – производство тепловыделяющих кассет – наличие мест временного хранения использованных кассет – централизованная их переработка и очистка – промежуточное хранение радиационных материалов – захоронение ядерных отходов [2].

Принимая во внимание опыт развития человечества, начиная с применения паровых технологий, автомобиле- и самолетостроения, сооружения больших плотин, а также тепло- и гидроэлектростанций, абсолютно надёжной техники не бывает. Максимальная надёжность может быть достигнута в первую очередь за счет минимизации рисков аварий, которые могут представлять опасность для персонала и населения.

Украине необходимо ориентироваться на процессы интеграции в мировую ядерную отрасль, расширять сотрудничество на уровне ведущих стран для кооперации производства составляющих ядерно-топливного цикла, включая их собственное производство в ближайшем обозримом будущем, а также для решения проблем, связанных с безопасной эксплуатацией и предотвращением аварийных ситуаций. Естественно, необходимо учитывать трагический опыт Чернобыльской катастрофы. Однако необходимо иметь в виду принципиальную разницу между уран-графитовыми ректорами этой АЭС, которая полностью выведена из эксплуатации с удалением ядерных кассет, и современными корпусными водо-водяными энергетическими реакторами (далее – ВВЭР). Ими оснащены все четыре АЭС Украины – Ривненская (два энергоблока по 440 и два по 1000 МВт), Южно-Украинская (2 энергоблока по 1000 МВт), самая мощная в Европе Запорожская (6 энергоблоков по 1000 МВт) и Хмельницкая (2

энергоблока по 1000 МВт и 2 таких же в стадии строительства). Благодаря их оснащению новейшими системами контроля безопасности и защит от возникновения опасных ситуаций, эти АЭС сегодня являются одними из самых безопасных в мире. Разработка этих систем велась и ведётся с учётом и на основе вероятностного анализа безопасности (ВАБ). Не менее важно его применение для углублённого анализа возможных аварий, а также обучения и противоаварийных тренировок оперативного персонала АЭС, что также является важным аспектом безопасности АЭС.

Необходимо также отметить, что обучение и тренировки персонала ведутся в учебно-тренировочных центрах (далее – УТЦ), функционирующих на каждой АЭС. В УТЦ установлены имитирующее оборудование и программные комплексы, отражающие реальные процессы, происходящие в ядерной паропреобразующей установке (далее – ЯППУ) и на энергоблоке АЭС в режиме реального времени. Фактически они дублируют блочный щит управления (далее – БЩУ) энергоблока, на котором задаются те или иные тренировочные программы. Таким образом, обеспечивается высокий уровень подготовки операторов энергоблоков и их постоянная готовность к решению сложных задач в нештатных ситуациях.

Атомная электрическая станция (АЭС) предназначена для производства электрической энергии в заданных режимах и условиях применения и располагается в пределах конкретной территории с использованием одного или нескольких ядерных реакторов и комплекса необходимых систем, устройств, оборудования и сооружений для обеспечения её эксплуатационной безопасности для обслуживающего персонала, населения и окружающей среды. Обычно АЭС состоит из нескольких энергоблоков, каждый из них имеет свою ядерную ЯППУ.

Защита окружающей среды от аварийных выбросов продуктов деления ядерных реакторов с водой под давлением обеспечивается проектом, в котором оговариваются четыре последовательных барьера безопасности: топливная матрица, оболочка топлива, первый контур и контайнмент, а также приводится обоснование, согласно которому при надлежащей эксплуатации гарантируется безопасность при всех проектных условиях эксплуатации реакторной установки. Концепция, которая включает защиту барьеров для предотвращения повреждения АЭС, соответствует принципу глубокоэшелонированной защиты и хорошо иллюстрируется в докладе МАГАТЭ [3].

Принцип глубокоэшелонированной защиты предполагает создание ряда последовательных уровней защиты от вероятных отказов технических средств и ошибок персонала, включая:

- установление последовательных барьеров на пути распространения радиоактивных продуктов (рис. 1);
- существование технических и административных мероприятий по сохранению целостности и эффективности этих барьеров;
- планирование мероприятий по защите населения и окружающей среды в случае разрушения барьеров.

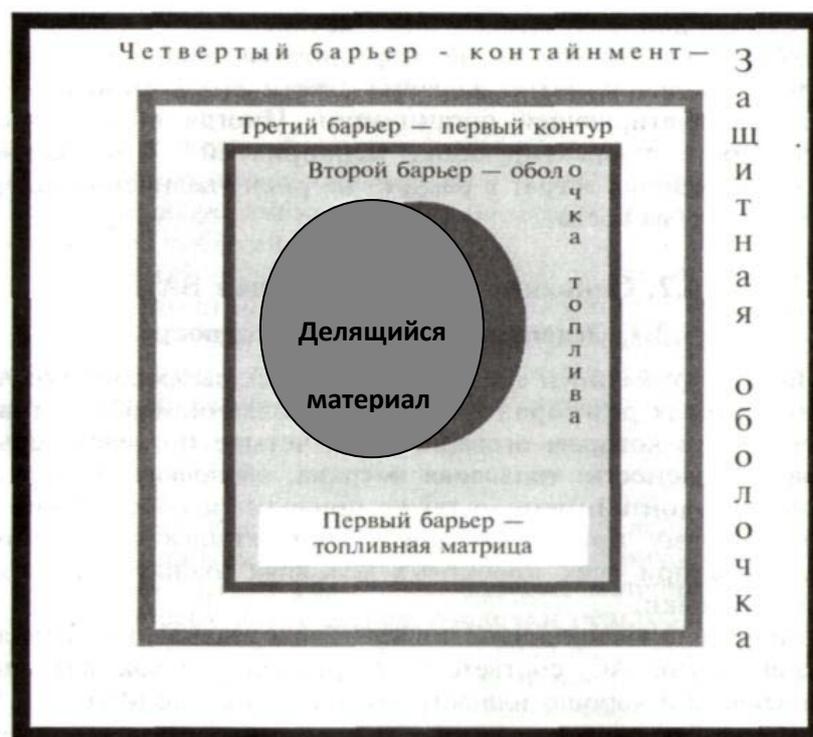


Рис. 1. Схема барьеров безопасности

Глубокоэшелонированная защита определяет основу построения безопасности АЭС. Проектом предусмотрена система контроля целостности системы барьеров на всем пути распространения радиоактивных продуктов, предназначенная для контроля отклонений от установленных пределов безопасной эксплуатации АЭС.

Среди основных принципов безопасности одним из важнейших является принцип единичного отказа, в соответствии с которым система должна выполнять свои функции при любом исходном событии, требующем ее срабатывания, и при независимом от исходного события отказе любого элемента этой системы.

Под единичным отказом подразумевается отказ одного из активных или пассивных элементов, имеющих механически движущиеся части.

В проектах реакторных установок (далее – РУ) и АЭС в целом должны быть предусмотрены технические средства и организационные меры, направленные на предотвращение проектных аварий и ограничение их последствий, а также обеспечивающие безопасность при любом из учитываемых проектом исходном событии с наложением одного независимого от исходного события отказа любого из следующих элементов систем безопасности: активного или пассивного, имеющего механические движущиеся части, или с наложением одной независимой от исходного события ошибки персонала.

Дополнительно к одному независимому от исходного события отказу одного из элементов должны быть учтены приводящие к нарушению пределов безопасной эксплуатации необнаруживаемые отказы неконтролируемых при эксплуатации АЭС элементов, влияющих на развитие аварии.

Практическое применение принципа единичного отказа обеспечивает:

- работу систем безопасности и систем, важных для безопасности в случае возникновения отдельных отказов оборудования или ошибок персонала;
- уменьшение риска отказа оборудования по общей причине.

На практике принцип единичного отказа реализуется путем резервирования. Резервирование предполагает применение двух или более аналогичных систем или независимых каналов системы, идентичных по своей структуре. При полной независимости этих систем или каналов их общие показатели надежности улучшаются пропорционально их количеству.

Проектирование АЭС осуществляется главным образом детерминистическим методом, т.е. технические решения и требования к системам и компонентам задаются в предписаниях и аналитических расчетах с использованием принципа консервативного подхода.

Консервативный подход – это такой подход к анализу аварии, при котором для параметров и характеристик принимаются значения и пределы, заведомо приводящие к наиболее неблагоприятным результатам. Консервативный подход используется при обосновании безопасности АЭС.

Как любой другой крупный промышленный комплекс, АЭС является источником риска для окружающей среды и социума. Риск этот связан в основном с производством, удержанием и хранением радиоактивных веществ. Для того, чтобы риск был приемлемым, принимаются различные меры на всех этапах жизненного цикла АЭС, начиная с разработки и заканчивая демонтажем.

Общий подход к безопасности основан на следующем принципе: чем выше вероятность наступления нежелательного события, тем менее значительными должны быть её последствия. Вероятность наступления нежелательного события связана с понятием риска. В вероятностном анализе безопасности атомных электростанций (далее – ВАБ) риск представляется как вероятный ущерб и имеет в науке несколько близких по значению определений.

Риск исчисляют как произведение вероятности возникновения возможного ущерба и ожидаемого объема ущерба.

Риск – это количественная мера (вероятность) произвести вред (ущерб) вследствие определенных событий, в том числе вследствие облучения. Определяется количеством случаев на определенное количество населения [4].

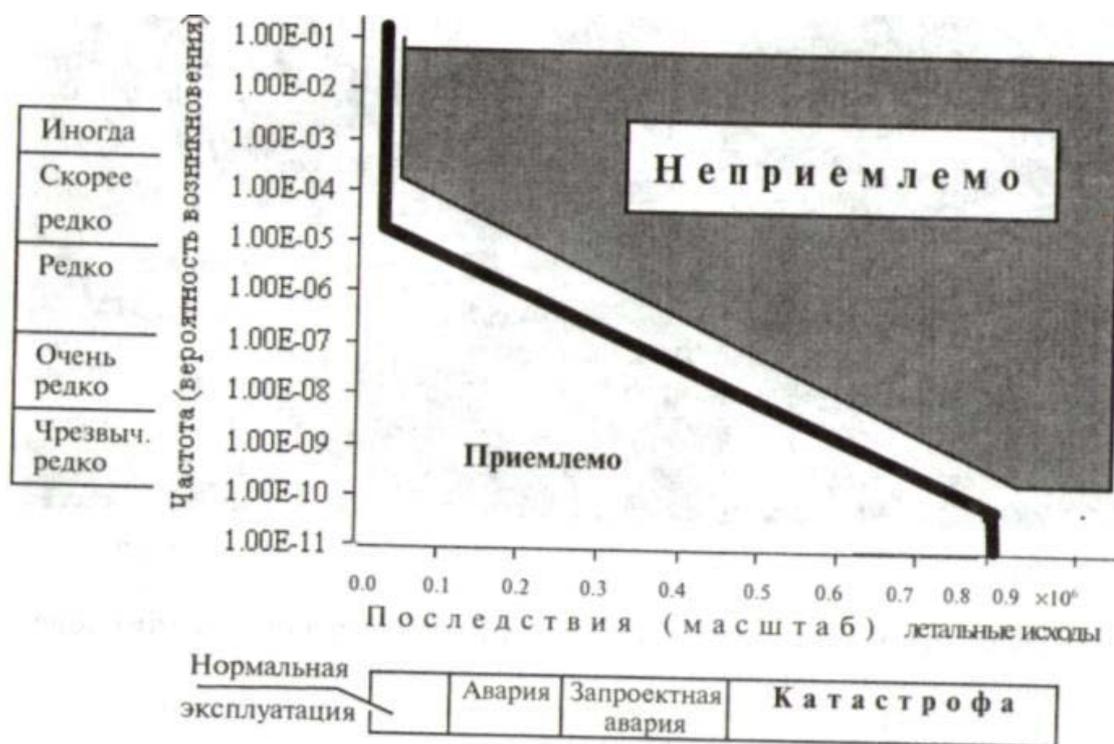
Оба эти определения представляют различные точки зрения на одно и то же понятие. Любой технический прогресс или состояние, а также многие природные явления наносят ущерб безопасности.

Мерой риска в обществе при значении риска, равном единице ($R = 1$), становится цена жизни человека. Так, события, в результате которых один несчастный случай со смертельным исходом происходит на 1 млн чел., обычно не замечаются в обществе (вероятность возникновения $P(t) = 10^{-6}$), а события, имеющие частоту летального исхода $P(t) = 10^{-3}$, расцениваются как несчастные случаи.

На рис. 2 по оси ординат рядом с частотой события приведена ее текстовая оценка, а по оси абсцисс – общепринятая оценка последствий. При нормальной эксплуатации допускаются события, имеющие небольшие последствия (линия приемлемости не доходит до оси ординат), равно как и нельзя исключить полностью события, имеющие чрезвычайно малые вероятности – остаточный риск. Предельный риск, еще приемлемый для общества, изображен посредством линии приемлемости на диаграмме «вероятность – последствия» [5].

Линия приемлемости, как следует из рис. 2, при $R = 1$ соответствует частоте $P = 10^{-4}$. Она отражает сложившееся в обществе понятие допустимого риска на основе частоты природных и техногенных событий.

Важные наблюдения и мнения по оценке приемлемого риска приведены в работе [6]. В исследовании получены данные по опросу населения США касательно оценки риска 30 факторов различных бытовых и техногенных факторов, включая атомную энергетику. Там же приводятся и реальные статистические данные по воздействию этих факторов. Большинство групп населения риск от атомной энергетики ставят на первое место, хотя по объективным статистическим данным ущерб здоровью людей от курения и употребления спиртных напитков в 1500 раз выше (1-е и 2-е места по статистике), а атомная энергетика в действительности занимает 20-е место в ряду риска после многих факторов. Допуская подобный риск, опрошенные группы населения выражали желание получать информацию относительно того, какими путями осуществляется контроль над опасным фактором и как осуществляется управление в потенциально опасных отраслях промышленности в целях его снижения.



Р Рис. 2. Диаграмма «вероятность – последствия»

Предписание, лежащее в основе принципа безопасности многих стран, гласит: «любой риск должен быть снижен настолько, насколько это является практически достижимым, или же до уровня, который является настолько низким, насколько это разумно достижимо». Это высказывание известно как принцип АЛАРА (далее – ALARA).

Приведем формулу для вычисления величины риска аварии на АЭС [5]. Риск $R_{m,i}$ в результате аварии вида i , вызванной событием вида m (например, разрывом трубопровода с теплоносителем первого контура АЭС), применительно к реакторной установке может быть упрощенно представлен соотношением:

$$R_{m,i} = F_{m,i} D C_{m,i}$$

где $F_{m,i}$ – среднее ежегодное количество (частота) аварий вида i , происшедших на реакторе по причине того, что произошло событие вида m ;

$C_{m,i}$ – активность радиоактивных материалов (Бк), вышедших в атмосферу из защитной оболочки реактора во время аварии вида i , инициированной событием вида m ;

D – опасность, возникающая в результате утечки радиоактивных продуктов в атмосферу, зависящая от ряда других параметров окружающей среды, таких, например, как атмосферные условия, коэффициенты переноса радиоактивных продуктов, распределения плотности населения и т.д.

Если риск $R > 10^{-3}$, то, согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (далее – ВОЗ), необходимо принятие мер по обеспечению безопасности.

Законодательства многих стран, их нормативно-правовая база эксплуатации атомных станций устанавливают значения частот событий с летальным исходом в пределах $10^{-5} \dots 10^{-6}$ событий в год на один реактор. Согласно норм радиационной безопасности Украины, при определении величины *риска* оперируют такими понятиями, как остаточный риск, приемлемый риск и верхняя граница индивидуального риска. Уровень остаточного риска принимается равным 10^{-6} за год, величина приемлемого риска для персонала – 10^{-4} , а для населения – 10^{-5} за год, верхняя граница индивидуального риска для облучения персонала принимается равной 10^{-3} , а для населения – 5×10^{-5} за год.

Определение величин $F_{m,i}$, D , $C_{m,i}$ для определения риска и величины самого риска R составляет основную задачу ВАБ.

В научных изданиях и в нормативных документах по АЭС имеются близкие по смыслу и содержанию определения безопасности АЭС. Так, например, в «Общих положениях обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88)», действующих до настоящего времени, определено: «Безопасность АС – свойство АЭС при нормальной эксплуатации и в случае аварий ограничивать радиационное воздействие на обслуживающий персонал, население и окружающую среду установленными пределами» [7].

В руководствах по безопасности АЭС МАГАТЭ [3] даётся следующая формулировка:

«Ядерная безопасность (или просто безопасность) – достижение надлежащих эксплуатационных условий, предотвращение аварий или ослабление последствий аварий, благодаря чему обеспечивается защита персонала площадки, населения и окружающей среды от недопустимой радиационной опасности».

АЭС является безопасной по определению, если:

- её радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду при нормальной эксплуатации и при проектных авариях не приводит к превышению установленных величин;
- радиационное воздействие ограничивается до приемлемых значений при тяжелых запроектных авариях.

Одним из основных разработчиков систем безопасности, а также их методического и научного сопровождения для реакторов типа ВВЭР-1000 является опытно-конструкторское бюро «Гидропресс» (г. Подольск Московской обл., Россия). Работы по контролю и повышению физической безопасности АЭС осуществляются в соответствии с рекомендациями, разрабатываемыми МАГАТЭ и международным агентством International Atomic Energy Agency (далее – IAEA) и под их контролем.

Неотъемлемым элементом оценки безопасности и одним из основных инструментов повышения безопасности АЭС является вероятностный анализ безопасности, и он должен быть предметом дальнейших исследований.

Это тем более необходимо, что при планировании и реализации программ развития ядерной энергетики в первую очередь должны решаться проблемы ядерной безопасности АЭС.

Список литературы

1. Енергетична програма України до 2030 р.
2. Третьякова Л. Д., Мітюк Л. О. Сучасні системи захисту персоналу під час експлуатації об'єктів ядерної енергетики / Л. Д. Третьякова, Л. О. Мітюк // Проблеми охорони праці в Україні: збірник наукових праць. – № 19. – К.: ДУ «ННДПБООП», 2010. – С. 26–31.
3. Серия изданий по безопасности МАГАТЭ. Основные принципы безопасности атомных электростанций. МАГАТЭ. – Вена, 1989.
4. Норми радіаційної безпеки України. (НРБУ-97). – К., 1997.
5. Бегун В. В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций: учебное пособие / В. В. Бегун, О. В. Горбунов, И. Н. Каденко, Е. Н. Письменный, А. Ю. Зенюк, Л. Л. Литвинский. – К., 2000. – 568 с.
6. Радиация. Дозы, эффект, риск. – М: Мир, 1990.
7. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88). ПНАЭ Г-1-011-89, 1989.

Дата подання статті до збірника – 21.08.2013