

# ГЛОБАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА GLOBAL ENERGY ISSUES AND ENERGY SECURITY

УДК 621.311.25:621.039.58

Є.М. Письменний, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-6403-6596

С.В. Клевцов, асистент ORCID 0000-0003-14055048

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ ЗАПАСОВ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

*На современном этапе развития ядерной энергетики к ней предъявляется всё больше требований в части обеспечения безопасности ядерных энергоустановок, как со стороны традиционных международных организаций, таких как МАГАТЭ, так и со стороны общественно-политических организаций и движений, что приводит к чрезмерному росту затрат и снижению её конкурентоспособности. Для достижения баланса между жёсткими требованиями обеспечения высокого уровня безопасности АЭС и расходами на его поддержание необходима разработка новых детерминистических методик, так как существующие количественно учитывают только вероятностные факторы. В статье предлагается подход по количественной оценке такого основного фактора безопасности, как детерминистический, что позволяет повысить объективность интегральной оценки необходимости мероприятий по безопасности и найти баланс между расходами на безопасность и достигнутым уровнем безопасности. Методология применена к энергоблоку №5 Запорожской АЭС, что позволило выявить скрытые дефициты и избыточные запасы безопасности, а также предложить новые критерии безопасности для использования в нормах, правилах и стандартах по ядерной и радиационной безопасности.*

**Ключевые слова:** дефицит безопасности, безразмерное значение запаса безопасности, детерминистический критерий безопасности, интегральный дефицит безопасности.

**Вступление.** На современном этапе развития ядерной энергетики к ней предъявляется всё больше требований в части обеспечения безопасности ядерных энергоустановок, как со стороны традиционных международных организаций, таких как МАГАТЭ или WENRA, так и со стороны общественно-политических организаций и движений, например, Greenpeace. Это приводит к чрезмерному росту затрат из-за завышенных требований по безопасности и снижению конкурентоспособности ядерной энергетики. В такой ситуации представляется важным соблюдение баланса между жёсткими требованиями обеспечения высокого уровня безопасности АЭС и расходами на его поддержание. Для оптимизации мер и мероприятий по безопасности, которые нужно предпринимать в ответ на указанные вызовы для эксплуатируемых АЭС, а также оптимизации расходов на их осуществление, была разработана и успешно применяется, прежде всего в США, концепция принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода (ПРКРП или на английском языке IRIDM – Integrated Risk Informed Decision Making), что нашло отражение в выпуске INSAG-25 [1]. В соответствии с этой концепцией предлагается проводить оценку мероприятий по повышению безопасности на основании целого ряда факторов, таких как вероятностный анализ, детерминистический анализ, культура безопасности, опыт эксплуатации, соблюдение норм, правил и стандартов по ядерной и радиационной безопасности, стоимость и т.д.

Эти факторы являются преимущественно качественными, за исключением вероятностного анализа, что отрицательно сказывается на объективности интегральной оценки какого-либо мероприятия по безопасной и/или надёжной эксплуатации АЭС, поскольку основой обоснования безопасности по-прежнему является детерминистический анализ. Для оценки «вероятностного фактора» имеется соответствующий инструмент - вероятностный анализ безопасности (ВАБ) [2], тогда как для оценки остальных факторов формализованная и общепринятая методика их количественной оценки отсутствует.

В статье рассматривается методология количественной оценки такого основополагающего фактора, как «детерминистический». Применение методологии позволяет повысить объективность интегральной

оценки мероприятий и найти баланс между расходами на поддержание безопасности и достигнутым уровнем безопасности, что особенно важно на современном этапе ядерной энергетики Украины.

**Цель и задачи.** В статье рассматривается методология, направленная на повышение объективности интегральной оценки мероприятий по безопасности АЭС и поиск баланса между расходами на поддержание безопасности и достигнутым уровнем безопасности. Для реализации заявленной цели поставлены и решены следующие задачи:

- введены новые термины и понятия, а также их определения в области оценки безопасности;
- разработана система новых дополнительных показателей безопасности АЭС;
- разработана методология количественной оценки детерминистических запасов безопасности;
- разработаны новые детерминистические критерии запасов безопасности, которые рекомендуются регулирующему органу (РО) в области ядерной и радиационной безопасности;
- применена методология к референтному энергоблоку атомной станции;
- осуществлена интеграция методологии в подход, основанный на интегральной оценке риска.

**Теоретические основы методологии.** Согласно общепринятого в мире подхода при проектировании и оценке безопасности ядерных установок для их безопасной и надёжной эксплуатации в течение длительного срока в Проекте АЭС, а также нормах, правилах и стандартах по ядерной и радиационной безопасности устанавливаются пределы и условия безопасности, превышение которых означает переход проектного сценария развития аварии в запроектный, в том числе и в тяжёлую аварию. Таким образом, основная задача обеспечения безопасности АЭС при конструировании, проектировании и последующей эксплуатации РУ заключается в том, чтобы для всего спектра учитываемых проектом аварий не происходило превышение пределов безопасности за счёт работы предусмотренных для этого систем безопасности. Для подтверждения факта не превышения пределов безопасности общепринято использовать Анализ проектных аварий (АПА), который в общем случае на основании консервативного подхода даёт ответ «да» или «нет», при этом игнорируя то, какой запас есть у «да», до перехода в «нет». Логично предположить, что чем больше запас, тем безопаснее АЭС.

Анализ проектных аварий является общепризнанным подходом при проектировании и обосновании безопасности реакторных установок, обладает устоявшейся однозначной методологией, процедурой и практикой применения. Для проведения расчётов в рамках АПА разработаны верифицированные и валидированные расчётные теплогидравлические, нейтронно-физические и прочностные программные комплексы с большим опытом их применения.

Безопасность атомных станций обеспечивается за счёт применения [3] системы последовательных физических барьеров, которая включает топливную матрицу, оболочку твэла, границу контура теплоносителя реакторной установки и герметичное ограждение реакторной установки.

Каждому физическому барьеру соответствует свой уникальный набор критериев приемлемости, которые устанавливаются в проекте и нормах, правилах и стандартах по ядерной и радиационной безопасности. Всего существует 7 критериев приемлемости, имеющих разную физическую природу (это может быть энтальпия топлива, температура, давление, эквивалентная доза и т.п.) и используемых в АПА в качестве пределов безопасности. При выполнении АПА расчётным путём определяется консервативное значение параметра, характеризующего критерий приемлемости. Как видно из рисунка 1 между консервативным значением и критерием приемлемости всегда есть зазор, т.к. при превышении критерия приемлемости эксплуатация атомной станции запрещена.

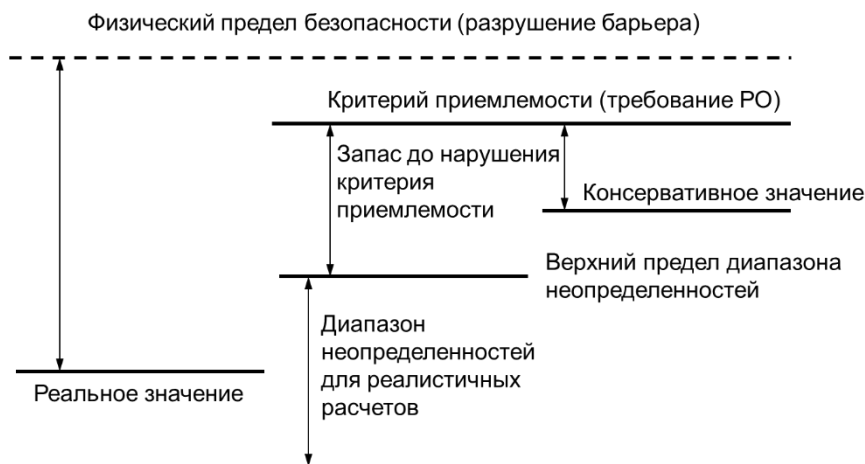


Рисунок 1 – Соотношение между физическим барьером безопасности, критерием приемлемости и расчётными значениями на основании консервативного и реалистичного подходов.

Простое оперирование численными значениями таких зазоров при принятии решений по вопросам безопасности затруднено из-за разной физической природы критериев приемлемости и существенного расхождения их численных значений. Для решения этой проблемы предлагается введение безразмерных показателей, что позволяет разработать систему новых показателей безопасности, сравнивать между собой по степени защищённости различные исходные события аварий, физические барьеры безопасности, критерии приемлемости, определять профили и балансы безопасности, а также сравнивать между собой разные атомные станции по уровню безопасности.

Такая система требует разработки нового понятийного аппарата, для чего предлагаются термины и определения, изложенные ниже.

**Запас безопасности** – запас между установленным в нормативных или проектных документах значением, характеризующим безопасность АЭС (пределы и критерии безопасности) и расчётным значением, отражающим реальное состояние безопасности АЭС (см. рисунок 1).

Такое определение запаса безопасности соответствует общепринятому [4].

**Дефицит безопасности** – отношение между установленным в нормативных или проектных документах значением, характеризующим безопасность АЭС (пределы и критерии безопасности) и расчётным значением, отражающим реальное состояние безопасности АЭС, выраженное в долях или процентах. Математически это можно описать следующим образом:

$$D_i = R_i/K_i \text{ или } D_i = (R_i/K_i) * 100\% \quad (1)$$

где  $D_i$  – дефицит по безопасности для  $i$ -го критерия приемлемости;

$R_i$  – расчётное значение  $i$ -го критерия приемлемости;

$K_i$  – значение для  $i$ -го критерия приемлемости.

Для удобства в данной статье будем называть значение, которое устанавливается в нормативных или проектных документах граничным значением дефицита безопасности, когда оно выражено в безразмерной форме. Граничное в смысле того, что его превышение будет означать нарушение предела безопасности (критерия приемлемости). Из определения следует, что граничное значение дефицита безопасности всегда равно «1» и соответственно, дефицит безопасности должен быть меньше единицы.

При таком подходе безразмерное значение запаса безопасности или безразмерный запас безопасности будет выглядеть как

$$Z_i = 1 - D_i \quad (2)$$

Для удобства понимания приведенные определения проиллюстрированы на рисунке 2.

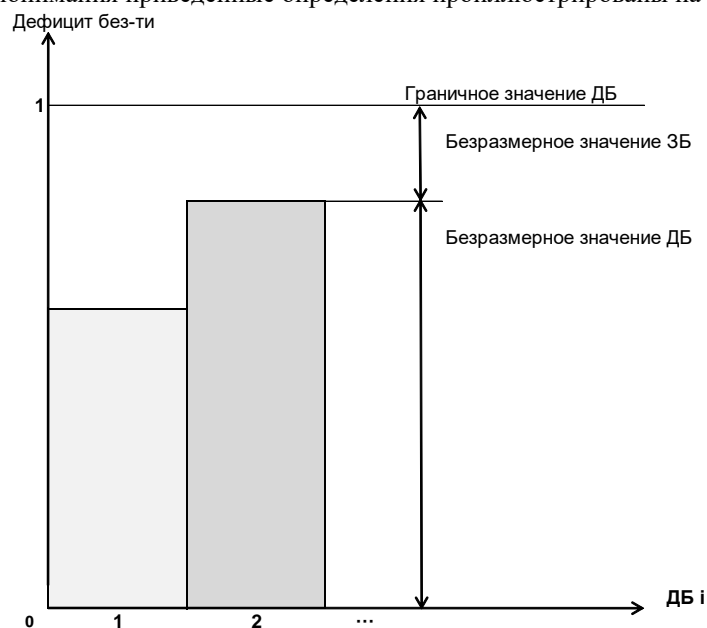


Рисунок 2 – Дефицит безопасности, безразмерный запас безопасности, граничное значение дефицита безопасности

Введение безразмерных величин открыло широкие возможности по реализации этого подхода в виде методологии и процедур, но для этого необходимо ввести ещё ряд понятий.

**Предельно допустимое значение дефицита безопасности** – это установленное в нормах, правилах и стандартах значение дефицита безопасности, превышение которого запрещает эксплуатацию реакторной установки или требует применения компенсирующих мероприятий. Например, в данной работе предлагается использовать значение 0.9 (т.е. сниженное на 10% граничное значение дефицита безопасности, что обеспечивает 10% безразмерный запас безопасности).

**Интегральный дефицит безопасности энергоблока** - суммарное значение дефицитов безопасности, определённых на основании детерминистического подхода для всех исходных событий (однако, отдельно для нарушений нормальной эксплуатации и проектных аварий), состояний энергоблока, по отношению ко всем критериям приемлемости и характеризующее безопасность конкретной АЭС.

$$D^i = \sum \sum D_{ij}, \quad (3)$$

$i$  – индекс критерия приемлемости;

$j$  – индекс исходного события.

Интегральный дефицит безопасности также может быть введен в практику регулирующего органа. Например, можно ввести регуляторное требование, когда значение интегрального дефицита безопасности энергоблока не может быть больше, чем количество всех оцениваемых запасов безопасности конкретной АЭС умноженное на 90% или 0.9. Такой интегральный дефицит безопасности можно назвать предельным интегральным дефицитом безопасности. Понятно, что для однотипных реакторных установок значения интегрального дефицита безопасности должны быть близки. При этом, чем меньше интегральный дефицит безопасности, тем выше уровень безопасности. При сравнении разнотипных реакторных установок, например, кипящих и с водой под давлением водо-водяных реакторов предпочтение с точки зрения эффективности-безопасность должно отдаваться той реакторной установке, для которой значение интегральной оценки меньше, с учётом применимых пределов и критериев безопасности.

**Интегральный дефицит безопасности физического барьера** - суммарное значение дефицитов безопасности, определённых на основании детерминистического подхода для конкретного физического барьера безопасности с учётом всех применимых к нему критериев приемлемости и исходных событий.

**Среднее значение дефицита безопасности** – среднее арифметическое дефицитов безопасности **рассчитанное** по отношению к исходному событию, физическому барьеру безопасности, критерию приемлемости.

$$D^{cp}_i = D^i / (N_{ij}), \quad (4)$$

где  $N_{ij}$  – это количество ИС для которых рассчитывался  $i$ -й критерий приемлемости.

С одной стороны, среднее значение дефицита безопасности дублирует интегральный дефицит безопасности, т.к. также является индивидуальной характеристикой безопасности. Однако, с другой стороны, является более универсальным инструментом для проведения сравнений между уровнями безопасности отдельных исходных событий, физических барьеров безопасности, критериев приемлемости, вплоть до сравнения безопасности различных реакторных установок, в том числе, разного типа, т.к., например, не зависит от количества ИС, рассмотренных в проекте, от количества критериев приемлемости, учитываемых для конкретного исходного события, и т.д.

**Профиль безопасности** – отображённые на единой шкале значения дефицитов безопасности конкретного энергоблока.

Позволяет визуально оценить сбалансированность безопасности и определить те исходные события и дефициты безопасности, которые избыточны или недостаточны по отношению к остальным исходным событиям или дефицитам безопасности.

**Детерминистический критерий безопасности** - установленный в нормативных документах минимальный запас до граничного значения дефицита безопасности, при нарушении которого эксплуатация АЭС требует выполнения специальных мероприятий по повышению безопасности или недопустима. Предлагается ввести 10% значение минимального запаса (см. рисунок 3).

**Детерминистический показатель безопасности** – один из описанных выше показателей: дефицит безопасности, безразмерный запас безопасности, интегральный дефицит безопасности, среднее значение дефицита безопасности, баланс и профиль безопасности.

**Управление запасами безопасности** – это такие целенаправленные изменения эксплуатационных характеристик АЭС и/или других аспектов влияющих на безопасность АЭС, которые предназначены для оптимизации расходов на эксплуатацию при условии поддержания достигнутого высокого уровня безопасности АЭС.

Таким образом, имеющимися запасами безопасности можно осмысленно управлять с целью получения максимальной экономической эффективности, при этом, не допуская снижения высокого достигнутого уровня безопасности.

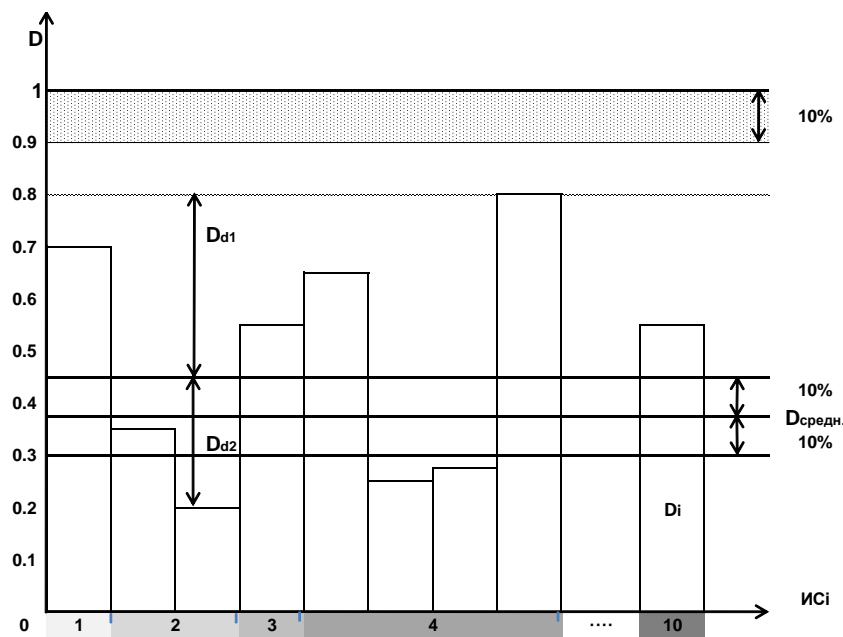


Рисунок 3 – Иллюстрация к детерминистическому критерию безопасности

**Практическое применение методологии.** В АПА критерии приемлемости устанавливаются для каждого физического барьера на основании нормативных и проектных документов:

1. Запас до кризиса теплообмена с учетом 95% доверительной вероятности, должен быть больше 1.0; номинальное значение – 3; эксплуатационный предел – 1.19.

2. Максимальная температура топлива: 2840<sup>0</sup>С для свежего и 2570<sup>0</sup>С для выгоревшего топлива; номинальное значение – 1600 0С; эксплуатационный предел – 1690 0С.

3. Максимальная радиально усредненная энтальпия топлива: 963 кДж/кг (230 ккал/кг) для свежего 840 кДж/кг (200 ккал/кг) для выгоревшего топлива в любой точке вдоль оси ТВЭЛ; номинальное значение – 100 ккал/кг.

4. Давление в оборудовании и трубопроводах не должно превышать рабочее давление) на 15% с учетом динамики переходных процессов и времени срабатывания предохранительной арматуры

- 207 кг/см<sup>2</sup>; номинальное значение – 160 кг/см<sup>2</sup>; эксплуатационный предел – 162 кг/см<sup>2</sup>.
- 92 кг/см<sup>2</sup>; номинальное значение – 60 кг/см<sup>2</sup>; эксплуатационный предел – 64 кг/см<sup>2</sup>.

5. Требования к обеспечению целостности ГО (максимальные температура и давление среды в помещениях ГО:

- 150 <sup>0</sup>С; номинальное значение – 60 <sup>0</sup>С; эксплуатационный предел – 90 <sup>0</sup>С.
- 5 кг/см<sup>2</sup> (0.49 МПа); номинальное значение – 0.85 кг/см<sup>2</sup>; эксплуатационный предел – 1.03 кгс/см<sup>2</sup>.

6. Максимальный проектный предел повреждения твэлов:

• температура оболочек твэлов — не более 1200<sup>0</sup>С; номинальное значение – 340 <sup>0</sup>С; эксплуатационный предел – 350 <sup>0</sup>С.

• локальная глубина окисления оболочек твэлов — не более 18% от первоначальной толщины стенки;

- доля прореагировавшего циркония — не более 1% его массы в оболочках твэлов.

7. Максимальная величина радиоактивных выбросов: на границе санитарно-защитной зоны и за ее пределами, не должны превышать установленных пределов:

- 0.3 Зв (30 бэр) на щитовидную железу детей за счет ингаляции; и
- 0.1 Зв (10 бэр) на все тело за счет внешнего облучения.

За исключением 1-го и 4-го критериев приемлемости все остальные представляют собой максимально допустимые величины, превышение которых означает разрушение физического барьера безопасности. Первые два критерия приемлемости устанавливаются для нарушений нормальной эксплуатации и являются более жесткими, тогда как остальные устанавливаются по отношению к

проектным авариям. Поэтому, в диссертационной работе все исходные события анализируются для каждой категории ИС по отдельности.

Взяты из Анализа проектных аварий референтного энергоблока с серийным реактором ВВЭР-1000/320 Запорожской АЭС [5] (в стране эксплуатируется 11 таких реакторных установок) значения запасов до нарушения критериев приемлемости, в результате пересчёта по формуле 1 переводятся в безразмерную форму. Также, по формуле 1 в безразмерную форму можно перевести и соответствующие параметры для нормальной эксплуатации, эксплуатационные пределы, а пределы безопасной эксплуатации в этом случае будут равны 1 (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Перевод номинальных параметров и эксплуатационных пределов в безразмерную форму.

Критерий №	Номинальный параметр		Эксплуатационный предел	
	Измеряемое или расчётное значение	Безразмерная форма	Измеряемое или расчётное значение	Безразмерная форма
1	2	3	4	5
Критерий 1	3	3	1,19	0,840
Критерий 2	1600		1690	0,658
Критерий 3				
Критерий 4	160/64	0,773/0,696	166/68	0,806/0,747
Критерий 5	60/0,85	0,4/0,17	90/1,03	0,6/0,206
Критерий 6	330	0,275	350	0,292
Критерий 7			Формулируется по отношению к активности т/н 1-го контура	

Такой подход позволяет оценить их соотношение, как в рамках анализируемого критерия приемлемости, так и путём сравнительного анализа их соотношения между различными критериями приемлемости, что позволит сделать важные выводы в части надёжности и безопасности реакторной установки.

Согласно таблицы 1, для большей части критериев приемлемости (они же граничные дефициты безопасности) имеются соответствующие эксплуатационные пределы. Обращает на себя внимание тот факт, что разница между критерием приемлемости (равным 1 в безразмерной форме) и эксплуатационными пределами в безразмерной форме различна у разных критериев приемлемости. Для одних она мала (малый запас), например для критерия 1 разница равна 0.16, а для критерия 6 в несколько раз больше – 0.708.

При конструировании и проектировании реакторных установок на этот момент необходимо обратить внимание и объяснить такие различия, которые могут быть вызваны, например, различием и динамикой физических процессов, свойств материалов или же действительно следствием несбалансированного подхода при проектировании.

При анализе любого исходного события могут применяться несколько критериев приемлемости. Поэтому, интегральный дефицит безопасности по отношению к j-ому ИС должен рассчитываться как сумма дефицитов по всем критериям приемлемости:

$$D_{исj}^t = \sum D_i, \quad (5)$$

$i$  – индекс критерия приемлемости;

$j$  – индекс исходного события.

Аналогично можно рассчитать интегральный дефицит для каждого физического барьера безопасности по отношению к каждой из категорий ИС (нарушения нормальной эксплуатации угрожают целостности только 2-го и 3-го физических барьеров безопасности при проектном протекании):

$$D_n^t = \sum \sum D_{ij}, \quad (7)$$

где  $j$  включает только те исходные события, которые угрожают целостности физического барьера безопасности, а  $n$  – номер физического барьера безопасности, т.е. принимает значения 1, 2, 3, 4.

Представленные выше теоретические основы методологии позволяют решать следующие практические задачи:

- рассчитать безразмерные запасы и дефициты безопасности для исходных событий,
- оценить средние и интегральные значения дефицитов безопасности как для критериев приемлемости и физических барьеров безопасности, так и энергоблока АЭС в целом, и оценить детерминистически уровень безопасности энергоблока.
- выполнить сравнительный анализ степени защищённости по отношению к критериям приемлемости и физических барьеров безопасности,
- рассчитать балансы дефицитов безопасности и построить профиль дефицитов безопасности
- выявить дефициты безопасности и избыточные запасы безопасности.

Прежде, чем продолжить освещение применения методологии на практике, необходимо дать некоторые краткие пояснения по философии и концепции безопасности АЭС.

Согласно ОПБАС-2008 [2] система последовательных физических барьеров включает: топливную матрицу, оболочку твэла, границу контура теплоносителя РУ, герметичное ограждение РУ и биологическую защиту.

Последний физический барьер применяется для источников ионизирующего излучения и в рамках данной работы применительно к АЭС не рассматривается.

Каждому физическому барьеру соответствует не один критерий приемлемости, а свой уникальный набор критериев приемлемости и, таким образом, дефициты безопасности позволяют оценить степень защищённости и сбалансированность защиты по отношению к каждому физическому барьеру индивидуально, как для каждого исходного события по отдельности, так и их совокупности, что является новаторским решением.

Для 1-го физического барьера в рамках АПА рассчитываются критерии приемлемости № 2 и 3. Для 2-го ФББ – критерий № 6. Для 3-го ФББ – критерий № 4 и для 4-го физического барьера критерии № 5 и 7.

Зная, какие критерии применяются к каким ФББ, для каждого физического барьера безопасности можно рассчитать интегральное значение и среднее значение дефицита безопасности (см. формулы 3 и 4).

Очевидно, что существуют предельные значения для интегрального значения дефицита безопасности, которое определяется количеством исходных событий и критериев приемлемости, рассчитываемых для ФББ. Отсюда следует важный вывод, что можно ввести регулирующие требования по безразмерным запасам безопасности физических барьеров безопасности по отношению к типам реакторных установок, т.е. установить минимальные значения, превышение которых не допускаются или требуют проведения специальных компенсирующих мероприятий.

Интегральный дефицит безопасности для ФББ №1 равен 3,741, для ФББ №2 - 3,722, для ФББ №3 - 10,526 и для ФББ №4 - 4,973. Анализ профиля дефицитов безопасности (см. Рисунок 4) показывает существенное различие в уровне защищённости физических барьеров безопасности и разбалансированный профиль безопасности. Наиболее защищённой является оболочка твэлов. Данная информация является важной при проектировании РУ и её систем безопасности. Необходимо применять такие решения, чтобы степень защищённости ФББ №3 и 4 была выше, а профиль безопасности для физических барьеров – более сбалансированным.

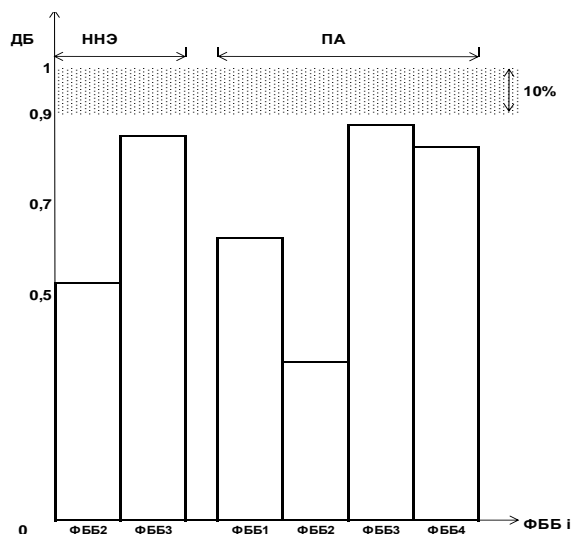


Рисунок 4 – Среднее значение запаса безопасности физического барьера безопасности по исходным событиям (ННЭ и ПА) и критериям приемлемости

**Выводы.** Предлагаемая методология может применяться самостоятельно при решении задач по проектированию, модернизации и реконструкции для повышения надёжной и безопасной эксплуатации АЭС, а также в составе методологии принятия решения основанного на комплексном риск-ориентированном подходе [6], тем самым решая проблему дополнения показателей риска детерминистическими показателями для принятия более обоснованных решений.

Методология может использоваться проектными и конструкторскими организациями, регулирующим органом по ядерной и радиационной безопасности, эксплуатирующими организациями, а также организациями научной и технической поддержки по эксплуатации и безопасности АЭС.

Методология имеет потенциал и для дальнейшего развития. Уже сейчас видны следующие направления:

- Разработка единого критерия безопасности АЭС на основе вероятностного и детерминистического критериев безопасности;
- Разработка программного продукта для отслеживания текущего уровня безопасности на основе детерминистических показателей в режиме реального времени.

#### Список использованной литературы

1.INSAG-25, Структура процесса принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода, МАГАТЭ, Вена, 2014г., STI/PUB/1499, ISBN 978–92–0–406814–6, ISSN 1025–2193.

2.НП 306.2.141-2008. Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій. К.: Державна адміністрація ядерного регулювання України, 2008.

3.International Atomic Energy Agency, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).

4.International Atomic Energy Agency, Safety Assessment for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4, IAEA, Vienna (2009).

5.Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий. Блок 5 Запорожская АЭС. 21.5.70.ОБ.02., 2003г.

6.International Atomic Energy Agency, Safety Standard, Integrated Risk Informed Decision Making Process Guidance, IAEA-TECDOC DS 365 Draft 1, IAEA, Vienna, April 2008.

Ev. Pysmennyy, Dr. Eng. Science, Prof.  
S. Klevtsov, Prof. assistant

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”

## METHODOLOGY OF THE RESEARCH OF DETERMINISTIC SAFETY MARGINS OF NUCLEAR POWER PLANTS

*Article provides methodology that on a basis of deterministic approach allows evaluate safety margins and safety level for Nuclear Power Plant, as well as for each physical safety barrier. These could be performed by independent implementation of the methodology or in the framework of Integrated Risk-Informed Decision Making approach.*

*As a tool for deterministic approach and safety margins calculation the Design Basis Accident (DBA) Analysis was applied. The main objective of DBA analysis is to demonstrate based on conservative approach exceeding or non-exceeding of so called acceptance criteria that are established and justified in the NPP design. Since, acceptance criteria have different physical background, units and numerical values it is proposed to transform them into unitless form by dividing value of corresponded calculated parameter on value of acceptance criterion. The result of ratio is the unitless safety deficit while difference between the unitless acceptance criterion (that is always equal to 1) and safety deficit is the unitless safety margin.*

*This allows evaluate for each initiating event the safety deficits for each acceptance criterion. Introduction of the average and integrated safety deficit makes possible to perform comparative analysis between different initiating events, acceptance criteria, physical protection barriers and types of nuclear reactors.*



Also, it is proposed to establish for each acceptance criterion a 10% zone (corresponds to 0.9 value limiting safety deficit) as a deterministic safety criterion and apply it in the nuclear regulations. If calculated value of safety deficit is within this zone than it is propose to use time limitation and recognize necessity to develop and apply safety measures of decrease of a safety deficit. This allows reveal as safety deficiencies so excessive safety margins.

The proposed methodology was applied for DBA Analysis of Zaporizhzhya NPP unit 5. Safety deficits were evaluated for each initiating event and corresponded safety profiles were draw for each acceptance criterion. Methodology is recommended for usage in regulatory activity, during the NPP designing and operation, and, for optimization of the safety systems maintenance and repair activity and its fulfillment on operating at power reactor.

**Key words:** safety deficit, integral safety deficit, unitless safety margin, deterministic safety criteria.

#### References

1. INSAG-25, A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Process, IAEA, Vienna, 2014, STI/PUB/1499, ISBN 978-92-0-406814-6, ISSN 1025-2193.
2. NP 306.2.141-2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants. Kyiv: State Nuclear Regulatory Administration of Ukraine, 2008.
3. International Atomic Energy Agency, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).
4. International Atomic Energy Agency, Safety Assessment for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4, IAEA, Vienna (2009).
5. Safety Analysis Report. Design Basis Accident Analysis. Unit 5 of Zaporizhzhya NPP. 21.5.70.ОБ.02., 2003.
6. International Atomic Energy Agency, Safety Standard, Integrated Risk Informed Decision Making Process Guidance, IAEA-TECDOC DS 365 Draft 1, IAEA, Vienna, April 2008.

Є.М.Письменний, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596

С.В. Клевцов, ассистент, ORCID 0000-0003-14055048

#### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕТЕРМІНІСТИЧНИХ ЗАПАСІВ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ СТАНЦІЙ

На сучасному етапі розвитку ядерної енергетики до неї ставиться все більше вимог з забезпечення безпеки ядерних енергоустановок, як з боку традиційних міжнародних організацій, таких як МАГАТЕ або WENRA, так і з боку суспільно-політичних організацій та рухів, що призводить до надмірного зростання витрат, та погіршує її конкурентоспроможність. Для дотримання балансу між жорсткими вимогами забезпечення високого рівня безпеки АЕС та витратами на його підтримку необхідна розробка нових детерміністичних методик, так як існуючі підходи враховують тільки кількісні імовірнісні фактори безпеки. У статті пропонується підхід до кількісної оцінки такого основного фактора безпеки, як «детерміністичний», що дозволяє підвищити об'єктивність інтегральної оцінки заходів з безпеки та знайти баланс між витратами на підтримку безпеки та досягнутим рівнем безпеки. Методологія застосована до енергоблоку №5 Запорізької АЕС, що дозволило виявити приховані дефіцити та надмірні запаси безпеки, та запропонувати нові критерії безпеки для застосування у нормах, правилах та стандартах з ядерної та радіаційної безпеки.

**Ключові слова:** дефіцит безпеки, безрозмірне значення запасу безпеки, детерміністичний критерій безпеки, інтегральний дефіцит безпеки.

Надійшла 24.04.2018

Received 24.04.2018