

Укрепление связи между радиационной защитой и безопасностью: Контроль за вероятностным радиационным воздействием

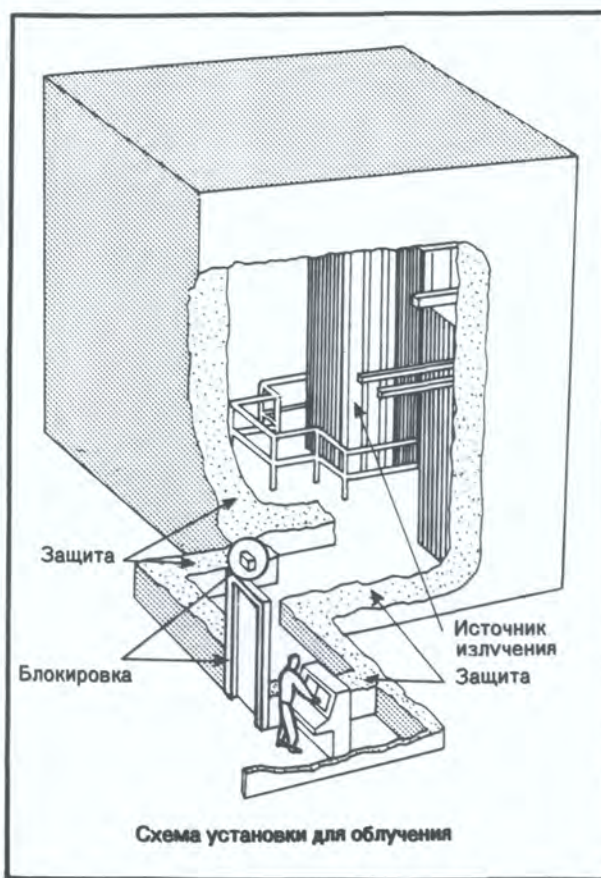
Эволюция подхода к проблемам безопасности

А.Х. Гонсалес и Дж. А.М. Уэбб

Оператор установки по облучению пищевых продуктов спокойно сидел за пультом управления, защищенным толстой бетонной стеной. Он знал, что защитный экран обеспечивал адекватную защиту от пучка излучений установки. Такая защита была создана в соответствии с „системой ограничения доз облучений“, рекомендованной Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) и принятой для практического использования большинством национальных и международных организаций. Для внедрения системы МКРЗ в мире было разработано огромное число норм, руководящих принципов и рекомендаций. Только МАГАТЭ опубликовало свыше 100 подобных документов. Оператор установки был уверен, что применение этих взаимосвязанных регулирующих правил свидетельствовало о мировом признании основных характеристик системы МКРЗ.

Однако даже такая хорошо отработанная система не устраняет полностью потенциальный радиационный риск. Согласно предположениям о воздействии на здоровье людей небольших доз облучения при низких мощностях доз радиационный риск, рассчитанный на основании радиоэпидемиологических данных о воздействии на людей более высоких доз при более высоких мощностях доз облучения, составлял порядка $1/100000$ мЗв для полученной дозы. Мощность дозы за защитным экраном обуславливала дозу облучения человека в случае его постоянного пребывания в данном помещении, не превышающую нескольких мЗв. Радиационное воздействие на самого оператора было ниже. За прошлый год его накопленная доза облучения составила менее одного миллизиверта, поэтому риск, которому он подвергался в прошлом

году, составлял менее $1/100\ 000$ мЗв. Оператор понимал, что данная величина незначительна и гораздо ниже значений тех видов риска, с которыми он сталкивался ежедневно. Оператор был удовлетворен условиями работы и уверен, что система СУЗ обеспечивала адекватную защиту от источника излучения.



Г-н Гонсалес — руководитель Секции радиационной защиты Отдела ядерной безопасности МАГАТЭ. Г-н Уэбб — секретарь Национального совета по радиологической защите Великобритании. Выраженные авторами данной статьи мнения носят частный характер и необязательно отражают точку зрения организаций, которые они представляют.

Наблюдая за пультом управления установкой, оператор заметил световой сигнал, который указывал на какую-то неисправность внутри установки: система подачи пищевых продуктов была заблокирована, и для ее ремонта ему предстояло войти внутрь бетонной защиты. Следуя письменным инструкциям по эксплуатации, он нажал кнопки останова установки и ее погружения в бассейн с водой, которая выполняла роль защитного экрана. Индикаторная лампа на пульте управления показала, что данная операция прошла успешно. Теперь оператор мог открыть дверь в коридор, пройти внутрь бетонной защиты и приступить к ремонту. Однако в этот момент у него возникли сомнения: действительно ли источник погрузился в бассейн с водой? Сработал ли механизм так, как ожидалось? Он знал, что даже в случае отказа системы останова установки, в момент, когда он откроет дверь, должна сработать другая система защиты, подключенная к затворному механизму двери, и в любом случае остановить установку. А что, если и эта система вышла из строя? Тогда высокая доза облучения, которую он получил бы в таком случае, привела бы к чрезвычайно серьезному радиационному поражению.... Оператор пожал плечами – зачем беспокоиться о чем-то столь маловероятном. Он уверенно вошел внутрь бетонной защиты. В конце концов, ему говорили, что установка оборудована системой СУЗ новейшей опробованной конструкции и построена в соответствии с самыми высокими стандартами. Случайное переоблучение было почти невозможным.

Слово „невозможно” ученые используют неохотно. Они предпочитают количественно определить вероятность возникновения какого-либо явления на основании достоверности (недостоверности) появления таких событий и измерения такой достоверности с помощью величины, называемой вероятностью. Рассмотрим два возможных варианта радиационного воздействия в вышеописанной ситуации: в первом случае достоверно, что радиационное воздействие произойдет с последующей вероятностью радиационного поражения в результате такого воздействия. Во втором случае, существует только вероятность радиационного воздействия, однако, если это произойдет, то достоверность радиационного поражения будет зависеть от уровня дозы. В обеих ситуациях можно определить радиационный риск*: поскольку в первом случае риск пропорционален дозе облучения, а во втором – пропорционален произведению вероятности радиационного воздействия на дозу облучения. Уровень риска должен контролироваться с помощью технологических систем**. Например, в первой ситуации в роли контрольной системы выступает защитный экран, а контрольного параметра – его толщина. Во втором случае контрольной системой является затворный механизм двери, а его надежность – контрольным параметром.

*Термин „риск” означает вероятность серьезного радиационного поражения.

**Термин „контролировать” в данном контексте означает ограничение, а не проверку.

В радиационной защите как научной дисциплине, обычно, рассматриваются ситуации первого типа. Второй тип ситуаций – это предмет изучения экспертов в области безопасности.

В данной статье описывается эволюция общих подходов к безопасности применительно к двум вышеуказанным ситуациям.

Разработка общего, последовательного и согласованного подхода позволит обеспечить сбалансированную взаимосвязь радиационной защиты и безопасности.

Ситуации, связанные с радиационным воздействием

При разработке возможных сценариев радиационного воздействия можно предусмотреть три типа ситуаций:

- ожидаемые ситуации, когда радиационное воздействие можно предвидеть и предположить с достоверностью (т.е. его вероятность равна или очень близка к единице).
- ситуации, которые можно предвидеть, но о возникновении которых нельзя говорить с уверенностью; однако в случае возникновения ситуаций они приведут к радиационному воздействию на здоровье людей
- ситуации (de facto), которые можно или нельзя предвидеть, но которые, однако, в случае их возникновения оставляют лишь возможность для принятия мер по ликвидации их последствий.

Защита от ионизирующего облучения, как правило, основывается на рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). В этих рекомендациях не рассматриваются конкретные сценарии радиационного воздействия, являющиеся предметом их обсуждения. Однако на практике такие рекомендации используются в отношении первого и частично третьего сценариев. Рекомендации МКРЗ используются в основном для регулирования ситуаций, связанных с условиями радиационного воздействия, о достоверности которого можно говорить с уверенностью. Такое радиационное воздействие в данной статье мы будем называть „достоверным”; данный термин предположительно охватывает различные виды радиационного воздействия, которое в практической жизни называют „нормальным” воздействием и воздействием в ходе „нормальной эксплуатации”. Во втором сценарии данный термин практически не используется, т.е. в случае радиационного воздействия его вероятность ниже единицы. Такой вид радиационного воздействия в данной статье называется „вероятностным”.

В национальных и международных нормах безопасности, основанных на рекомендациях МКРЗ, четко признается наличие данного факта*.

*В Основных радиационных нормах безопасности МАГАТЭ, Международной организации труда (МОТ), Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР) признаются „два четких условия радиационного воздействия, а именно (i) условия, в которых радиационное воздействие можно прогнозировать и ограничить с помощью контроля за источником излучения и применения системы ограничения доз облучения... (радиаци-

„Достоверное” радиационное воздействие: политика в области защиты

В отношении „достоверного” радиационного воздействия МКРЗ рекомендует систему ограничения доз облучения, которая объединяет в себе следующие взаимосвязанные требования*: (а) никакие практические меры не должны внедряться, если в результате они не дадут чистой выгоды (или обоснование практических мер); (б) в отношении любого радиационного воздействия должен действовать принцип максимального практически достижимого снижения доз. Облучение с учетом экономических и социальных факторов (или оптимизация защиты); (в) эквивалентная доза облучения отдельного лица не должна превышать пределы, рекомендованные МКРЗ для соответствующих обстоятельств (или ограничение индивидуальных доз облучения).

Следует провести анализ этих трех основных принципов политики в отношении „достоверного” радиационного воздействия с точки зрения возможного переноса этих принципов на „вероятностное” воздействие.

Обоснование практических мер. Данное требование просто означает, что для практического внедрения какой-либо меры по радиационной защите необходимо, чтобы ее ожидаемые преимущества превышали возможный ущерб. Однако значение данного положения не было еще полностью проанализировано ни МКРЗ, ни другими международными организациями. Более того, если перейти от узких рамок „достоверного” радиационного воздействия к более широкому диапазону „вероятностного” воздействия, практическое применение принципа обоснования становится более затруднительным. В некоторых сценариях вероятность радиационного воздействия может быть очень низкой, однако, если оно произойдет, его последствия могут быть очень серьезными. Пока не ясно, каким образом, подобные ситуации можно включить в оценку обоснования практических мер. **Оптимизация защиты** МКРЗ использует данный термин для выражения своего стремления к максимальному практически достижимому снижению доз облучения (принцип ALARA) с учетом социальных и экономических факторов**. К сожа-

онное воздействие при нормальных условиях эксплуатации); и (ii) условия, в которых источник излучения не является предметом контроля, поэтому степень любого последующего радиационного воздействия, если оно произойдет, можно ограничить только путем ликвидации его последствий... (радиационное воздействие при аномальных условиях эксплуатации)”. Первый случай (i) имеет прямое отношение к ситуациям, которые в данной статье приводят к „достоверному” радиационному воздействию и которые частично могут охватывать ожидаемые ситуации. Второй случай (ii), касается ситуаций, которые уже возникли. В целом Основные радиационные нормы безопасности четко определяют случай (i), и только некоторые их общие положения можно распространить на случай (ii).

* Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите, МКРЗ, Издание № 26, *Annals of the ICRP*, т. 1, № 3, Pergamon Press, Оксфорд (1977 г.).

** Анализ эффективности затрат и результатов при оптимизации радиационной защиты, Издание № 37, МКРЗ, т. 1 *Annals of the ICRP*, т. 10, № 2/3, Pergamon Press, Оксфорд (1983 г.).

лению, многие неправильно интерпретируют это простое требование, считая его синонимом анализа затраты – польза. Было четко указано, что для осуществления оптимизации не обязательно использовать какие-либо определенные методы, помогающие принять решение, как, например, анализ затраты – польза, и что для оптимизации подходит любой метод, включая простую интуицию и здравый смысл*. Такое более широкое толкование оптимизации играет важную роль в расширении принципов оптимизации за рамки ситуаций, связанных с „достоверным” радиационным воздействием.

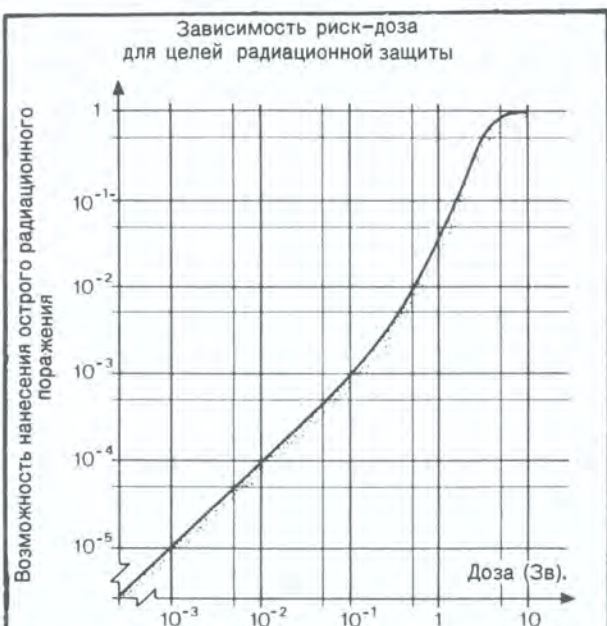
Предельные значения индивидуальных доз облучения. МКРЗ рекомендует их для „достоверного” радиационного воздействия искусственных источников излучения. Однако, устанавливая эти пределы, она признавала потенциальную возможность „вероятностного” воздействия. Если исключить данный сценарий, то числовые значения пределов будут другими.

В силу того, что данные предельные значения касаются доз облучения отдельных лиц, на которых могут воздействовать несколько источников, МКРЗ и МАГАТЭ рекомендовали также использовать верхние пределы. Верхний предел для отдельного источника устанавливается равным некоторой доле порогового значения дозы облучения, получаемой в результате общего радиационного воздействия всех источников излучения.

„Вероятностное” радиационное воздействие

Как отмечалось выше, система ограничения доз облучения МКРЗ охватывает все ситуации, в которых радиационное воздействие на людей прогнозируется, а источник излучения контролируется. Несмотря на то, что эти принципы являются универсальными, их нельзя использовать в существующей форме для контроля за источником, который может стать, а может и не стать причиной радиационного воздействия. В силу этого систему МКРЗ нельзя непосредственно использовать в случаях „вероятностного” радиационного воздействия, однако лежащие в ее основе принципы можно доработать. Для этого необходимо, чтобы система основывалась на вероятности и контроле доз облучения, а не только на контроле доз.

В действительности все ожидаемые ситуации в ходе эксплуатации источников излучения связаны с „достоверным” и „вероятностным” радиационным воздействием. Относительное значение этих двух режимов может сильно колебаться в зависимости от различных источников, однако в принципе для всех источников необходимо принимать во внимание оба режима. В абстрактной ситуации не всегда можно четко провести различие между этими двумя режимами, однако в отношении любого конкретного источника решение такой проблемы не вызывает особых трудностей. Например, нормальное радиационное воздействие может являться результатом целого ряда отдельных инцидентов, если такие инциденты происходят довольно часто, но в пределах разумного, может возникнуть стремление отнести такое воздействие к категории „достоверных” событий, и



Данный рисунок иллюстрирует зависимость доза-риск, используемую в целях радиационной защиты. Можно установить три области: (1) При уровнях доз значительно ниже одного зиверта могут возникать только стохастические эффекты, причем их вероятность прямо пропорциональна уровню дозы. К числу таких эффектов относятся раковые заболевания подвергшихся облучению лиц с летальным исходом и серьезные генетические эффекты, проявляющиеся у потомства облученных людей. Можно предположить, что в данном диапазоне любому приращению дозы соответствует пропорциональное увеличение вероятности эффекта. Данная зависимость необязательно должна являться точным отображением радиобиологических данных, однако ее следует рассматривать скорее как простое практическое предположение, а не как инструмент оценки степени облучения отдельных лиц. Следовательно, можно предположить, что зависимость вероятности радиационного поражения от дозы облучения в этом диапазоне носит линейный характер. В целях радиационной защиты крутизна линии (т.е. в данной области — фактор риска) в настоящее время принимается равной $1,6 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$. Новые радиологические данные о состоянии здоровья людей, переживших атомную бомбардировку, указывают на возможное изменение фактора риска в будущем. (2) Дозы, величина которых приближается к одному зиверту и которые были получены за короткий промежуток времени, могут вызывать нестохастические эффекты. Зависимость доза-риск приближается к сигмоидальной зависимости. Как и в стохастической области, крутизна линии зависит от целого ряда факторов, как, например: мощность дозы, которая может соответствовать определенным сценариям радиационного воздействия. В случае дозы приблизительно равной 3 Зв вероятность смертельного исхода составляет примерно 0,5. (3) И в заключение, можно предположить, что в случае доз, превышающих 5–10 Зв и полученных за короткий промежуток времени, практически у всех облучившихся будет наблюдаться синдром острого радиационного поражения, и все они в конечном счете умрут в результате облучения. Следовательно, можно предположить, что вероятность асимптотически приближается к единице, если дозы облучения превышают 5–10 Зв.

наоборот, если они происходят редко, то результирующее радиационное воздействие может быть отнесено к категории „вероятностных“ событий.

Величины, характеризующие источник с точки зрения безопасности, будут изменяться в зависимости от рассматриваемого сценария. В сценариях, связанных с „достоверным“ воздействием, относительная величина распределения дозы обычно характеризуется дозой, полученной большинством отдельных лиц, и коллективной дозой облучения, полученной от источника. Такие величины, как правило, достаточны для низких доз, предполагаемых в ходе нормальной эксплуатации: ожидается, что значение величины дозы облучения отдельных лиц должно привести к пропорциональному увеличению степени радиационного поражения, а в силу того, что индивидуальная доза является мерой индивидуального радиационного поражения или риска, коллективная доза стала мерой общего ожидаемого радиационного поражения. В случае „вероятностного воздействия“ можно также установить вероятность радиационного поражения или риска для отдельного лица, объединив вероятность получения дозы и вероятность радиационного поражения от такой дозы. Из этого следует, что можно также определить вероятностное распределение последствий.

Контроль за „достоверным“ и „вероятностным“ радиационным воздействием: параллельные разработки

Некоторые процедуры оценки и контроля за „вероятностным“ радиационным воздействием разрабатывались параллельно, а в некоторой степени и отдельно от основных принципов радиационной защиты. На национальном уровне для некоторых источников „вероятностного воздействия“ уже разработаны цели радиационной безопасности (а именно для ядерноэнергетических реакторов), и на международном уровне начинает складываться консенсус в отношении некоторых принципов ядерной безопасности*. Разработка процедур оценки и контроля за захоронением радиоактивных отходов также началась отдельно, однако в настоящее время предпринимаются энергичные усилия по решению некоторых проблем захоронения радиоактивных отходов путем расширения и доработки основных рекомендаций МКРЗ**. Был предложен унифицированный подход к контролю во всех этих вызывающих беспокойство областях на основе общих принципов последовательного и согласованного решения проблем нормального и потенциального радиационного воздействия. Со своей стороны МАГАТЭ в целях разработки унифицированного подхода к радиационной безопасности опубликовало недавно консультативный документ, касающийся применения принципов радиационной

*Основные принципы радиационной безопасности АЭС, МАГАТЭ, Серия изданий по безопасности, 75-INSAG-3, МАГАТЭ, Вена (1988 г.).

**Принципы радиационной защиты при захоронении твердых радиоактивных отходов, МКРЗ, издание № 46, Annals of the ICRP, т. 15, № 5, Pergamon Press (1985 г.).

защиты к источникам, которые потенциально могут стать причиной радиационного воздействия*

Основа политики в области радиационной безопасности

В основу политики радиационной безопасности, охватывающей все сценарии, как достоверные, так и вероятностные, может быть положена зависимость риск-доза, используемая в целях радиационной защиты и которая, в свою очередь, основывается на целом ряде радиобиологических предположений. Общая политика в области радиационной безопасности должна исходить из некой вероятности получения доз облучения, превышающих пороговые значения и верхние пределы и даже переходящих в диапазон доз, которые могут привести к серьезным „нестохастическим“ эффектам, поэтому конкретизация этих предложений играет особенно важную роль. Такую зависимость доза-риск можно использовать в качестве основы общей политики в области безопасности. (См. соответствующий рисунок).

На пути к унифицированной политике

Кажется разумным сфокусировать внимание на идее установления *порогового значения индивидуального риска* как на одном из необходимых, хотя и не достаточном требовании, предъявленном к унифицированному подходу к вопросу радиационной безопасности в целом и к контролю за вероятностным радиационным воздействием в частности. Данная идея является попыткой поиска некоторой совместимости с существующей системой ограничения доз облучения и, тем самым, попыткой установления общего порогового значения риска для отдельного лица и решения вопроса, до какой степени нужно повышать безопасность, находящуюся ниже этого предела, путем расширения концепции оптимизации и включения в нее всех видов риска для облученного населения. Такая концепция привлекательна, поэтому в настоящее время в контексте вероятностного радиационного воздействия разрабатываются и совершенствуются две идеи предельных значений индивидуальных доз и оптимизации.

Однако необходимо подчеркнуть, что эксперты по ядерной безопасности также рассматривали вопрос „социального риска“ с точки зрения критериев, относящихся к группе „пороговых значений социального риска“ или „уровней социального риска“**. Кажется, что на такие критерии социального риска непосредственно не распро-

страняются требования, предъявляемые к ограничению индивидуальных доз и оптимизации. Однако они могут быть связаны с требованиями, предъявляемыми к обоснованию практических мер, но данная потенциальная связь в этой статье анализироваться не будет.

Пороговое значение индивидуального риска

В настоящее время рекомендованное МКРЗ предельное значение доз облучения отдельных лиц из населения равно 1 мЗв/год соответствует ожидаемому риску приблизительно в 10^{-5} и может быть использовано в качестве эталонного значения для разработки критерия пороговых значений индивидуального риска. Если нормальное радиационное воздействие находится ниже предельного значения дозы, то единственными эффектами, которые следует принимать во внимание при оценке воздействия на здоровье людей, являются раковые заболевания и эффекты, проявляющиеся у потомства облученных людей. Если теперь преобразовать предел дозы в предел риска, то ограничения, действующие в отношении самой дозы, отпадают, поэтому учитываться должны другие эффекты, например, смерть в результате высоких доз облучения. В принципе нет необходимости придавать значение всем типам эффектов, если например, в качестве весовой функции использовать потери в человеко-годах, то смерть в результате острого лучевого поражения перевесит смерть от рака с длительным латентным периодом. Однако в контексте пределов (а не уровней) в целях упрощения представляется разумным в одинаковой степени серьезно относиться и к воздействию на здоровье людей, тогда в качестве порогового значения риска можно будет установить отдельное цифровое значение, применимое ко всем событиям вероятностного характера.

В силу этого для оценки радиационной безопасности отдельных лиц и в целях совместимости с общими радиационными нормами безопасности и ограничения доз облучения было предложено пороговое значение риска равно $10^{-5}/\text{год}$. Данный предел будет применяться в отношении индивидуального риска для большинства наиболее сильно облученных отдельных лиц (за исключением больных) в результате потенциального радиационного воздействия всех источников излучения (за исключением природных источников). Важно знать, что данное пороговое значение риска является нижней границей зоны неприемлемого риска; любой риск ниже данного предела не обязательно должен рассматриваться как приемлемый.

В силу того, что риск для отдельного лица может быть обусловлен несколькими источниками, в дополнение к пороговым значениям риска (для отдельного лица) необходимо ввести *верхнее пороговое значение риска*, обусловленное источником излучения (или даже верхнее пороговое значение риска для конкретного сценария), который будет ограничивать индивидуальный риск, обусловленный одним источником излучения (или соответственно, одним сценарием радиационного воздействия). Верхнее пороговое значе-

* „Применение принципов радиационной защиты к источникам потенциального радиационного воздействия: На пути к унифицированному подходу к радиационной безопасности“ (консультативный документ), МАГАТЭ, Вена (1988 г.).

** „Современное состояние, опыт и перспективы развития вероятностных критериев безопасности, отчет совещания технического комитета, 1988 г., МАГАТЭ, TECDOC (готовится к публикации).“

Параметрическая кривая для ограничения индивидуального риска



Одной из процедур реализации требований, предъявляемых к анализу вероятностных событий, связанных с отдельными лицами, является выражение пороговых значений риска в виде параметрической кривой. На рисунке показана такая кривая, отражающая максимальную вероятность, которую можно допустить для расчетной дозы облучения в результате начального события и которая основана на установлении верхнего порогового значения годового риска U_R для критической группы. Характерными признаками параметрической кривой являются: область обратно пропорциональной зависимости; область нелинейной зависимости для диапазона доз, в котором могут также наблюдаться нестохастические эффекты; и постоянная вероятность получения летальных доз. В последней области вероятность носит постоянный характер независимо от величины дозы, так как последствия для пострадавшего будут всегда

одинаковыми независимо от полученной дозы облучения. В диапазоне доз, приводящих только к стохастическим эффектам, зависимость вероятность-доза носит обратно пропорциональный характер, причем значения ее величины для единичной дозы являются произведением вероятности получения определенной дозы, годовой дозы, на вероятность эффекта. И, в заключение, в диапазоне доз, где могут наблюдаться нестохастические эффекты, т.е. индивидуальные дозы облучения превышают несколько зивертов, параметрическая кривая имеет нелинейную форму, что дает возможность учесть возрастающую вероятность смертельного исхода. Данная часть кривой обычно соответствует сигмаидальной зависимости χ зависит от времени, в течение которого была получена доза облучения.

Предложенную параметрическую кривую можно использовать следующим образом для оценки соответствия безопасности определенного варианта требованиям, предъявляемых к величине риска. Во-первых, нужно определить событие или последовательность событий, которые потенциально могут привести к радиационному воздействию на человека. Событие или последовательность событий можно выбирать как событие, представляющее группу аналогичных сценариев, в силу того, что рассматриваются максимальные последствия. Во-вторых, нужно провести оценку вероятности появления каждого из событий и последующего радиационного воздействия на критическую группу. И, в заключение, надо нанести точки, соответствующие вероятности возникновения начального события, всем другим условиям окружающей среды и максимальной дозе. Если эти точки будут находиться в неприемлемой области, то данный вариант следует отвергнуть. Однако, даже если все точки будут расположены в приемлемой области предлагаемый для рассмотрения вариант может не подойти, так как он не был оптимизирован. Следовательно, на данном этапе полезность параметрической кривой ограничена ролью основного инструмента проверки и принятия решения о приемлемости или неприемлемости данного варианта. Следующим этапом является проверка соответствия варианта главному требованию — оптимизации безопасности.

ние риска определяется пороговыми значениями риска (т.е. устанавливается равным какой-то доле порогового значения риска) и может зависеть от рассматриваемого источника или сценария. Верхнее пороговое значение риска, соотнесенное с источником излучения, должно использоваться при проектировании и регулировании деятельности конкретной установки таким же образом, как и существующие верхние пределы доз облучения. Самым простым методом включения вероятностных сценариев в систему радиационной защиты, основанной на оценке риска, является определение отдельных верхних пороговых значений риска вероятностного радиационного воздействия и сохранение существующего предела доз облучения в ходе нормальной эксплуатации.

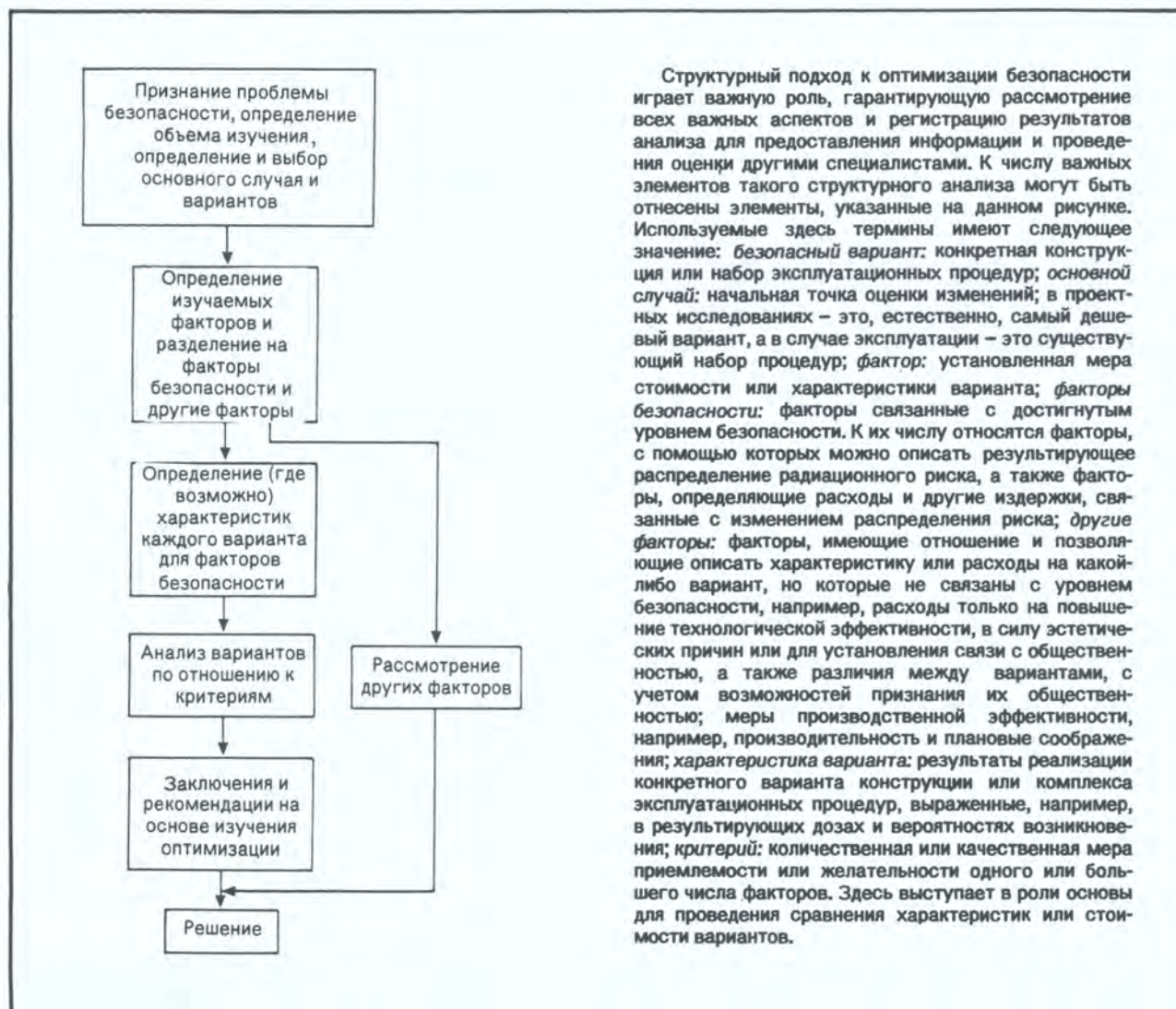
В зависимости от выбранного верхнего порогового значения риска можно построить параметрическую кривую, ограничивающую значение индивидуального риска для конкретного сценария, как непосредственно вытекающую из

зависимости риск-доза* (как было показано ранее на рисунке, иллюстрирующем зависимость риск-доза). (См. также соответствующий рисунок, поясняющий параметрическую кривую).

Оптимизация безопасности

Гарантия условия, что ни одно отдельное лицо не будет подвергаться неоправданно высокому радиационному риску, является необходимым, но не достаточным условием обеспечения соответствующего уровня безопасности источника излучения. По-прежнему остается вопрос, следует ли

*„Применение результатов вероятностной оценки безопасности регулирующими органами Аргентины“, А.Х. Гонсалес, в Материалах международного совещания по безопасности тепловых ядерных реакторов, Чикаго, США, NUREG/CP-0027 (1982 г.).



Структурный подход к оптимизации безопасности играет важную роль, гарантирующую рассмотрение всех важных аспектов и регистрацию результатов анализа для предоставления информации и проведения оценки другими специалистами. К числу важных элементов такого структурного анализа могут быть отнесены элементы, указанные на данном рисунке. Используемые здесь термины имеют следующее значение: **безопасный вариант**: конкретная конструкция или набор эксплуатационных процедур; **основной случай**: начальная точка оценки изменений; в проектных исследованиях – это, естественно, самый дешевый вариант, а в случае эксплуатации – это существующий набор процедур; **фактор**: установленная мера стоимости или характеристики варианта; **факторы безопасности**: факторы связанные с достигнутым уровнем безопасности. К их числу относятся факторы, с помощью которых можно описать результирующее распределение радиационного риска, а также факторы, определяющие расходы и другие издержки, связанные с изменением распределения риска; **другие факторы**: факторы, имеющие отношение и позволяющие описать характеристику или расходы на какой-либо вариант, но которые не связаны с уровнем безопасности, например, расходы только на повышение технологической эффективности, в силу эстетических причин или для установления связи с общественностью, а также различия между вариантами, с учетом возможностей признания их общественностью; меры производственной эффективности, например, производительность и плановые соображения; **характеристика варианта**: результаты реализации конкретного варианта конструкции или комплекса эксплуатационных процедур, выраженные, например, в результирующих дозах и вероятностях возникновения; **критерий**: количественная или качественная мера приемлемости или желательности одного или большего числа факторов. Здесь выступает в роли основы для проведения сравнения характеристик или стоимости вариантов.

совершенствовать данный параметр, принимая во внимание, например, тот факт, что большое число отдельных лиц, сталкивающихся с низким индивидуальным риском, может обуславливать неприемлемо высокую степень общего ожидаемого радиационного поражения.

В случае с „достоверным” радиационным воздействием необходимо оптимизировать радиационную защиту от источника излучения. Выполнение этого требования, как правило, приводит к индивидуальным дозам, значение которых ниже предельных значений индивидуальных доз. Концепция оптимизации защиты предполагает выбор наиболее целесообразного уровня защиты с учетом целого ряда факторов, наиболее важными из которых являются (1) общее радиационное поражение облученного населения, выраженное коллективной дозой и (2) стоимость защиты. Однако признается возможным принять во внимание и другие факторы, как, например, распределение доз. Таким образом, оптимизацию можно рассматривать как процесс, в котором используется метод, облег-

чающий принятие решения. В силу того, что при принятии окончательного решения учитываются также и другие факторы, часть из которых не имеет никакого отношения к радиационной защите, результат оптимизации можно считать частичным вкладом в окончательное решение.

Совершенно ясно, что при проведении полной оценки ожидаемого радиационного поражения, связанного с различными сценариями „вероятностного радиационного воздействия”, необходимо учитывать число пораженных людей, вероятность и уровень их доз облучения, а также все усилия, включая расходы на повышение безопасности. Данный аспект достаточно тесно связан с идеями оптимизации защиты, в соответствии с которыми уместно проанализировать пути возможного распространения данной концепции на систему, в основе которой лежит оценка риска.

При расширении этой системы очень полезно сфокусировать внимание на концепции „оказания помощи в принятии решений” в процессе оптимизации и включить в число рассматриваемых

факторов вероятность и последствия возможного радиационного воздействия. Кроме того, в контексте принятия решения оптимизацию полезно рассматривать как структурный подход. (См. соответствующий рисунок). При проведении расширенной оптимизации может оказаться бесполезным предложение об эквивалентности различных эффектов на здоровье людей, которое было принято для упрощения процесса разработки критериев ограничения риска. В частности, последствия нестохастических эффектов, например, смерть в результате острого лучевого поражения, лучше рассматривать отдельно от последствий стохастических эффектов.

Соответствующей величиной, предложенной МКРЗ и принятой МАГАТЭ для оптимизации защиты от „достоверного” радиационного воздействия, является „ущерб”, который определяется как ожидаемое значение радиационного поражения группы людей в результате воздействия определенного источника излучения. В случае „вероятностного” радиационного воздействия, как показывает следующий пример, концепцию ущерба нельзя использовать непосредственно*. Рассмотрим последовательность развития аварии с низкой вероятностью P , которая приводит к серьезным последствиям C , если она происходит (и, конечно, не имеет никаких последствий в противном случае). Ожидаемое значение радиационного поражения является произведением PC . Если значение P очень низкое, а C очень высокое, то величина ущерба будет иметь промежуточное значение, не дающее адекватного количественного представления о ситуации, которая может вообще не иметь никаких последствий или привести к очень серьезным последствиям. Другими словами большая неопределенность в отношении серьезности последствий не ясна для человека, принимающего решения, поэтому ее нельзя включать в процесс принятия решения. Таким образом, в подобных случаях ущерб может и не являться величиной, полезной для оценки вариантов. Следовательно в случае „вероятностного” радиационного воздействия к числу сравниваемых величин должно относиться — в дополнение к условиям по обеспечению безопасности — полное распределение вероятностей и последствий.

В дополнение к проблеме выбора величин для сравнения возникает проблема включения в процесс сравнения величин или приоритетов, которые нельзя выразить в соизмеримых единицах. К числу таких приоритетов, которые необходимо учитывать полностью, относится степень снижения риска аварий с серьезными последствиями; социальные издержки, связанные с ограничениями или неудобствами; заболеваемость и смертность в результате различных радиационных эффектов и относительное значение эффектов.

Проблему сравнения величин, которые не поддаются прямому линейному сравнению, можно решать с помощью функций полезности и теории

принятия решений*. Приоритеты различных величин определяются с использованием функции полезности, которая помогает объединять различные величины для проведения сравнения. После этого можно объединить результирующие функции полезности, используя механизм оказания помощи в принятии решения, чтобы выбрать „наилучший” (т.е. оптимизированный) в данных условиях** вариант. В настоящее время в рамках специальной группы МКРЗ ведется обсуждение данного класса методов, облегчающих принятие решения; уже подготовлено общее описание этого механизма**.

Перспективы: общая политика и проблемы, требующие решения

В заключение можно сказать, что система ограничения риска, основанная на принципах оптимизации безопасности с ограничением верхних пороговых значений индивидуального риска, и существующая система ограничения доз могут стать основой общей политики в области радиационной безопасности.

Однако для успешного проведения такой политики требуется дальнейшее исследование некоторых практических проблем, в том числе:

- Проведение вероятностного анализа безопасности связано со множеством неопределенностей. Вытекающая из этого недостаточная уверенность в полученном результате должна найти свое отражение в определенной степени консерватизма, который будет присутствовать при определении соответствующего уровня безопасности или при сравнении полученных результатов с целями. В данном контексте, например, могут возникнуть трудности с использованием пороговых значений риска или верхних пределов в качестве цели безопасности, а не ее ограничения. Следовательно, должно быть совершенно ясно, что пороговое значение риска и верхние пределы нельзя интерпретировать как цели или уровни безопасности. Скорее их следует интерпретировать как границы запретной области, и они должны обладать необходимой степенью консерватизма, который поможет справиться с ожидаемыми неопределенностями.

- В настоящее время не существует готовых стандартизированных методов вероятностной оценки. Для одной и той же ситуации можно получить сильно отличающиеся друг от друга результаты, если не будут достаточно подробно определены

* „Критические замечания по поводу применения некоторых методов оценки вероятностей и последствий аварий”, Д.Дж. Бенинсон и Б. Линделл, Текущие вопросы безопасности АЭС, МАГАТЭ, 1980 г.

*См. две статьи Д.Дж. Бенинсона: „Оптимизация радиационной защиты как особый случай теории принятия решений” в издании Оптимизация радиационной защиты, МАГАТЭ, Вена (1986 г.); и „Применение принципов оптимизации радиационной защиты к потенциальному радиационному воздействию в результате аварий” в издании Характеристики и безопасность ядерной энергии т. 4, МАГАТЭ, Вена, (1986 г.).

** „Методы, помогающие принять решение в области радиационной защиты”, Дж.А.М. Уэбб и Дж. Ломбард в материалах конференции МАГАТЭ в Сиднее (апрель 1988 г.) Радиационная защита в области ядерной энергии, которые готовятся к публикации.

граничные условия и методология анализа. В результате может возникнуть нежелательная ситуация, когда на основании данных двух анализов одной и той же ситуации можно сделать вывод как о соответствии, так и о несоответствии установленному пределу риска. Решить эту проблему представляется возможным путем разработки стандартизированных процедур вероятностной оценки безопасности и их включения в соответствующие регулирующие правила. Однако этот вариант может вступить в противоречие с философией регулирующих органов некоторых стран, которые придерживаются недирижистского подхода.

● Другая проблема заключается в *измеримости и учитываемости риска*. В случае „достоверного” радиационного воздействия в качестве косвенной меры риска для облученных лиц используется „эффективная эквивалентная доза”. Такая величина „поддается измерению” с помощью других соответствующих физических величин, а также различных предположений и гипотез, следовательно ее можно зарегистрировать в соответствующих учетных документах, имеющих официальный статус. Иная ситуация сложилась с „вероятностным” радиационным воздействием: с помощью

эффективной эквивалентной дозы при воздействии облучения нельзя измерить риск (так как есть шанс, что воздействия не будет), а других „измеряемых” и „учитываемых” величин нет. С помощью приборов нельзя „измерить” надежность систем СУЗ, последующую вероятность радиационного воздействия или комбинацию вероятности и дозы; их нельзя принять в качестве величин, используемых в целях учета, так как *a posteriori* нельзя будет юридически „доказать” их соответствие. Возможно, имеются какие-то пути решения этой юридической проблемы, однако их пока никто еще не изучал.

В свете этих проблем некоторые эксперты по безопасности выразили опасение по поводу применения системы ограничения риска в отношении АЭС. По их мнению предпочтительней сфокусировать внимание на общих целях вероятностного анализа. Другие эксперты высказали мнение, что несмотря на практические трудности, нужно оказать поддержку созданию общей философской основы ограничения риска. Мы считаем, что у последней точки зрения имеются достаточно хорошие перспективы на успех, чтобы претворить ее в жизнь.