

А ЧТО, ЕСЛИ?

РУКОВОДСТВО МКРЗ ПО ПОТЕНЦИАЛЬНОМУ РАДИАЦИОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

ДЖЕК ВАЛЕНТИН

В основе применяемых во всем мире правил по радиационной безопасности лежат рекомендации находящейся в Швеции Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). В 90-х гг. особое внимание экспертов было сосредоточено на том, что может случиться неожиданно, — на анализе гипотетических ситуаций “а что, если?”, которые теоретически могут привести к облучению людей потенциально опасными источниками излучения.

Обычно потенциальные облучения не должны происходить, но их можно ожидать и вероятность их возникновения можно прогнозировать. Первые соображения МКРЗ по поводу данного подхода появились в процессе рассмотрения проблем окончательного удаления долгоживущих радиоактивных отходов и анализа крупных аварий, таких как ядерные катастрофы.

МКРЗ провела в настоящее время исследование третьей возможной ситуации: аварий, оказывающих воздействие лишь на одного или нескольких человек (но иногда с тяжелыми последствиями для пострадавших). Хотя подобные инциденты не оказывают на общество столь разрушительного воздействия, как наводящие страх крупные ядерные аварии, они все же происходят с пугающей регулярностью и могут иметь пагубные последствия для пострадавших.

В данной статье проводится обзор концептуальных основ, критериев и методологии МКРЗ по радиационной защите от потенциальных облучений в отдельных случаях. Защита от такого “ограниченного” потенциального облучения начинается

со структурированного анализа сценариев с использованием методов, которые до сих пор были привычными скорее для инженеров по технике безопасности, нежели для специалистов по радиационной защите. С учетом вероятностей, полученных на основе таких анализов, можно рассчитать ожидаемый ущерб от потенциальных облучений. Этот риск можно сравнить с мерами по недопущению риска, что не должно представлять особых сложностей для рассматриваемых здесь мелких инцидентов. После такого первоначального анализа можно применить повторный процесс оптимизации с целью гарантировать уровень риска или потенциальную степень облучения, а также полученные дозы на наименьшем достижимом уровне.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ОСНОВА

В соответствии с Публикацией МКРЗ № 60 1990 г. *Recommendations of the ICRP* (Рекомендации МКРЗ) ожидается, что нормальное облучение в процессе практической деятельности происходит с почти-достоверностью во время плановых операций или в результате непреднамеренных, но весьма вероятных событий, однако с незначительными последствиями. Вероятность потенциального облучения, наоборот, считается неопределенной. Оно является следствием незапланированных событий, таких как отказы оборудования или отклонения от плановых эксплуатационных процедур. Подобные события невозможно прогнозировать в деталях, но они могут быть предсказаны теоретически, и вероятность их возникновения может быть определена.

Пределы доз неприменимы к потенциальным облучениям. Они должны дополняться ограничениями риска. Теоретическая основа такого инструмента была разработана в Публикации МКРЗ № 64 *Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework* (Защита от потенциального излучения: концептуальная основа). Более поздний доклад, Публикация МКРЗ № 76 *Protection from Potential Exposures: Application to Selected Radiation Sources* (Защита от потенциальных облучений: применение к избранным источникам излучения), имеет целью показать способы применения указанного инструмента на практике в случае “ограниченных инцидентов”, таких как небезопасный вход в камеру облучения.

Число пострадавших в таких случаях невелико. Причиненный ущерб ограничивается в основном воздействием на здоровье реально подвергшихся облучению людей. Ведущие к потенциальному облучению процессы относительно просты и могут стать главной опасностью, связанной с данной практической деятельностью.

И наоборот, ущерб, причиняемый катастрофами, такими как крупные ядерные аварии, выходит за рамки воздействия на здоровье облученных людей

Дж. Валентин является ученым секретарем Международной комиссии по радиологической защите, находящейся в Стокгольме, Швеция. Статья подготовлена на основе доклада, опубликованного ранее Национальным советом по радиологической защите (Соединенное Королевство) в его издании “Radiation Protection Bulletin”.

(ограничения сельскохозяйственной деятельности, контроль пищевых продуктов и т. п., а также огромные расходы). Международная консультативная группа по ядерной безопасности (ИНСАГ) обсудила такие проблемы. Окончательное удаление долгоживущих отходов расширяет масштабы потенциальных облучений в перспективе на далекое будущее. Данная проблема была рассмотрена в Публикации МКРЗ № 46 *Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste* (Принципы радиационной защиты при удалении твердых радиоактивных отходов); в настоящее время МКРЗ завершает работу над дополнением к данному документу.

КРИТЕРИИ ПРИЕМЛЕМОСТИ

В своих Публикациях № 60 и 64 МКРЗ рекомендует, чтобы риски для здоровья от потенциальных облучений были ограничены и удерживались в рамках величин такого же порядка, которые применяются для пределов доз и ограничений при нормальных облучениях. Указанные риски для здоровья обуславливают два различных распределения вероятности. В первом случае облучение происходит с конкретной вероятностью, например P . Применительно к конкретному облучению условная вероятность стохастического и/или детерминистского ущерба для здоровья является функцией дозы, скажем, $f(E)$. Поэтому безусловная вероятность ущерба для здоровья выражается произведением этих вероятностей, т. е. $P \cdot A(E)$. Данная величина должна поддерживаться на уровне эталонного риска, например R , или быть ниже его. В случае с обсуждаемыми здесь ограниченными инцидентами R может рассматриваться как ограничение индивидуального риска, связанного с источником.

Величина ограничения риска не обязательно устанавливается раз и навсегда. Она может отно-

ситься к конкретному случаю и регулироваться по разным причинам. Однако в Публикации МКРЗ № 76 содержится общее ограничение риска, которое может быть использовано в качестве исходного пункта при выборе специфических для конкретного случая ограничений. В основе такого общего ограничения в сфере профессиональных облучений лежит годовая эффективная доза в 5 мЗв. Во многих оптимизированных операциях максимальные нормальные годовые дозы — именно такого порядка. С учетом коэффициента риска летального исхода при раковом заболевании от профессионального облучения в $4 \cdot 10^{-2} \text{Зв}^{-1}$ общий эталонный риск летального исхода R становится равным $2 \cdot 10^{-4} \text{а}^{-1}$.

Тогда возможно оценить, является ли вероятность опасных событий P допустимо низкой и приемлемы ли инженерно-техническая система безопасности и технологические процедуры на установке. Если, например, исследуемое событие связано с небезопасным входом в камеру облучения, где мощность доз столь высока, что неизбежно последует летальный исход [т. е. $f(E)=1$], вероятность P должна находиться на уровне ниже R . Если в результате анализа будет установлено, что P превышает R , необходимо предпринять шаги по повышению безопасности.

Ввиду ограниченного характера обсуждаемых здесь инцидентов проблема облучения населе-

РОЛЬ МКРЗ

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) — некоммерческая организация, начало деятельности которой относится к 1928 г. Она вырабатывает общие ориентиры в отношении широко распространенного — в связи с различными видами использования ядерной энергии — применения источников излучения. Ее рекомендации охватывают все аспекты защиты от ионизирующего излучения и составляют сегодня основу для обеспечения радиационной безопасности во всем мире, в том числе для норм и принципов, разрабатываемых МАГАТЭ. Дополнительную информацию можно получить в Научном секретариате МКРЗ, штаб-квартира которой находится в Стокгольме, Швеция, по адресу: SE-171, 16 Stockholm. Факс: +46-8-729-729-8. Эл. почта: scient.secretary@icrp.org. Сайт в Интернете: www.icrp.org.

ния возникает не всегда. Однако в некоторых сценариях, связанных, например, с утратой или хищением закрытых источников, облучение одного человека или нескольких человек из числа населения может стать крупным событием, требующим изучения. Максимальные нормальные дозы облучения населения ограничиваются обычно уровнем ниже 10^{-4}Зв а^{-1} , а коэффициент летального исхода в результате ракового заболевания при облучении населения равняется $5 \cdot 10^{-2}$. Следовательно, величина общего эталонного риска летального исхода R , применяемая к облучению населения, составит $5 \cdot 10^{-6}$.

При проведении анализа следует помнить, что в некоторых случаях, в зависимости от физических характеристик источника, потеря контроля над ним также сопряжена с риском обширного заражения и облучения многих людей из числа населения. Если такой сценарий представляется вероятным, то психологическая и экономическая ситуация может оказаться более схожей с ситуацией при ядерной аварии (хотя и далеко не столь масштабной), а описанные здесь методы — чрезмерно упрощенными.

РАЗРАБОТКА СЦЕНАРИЕВ

При проведении анализа, имеющего целью оценить вероятность возникновения опасных событий P , требуется идентифицировать все типы сценариев, при

которых могло бы значительно усилиться потенциальное облучение. В принципе это выглядит довольно просто: человек садится за стол и составляет перечень различных ситуаций, при которых инциденты считаются возможными. Однако, разумеется, какую-то возможность легко упустить из виду, поэтому в данном случае рекомендуется структурированный подход. Есть несколько методов формализации анализа, таких как изучение опасности и работоспособности системы, анализ режимов отказов и последствий и т. п. Эти различные методы касаются таких проблем, как средства обеспечения полноты, определение ключевых слов, подлежащих использованию при составлении перечней событий, и т. п., т. е. вопросов, которые, как может показаться, относятся к сфере “просто здравого смысла”, но в прошлом упущения именно в этой области часто приводили к инцидентам.

В каждом сценарии должна быть предусмотрена нагрузка на систему защиты. Анализ ставит целью определить, откажет ли система в случае нагрузки. Нагрузка должна включать как “нормальные” действия, обычно выполняемые системой, так и “случайные” события (человеческие ошибки или отказы оборудования).

Если сочтено, что все соответствующие сценарии приняты во внимание, необходимо определить их логическую структуру. Такой тип анализа хорошо известен в сфере проектирования. Обычно такое структурирование представляется в виде дерева событий или дерева ошибок.

Деревья событий начинаются с предъявления системе первоначальной нагрузки и проходят через последовательные ответы системы, описывая результат с точки зрения успеха или неудачи отдельных шагов или работы оборудования. Деревья ошибок начинаются с другого конца — с конкретного нежелательного результата — и используются в обратном направлении с целью

анализа возможных путей, которые привели к такому результату. В качестве примера можно привести очень простую систему блокировки с двумя независимыми датчиками и исполнительным механизмом, контролирующим доступ в камеру облучения. Исходным, по умолчанию, является положение исполнительного механизма, при котором дверь заперта. Дверь можно отпереть лишь в том случае, если ни один из датчиков не подает сигнал о наличии радиации. Цель установки двух датчиков состоит в обеспечении дублирования, т. е. резервного функционирования системы в случае отказа первого датчика. Эта простая система может быть легко описана с помощью как дерева событий, так и дерева ошибок.

Математический анализ деревьев событий или ошибок является концептуально простым; в основе его лежит элементарная теория вероятности. Однако практическое применение этой теории нередко весьма затруднено ввиду необходимости исследования многих альтернативных результатов, и во всех случаях для правильности расчетов, кроме самых простейших, рекомендуется компьютерная обработка.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ

Формальные аналитические методы оптимизации защиты от потенциального облучения все еще далеки от завершения, особенно в случаях с малой вероятностью и серьезными последствиями. Поэтому в своей *Публикации № 76 МКРЗ* рекомендует аналитикам начинать с косвенного метода определения цели для оптимизации.

В соответствии с данной процедурой защита от нормального облучения сначала рассчитывается с использованием традиционных методов (от простого здравого смысла до сложных количественных методов). Их применение позволит определить ожидаемую усредненную нормальную дозу. Риск летального исхода в результате рако-

вого заболевания, связанного с этой оптимизированной нормальными дозой, используется затем в качестве эталонной величины риска, которую следует использовать для оптимизации защиты от потенциального облучения. Реальная оптимизация включает итеративный процесс изучения эффективности расходов и осуществимости внесения различных изменений в проектирование на уровне операций, в средства обеспечения безопасности и процедуры.

В этой связи представляется полезным придерживаться положений издания “Последовательность приоритетов в области безопасности” (Safety Precedence Sequence). Они располагаются в следующем порядке: 1) проектирование в целях обеспечения минимального риска; 2) сокращение рисков с помощью средств обеспечения безопасности, например блокирующих устройств; 3) устройства предупредительной сигнализации (например, сигнализаторы радиационной опасности); 4) процедуры и обучение работников; и 5) выявление остаточных рисков для рассмотрения руководством.

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЕ ОШИБКИ И ГЛУБОКО-ЭШЕЛОНИРОВАННАЯ ЗАЩИТА

В издании “Последовательность приоритетов в области безопасности” отмечается, что технические эшелоны защиты — начальная, разумеется, со сведения к минимуму возможности возникновения аварии — обычно предпочтительнее действий человека. Это объясняется тем, что нередко именно человеческие ошибки, больше чем какие-либо другие факторы, приводят к возникновению потенциального облучения.

К сожалению, человеческие ошибки также труднее всего поддаются количественному выражению. Они в значительной мере обусловлены ситуацией и так называемыми “факторами, определяющими работу”

(компоновка рабочего места, уровень шума и помехи, степень напряжения и т. п.). Кроме того, если в первый раз та или иная ошибка не привела к неблагоприятным последствиям, то со временем вероятность ее повторения может возрасти.

Глубокоэшелонированная защита — важный принцип радиационной безопасности, в соответствии с которым система обеспечивается перекрывающимися барьерами безопасности, соразмерными с исходящим от источника риском. Практическое применение данного принципа сопряжено как с “резервированием”, когда параллельно создается несколько копий или вариантов одного и того же защитного эшелона, так и с “диверсификацией”, когда в рамках определенной проблемы предусматриваются альтернативные способы защиты.

Данный широко применяемый принцип в полной мере пригоден как для самых мелких операций, так и для крупных установок. Возьмем, к примеру, мобильную установку по промышленной гамма-радиографии, которая может эксплуатироваться одним работающим самостоятельно лицом, использующим один комплект оборудования. По окончании работы с данным оборудованием источник должен быть помещен в экранированный ящик в качестве первого эшелона защиты от случайного облучения.

Вторым эшелонем защиты является индикатор положения, предназначенный для указания успешного или неудачного укрытия источника. В некоторых случаях могут применяться два отдельных индикатора, обеспечивающих резервирование на данном этапе. Третий эшелон защиты состоит в том, что даже при отсутствии признаков отказа оператор обязан в соответствии с процедурой проверить рабочий участок с помощью контрольного прибора.

В качестве дополнительной меры оператор должен также носить дозиметр со звуковой

сигнализацией. И наконец, в том случае, когда индикаторы или мониторинг указывают на то, что источник не занял надлежащее положение, оператор должен временно оградить участок до окончательного укрытия источника.

НЕКОТОРЫЕ СЛОЖНОСТИ

В тех случаях, когда модификацию проверенной конструкции планируется провести в “полевых” условиях, существует серьезный риск потенциального облучения ввиду высокой вероятности человеческой ошибки. За исключением вынужденных обстоятельств, когда требуется принятие неотложных мер, до проведения тщательной оценки безопасности и четкого документального оформления предлагаемой модификации и ее оценки модификация осуществляться не должна.

Иногда ослабление того или иного вида облучения может проводиться усилением другого облучения. Например, обычно проводятся регулярные инспекции с целью обнаружения дефектов, до того как они вызовут отказ компонентов. Например, более частые инспекции ускорителя могут повысить показатели раннего обнаружения дефектов и тем самым снизить вероятность потенциального облучения.

Однако радиационные поля, присутствующие на такой установке, повлекут за собой также повышение профессионального облучения. Поэтому при оптимизации защиты должны приниматься во внимание оба вида облучения.

В сфере медицинского применения облучений дополнительная сложность состоит в том, что не только чрезмерные, но и слишком малые дозы могут оказаться небезопасными для пациента, что может помешать провести сравнение ожидаемого вреда с критерием риска R . Однако структурированный анализ продолжает оставаться полезным для выявления главных факто-

ров риска. После этого могут быть рассмотрены меры по снижению риска для пациента.

Упомянутые выше соображения касаются вероятности облучения P . Вероятность ущерба $f(E)$ при данной дозе может также привести к осложнениям. Например, в ситуациях, связанных с потенциальным облучением, могут быть получены дозы, достаточно высокие, чтобы наверняка вызвать летальный исход, обусловленный детерминистскими эффектами. Отсюда появляется возможность более значительного сокращения продолжительности жизни по сравнению с тем, который связан со стохастически обусловленным летальным исходом (он наступает позднее). Однако никакое дополнительное взвешивание данных для более раннего летального исхода не представляется необходимым ввиду общей неопределенности в расчетах вероятности.

Далее, локализованные детерминистские эффекты от потенциальных облучений будут основной угрозой в некоторых видах практической деятельности и эксплуатационной среде. Для облучений в рамках действующих пределов доз детерминистские эффекты представляются совершенно невозможными. Поэтому МКРЗ сознательно предпочла не принимать во внимание такой ущерб при обычных облучениях.

Однако оценка ущерба от детерминистских эффектов при потенциальном облучении является неизбежной. В то же время безусловно заслуживающая оценки, например, потеря пальца со всей очевидностью не идет ни в какое сравнение с летальным исходом. Таким образом, требуется взвешивание в отношении тяжести ущерба. В *Публикации МКРЗ № 76* рекомендуется общий весовой коэффициент 0,25. В основе его лежат различные страховые и компенсационные схемы и учитывается потребность в приемлемо простых общих взвешивающих коэффициентах. □