

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ, ОТНОСЯЩИХСЯ К БОЛЬШОМУ АВАРИЙНОМУ ВЫБРОСУ

Любарский А.В.¹, Токмачев Г.В.¹, Михалев А.В.^{1,2}, Кузьмина И.Б.³

¹ АО «Атомэнергoproject»

105082, г. Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1

² ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

³ АО «РЭИН Инжиниринг»

115114, г. Москва, ул. Летниковская, д. 10, стр. 5



Вероятность реализации большого раннего аварийного выброса является одним из показателей безопасности, отражающим риск летальных исходов при аварии на АЭС. И несмотря на то, что данный показатель является весьма значимым, в федеральных нормах и правилах РФ он не определен. В статье проанализирован мировой опыт определения критериев большого раннего аварийного выброса с учетом статистических данных конкретной рассматриваемой страны (США). На основании анализа сформулированы определение большого раннего аварийного выброса и критерии его достижения с учетом мер по защите населения, проживающего в пределах зоны планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ), а также предложен подход по их определению. Сформулированы вероятностные цели по безопасности, учитывающие риск возникновения негативных радиационных эффектов для населения, приводящих с большой вероятностью к летальным исходам при большом раннем аварийном выбросе. Предложенные вероятностные цели по безопасности учитывают долговременные последствия тяжелых аварий для населения.

Сформулированный подход по учету вероятностных целевых показателей безопасности включает в себя условия конкретного проекта АЭС и площадки, на которой она размещена, и позволяет обеспечить более высокий уровень безопасности населения во время тяжелой аварии с учетом оптимального времени начала защитных мероприятий.

Ключевые слова: цели по обеспечению здоровья, вероятностные цели по безопасности, аварийный выброс, меры по защите населения.

Для цитирования: Любарский А.В., Токмачев Г.В., Михалев А.В., Кузьмина И.Б. К вопросу определения и практического применения вероятностных показателей безопасности, относящихся к большому аварийному выбросу. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 59 – 73.

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.05>

ИСТОРИЯ И ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЦЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Цели по обеспечению здоровья Комиссии по ядерному регулированию США

В отечественной нормативной практике отсутствует упоминание о целях по обеспечению здоровья населения (ЦОЗ) с учетом техногенных рисков, поэтому целесообразно обратиться к зарубежному передовому опыту, в первую очередь, США. Комиссия по ядерному регулированию США (КЯР) в 1986 г. утвердила качественные и количественные ЦОЗ.

Двумя качественными ЦОЗ (как в части риска для людей, проживающих на прилегающей к атомной электростанции территории, так и для населения в целом) являются следующие [1]:

- «Представителям населения должен быть обеспечен такой уровень защиты от последствий эксплуатации атомной электростанции, чтобы люди не подвергались значительному дополнительному риску для жизни и здоровья»;

- «Общественные риски для жизни и здоровья от эксплуатации АЭС должны быть сопоставимы или меньше, чем риски от производства электроэнергии с помощью жизнеспособных конкурирующих технологий, и не должны быть существенным дополнением к другим общественным рискам».

КЯР также утвердила две следующие количественные ЦОЗ, которые служат для определения факта достижения качественных целей [1]:

- «Риск быстрого летального исхода для находящегося поблизости от АЭС среднестатистического человека, возникающий в результате аварий на реакторах, не должен превышать одной десятой доли одного процента (0,1%) от суммы рисков быстрых летальных исходов, вызванных другими авариями, с которыми обычно сталкиваются представители населения США»;

- «Риск летальных исходов от рака для населения, проживающего в районе атомной электростанции, возникающий в результате эксплуатации АЭС, не должен превышать одной десятой доли одного процента (0,1%) от суммы рисков смертности от рака, вызванного всеми остальными причинами».

Первая количественная цель привязана к риску быстрого летального исхода от всех видов аварий на АЭС (т.е. относится к смертям, наступающим вскоре, обычно в течение нескольких недель или месяцев, после воздействия больших доз радиации). Вторая привязана к общему риску смерти от рака по любым причинам. Обе цели не ориентированы на конкретные группы населения, т.е. учитываются все возрастные, социальные и т.п. группы.

Количественно ЦОЗ сформулированы так [1]:

- количественная ЦОЗ1 по быстрым летальным исходам – $5,0E-07$ 1/год исходя из риска смерти в результате техногенной аварии в США;

- количественная ЦОЗ2 по смертности от рака – $2,0E-06$ 1/год исходя из статистики смертности от рака.

Указанные ЦОЗ определены по формулам

$$\text{ЦОЗ1} = \frac{0,001 \cdot L}{N}, \quad (1)$$

где L – число смертей от всех причин, не связанных с хроническими заболеваниями в стране; N – население страны; 0,001 – коэффициент, учитывающий 0,1% от суммы рисков быстрых летальных исходов;

$$\text{ЦОЗ2} = \frac{0,001 \cdot C}{N}, \quad (2)$$

где C – число смертей от рака в стране; N – население страны; 0,001 – коэффициент, учитывающий 0,1% от суммы рисков смертности от рака.

Обе количественные ЦОЗ носят статистический характер, т.е. определяются исходя из реальной статистики смертей в США.

Предложенные КЯР количественные ЦОЗ имеют достаточно устойчивый характер. Так КЯР в 2004 г. [2] (население США 293 500 000 человек) выполнило оценки изменения количественных ЦОЗ по сравнению с публикацией количественных ЦОЗ в 1986 г.

В 2004 г. по данным Центра по контролю и профилактике заболеваний США

- от всех причин, не связанных с хроническими заболеваниями, погибло 112 000 человек;

- от рака зафиксировано 597 000 смертей.

В соответствии с формулами (1) и (2) и данными Центра по контролю и профилактике заболеваний США ЦОЗ имеют следующие значения:

- $3,8\text{E}-7$ 1/год ($\sim 4,0\text{E}-07$ 1/год) для ЦОЗ1 (средний индивидуальный риск быстрых летальных исходов);

- $1,9\text{E}-6$ 1/год ($\sim 2,0\text{E}-06$ 1/год) для ЦОЗ2 (средний индивидуальный риск смертности от рака).

Таким образом, показано, что установленные в 1986 г. количественные ЦОЗ несущественно менее строгие по отношению к ситуации в 2004 г.

Если применить предложенный подход КЯР к условиям России (по данным на 2021 г. население 146 млн. человек [3], количество внезапных смертей, связанных с травмами и прочими техногенными внешними воздействиями, около 128 000 человек и смертей от рака около 283 000 человек [4]), то могут быть получены следующие оценки:

- количественная ЦОЗ1 равна $8,77\text{E}-07$ ($\sim 9\text{E}-07$) 1/год;

- количественная ЦОЗ2 равна $1,94\text{E}-06$ ($\sim 2\text{E}-06$) 1/год).

Таким образом, количественная ЦОЗ1 КЯР ($5\text{E}-7$ 1/год) по быстрым летальным исходам более жесткая, чем та, которая могла бы быть установлена для России в соответствии с методикой КЯР, но количественная ЦОЗ2 по смертности от рака полностью применима.

Аналогичная России ситуация наблюдается и в Турции [5]. Например, риск смерти от рака в Турции около 200 человек на сто тысяч в год. Следовательно, средний индивидуальный риск смертности от рака, выраженный в значении ЦОЗ2, составляет $2,0\text{E}-06$ 1/год.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ЦЕЛИ ПО БЕЗОПАСНОСТИ (ВЦБ)

ВЦБ КЯР

В практическом смысле количественные ЦОЗ были замещены ВЦБ, изложенными в Руководстве по принятию решений, включенном в Нормативное руководство КЯР 1.174 [6] (выпущено в 1998 г., пересмотрено в 2018 г.).

Для ВЦБ заданы следующие значения:

- $1,0\text{E}-04$ 1/реактор-год по частоте повреждений активной зоны ядерного реактора;
- $1,0\text{E}-05$ 1/реактор-год по частоте больших ранних аварийных выбросов.

КЯР обосновал, что вероятностная цель по частоте большого раннего выброса, равная $1,0\text{E}-05$ 1/реактор-год, является подходящим заместителем количественной ЦОЗ1 $5,0\text{E}-07$ 1/год по быстрым летальным исходам, а цель по частоте повреждения активной зоны, равная $1,0\text{E}-04$ 1/реактор-год, является подходящим заместителем количественной ЦОЗ2 по смертности от рака ($2,0\text{E}-06$ 1/год) [7].

Важно отметить, что КЯР устанавливал не критерии, а цели. При этом установление целей по частоте большого позднего аварийного выброса КЯР считал излишним. Также КЯР не считал необходимым для проверки соответствия установленным целям выполнение вероятностного анализа безопасности (ВАБ) уровня 3, целью которого является оценка частоты различных дозовых нагрузок на население и частоты летальных исходов населения в районе АЭС.

Подходы МАГАТЭ и EUR к учету больших ранних аварийных выбросов

В соответствии с подходом МАГАТЭ, сформулированным в INSAG-12 [8], при проектировании новых АЭС следует стремиться к тому, чтобы значение частоты больших аварийных выбросов, при которых необходимы быстрые контрмеры по защите населения, было как можно более низким. При этом в качестве быстрых контрмер рассматриваются серьезные меры по защите населения за пределами площадки АЭС, относящиеся к эвакуации населения, проживающего на прилегающей к АЭС территории. Уровень дозовых нагрузок, при котором требуется проводить эвакуацию, может варьироваться от 0,1 до 0,5 Зв, что отвечает рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите. Целевые значения частоты повреждения активной зоны и частоты большого выброса проиллюстрированы на рис. 1, 2 (на основании информации из [8, 9]). Для понимания рис. 1 следует принять во внимание, что INSAG-12 [8] ввел в употребление термин «практическое исключение» в отношении больших ранних выбросов, но не дал численного определения частоты таких выбросов (т.е. не определил значение частоты, при котором большие ранние выбросы могут классифицироваться как «практически исключенные» события).

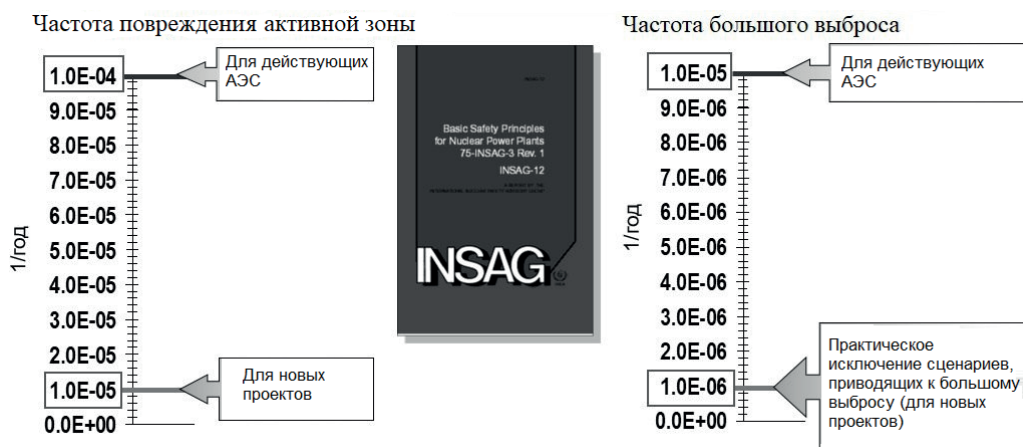


Рис. 1. Целевые ориентиры безопасности согласно INSAG-12 (частота повреждений активной зоны ядерного реактора и частота большого выброса)

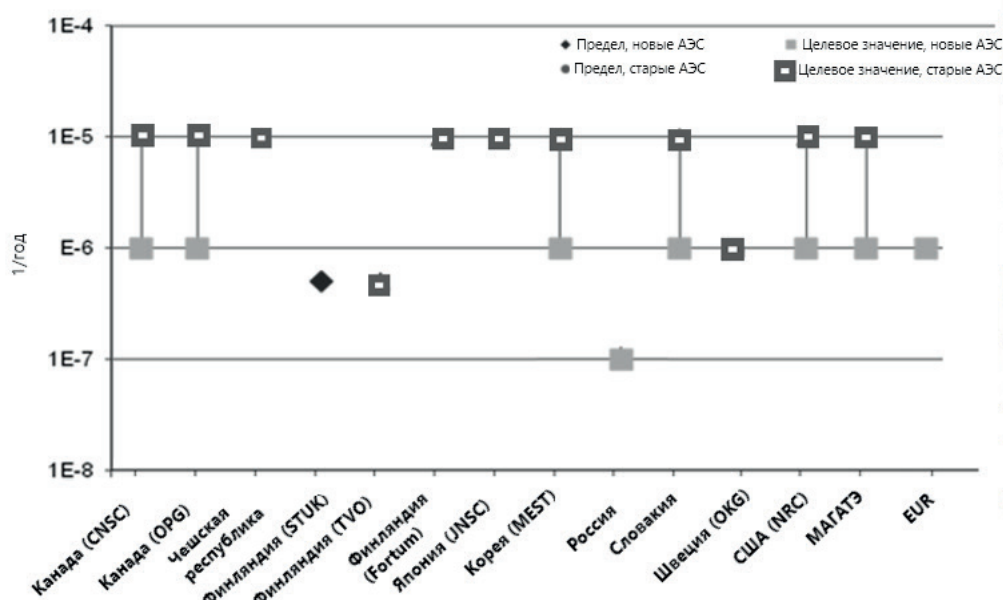


Рис. 2. Целевые ориентиры безопасности, установленные в разных странах (частота большого выброса)

В разделе 2.1 Требований Европейских эксплуатирующих организаций EUR [10] говорится, что проект блока АЭС должен быть таким, чтобы реализация сценариев аварий, приводящих к раннему или большому аварийному выбросу, была практически исключена (Practically Eliminated). В [10] в разделе определений для термина «ранний выброс» указывается, что для этого выброса меры по защите населения необходимы, но их эффективность маловероятна из-за недостатка времени.

Дискуссия относительно вероятностных целей по безопасности КЯР

Несмотря на то, что подход к определению целей безопасности, разработанный КЯР для АЭС в США, был принят в большинстве стран в мире, существует ряд аспектов, требующих, как минимум, обсуждения и учета при формулировке целей безопасности в конкретной стране.

Исходно КЯР не дала определения понятию «большой ранний аварийный выброс». В контексте норматива 1.174 [6] частота большого раннего аварийного выброса используется в качестве заменителя количественного ЦОЗ по ранней смертности и определяется как «Частота аварий, приводящих к значительным, несмягченным выбросам из защитной оболочки в течение периода времени до эффективной эвакуации близко проживающего населения, таковых, что существует потенциал возникновения ранних последствий для здоровья».

Первый согласованный количественный подход к определению термина «большой ранний аварийный выброс» был выработан КЯР в [11]:

- понятие «большой» применяется к выбросам, в результате которых количество йода в выбросе превышает приблизительно 2 – 5% от исходного содержания изотопа в отработанном топливе реактора;
- понятие «ранний» применяется к выбросам в течение 4 – 10 часов после начала аварии.

Фактически понятие «ранний» привязано к мероприятиям по эвакуации населения, т.е. если аварийный выброс происходит до окончания эвакуации, то он определяется как «ранний».

Однако уже в NUREG/CR-6595 (Ред. 1) [12] указывается, что даже поздние аварийные выбросы (т.е. происходящие за пределами 10-ти часов после начала аварии) могут привести к ранним смертельным случаям, особенно если условия аварии препятствуют эвакуации населения (например, цунами или землетрясение). Возможно, поэтому в [13] рекомендовано проверять соответствие новых реакторов целям по отношению к большому аварийному выбросу вне зависимости от времени выброса (только для пассивных реакторов, т.е. реакторов, в которых основные функции безопасности выполняются пассивными системами, например, для реактора AP-1000). Выбор критерия незначительности дополнительного риска от АЭС как 0,1% от общего риска (ранних летальных исходов или смерти от рака) КЯР никогда не обосновывался, однако именно от него напрямую зависят целевые ориентиры. Тем не менее, выбранное значение считается приемлемым, так как полученные на его основании вероятностные цели по безопасности приняты как МАГАТЭ [14, 15], так и большинством стран-членов МАГАТЭ [16].

Значения ВЦБ (частота повреждений активной зоны ядерного реактора и частота большого раннего аварийного выброса), полученные на основании количественных ЦОЗ, по сути означают, что условная вероятность ранних летальных исходов при условии большого раннего аварийного выброса оценена как $5,0E-2$, а условная вероятность смерти от рака при условии повреждения ядерного топлива в активной зоне оценена как $2,0E-02$. Не вдаваясь в детали таких оценок, приведенных в [7], следует отметить следующее.

Условная вероятность смерти от рака оценена исходя из анализов, выполненных для одной станции в США. При оценке учитывалась возможность эвакуации 90% населения в течение четырех – восьми часов в районе АЭС (25 миль). Условная вероятность ранних летальных исходов оценена исходя из усредненных данных по АЭС в США, где в 1986 г. работало более 100 АЭС различных проектов с различной конструкцией герметичной оболочки. Обе оценки могут быть неприменимы к странам с малым количеством АЭС, где строятся или эксплуатируются современные блоки, с дополнительными мерами по удержанию расплава в корпусе реактора, в ловушке расплава или в герметичной оболочке, а также с дополнительными мерами по управлению запроектными авариями. Для современных АЭС выход продуктов деления за пределы герметичной оболочки при тяжелых авариях в количествах, потенциально приводящих к ранней смерти или к раку (при условии повреждения топлива в активной зоне), значительно менее вероятен, чем для блоков, находящихся в эксплуатации в США в 1986 г. Для таких стран оценки могут быть как избыточно консервативны, так и избыточно оптимистичны в зависимости от конкретного проекта блока, от условий в районе АЭС (в первую очередь, метеорологических, сельскохозяйственных и демографических), а также уровня технической оснащенности (в частности, для возможности организации своевременной эвакуации большого количества людей).

КЯР не указал, что должно входить в объем ВАБ, результаты которого требуются для сравнения с целевыми ориентирами КЯР, а именно, входят ли другие источники радиоактивности (например, ядерное топливо в бассейне выдержки), учитываемые состояния блока (работа на мощности, останов, перегрузка и т.п.), учитываемые ИС (только внутренние ИС или также ИС, вызванные внутренними и внешними воздействиями). В настоящее время требуется выполнение полномасштабного ВАБ [14, 15] для всех видов источников

радиоактивности и для всех эксплуатационных состояний блока АЭС. Следовательно, определенные КЯР целевые ориентиры должны оцениваться с использованием полномасштабного ВАБ (при этом должна оцениваться частота повреждения ядерного топлива вместо частоты повреждений активной зоны ядерного реактора), что также влияет на оцененные условные вероятности.

ВЦБ КЯР не учитывают большие поздние аварийные выбросы как для времен, несколько превышающих времена реализации большого раннего аварийного выброса (сутки), так и времен, значительно превышающих времена реализации большого раннего аварийного выброса (недели, месяцы, годы), которые могут иметь негативные последствия для здоровья населения в районе АЭС при отсутствии программы переселения с загрязненных территорий.

Вывод из анализа представленной информации

Приведенная выше информация позволяет сделать следующие выводы.

1. Количественные ЦОЗ, установленные КЯР в 1986 г., имеют достаточно устойчивый временной и международный характер и могут применяться и в настоящее время в различных странах (России, Турции и др.).

2. Условная вероятность ранних летальных исходов при условии большого раннего аварийного выброса и условная вероятность смерти от рака при условии повреждения топлива могут существенно отличаться в разных странах даже для одного и того же проекта блока АЭС, что обусловлено спецификой площадки размещения АЭС. В связи с этим корректность применяемых в ряде стран ВЦБ КЯР (частота повреждения активной зоны ядерного реактора и частота большого раннего аварийного выброса), вызывает сомнение, так как они не учитывают особенности проектов АЭС, плотность населения, характерные погодные условия, национальные особенности, уровень технического развития и технических ресурсов, программу противоаварийного планирования для населения в близлежащих населенных пунктах в районе АЭС. Указанные выше аспекты непосредственно влияют на условную вероятность ранних летальных исходов и условную вероятность смерти от рака. ВЦБ должны иметь более прозрачную и явно оцениваемую связь с ЦОЗ. Оценка достижения ВЦБ должна выполняться для групп представительных сценариев, качественно отличающихся развитием аварии, для каждой из которой следуют индивидуально учитывать условия для возможности эвакуации, метеорологические прогнозы (направление ветра, выпадение осадков и т.п.), предполагаемое время выброса и накопления критических дозовых нагрузок, а также программу противоаварийного планирования.

Следует рассмотреть необходимость установить ВЦБ по большому аварийному выбросу для фаз развития аварий, как незначительно превышающих времена реализации большого раннего аварийного выброса (сутки), так и значительно превышающих эти времена (месяцы). При оценке выполнения ВЦБ следует учитывать не только эвакуацию и другие защитные меры, но и релокацию населения на длительный срок.

Наиболее целесообразными представляются ВЦБ, основанные на оценке риска летального исхода для населения, требующие выполнения ВАБ уровня 3 или дозовых нагрузок, потенциально приводящих к немедленным или отложенным летальным последствиям для населения.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЦБ И ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ ИМ ПРОЕКТОВ АЭС

Предлагаемые количественные цели по обеспечению здоровья

Поскольку определенная количественная ЦОЗ1 КЯР имеет сравнительно небольшое отличие от ЦОЗ1, определенной по статистическим данным для России, но остается более консервативной, а ЦОЗ2 имеет схожие значения, представляется разумным и приемлемым использовать количественные ЦОЗ, определенные КЯР.

Эти цели предлагается использовать как вероятностные целевые ориентиры в следующей формулировке:

- следует стремиться к тому, чтобы риск быстрого летального исхода, возникающего в результате аварий на АЭС, для находящегося поблизости от АЭС наиболее уязвимого представителя населения не превышал значения $5,0 \times 10^{-7}$ 1/год (количественная ЦОЗ1);
- следует стремиться к тому, чтобы риск летальных исходов от долговременных радиационных последствий, который может возникнуть в результате аварий на АЭС, для населения, проживающего в районе АЭС, не превышал значения $2,0 \times 10^{-6}$ 1/год (количественная ЦОЗ2).

Предлагаемая ВЦБ1

С учетом предлагаемой количественной ЦОЗ1 можно предложить следующую формулировку ВЦБ1 – следует стремиться к тому, чтобы вероятность большого раннего аварийного выброса не превышала значения $5,0 \times 10^{-7}$ за один календарный год.

Термин «большой ранний аварийный выброс» при этом определяется следующим образом: большой ранний аварийный выброс – выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду в количествах, потенциально приводящих к высокой вероятности быстрого летального исхода для наиболее уязвимого представителя населения, проживающего в районе АЭС, за время, недостаточное для организации защиты населения в условиях, при которых происходит рассматриваемый выброс.

На рисунке 3 показаны характерные временные точки, важные с точки зрения определения большого раннего аварийного выброса и оценки располагаемого времени для организации мер по защите населения в конкретном населенном пункте j для конкретной

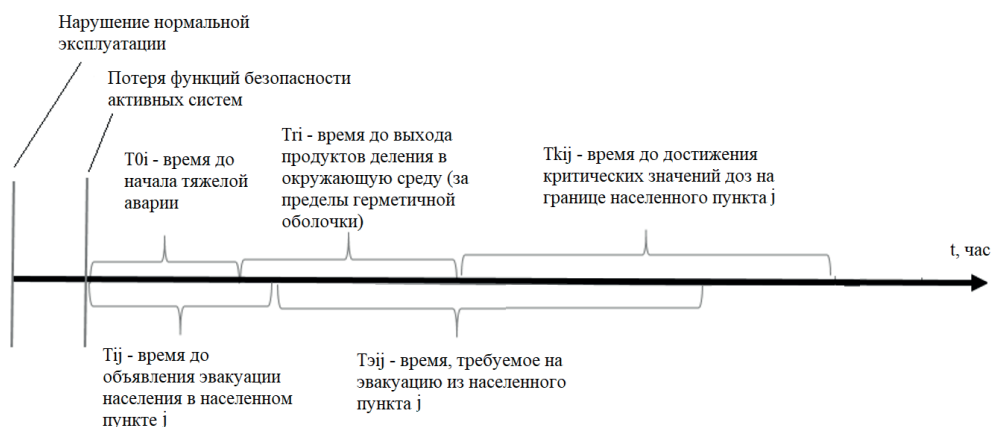


Рис. 3. Временные интервалы, важные для оценки располагаемого времени для организации мер по защите населения при тяжелой аварии

тяжелой аварии i . Предполагается, что тяжелая авария начинается после потери функций безопасности, осуществляемых активными системами безопасности, так как пассивные системы, как правило, ограничены во времени и не устраняют условия возникновения тяжелой аварии, но отдалают ее начало, создавая запас времени как для восстановления активных систем, так и для организации мер по защите населения.

Определение большого раннего аварийного выброса предполагает, что для оценки его наступления в населенном пункте j требуется учет трех основных временных факторов, указанных на рис. 3, для каждого аварийного сценария i :

- время, за которое радиоактивные продукты выходят в окружающую среду и вызывают дозовую нагрузку, потенциально приводящую к высокой вероятности быстрого летального исхода для наиболее уязвимого представителя населения в любой произвольно взятой точке вокруг АЭС (далее «критических дозовых нагрузок») ($T0i + Tri + Tkij$);
- время от момента начала аварии до момента объявления активизации мер по защите населения (Tij);
- время, требуемое на организацию мер защиты населения в условиях аварии ($Tэij$), полностью прекращающих воздействие радиации на население.

Следует отметить, что идеальной защитной мерой является эвакуация населения, однако 100%-ная эвакуация населения за время $Tэij$ невозможна. Поэтому вместо «эвакуация» используется термин «организация защиты населения», под которым понимается перемещение за время $Tэij$ из зоны планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ) значительного количества населения (например, эвакуация 90% населения) и ограничение воздействия радиации на остальное население (размещение в укрытиях, йодная профилактика) с условием, что оно будет перемещено за пределы зоны воздействия радиации за время, превышающее $Tэij$.

Если дозовая нагрузка на наиболее уязвимого представителя населения в любой точке вокруг АЭС, потенциально приводящая к высокой вероятности быстрого летального исхода, достигается за время меньшее, чем $Tij + Tэij$, то большой ранний аварийный выброс происходит, если нет – не происходит. Соответственно, вероятность того, что для анализируемой аварии происходит большой ранний аварийный выброс, равна вероятности того, что $T0i + Tri + Tkij > Tij + Tэij$ для наиболее уязвимого представителя населения в любой точке вокруг АЭС.

Таким образом, вероятность наступления большого раннего аварийного выброса зависит от следующих факторов.

В части оценки $T0i + Tri + Tkij$ от

- скорости поступления и количества поступающих продуктов деления в окружающую среду, а также скорости протекания аварийного процесса;
- высоты и энергии аварийного выброса;
- метеорологических условий, определяющих распространение и оседание продуктов деления в области вокруг АЭС.

В части оценки Tij от условий, при возникновении которых объявляется эвакуация.

В части оценки $Tэij$ от

- условий, при которых выполняется эвакуация, таких как время суток и доступность эвакуационных путей и укрытий;
- готовности населения к эвакуации;
- готовности систем реагирования реализовать защитные меры, включая эвакуацию населения, йодную профилактику и укрытия для временно оставляемого на загрязненной территории населения;

- демографической обстановки в районе АЭС.

Предлагаемое определение большого раннего аварийного выброса непосредственно не привязано к санитарно-защитной зоне (СЗЗ) или ЗПЗМ. Однако косвенно эта связь учтена.

1. Если в любой точке за пределами ЗПЗМ за достаточно большее время возможно достижение критических дозовых нагрузок, то большой ранний аварийный выброс достигается с вероятностью единица, так как быстрые меры по защите населения за пределами ЗПЗМ не предусмотрены. В данном случае «большим» является время, равное 10-ти суткам, которое, во-первых, используется в качестве критерия для оценки необходимости защитных действий для населения [17], во-вторых, в течение 10-ти суток можно уверенно предполагать реализацию защитных мер в любых аварийных условиях.

2. Если в любой точке за пределами СЗЗ достижение критических дозовых нагрузок за достаточно большее время (10 суток) невозможно, то большой ранний аварийный выброс не достигается с вероятностью единица, так как в пределах СЗЗ население не должно находиться.

3. Если за пределами СЗЗ, но в пределах ЗПЗМ возможно достижение критических дозовых нагрузок за время менее 10-ти суток, то вероятность того, что для анализируемой аварии происходит большой ранний аварийный выброс, равна вероятности того, что $T0i + Tri + Tkij > Tij + Tэij$ для наиболее уязвимого представителя населения в любой точке в границах между СЗЗ и ЗПЗМ.

Если за пределами СЗЗ, но в пределах ЗПЗМ возможно достижение критических дозовых нагрузок за время более 10-ти суток, то вероятность того, что для анализируемой аварии происходит большой ранний аварийный выброс, принимается равной нулю в предположении, что за 10 суток краткосрочные меры защиты населения от негативных радиационных последствий будут реализованы.

Предлагаемая ВЦБ2

Отсутствие реализации большого раннего аварийного выброса практически гарантирует отсутствие раннего летального исхода из-за конкретной аварии, так как гарантирует, что выполняется хотя бы одно из условий, а именно, дозовые нагрузки на население вокруг АЭС

- не достигают критических значений для возможности наступления быстрого летального исхода за пределами ЗПЗМ;
- достигают критических значений для возможности наступления быстрого летального исхода в пределах ЗПЗМ, но защитные меры реализованы до достижения критического значения (за время, меньшее $T0i + Tri$).

Однако отсутствие реализации большого раннего аварийного выброса не гарантирует, что население не будет подвергнуто радиационному воздействию, хотя и не приводящему к быстрым летальным исходам, но потенциально вызывающему серьезные негативные последствия для здоровья. В частности, даже если меры по защите населения выполнены в течение времени $T0i + Tri$, население все равно может быть подвергнуто радиационному воздействию, приводящему к долговременным негативным последствиям.

Консервативно в качестве ВЦБ2 может быть предложен следующий целевой ориентир.

Следует стремиться к тому, чтобы вероятность большого аварийного выброса не превышала значения $2.0E-06$ за один календарный год.

При этом большой аварийный выброс может быть определен как выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду в количествах, потенциально приводящих к высокой

вероятности летального исхода для наиболее уязвимого представителя населения, проживающего в районе АЭС.

Для формулировки критерия дозовых нагрузок, потенциально приводящих к быстрому летальному исходу, можно использовать информацию из [18], где определено, что при кратковременном облучении дозой 3–5 Гр при отсутствии лечения летальные исходы возникают у 50% облученных людей в результате повреждения стволовых клеток костного мозга. В качестве дозового критерия при определении большого раннего аварийного выброса разумно использовать значение дозы 4 Гр в любой точке за пределами СЗЗ, поглощенной за 10 суток. Использование значения дозы 4 Гр, поглощенной за 10 суток (а не за одни сутки), позволяет компенсировать некоторый оптимизм, связанный как с тем, что вероятность летального исхода высока и при меньших значениях дозы, так и с тем фактом, что радиационному воздействию будет подвергаться более одного наиболее уязвимого представителя населения, проживающего в районе АЭС.

В качестве критерия большого аварийного выброса можно принять выброс, при котором дозовые нагрузки на население еще не приводят к негативным последствиям для здоровья населения. Согласно [18], вероятность летальных исходов при поглощенной дозе ниже 1 Гр исключена даже при отсутствии эвакуации или медицинской помощи. На основании этого в качестве дозового критерия при определении большого позднего аварийного выброса можно консервативно использовать значение 1 Гр.

ВЫВОДЫ

Вероятностные целевые показатели безопасности КЯР, установленные в 1986 г.,

- названы «суррогатными» значениями, которые, как показано на основании ограниченных исследований [7], гарантируют соблюдение ЦОЗ; однако эта гарантия не относится к условиям, которые принципиально отличаются от условий США в 1986 г., поскольку они не учитывают особенности проектов и площадок АЭС, плотности населения, характерных погодных условий, национальных особенностей, уровня технического развития и технических ресурсов, программы противоаварийного планирования для населения в близлежащих населенных пунктах в районе АЭС и т.п.;

- определены в терминах (ранние, большие), которые исходно не сопровождались четким физическим содержанием.

Так как вероятностные целевые показатели безопасности непосредственно зависят от определений большого (раннего) аварийного выброса, эти определения должны быть пересмотрены с учетом условий конкретной площадки АЭС:

- программы защитных мероприятий для населения в близлежащих к АЭС населенных пунктах;

- времени и технических средств, доступных экстренным службам для эвакуации населения в контексте конкретной аварии и метеорологического прогноза (направление ветра, осадки и т.д.), расчетного времени, энергии и высоты выброса радиоактивных продуктов деления и т.п.

Предлагаемые в статье определения большого (раннего) аварийного выброса и на его основе ВЦБ позволят обеспечить

- более высокую степень уверенности в защите населения от воздействия радиации при тяжелых авариях на АЭС;

• необходимый инструмент для определения оптимального времени начала защитных мероприятий для населения в районе АЭС при нарушениях условий нормальной эксплуатации.

Литература

1. Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants; Policy Statement; Correction and Republication, 51 FR 30028; USA Federal Register, Vol. 51, No 162, August 21, 1986 Электронный ресурс: https://archives.federalregister.gov/issue_slice/1986/8/21/30025-30043.pdf#page=4 (дата обращения: 24.11.2023).
2. Education of Risk Professionals Module 1. Inroduction to PRA and basics of PRA. 1019203, EPRI, USA, December 2009, Электронный ресурс: <https://www.epri.com/research/products/000000000001019203> (дата обращения: 24.11.2023).
3. Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту на 1 января 2021 года (Статистический бюллетень). Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Москва, 2021 г. Электронный ресурс: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_chislen_nasel-pv_01-01-2021.pdf (дата обращения: 24.11.2023).
4. Число умерших по причинам смерти в 2021 г. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Москва 2022 г. Электронный ресурс: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Frosstat.gov.ru%2Fstorage%2Fmediabank%2Fdemo24-2_2021.xlsx&wdOrig-in=BROWSELINK (дата обращения: 24.11.2023).
5. Ölüm ve Ölüm Nedeni İstatistikleri, 2019. Türkiye, 2020. Электронный ресурс: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Death-and-Causes-of-Death-Statistics-2019-33710> (дата обращения: 24.11.2023) (in Turkish).
6. An Approach For Using Probabilistic Risk Assessment In Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis., Regulatory Guide 1.174, Revision 3. US NRC, Jan. 2018, Washington, DC. Электронный ресурс: <https://www.nrc.gov/docs/ML1731/ML17317A256.pdf> (дата обращения: 24.11.2023).
7. Feasibility Study for a Risk-Informed and Performance-Based Regulatory Structure for Future Plant Licensing, Appendices A through L. NUREG-1860 Volume 2, USNRC, 2007, Washington, DC. Электронный ресурс: <https://www.nrc.gov/docs/ML0804/ML080440215.pdf> (дата обращения: 24.11.2023).
8. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, INSAG Series No. 75-INSAG-3 (Rev. 1), INSAG-12. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1082r_web.pdf (дата обращения: 24.11.2023).
9. Probabilistic Safety Goals for Nuclear Power Plants. Phases 2-4/Final Report, Nordic Nuclear Safety Research, 2011 г. Электронный ресурс: https://inis.iaea.org/collection/NCL_CollectionStore/_Public/42/073/42073012.pdf (дата обращения: 24.11.2023).
10. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants (EUR). Volume1,2, Revision E, EUR Organisation, 2016. Электронный ресурс: <https://www.europeanutilityrequirements.eu/EURdocument/EURVolume1,2,4.aspx> (дата обращения: 24.11.2023).
11. Recommendation on Large Release Definition, SECY-93-138, USNRC, 1993, Washington, DC.
12. NUREG/CR-6595 Revision 1, An Approach for Estimating the Frequencies of Various Containment Failure Modes and Bypass Events. USNRC, 2004, Washington, DC. Электронный ресурс: <https://www.nrc.gov/docs/ML0432/ML043240040.pdf> (дата обращения: 24.11.2023).
13. Standard Review Plan NUREG-0800 (Vol. 19.3 Regulatory Treatment of Nonsafety Systems for Passive Advanced Light Water Reactors, Revision 0), 2014, US NRC, Washington, DC. Электронный ресурс: <https://www.nrc.gov/docs/ML1403/ML14035A149.pdf> (дата обращения: 24.11.2023).
14. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3.- Vienna: International Atomic Energy Agency 2010. Электрон-

ный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1430_web.pdf (дата обращения: 24.11.2023).

15. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4.- Vienna: International Atomic Energy Agency – 2010. Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/publications/8236/development-and-application-of-level-2-probabilistic-safety-assessment-for-nuclear-power-plants> (дата обращения: 24.11.2023).

16. Probabilistic Risk Criteria and Safety Goals, NEA/CSNI/R(2009)16, Nuclear Energy Agency, OECD, 2009. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-12/csni-r2009-16.pdf> (дата обращения: 24.11.2023).

17. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 года № 47. Электронный ресурс: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/?ysclid=llqsvn1oi9355366862> (дата обращения: 24.11.2023).

18. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 384 с. ISBN 978-5-9704-1483-5. Электронный ресурс: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970414835.html> (дата обращения: 24.11.2023).

Поступила в редакцию 17.01.2024

Авторы

Любарский Артур Вадимович, начальник управления, к.т.н.,

E-mail: Lyubarskiy_AV@aep.ru

Токмачев Геннадий Владимирович, главный специалист, к.т.н.,

E-mail: Tokmachev_GV@aep.ru

Михалев Александр Витальевич, аспирант,

E-mail: Mikhalev_AV@aep.ru

Кузьмина Ирина Борисовна, эксперт, к.т.н.,

E-mail: IrBoKuzmina@rosatom.ru

UDC 621.039.58

About Definition and Practical Application of Probabilistic Safety Indicators Related to Large Accidental Release

Lyubarskiy A.V.¹, Tokmachev G.V.¹, Mikhalev A.V.^{1,2}, Kuzmina I.B.³

¹ Atomenergoproekt, JSC,

7 Bldg. 1, Bakuninskaya Str., 105082 Moscow, Russia

² National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

14 Bldg. 1, Krasnokazarmennaya Str., 111250 Moscow, Russia

³ REIN Engineering, JSC,

10 Bldg. 5, Letnikovskaja Str., 115114 Moscow, Russia

Abstract

The probability of a large early release is one of the safety indicators that reflects the risk of fatalities during an accident at a nuclear power plant. Despite the fact that this indicator is very significant, it isn't defined in the federal rules and regulations of the Russian Federation. The article analyzes the experience of determining radiation safety goals for nuclear power plants in the US NRC, taking into account the statistical data of the specific country under consideration

(USA), which includes quantitative health objectives (QHOs) and associated safety goals (SG). A conclusion has been made about the sustainable nature of the goals identified using the NRC approach. A critical analysis of the set of indicators allowed us to conclude that it is necessary to improve the methodology for assessing the safety goals based on the specified SG, taking into account the specifics of NPP projects, regional characteristics, phases of accident development and other factors. The article outlines the proposed approaches to determining SG's based on probabilistic targets – quantitative values of QHO1 and QHO2 for the Russian Federation. A definition of a «large early release» is formulated and criteria for its achievement are proposed, taking into account measures to protect the population living within the protective action-planning zone.

Thus, when assessing the degree to which these goals are achieved in practice, it is proposed to take into account not only the likelihood of a large release during an accident at a nuclear power plant, but also measures aimed at protecting the population, in particular evacuation. In this case, early deaths occur only when the population is not evacuated before the critical health dose loads from the release are reached.

Key words: health goals, probabilistic safety goals, large early release, measures to protect the population.

For citation: Lyubarskiy A.V., Tokmachev G.V., Mikhalev A.V., Kuzmina I.B. About Definition and Practical Application of Probabilistic Safety Indicators Related to Large Accidental Release. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 59–73; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.05> (in Russian).

References

1. Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants; Policy Statement; Correction and Republication, 51 FR 30028; USA Federal Register, Vol. 51, No 162, August 21, 1986 Available at: https://archives.federalregister.gov/issue_slice/1986/8/21/30025-30043.pdf#page=4 (accessed 24.11.2023).
2. Education of Risk Professionals Module 1. Introduction to PRA and basics of PRA. 1019203, EPRI, USA, December 2009, Available at: <https://www.epri.com/research/products/000000000001019203> (accessed: 24.11.2023).
3. Population of the Russian Federation by sex and age as of January 1, 2021 (Statistical Bulletin). Federal State Statistics Service (Rosstat). Moscow, 2021. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_chislen_nasel-pv_01-01-2021.pdf (accessed 24.11.2023).
4. Number of deaths by cause of death in 2021. Federal State Statistics Service (Rosstat). Moscow, 2022. Available at: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Frosstat.gov.ru%2Fstorage%2Fmediabank%2Fdemo24-2_2021.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK (accessed: 24.11.2023). (in Russian).
5. Ölüm ve Ölüm Nedeni İstatistikleri, 2019. Türkiye, 2020. Available at: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/In-dek?p=Death-and-Causes-of-Death-Statistics-2019-33710> (accessed: 24.11.2023) (in Turkish).
6. An Approach For Using Probabilistic Risk Assessment In Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis., Regulatory Guide 1.174, Revision 3. US NRC, January 2018. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1731/ML17317A256.pdf> (accessed 24.11.2023).
7. Feasibility Study for a Risk-Informed and Performance-Based Regulatory Structure for Future Plant Licensing, Appendices A through L. NUREG-1860 Volume 2, USNRC, December 2007. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML0804/ML080440215.pdf> (accessed 01.09.2023).
8. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, INSAG Series No. 75-INSAG-3 (Rev. 1), INSAG-12. Vienna: International Atomic Energy Agency – 1999. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1082r_web.pdf (accessed 24.11.2023).

9. Probabilistic Safety Goals for Nuclear Power Plants. Phases 2-4/Final Report, Nordic Nuclear Safety Research, 2011 Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCL_CollectionStore/_Public/42/073/42073012.pdf (accessed 24.11.2023).
10. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants (EUR). Volume1,2, Revision E, EUR Organisation, 2016. Available at: <https://www.europeanutilityrequirements.eu/EURdocument/EURVolume1,2,4.aspx> (accessed 24.11.2023).
11. Recommendation on Large Release Definition, SECY-93-138, USNRC, May 1993, Washington, DC.
12. An Approach for Estimating the Frequencies of Various Containment Failure Modes and Bypass Events. NUREG/CR-6595 Revision 1, USNRC, October 2004 Available at <https://www.nrc.gov/docs/ML0432/ML043240040.pdf> (accessed 24.11.2023).
13. Standard Review Plan. NUREG-0800 (Vol. 19.3 Regulatory Treatment of Nonsafety Systems for Passive Advanced Light Water Reactors, Revision 0), June 2014, USNRC. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1403/ML14035A149.pdf> (accessed 24.11.2023).
14. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3. Vienna: International Atomic Energy Agency – 2010. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1430_web.pdf (accessed 24.11.2023).
15. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4. Vienna: International Atomic Energy Agency – 2010. Available at: <https://www.iaea.org/publications/8236/development-and-application-of-level-2-probabilistic-safety-assessment-for-nuclear-power-plants> (accessed 24.11.2023).
16. Probabilistic Risk Criteria and Safety Goals, NEA/CSNI/R(2009)16, Nuclear Energy Agency, OECD, December 2009. Available at: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2021-12/csni-r2009-16.pdf> (accessed 24.11.2023).
17. Radiation safety standards (NRB-99/2009). Approved by a resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation, 7 Jul 2009. Available at: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb-2d1ecc4ddb4c33/?ysclid=llqsvn1ol9355366862> (accessed 24.11.2023) (in Russian).
18. Ilyin L.A., Kirillov V.F., Korenkov I.P. Radiation hygiene. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2010. 384 p. ISBN 978-5-9704-1483-5. Available at: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970414835.html> (accessed 24.11.2023) (in Russian).

Authors

Artur V. Lyubarskiy, Head of Division, Cand. Sci. (Engineering),
 E-mail: Lyubarskiy_AV@aep.ru
 Gennady V. Tokmachev, Chief Expert, Cand. Sci. (Engineering),
 E-mail: Tokmachev_GV@aep.ru
 Aleksandr V. Mikhalev, PhD student,
 E-mail: Mikhalev_AV@aep.ru
 Irina B. Kuzmina, Expert, Cand. Sci. (Engineering),
 E-mail: IrBoKuzmina@rosatom.ru