

А. В. Печерица<sup>1</sup>, О. В. Зеленый<sup>1</sup>,  
А. М. Дыбач<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный научно-технический центр  
по ядерной и радиационной безопасности

<sup>2</sup>Государственный комитет ядерного  
регулирования Украины

## Взаимосвязь детерминистических и вероятностных подходов при решении вопросов, связанных с безопасностью АЭС

*Представлены основные элементы детерминистического и вероятностного подходов исследования безопасности АЭС с указанием их достоинств и недостатков. Осуществлено сравнение данных подходов и показаны преимущества интегрального подхода решения вопросов, влияющих на безопасность, позволяющего комплексно учитывать вероятностные и детерминистические аспекты.*

О. В. Печерица, О. В. Зеленый, О. М. Дибач

### **Взаємозв'язок детерміністичних та імовірнісних підходів під час вирішення питань, пов'язаних з безпекою АЕС**

*Представлено основні елементи детерміністичного та імовірнісного підходів дослідження безпеки АЕС з визначенням їх сильних сторін та недоліків. Здійснено порівняння цих підходів та показано переваги інтегрального підходу до вирішення питань, що впливають на безпеку, якій дозволяє комплексно враховувати імовірнісні та детерміністичні аспекти.*

**В**ероятностный анализ безопасности (ВАБ) уже достиг того уровня развития, когда результаты его применения непосредственно и весомо влияют на процесс проектирования и эксплуатации АЭС. В мировой ядерной отрасли существует ясное понимание того, что результаты выполнения ВАБ должны учитываться наряду с традиционным детерминистическим анализом безопасности (ДАБ). Согласованность вероятностных и детерминистических оценок является фундаментом для принятия взвешенных решений вопросов, связанных с безопасностью АЭС. В прошлом в практике ядерного регулирования детерминистический подход применялся в качестве основы принятия решений по вопросам, важным для безопасности, и последующей реализации данных решений, которая осуществлялась путём обеспечения глубокоэшелонированной защиты и установления адекватных запасов безопасности. Необходимость соблюдения данных детерминистических требований служит основой большинства регуляторных документов и руководств различных уровней, применяемых в настоящее время. Вместе с тем, на протяжении последних пятнадцати лет для большинства АЭС мира выполнен вероятностный анализ безопасности, результаты которого сейчас всё шире используются в дополнение к детерминистическим анализам. Таким образом, создаются условия для применения интегрированного подхода, который представляет собой комбинацию детерминистических и вероятностных аспектов проведения исследования и решения вопросов, связанных с безопасностью АЭС.

### **Детерминистический анализ**

Согласно [1], «детерминистический анализ — анализ, при котором для важнейших параметров используются единственные численные значения (с предполагаемой вероятностью, равной 1), что приводит к единственному значению результата. Это подразумевает сосредоточение внимания на типах аварий, выбросов и последствий без учёта вероятностей различных последовательностей событий».

Сущность детерминистического подхода при решении вопросов, связанных с безопасностью АЭС, заключается в определении и реализации консервативных принципов и требований при проектировании и эксплуатации АЭС. Благодаря соблюдению этих принципов с высокой степенью доверия обеспечивается приемлемый уровень риска от эксплуатации АЭС. Обеспечение глубокоэшелонированной защиты и предусмотрение адекватных запасов безопасности являются детерминистическими принципами высокого уровня, которые, в свою очередь, реализовываются за счёт принципов уровня более низкого, таких как принцип единичного отказа, предотвращение отказа по общей причине, квалификация оборудования, запрет на вмешательство в действия автоматики и др. Консервативные принципы высокого уровня кратко описаны ниже.

**Обеспечение глубокоэшелонированной защиты.** Одним из краеугольных принципов обеспечения ядерной и радиационной безопасности является принцип обеспечения глубокоэшелонированной защиты (ГЭЗ). Целью реализации данного принципа являются предотвращение возникновения отклонений от нормальной эксплуатации, своевременное выявление их причин, устранение их последствий и недопущение их перерастания в более серьезные нарушения. Реализация стратегии ГЭЗ на этапах проектирования

и эксплуатации АЭС достигается обеспечением наличия физических барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ, а также многоуровневой системы технических мер, направленных на выполнение функций безопасности и обеспечение целостности указанных барьеров в условиях нормальной эксплуатации и при её нарушениях. Пять уровней ГЭЗ и четыре физических барьера для удержания радиоактивных материалов определены в [2]:

- Барьер 1* Топливная матрица
- Барьер 2* Оболочка тепловыделяющего элемента
- Барьер 3* Границы контура теплоносителя
- Уровень 1* Предотвращение нарушения нормальной эксплуатации и отказов
- Уровень 2* Контроль нарушения нормальной эксплуатации и обнаружение отказов
- Уровень 3* Контроль аварии в пределах проектных основ
- Барьер 4* Герметичное ограждение
- Уровень 4* Контроль тяжёлых условий на площадке, включая предотвращение развития аварии и смягчение последствий тяжёлой аварии
- Уровень 5* Смягчение радиологических последствий значительных выбросов радиоактивных материалов

**Обеспечение адекватных запасов безопасности.** Универсального определения термина «запас безопасности» в процессе подготовки данной статьи не найдено. Наиболее удачное, с точки зрения авторов статьи, определение данного термина представлено в [3]: «запас безопасности — выраженная в единицах измерения определённой физической величины разница между значением отказа системы либо компонента и действительным (расчётным) значением данной величины в условиях нормальной эксплуатации (в условиях аварии)». Реализация принципа обеспечения адекватных запасов безопасности направлена на то, чтобы при проектировании АЭС были обеспечены большие запасы до фактиче-

ских отказов физических барьеров безопасности. Например, контейнмент (4-й физический барьер) должен быть спроектирован таким образом, чтобы был обеспечен адекватный запас между значением отказа контейнмента и расчётными значениями той или иной физической величины, рассматриваемой в документации, обосновывающей безопасность АЭС. Данный пример проиллюстрирован на рис. 1 [4].

**Учёт и анализ неопределённостей при выполнении детерминистического анализа безопасности.** Факт присутствия неопределённостей, связанных с применением детерминистического подхода при выполнении анализов, общеизвестен. Данные неопределённости существуют в аналитических моделях и расчётных кодах, которые используются для прогнозирования поведения энергоблока в эксплуатационных и аварийных условиях. Неопределённости присутствуют также в различных аппроксимационных кривых, которые используются, например, для определения способности сооружений, систем и компонентов противостоять различным опасным воздействиям.

Традиционным способом учёта неопределённостей в ДАБ является принятие консервативных допущений и использование консервативных моделей и данных. Например, при выполнении анализа проектных аварий:

- постулируется возникновение исходного события;
- выбираются наихудшие с точки зрения того или иного исходного события начальные условия;
- не рассматриваются и не моделируются действия оперативного персонала;
- моделируется наихудший с учётом того или иного исходного события единственный отказ элемента защитной системы безопасности;
- консервативно выбирается критерий приемлемости, на предмет соблюдения которого собственно и выполняется анализ.

Данные консервативные допущения принимаются для демонстрации того, что необходимые запасы безопасности

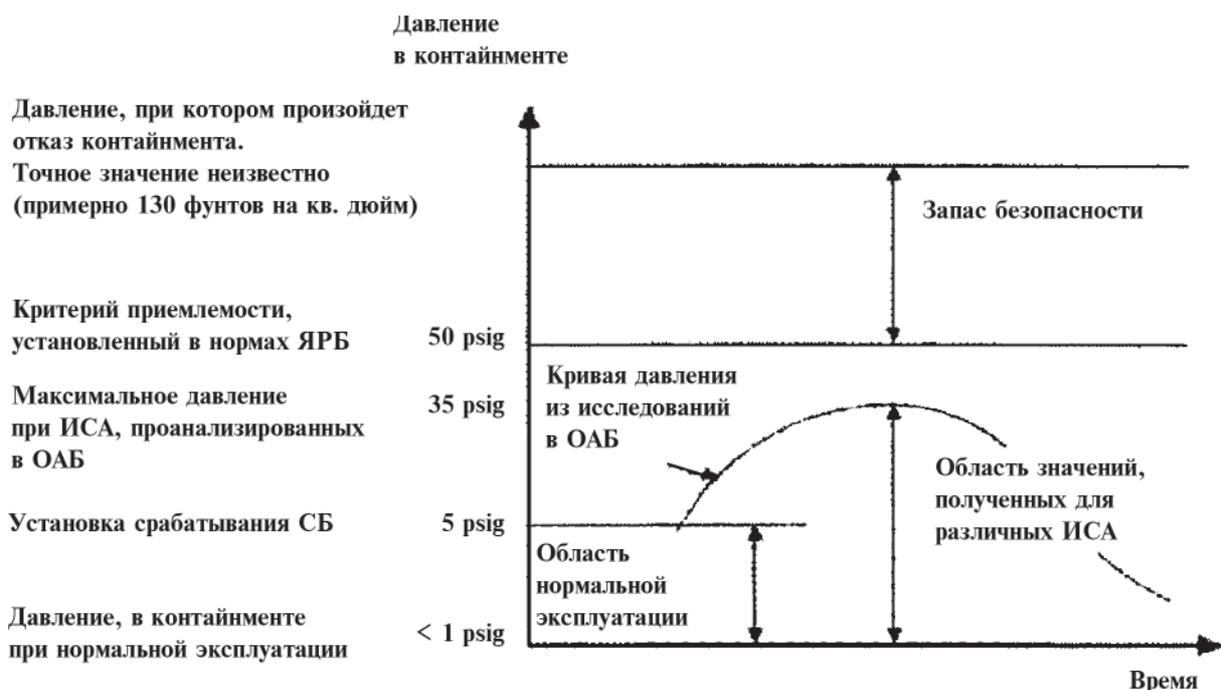


Рис. 1. Физический смысл запаса безопасности по давлению отрыва контейнмента при проектировании АЭС

существуют и с высокой степенью уверенности можно утверждать, что условия деградации физических барьеров безопасности не будут достигнуты.

**Преимущества использования детерминистического подхода.** Основным достоинством детерминистического подхода является наличие большой методологической базы и огромного опыта его применения во всём мире, для всех типов реакторных установок. Именно с его помощью осуществлялась и осуществляется демонстрация ядерной безопасности и обеспечение её высокого уровня с первых дней развития атомной энергетики.

**Недостатки использования детерминистического подхода.** Ряд недостатков использования детерминистического подхода, о которых необходимо знать, включает в себя следующие аспекты:

исследования безопасности детерминистическими методами больше сфокусированы на рассмотрении огибающих аварийных сценариев (таких как максимальная проектная авария), чем на событиях с более высокой частотой (например, малые течи первого контура), которые зачастую вносят большой вклад в риск;

при использовании детерминистического подхода происходит аппроксимация частот ИСА и вероятностей отказа элементов систем, что не позволяет выполнить оценку сбалансированности проекта. Возникают случаи, когда по результатам исследований безопасности детерминистическими методами обеспечивается высокая защищённость энергоблока от одних типов ИСА и недостаточная защищённость от других типов событий;

в случае выявления дефицитов безопасности по результатам выполнения исследования, весьма затруднительно определить значение и важность реализации тех или иных модернизаций с точки зрения максимального влияния их на выявленные проблемы и, таким образом, весьма затруднительно определиться с приоритетностью реализации указанных модернизаций.

Использование только детерминистического подхода для анализа вопросов, связанных с безопасностью АЭС, будет недостаточным для демонстрации достижения высокого уровня безопасности с учётом необходимой сбалансированности энергоблока АЭС в части способности противостоять всем исходным событиям. Это заключение можно сделать по результатам ВАБ, которые демонстрируют, что некоторые важные вкладчики в риск не могут быть оценены и контролируемы с применением детерминистических методов.

## Вероятностный анализ

**Общие положения.** Согласно [1], «вероятностный анализ безопасности — всесторонний структурированный подход к определению сценариев отказов, представляющий собой концептуальное и математическое средство для получения численных оценок риска».

Общепризнанными являются три уровня вероятностного анализа безопасности. ВАБ уровня 1 определяет последовательности отказов элементов систем и ошибок персонала при возникновении того или иного ИСА, которые могут привести к повреждению активной зоны реактора, и оценивает частоту данного события. При выполнении ВАБ уровня 2 определяются пути возможных радиоактивных выбросов в случае отказа контейнмента, а также оценивается частота реализации таких выбросов. ВАБ уровня 3 оце-

нивает радиологические последствия аварии на энергоблоке за пределами площадки АЭС. Оцениваются влияние на здоровье населения и иные общественные риски (например, загрязнение территории).

На сегодняшний день вероятностный анализ безопасности выполнен для подавляющего большинства АЭС мира. В общем случае, в объёме исследования безопасности энергоблока АЭС вероятностными методами должны быть учтены все возможные эксплуатационные состояния энергоблока (номинальная мощность, пониженная мощность, останов) и весь спектр исходных событий и воздействий (внутренние ИСА, внутренние пожары и затопления, внешние воздействия — сейсмические события и неблагоприятные погодные условия) [5]. Однако отметим, что в реальности для большинства атомных станций ВАБ выполнен в гораздо меньшем объёме. Накладываемые в этом случае ограничения на область применения ВАБ должны быть известны и учтены (особенно при использовании результатов ВАБ в практике регуляторной деятельности).

**Вероятностные критерии.** На основании исследований с применением ВАБ могут быть установлены следующие вероятностные критерии безопасности:

частота повреждения активной зоны (ВАБ уровня 1);

частота конкретного выброса радиоактивных веществ (количество, изотопы) либо частота реализации аварийных последовательностей, приводящих к отказу контейнмента (ВАБ уровня 2);

частота определённых последствий для здоровья населения и/или для окружающей среды.

Основываясь на мировом опыте, МАГАТЭ [5], [7] определило численные значения указанных вероятностных критериев безопасности.

По частоте повреждения активной зоны (ЧПАЗ) предлагается использовать следующие критерии:

ЧПАЗ  $< 10^{-4}$  реактор/год — для действующих энергоблоков АЭС;

ЧПАЗ  $< 10^{-5}$  реактор/год — для новых энергоблоков АЭС.

Большой выброс радиоактивных веществ, который может иметь тяжёлые последствия для населения и потребовать применения внешних контрмер (за пределами площадки АЭС), определяется в различных странах по-разному:

как абсолютное значение выброса наиболее значимых нуклидов;

как доля содержимого активной зоны;

как определённая доза «наиболее облучённого человека» за пределами площадки АЭС;

как выброс, дающий «неприемлемые последствия».

По частоте большого выброса радиоактивных веществ предлагается использовать следующие критерии:

частота большого выброса  $< 10^{-5}$  реактор/год — для действующих энергоблоков АЭС;

частота большого выброса  $< 10^{-6}$  реактор/год — для новых энергоблоков АЭС.

Универсального определения того, что представляет собой «большой выброс радиоактивных веществ», не существует. Однако во многих странах приняты аналогичные численные критерии по частотам выброса радиоактивных веществ (в том числе и в Украине по частоте предельного аварийного выброса — ЧПАВ) [8].

В документе [7] не приводятся численные критерии по последствиям для здоровья населения. В некоторых странах целевой критерий безопасности по результатам ВАБ уровня 3 (риск смерти лиц из населения) составляет  $1 \cdot 10^{-6}$  на реактор в год [6].

В ряде стран с развитой атомной энергетикой, например в США, существуют отдельные вероятностные критерии, используемые при принятии решения регулирующим органом по вопросам, связанным с безопасностью (выполнение модернизаций) [9]:

разрешается реализовывать изменения в проекте и/или эксплуатации АЭС, если показано, что эти изменения приводят к снижению ЧПАЗ, ЧПАВ;

разрешается реализовывать изменения в проекте и/или эксплуатации АЭС, приводящие к повышению ЧПАЗ меньше чем  $10^{-5}$ , а ЧПАВ меньше чем  $10^{-6}$ , если показано, что даже после таких изменений ЧПАЗ и ЧПАВ остаются на приемлемом уровне (ЧПАЗ  $< 10^{-4}$  реактор/год; ЧПАВ  $< 10^{-5}$  реактор/год);

реализация изменений в проекте и/или эксплуатации АЭС, которые приводят к повышению ЧПАЗ больше чем  $1 \cdot 10^{-5}$ , а ЧПАВ больше чем  $1 \cdot 10^{-6}$ , является недопустимой.

**Учёт и анализ неопределённостей при выполнении вероятностного анализа безопасности.** Предметом учёта и анализа являются неопределённости двух видов: статистическая и системная. Статистическая неопределённость имеет место в силу случайной, стохастической природы событий, моделируемых при выполнении ВАБ и принимаемых во внимание в вероятностных моделях. Системная неопределённость проявляется вследствие наличия ограничений в уровне знаний и развития технологий при выполнении ВАБ. Системная неопределённость разбивается в свою очередь на три класса: параметрическая неопределённость; неопределённость, связанная с моделированием, и неопределённость, связанная с полной выполненностью анализа.

Неопределённость исходных данных (частоты ИСА; показатели надёжности оборудования; вероятности ошибки персонала), используемых при выполнении ВАБ, обуславливает наличие параметрической неопределённости, которая обычно характеризуется распределением соответствующих статистических величин. Программное обеспечение, используемое для количественной оценки при выполнении ВАБ, позволяет проанализировать и оценить влияние параметрической неопределённости на результаты ВАБ.

Допущения, сделанные при выполнении анализов и разработке расчётных моделей, обуславливают наличие следующего вида неопределённости. Одним из таких допущений может быть, например, временной интервал наступления течи первого контура через уплотнения ГЦН вследствие потери их охлаждения. Отдельный набор аналогичных по своей природе допущений используется при моделировании действий (ошибок) персонала в рамках ВАБ. Обычным подходом по учёту неопределённостей, связанных с моделированием, является проведение анализа чувствительности результатов ВАБ к сделанным допущениям.

И наконец, неопределённость, связанная с полной анализом, обусловлена необходимостью оценки вклада в оцениваемую величину риска классов событий, воздействий, режимов эксплуатации, не включённых в объём анализа. Пример такого вида неопределённости — неучёт в процессе анализа факторов старения либо некоторых организационных факторов вследствие отсутствия общего понимания, как корректно учитывать такие аспекты в ВАБ. Неопределённости подобного вида обычно документируются как ограничения конкретных выполненных исследований.

**Преимущества использования вероятностного подхода.** Среди преимуществ необходимо выделить три:

1. Демонстрация сбалансированности проекта по всему спектру исходных событий. С использованием ВАБ можно

определить, имеет ли какая-либо группа (категория) исходных событий гораздо больший, по сравнению с остальными категориями ИСА, вклад в риск, и таким образом охарактеризовать сбалансированность проекта конкретного энергоблока в части возможности противостоять всему рассматриваемому спектру событий. Оценку сбалансированности проекта при помощи детерминистического подхода можно выполнить только приблизительно и косвенно.

2. Демонстрация сбалансированности проекта по всем уровням глубокоэшелонированной защиты. При помощи ВАБ можно учесть и проанализировать взаимозависимости между различными уровнями глубокоэшелонированной защиты и представить информацию об относительной деградации каждого из них и, в общем случае, информацию об общем уровне реализации концепции глубокоэшелонированной защиты.

3. Определение значимости систем, оборудования и сооружений. Исходные события, воздействия и системы, оборудования и сооружения представляются в одной, единой модели ВАБ, что делает возможным определить относительное значение каждого из этих элементов. Такое подробное ранжирование нельзя выполнить с помощью детерминистического подхода, поскольку при его использовании каждое событие или воздействие рассматривается отдельно.

**Недостатки использования вероятностного подхода.** Недостатки, о которых речь пойдёт далее, обусловлены, в основном, объёмом и уровнем детализации конкретных выполненных исследований безопасности вероятностными методами. При использовании ВАБ важно осознать данный факт для гарантии того, что та или иная модель ВАБ используется в границах области её применения. Несмотря на наличие достаточного количества показательных примеров использования ВАБ, существуют следующие аспекты, накладывающие ограничения на данное использование:

невозможно продемонстрировать, что абсолютно все исходные события аварий и аварийные последовательности, имеющие вклад в риск, учтены при выполнении анализа;

существуют большие (несколько порядков) неопределённости в некоторых областях ВАБ;

затруднительно убедиться в корректности исходных данных, используемых в дальнейшем в рамках ВАБ, особенно в случае использования обобщённых данных;

существуют затруднения, связанные с субъективизмом, при моделировании некоторых аспектов, например моделировании зависимостей между единичными ошибками персонала.

### **Взаимосвязь детерминистического и вероятностного анализа**

Существующая взаимосвязь между вероятностным и детерминистическим анализами безопасности может быть продемонстрирована на примере их симбиоза при обеспечении глубокоэшелонированной защиты и адекватных запасов безопасности.

При выполнении детерминистического анализа безопасности (например, анализа проектных аварий) обычно рассматриваются исходные события, затрагивающие один или несколько физических барьеров, при этом в качестве единичного отказа рассматривается отказ в системах безопасности, который влияет на один или несколько уровней

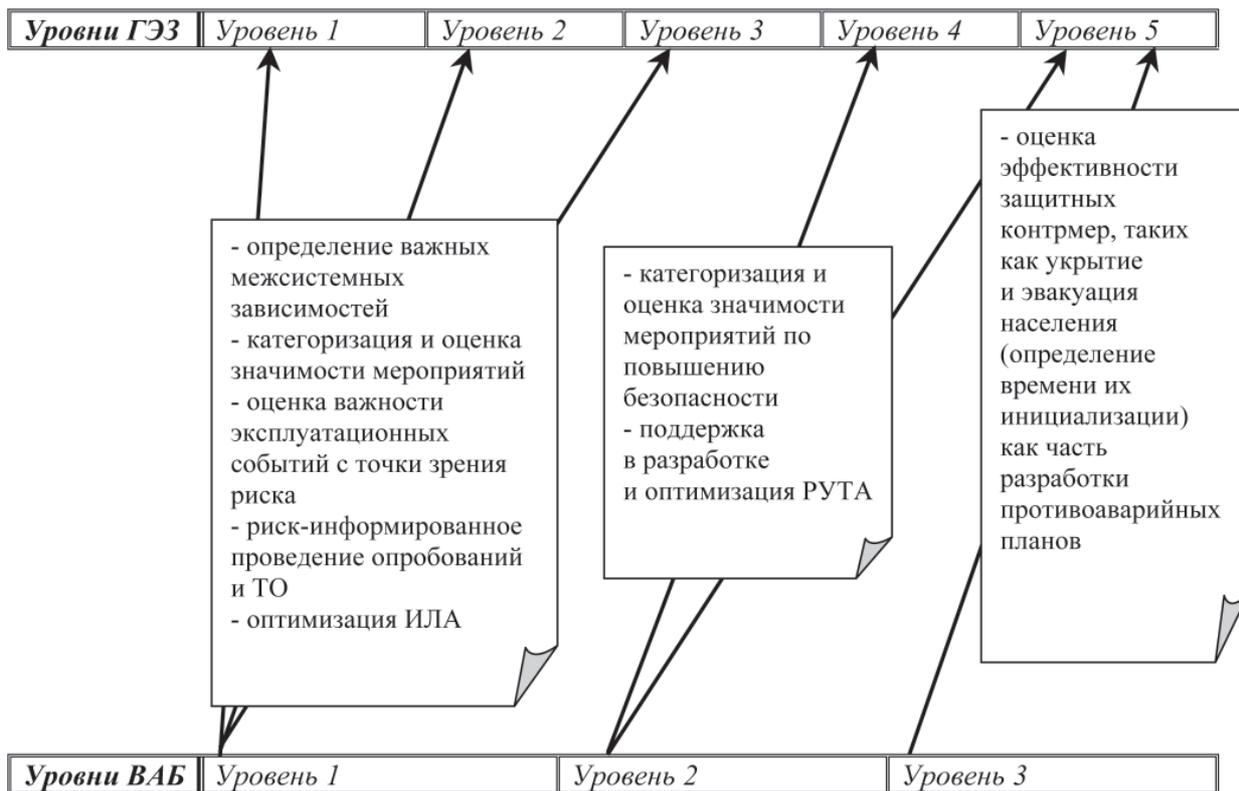


Рис. 2. Использование инструментов ВАБ для усиления уровней глубокоэшелонированной защиты

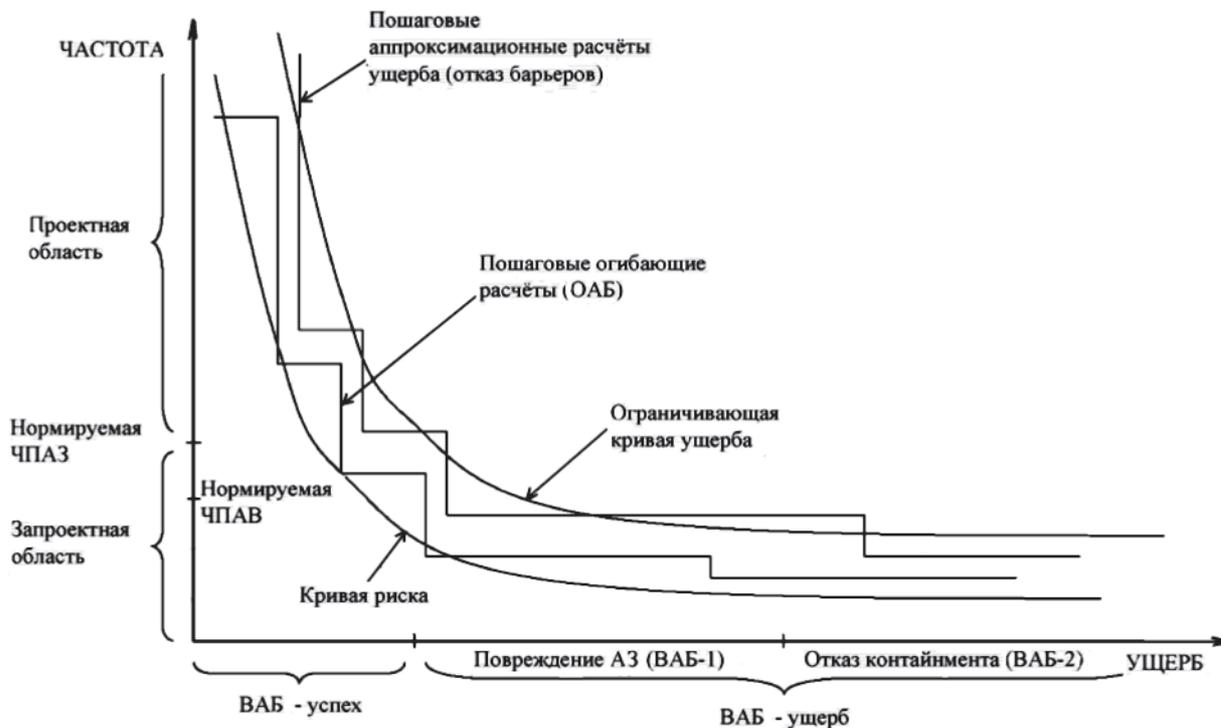


Рис. 3. Взаимодополнение ВАБ и ДАБ

глубокоэшелонированной защиты. Назначением данного анализа является демонстрация того, что количество работоспособных физических барьеров и уровней ГЭЗ достаточно для успешного противостояния энергоблока АЭС любому событию, рассматриваемому в проектных основах.

При выполнении ВАБ рассматриваются как проектные, так и запроектные аварии, и оценивается способность энергоблока АЭС обеспечить приемлемо низкую частоту тяжёлых последствий указанных событий. Результаты ВАБ предоставляют информацию о том, насколько эффективно и адекватно реализуется концепция ГЭЗ на энергоблоке АЭС. Данная информация может быть использована для обеспечения и усиления уровней глубокоэшелонированной защиты (рис. 2).

При определении запасов безопасности ВАБ и ДАБ являются взаимодополняющими в следующих аспектах.

Данные подходы фокусируются на различных областях кривой риска (рис. 3):

ДАБ: область малых последствий и высокой частоты;

ВАБ: область тяжёлых последствий и низкой частоты.

Данные подходы акцентируют внимание на различных аспектах риска:

ДАБ в большей степени концентрируется на расчёте *последствий событий*, частота которых определена, в основном, качественным путём;

ВАБ в большей степени концентрируется на расчёте *частот событий*, последствия которых определены, в основном, качественным путём.

Данные подходы сфокусированы на различных составляющих анализа оценки безопасности энергоблока АЭС:

ДАБ является инструментом, используемым для верификации безопасности проекта энергоблока АЭС;

ВАБ является инструментом, используемым для верификации достигнутого (текущего) уровня безопасности энергоблока АЭС.

## Выводы

Подводя итоги, необходимо отметить следующее. Детерминистический и вероятностный подходы являются системными подходами, применяемыми при принятии решений, связанных с безопасностью на различных этапах жизненного цикла энергоблока АЭС, с использованием

различных методологий оценки, различных граничных условий, что обуславливает наличие у каждого из этих подходов своих уникальных достоинств и ограничений. Мировой опыт проектирования и эксплуатации АЭС показывает, что существует достаточно большое количество вопросов, связанных с безопасностью АЭС, которые могут быть решены и важность которых может быть оценена только с применением подхода, интегрирующего сильные стороны ДАБ и ВАБ. Применение такого интегрированного подхода в практике деятельности как регулирующего органа, так и эксплуатирующей организации позволяет обеспечивать необходимую взвешенность решений вопросов, связанных с безопасностью АЭС.

## Список литературы

1. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. — Вена: МАГАТЭ, 2008. — 303 с.
2. Глубокоэшелонированная защита в ядерной безопасности. Серия ИНСАГ. № 10. — Вена: МАГАТЭ, 1998. — 48 с.
3. Safety margins for operating reactors. TECDOC-1332. — Vienna: IAEA, 2003. — 143 p.
4. I. Vbranic. Relationship between the deterministic analysis and the PSA in addressing safety margins and defence in depth. Regional Technical Meeting on Combining Probabilistic Safety Assessment and Deterministic Analysis. RER/9/095. — Budapest, Hungary, 11 — 15 May 2009. — (Материалы презентации).
5. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. TECDOC DS394. Draft2. — Vienna: IAEA, 2007. — 166 p.
6. Оценка безопасности и независимая проверка для атомных электростанций. Руководство МАГАТЭ по безопасности NS-G-1.2. — Вена: МАГАТЭ, 2004. — 109 с.
7. Basic safety principles for nuclear power plants. 75-INSAG-3. — Vienna: IAEA, 1999. — 105 p.
8. Общие положения безопасности атомных станций (НП 306.2.141-2008). — Утверждено приказом Гос. комитета ядерного регулирования Украины 19.11.2007 № 162. — К., 2008. — 72 с.
9. An approach for using probabilistic risk assessment in risk-informed decisions on plant-specific changes to the licensing basis, Regulatory Guide 1.174, Revision 1, US NRC, Rockville, MD. — 2002. — 30 p.

Надійшла до редакції 08.06.2009.