

А. А. Андрижиевский, д-р техн. наук; А. Г. Трифонов, д-р техн. наук;
Ю. Е. Крюк, канд. техн. наук (Объединенный институт энергетических
и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси)

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РИСКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

The modern approaches and methods of safety analysis of nuclear power plant have been discussed and the levels of probabilistic safety assessment have been indicated. The multiple meaning of risk conception for each levels of analysis has been interpreted and probabilistic method approach to risk estimation has been described. The necessity to perform the probabilistic safety analysis for new project of.

Введение. Любая промышленная деятельность приносит выгоду, но и всегда сопряжена с риском. При этом под риском подразумевается вероятность определенного вредного воздействия, возникающая в течение определенного периода.

Сложная промышленная деятельность, такая как эксплуатация ядерных установок, обычно связана с рисками различного вида, которые могут причинить разный по своему характеру вред отдельным лицам, обществу и окружающей среде.

Основная цель безопасности объектов атомной промышленности состоит в обеспечении защиты – индивидуальной и коллективной – людей и охране окружающей среды от общего воздействия ионизирующего излучения.

Обеспечение безопасности для атомной станции основывается на концепции глубокоэшелонированной защиты и означает наличие нескольких уровней защиты.

Наиболее приоритетной задачей является предотвращение аварий. В случае возникновения аварии предусматриваются мероприятия по ее смягчению. Глубокоэшелонированная защита представляет собой широкий круг мер – от предотвращения и контроля незначительных событий и отклонений от нормальных эксплуатационных условий в нормальных условиях до управления авариями, наносящим крупный ущерб АЭС.

Общая цель ядерной безопасности заключается в защите отдельных лиц, общества и окружающей среды от вредных последствий путем создания и поддержания на ядерных установках эффективных средств защиты от радиационной опасности [1].

Приведенная цель ядерной безопасности неявно включает две составляющие, связанные с радиационной защитой и техническими аспектами безопасности. Они взаимозависимы: технические аспекты в сочетании с административными и процедурными мерами обеспечивают защиту от опасности ионизирующего излучения.

Методы анализа безопасности. О достижении целей безопасности в отношении конкретной ядерной установки свидетельствует результат проведенного анализа безопасности. В идеальном случае такой анализ должен

включать все события, последовательности и процессы, при которых отказы или серии отказов могут потенциально привести к радиологическим последствиям. В реальных условиях невозможно достичь охвата всех потенциальных отрицательных событий, но это и не является обязательным. Независимо от метода проведения анализа безопасности он будет включать ряд отобранных сценариев (сочетания событий, последовательностей и процессов). Выбор сценариев для включения в анализ делается таким образом, чтобы (насколько это разумно достижимо) охватывались основные факторы, способствующие риску. Результаты анализа безопасности свидетельствуют, что виды риска, которые необходимо учитывать, сведены до уровней ниже допустимых. Следовательно, проведение анализа должно выполняться с использованием апробированных методов и в ходе соответствующих независимых авторитетных рассмотрений. В качестве методов проведения анализа безопасности используют или обычные методы подробного инженерно-технического анализа (детерминистские методы) или наиболее распространенные в современных оценках вероятностные методы [2].

Детерминистские методы анализа безопасности начинаются с определения сценариев в терминах исходных событий и отказов компонентов, которые, как предполагается, могут произойти. Сценарии определяются с включением даже отдаленно вероятных событий, а критерии приемлемости (включая запасы безопасности) определяются таким образом, чтобы конечный результат удовлетворял национальным целям безопасности.

При вероятностной оценке для анализа отказа эксплуатационных систем и систем безопасности АЭС используется реальная количественная информация о возникновении различных событий и условий и информация о надежности компонентов. В ходе такого анализа может быть оценена вероятность различных потенциальных последовательностей событий и их последствий.

Таким образом, вероятностный анализ безопасности (ВАБ) АЭС предусматривает систематический подход к определению, является ли система безопасности адекватной, дизайн АЭС

сбалансированным, уровень глубокоэшелонированной защиты установленным и радиационный риск настолько малым, насколько это разумно достижимо. ВАБ обеспечивает всеобъемлющий и структурированный подход к идентификации сценариев отказов в работе реактора и получаемых численных оценок рисков для персонала и населения. Вероятностный анализ, как правило, осуществляется для трех следующих уровней. На первом уровне рассмотрения определяется последовательность событий, приводящих к повреждению активной зоны реактора. Выполняется оценка частоты возможных повреждений активной зоны, делается заключение о надежности и неустойчивости систем безопасности, разрабатываются процедуры, предупреждающие повреждение активной зоны. На втором уровне рассматриваются пути возможных выбросов радиоактивных материалов из реактора, выполняются вероятностные оценки масштабов и частоты этих выбросов. Осуществление этого анализа дает дополнительное понимание важности мер предотвращения и смягчения аварий, таких, например, как использование защитной оболочки ядерного реактора. Третий уровень рассмотрения включает непосредственные оценки радиационного риска как оценки вероятностного ущерба здоровью, а также в рамках данного уровня оцениваются другие социально-значимые риски, такие как риск загрязнения окружающей среды или продуктов питания.

Таким образом, выполнение анализа безопасности начинается с момента проектирования атомной станции, рассматривает все этапы ее эксплуатации и снятия с эксплуатации, а также работы по операциям с отходами. Конечной целью полного вероятностного анализа является определение и изучение всех возможных путей развития аварии на АЭС и поиск вариантов смягчения возможных последствий для окружающей среды и здоровья людей. При этом все возможные сценарии аварий должны быть учтены на самом раннем этапе процесса проектирования.

Впервые вероятностный анализ безопасности был проведен в США в 1975 году. В дальнейшем такие исследования стали необходимым условием оценки безопасности АЭС в европейских странах. На основе полученных результатов разрабатываются всеобъемлющие и структурированные модели надежности, позволяющие проводить вероятностные оценки риска.

Вероятностное определение риска. В общем случае риск обычно определяется как сочетание серьезности и вероятности события. Другими словами – как часто это может случиться и как серьезно это будет:

$$\text{Риск} = \text{Частота} \times \text{Последствия.} \quad (1)$$

Следовательно, если существование опасности оправдано, основной задачей становится

снижение риска, т. е. уменьшение частоты опасных событий и/или последствий.

Снижение риска на практике реализуется посредством глубокоэшелонированной защиты: конструктивное снижение частоты отказов и предотвращение последствий.

Реализация принципа глубокоэшелонированной защиты развивается в глубину по мере усугубления ситуации с точки зрения безопасности (рис. 1).

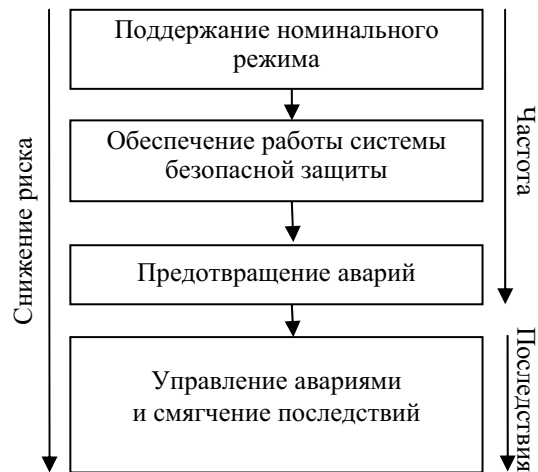


Рис. 1. Реализация принципа глубокоэшелонированной защиты

Согласно [3] в ядерной безопасности под риском понимают многозначную величину, выражающую угрозу, опасность или возможность возникновения вредных или поражающих последствий в результате действительно или потенциального облучения. Она связана с такими величинами, как вероятность возникновения конкретных пагубных последствий, а также масштаб и характер таких последствий. Следовательно, вероятность является ключевым признаком риска.

Трудно определить численное значение вероятности, не рассматривая конкретную ситуацию или использующиеся методы оценки. Любая формулировка вероятности требует определенной модели – формализованного описания ситуации, с учетом которой предстоит оценить вероятность исхода события. Под риском в этом случае понимают оцененную вероятность события вместе с описанием его последствий, если оно произойдет.

Отправным моментом оценки вероятности обычно является информация о наблюдаемой частоте событий. При условии, что наблюдаемые события не зависят друг от друга и что средняя частота событий является величиной, постоянной во времени за период наблюдения или прогноза, существует непосредственная связь между средней частотой f и вероятностью, что событие (одно или несколько) произойдет в течение выбранного временного интервала t .

Следовательно, произведение средней частоты на временной интервал представляет собой математическое ожидание числа событий, которые произойдут в течение указанного интервала:

$$M = ft, \quad (2)$$

где M – математическое ожидание числа событий f за период t .

Если ожидание $M \ll 1$, то, следовательно, произведение средней частоты событий на выбранный временной интервал может быть рассмотрено как вероятность того, что за указанный интервал произойдет какое-либо событие.

В реальных условиях эксплуатации ядерных установок реализация опасных событий может быть рассмотрена как исключительно редкое явление. Тогда характер распределения таких событий будет соответствовать распределению Пуассона. В этом случае вероятность, по крайней мере, одного неблагоприятного события в течение указанного периода времени не может превышать единицы.

Таким образом, истинное значение вероятности того, что за время t опасное событие произойдет, рассчитывается согласно следующей формулы:

$$P = 1 - e^{-ft}, \quad (3)$$

где P – значение вероятности неблагоприятного события за время t .

Частота f имеет в этом случае размерность – время⁻¹. Поэтому ее численное значение зависит от выбора единиц времени.

Рассматривая возможные отказы как крайне редкие события мы можем говорить о них, как о событиях с частотой не более 10^{-3} в год. Следовательно, согласно формуле (3) вероятность таких событий в течение одного года составляет:

$$P = 1 - e^{0,001} = 0,999 \cdot 10^{-3}.$$

При проведении вероятностного анализа безопасности осуществляется оценка условной вероятности. Условная вероятность – это вероятность того, что событие произойдет в случае, если произошло ранее определенное событие. Например, оценка риска третьего уровня – вероятность смерти как последствия воздействия ионизирующего излучения – зависит от реализации риска первого уровня – наличия облучения вследствие повреждения активной зоны реактора – и от реализации риска второго уровня – величины воздействия облучения в результате выброса и распространения радиоактивных материалов.

Обсуждение последствий аварии как компоненты риска имеет смысл только при проведении анализа третьего уровня. В этом случае рассматривается воздействие облучения в результа-

те аварии на здоровье людей, или радиационный риск, вероятность, тяжесть и число случаев которого непосредственно связаны с потенциальным облучением в результате аварии. В оценку социального и общественного риска включаются оценки возможных последствий временной эвакуации, ограничения потребления продуктов питания, ограничения или запрещения видов деятельности и др. Оценка такого рода зависит от масштаба аварии, но не связана напрямую с облучением и относится к экономическим задачам оценки хозяйственного риска.

В области ядерной и радиационной безопасности рассматриваются последствия, связанные с облучением людей и его воздействием на их здоровье. В этом случае под риском понимают вероятность появления конкретного воздействия на здоровье отдельного лица или группы лиц в результате облучения. При этом необходимо указывать конкретные воздействия на здоровье, например риск смертельного рака, риск серьезных наследственных эффектов или общий радиационный ущерб (вред), поскольку общепринятое «условие по умолчанию» отсутствует. Риск в этом случае выражается как произведение вероятности облучения и вероятности того, что облучение, если предположить, что оно произошло, приведет к конкретному воздействию на здоровье. Последняя вероятность иногда называется условным риском [4].

Известно, что последствия для здоровья бывают двух видов: детерминированные и стохастические.

Для реализации детерминированных последствий необходимо получение достаточно высокой дозы облучения, и ниже определенного порога дозы они никогда не возникают.

Возникновение стохастических эффектов в результате облучения носит статистический характер, и их вероятность возрастает с увеличением дозы.

Указанные различия между детерминированными и стохастическими последствиями имеют большое значение при оценке риска, так как влияют и на оценку вероятности, и на время возникновения.

В качестве основных факторов для суждений о последствиях облучения используется приписанная вероятность смерти либо тяжелых наследственных эффектов, а также число потерянных лет жизни, обусловленных приписанной смертью и появлением несмертельных случаев, приведенных по вреду к последствиям смертельных [4].

Следовательно, риск смертельного исхода для отдельно взятого лица, связанный с облучением, оценивается как условная вероятность того, что облучение вызовет смерть. При этом для стохастических эффектов среднее сокращение продолжительности жизни составляет

15 лет, а для детерминированных – 35. Согласно НРБ-2000 [5] индивидуальный пожизненный риск возникновения стохастических эффектов определяется как

$$r_i = \int_0^w p_i(E) r_e E dE, \quad (4)$$

где r_i – индивидуальный пожизненный риск; E – индивидуальная эффективная доза; $p_i(E)dE$ – вероятность для i -го индивидуума получить годовую эффективную дозу от E до $E + dE$; r_e – коэффициент пожизненного риска сокращения длительности периода полноценной жизни в среднем на 15 лет на один стохастический эффект (от смертельного рака, серьезных наследственных эффектов и несмертельного рака, приведенного по вреду к последствиям от смертельного рака).

В соответствии с новыми рекомендациям МКРЗ 103 величина коэффициента r_e в случае облучения населения принята $6,5 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ [6]. Тогда риск здоровью при однократном облучении дозой 1 Зв с вероятностью облучения 10^{-5} согласно (3) рассчитывается так:

$$r_i = 10^{-5} \cdot 6,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 6,5 \cdot 10^{-7}. \quad (5)$$

Оценка риска здоровью, прежде всего, зависит от величины самого облучения и вероятности, что это облучение будет реализовано.

Индивидуальный риск сокращения периода полноценной жизни в результате тяжелых последствий детерминированных эффектов принимается равным [5]:

$$r_{i, Д} = P_i(D > Д),$$

где $Д$ – пороговая доза для детерминированного эффекта; $P_i(D > Д)$ – вероятность для i -го индивидуума быть облученным дозой больше $Д$ при обращении с источником в течение года.

Таким образом, для определения риска здоровью требуется учет, по крайней мере, трех компонентов: вероятности самого облучения, вероятности реализации эффекта, приписываемого облучению, и любого взвешивания, которое будет применяться в отношении этого эффекта.

Численные оценки риска. При планировании деятельности, связанной с источниками ионизирующего излучения, необходимо заранее принять решение об уровне безопасности будущего объекта, т. е. заранее определить величину риска, с которой планируемая деятельность будет рассматриваться как обоснованная. Другими словами, необходимо определить количественные оценки вероятностей и последствий возможных аварий, которые могут использоваться в качестве приемлемых показателей достигнутого уровня безопасности. В основе принятой концепции приемлемого риска лежит принцип **ALARP** (сокращение от английского

термина «As Low As Reasonably Practicable», т. е. «Так низко, как это разумно достижимо на практике») (рис. 2).

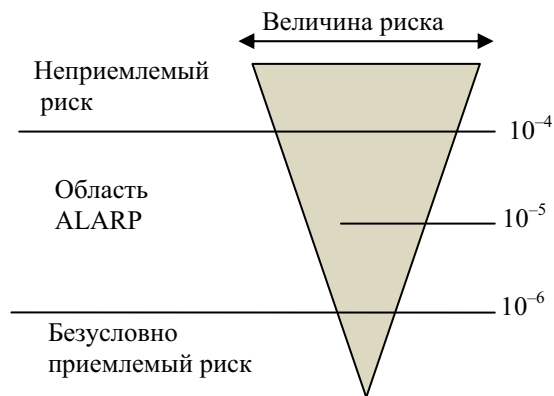


Рис. 2. Принцип ALARP

Приемлемый риск, или пренебрежимый риск, принимается обществом без каких-либо ограничений и не требует дальнейших усилий по его снижению. Соответственно, если в процессе построения системы безопасности достигнут уровень частоты возможных фатальных событий ниже 10^{-6} , такая деятельность будет приниматься как безопасная.

Область риска с частотой возможных фатальных событий от 10^{-6} до 10^{-4} предполагает осуществление деятельности, если преимущества от данной деятельности являются доказанными.

При этом уровень риска в области ниже 10^{-5} является приемлемым, если дальнейшие затраты на снижение риска не приносят заметного улучшения безопасности, а выше 10^{-5} – если дальнейшее снижение риска практически не достижимо.

В случае проведения вероятностного анализа безопасности очень важно четко указать уровень, для которого применяются оценки. Отсутствие четкого определения уровня решаемых задач приводит к определенному недопониманию результатов вероятностного анализа.

Выраженная в категориях вероятностной оценки цель безопасности первого уровня используется в качестве цели при разработке конструкции АЭС, и достигнутый уровень рассматривают как показатель требуемой степени безопасности функционирования систем станции с учетом ограничений, характерных для вероятностных методов оценки.

Цель безопасности второго и третьего уровня может использоваться в качестве основы для оценки и принятия решений по проблемам риска, связанного с эксплуатацией АЭС, причем величина риска выражается и в качестве вероятностной оценки, и в качестве оценки последствий.

Численным критерием для решения задач безопасности первого уровня в международной

практике определена вероятность в единицу времени (частота) повреждений активной зоны реактора – самая распространенная мера риска для большинства АЭС [7]. Приемлемыми значениями считаются величины риска 10^{-4} для существующих АЭС и 10^{-5} для вновь сооружаемых.

Крупный выброс радиоактивных материалов может иметь серьезные последствия для населения и потребует осуществления аварийных мероприятий вне площадки. В этом случае в качестве приемлемой величины риска для обеспечения безопасности второго уровня в международных документах принято значение 10^{-5} в год для существующих станций и 10^{-6} в год для будущих станций.

В отношении безопасности третьего уровня, определяющего риск воздействия на здоровье населения, выраженный в виде годовой вероятности смерти, в международных документах предлагается ограничиться величиной 10^{-5} .

Однако согласно действующим на сегодняшний день в Республике Беларусь нормам радиационной безопасности (НРБ-2000) целевое значение для индивидуального риска летального исхода может быть установлено на уровне 10^{-6} в год (уровень пренебрежимо малого риска), что будет соответствовать годовой вероятности аварии, в результате которой следует облучение человека, равное 10^{-5} .

Заключение. Сегодня проведение вероятностного анализа безопасности для атомных станций является объективной реальностью в большинстве европейских стран. И в каждом случае обязательно выполняется ВАБ первого уровня, включающий оценку частоты повреждений активной зоны реактора. Во многих случаях также оценивается вклад малых доз облучения при нормальной эксплуатации и в случае гашения реактора. В отдельных ситуациях в ходе анализа рассматривается, как будет происходить облучение в результате повреждения активной зоны. Такой анализ часто называют

анализом уровня 1+, хотя факторы учета варьируются в зависимости от страны.

Согласно современным стандартам безопасности обязательным является выполнение вероятностного анализа второго уровня и в качестве хорошей практики рекомендовано проведение вероятностного анализа, включающего элементы третьего уровня [7].

Таким образом, в настоящее время при проектировании атомной станции осуществление вероятностного анализа безопасности будущего ядерного объекта на уровне не ниже второго является обязательным, а для страны, пострадавшей в результате крупной радиационной аварии, повлекшей серьезные медицинские, социальные и экономические последствия, анализ третьего уровня может рассматриваться как необходимый.

Литература

1. Безопасность ядерных установок. Серия изданий по безопасности № 110 / МАГАТЭ. – Вена: Изд. МАГАТЭ, 1993. – 193 с.
2. Safety Analysis for Research Reactors / Safety reports series no. 55 IAEA. – Vienna: Pub. IAEA, 2008. – 150 p.
3. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности / МАГАТЭ. – Вена: Изд. МАГАТЭ, 2007. – 303 с.
4. Annals of the ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection / ICRP. – Oxford: Pergamon Press, 1991. – 96 p.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000). Санитарные правила и нормативы. – Минск: Госстандарт, 2000. – 90 с.
6. Annals of the ICRP Publication 103: 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection / ICRP. – Oxford: Pergamon Press, 2007. – 332 p.
7. Review of probabilistic safety assessments by regulatory bodies / Safety reports series no. 25 IAEA. – Vienna, 2002. – 143 p.