

УДК 621.039

С.В. КЛЕВЦОВ, Национальный технический университет Украины
„Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”,
пр-т Победы, 37, г. Киев-56, 03056, Украина

КОНЦЕПЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Рассмотрена концепция методологии по управлению безопасностью АЭС на основании детерминистического подхода, которая может применяться как самостоятельно, так и в рамках подхода интегрального риск-ориентированного принятия решений. Концепция применена к энергоблоку с ВВЭР-1000/320. На его примере показаны дефициты безопасности и пути их снижения.

Ключевые слова: дефицит безопасности, предельное значение дефицита безопасности, безразмерное значение запаса безопасности, профиль безопасности, управление запасами безопасности.

В настоящее время существует и широко применяется только одна методология, которая позволяет количественно измерить уровень безопасности АЭС и обеспечить оптимизацию защиты. Это Вероятностный анализ безопасности. Тем не менее, безопасность АЭС по-прежнему обосновывается на основании детерминистического подхода. В качестве основного инструмента детерминистического подхода используется Анализ проектных аварий как для проектирования АЭС, так и для обоснования её безопасности. Он обладает общепризнанной и устоявшейся методологией, процедурой и опытом применения. Таким образом, возникает противоречие между измерением уровня и обоснованием безопасности. Для решения этого противоречия необходим симбиоз детерминистического и вероятностного подхода. Например, так предлагается в INSAG-25 [1]. В проекте технического документа МАГАТЭ [2] пошли несколько дальше – предлагается оценивать мероприятия 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.

В связи с этим, предлагается концепция методологии количественной оценки такого основополагающего фактора, как «детерминистический», что позволит 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.

Для оценки детерминистического фактора вводятся новые понятия запаса безопасности, дефицита безопасности, профиля и баланса дефицита безопасности, детерминистического критерия безопасности, с помощью которых строится концепция управления запасами безопасности для выявления ранее скрытых дефицитов безопасности и избыточных запасов безопасности, что и формирует основу управления запасами безопасности.

Таким образом, основной целью является разработка и демонстрация возможностей концепции методологии управления запасами безопасности энергоблока АЭС как самостоятельно, так и в составе комплексных подходов, как описано в [1, 2].

Как уже указывалось, разработка концепции требует введение дополнительного понятийного аппарата, для чего предлагаются термины и определения, изложенные ниже.

Запас безопасности – запас между установленным в нормативных или проектных докумен-

© С.В. КЛЕВЦОВ, 2018

тах значением, характеризующим безопасность АЭС (пределы и критерии безопасности) и расчётным значением, отражающим реальное состояние безопасности АЭС.

Для определения запасов безопасности предлагается воспользоваться Анализом проектных аварий (АПА). 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 и принято использовать 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 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.

Дефицит безопасности – это отношение расчётного значения параметра, отражающего реальное состояние безопасности АЭС, к установленному в нормативных или проектных документах значению, характеризующему безопасность АЭС (пределы и критерии безопасности), выраженное в долях или процентах. Математически это можно описать следующим образом:

$$D_i = R_i/K_i \text{ или } D_i = \left(\frac{R_i}{K_i}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

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 зна-

чением дефицита безопасности, когда оно выражено в безразмерной форме. Граничное в смысле того, что его превышение будет означать нарушение предела безопасности (критерия приемлемости в АПА). 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:

$$Z_i = 1 - D_i.$$

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, предлагается использовать значение 0,9 (т.е. сниженное на 10% граничное значение дефицита безопасности, что обеспечивает 10% безразмерный запас безопасности).

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 имеют избыточный или недостаточный запас безопасности 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 (рис. 1).

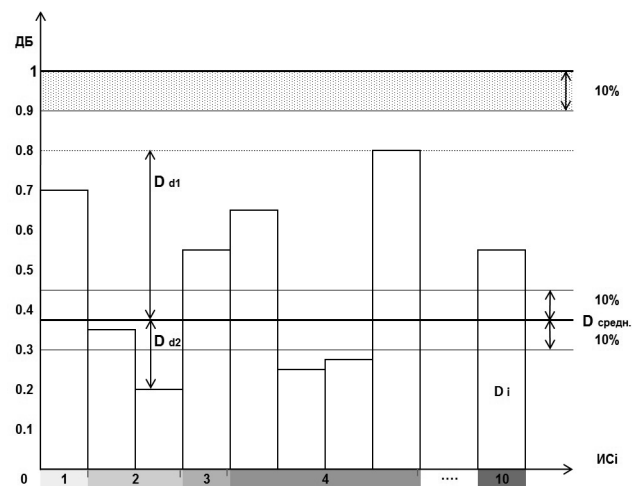


Рисунок 1. Иллюстрация к детерминистическому критерию безопасности

Детерминистический показатель безопасности – один из описанных выше показателей: дефицит безопасности, безразмерный запас безопасности 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.

Введение безразмерных величин открыло возможности для сравнения запасов безопасности для различных пределов безопасности, которые имеют различную физическую природу и большой разброс величин значений.

Если взять результаты ранее выполненных АПА (например, энергоблока № 5 Запорожской АЭС [3]) и перевести рассчитанные значения характерных параметров, показывающих запасы до нарушения пределов безопасности, в безразмерную форму с помощью (1), то для каждого исходного события (аварии), учитываемого в Проекте АЭС, можно построить диаграмму профиля безопасности, аналогичную той, что показана на рис. 1, на которой хорошо видно, насколько сбалансирована защита энергоблока по отношению к соответствующему критерию безопасности при возникновении аварии: чем меньше отклонение индивидуального значения дефицита безопасности от среднего значения, тем сбалансированней будет защита и чем меньше среднее значение дефицита безопасности, тем лучше защищён энергоблок. Также, видны низкие значения дефицитов безопасности для некоторых аварий, что указывает на возможность модернизации, в результате которой можно добиться управляемого снижения издержек при сохранении общего высокого уровня безопасности.

Для некоторых исходных событий дефициты безопасности могут попадать в 10%-ную зону, что свидетельствует о низком запасе безопасности и мотивирует разрабатывать мероприятия по повышению безопасности АЭС. Однако, для того, чтобы избежать повышения расходов на безопасность и сделать их максимально обоснованными, предлагается следующий подход – ввести зонирование для различных уровней дефицитов безопасности. В общем случае, это может выглядеть, как показано на рис. 2.

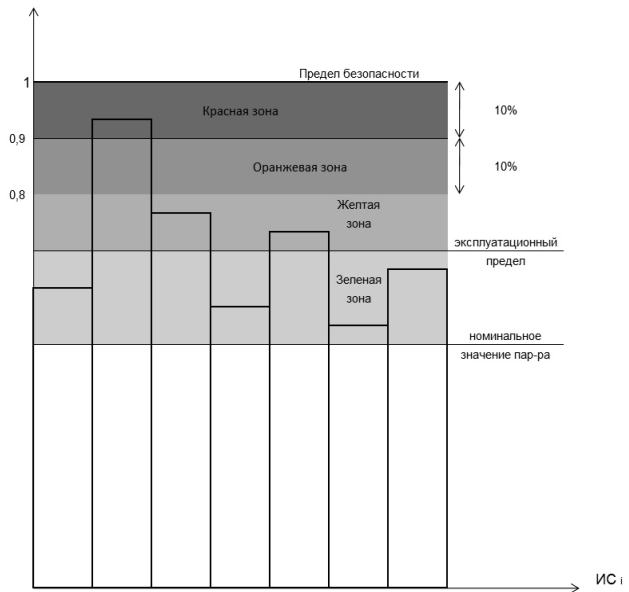


Рисунок 2. Зонирование запасов безопасности.

Принимая во внимание уже общепринятую цветовую кодировку состояний энергоблока отражающую уровни безопасности (например, как в симптомно-ориентированных аварийных инструкциях) предлагается применить её и здесь:

- **Красная зона** – находится запрещено или длительность нахождения в этой зоне ограничена и требуется применение специальных мер. Снизу ограничивается линией соответствующей значению 0,9.

- **Оранжевая зона** – можно находиться неограниченное время, но требуется применение специальных мер, сверху зона ограничена границей с красной зоной, а снизу – дополнительным 10%-ным запасом. В качестве нижней границы можно также применить среднее значение дефицита безопасности.

- **Жёлтая зона** – граничит с оранжевой зоной и снизу линией, которая определяется эксплуатационным пределом, нахождение в этой зоне неограниченно по времени и не требует никаких мер.

- **Зелёная зона** – полная безопасность.

В результате применения методологии управления запасами безопасности необходимо стремиться к тому, чтобы все дефициты безопасности для всех пределов безопасности и исходных событий находились как минимум в жёлтой зоне.

Однако, не всегда решения проблем безопасности одинаково сказываются на всех дефицитах безопасности одинаково – может наблюдаться снижение проблемного дефицита безопасности и увеличение какого-то другого, в результате чего он может перейти из одной зоны в другую, более опасную. Для управления этим процессом предлагается следующий подход, основанный на рис. 3.

Любые изменения (модернизация и реконструкция систем безопасности, их износ, старение) на энергоблоке показанные в виде приращения дефицита безопасности на оси ординат и которые приводят к попаданию в красную зону, недопустимы, либо должны быть ограничены во времени. Изменения, которые приводят к попаданию в оранжевую зону, нежелательны, но допустимы. Попадание в жёлтую зону является предупреждением. Необходимо стремиться к тому, чтобы любые изменения на энергоблоке приводили к попаданию в зелёную зону.

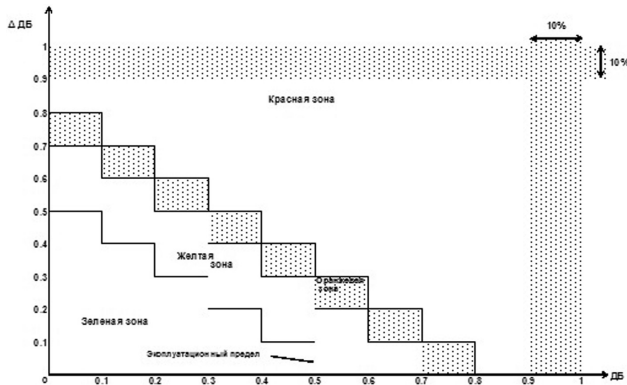


Рисунок 3. Иллюстрация к зонированию дефицитов безопасности

Возникает вопрос о том, как поступать при попадании в красную зону. Немедленное прекращение эксплуатации энергоблока будет противоречить существующим требованиям в области безопасности АЭС и приведёт к ограничению эксплуатации и финансовым потерям. В этом случае, предлагается ввести временную составляющую, которая устанавливает и ограничивает длительность нарушения детерминистического критерия безопасности, как показано на рис. 4 (переход к выполнению схемы на рис. 4 возможен из рисунка 2, 3 при нахождении в красной зоне).

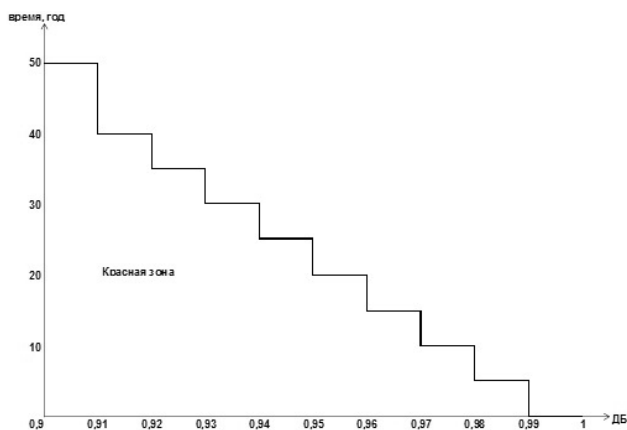


Рисунок 4. Разрешённая длительность нахождения в красной зоне

В зависимости от того, насколько нарушается детерминистический критерий безопасности определяется допустимое время для соответствующего значения дефицита безопасности. Так, для диапазона дефицита безопасности от 0,9 до 0,91 это время фактически неограничено (50 лет на сегодняшний день соответствует сроку эксплуатации РУ). Согласно предлагаемой схеме, для диапазона 0,98 – 0,99 допускается только 5 лет для снижения дефицита безопасности.

Рассмотренные выше 10% зоны, принципы зонирования и временные ограничения, могут использоваться регулирующим органом по ядерной и радиационной безопасности как предлагается в статье. Однако регулирующий орган может использовать и другие значения, если они более адекватны его задачам, что определяется возможностями государства и типами эксплуатируемых реакторных установок.

Если применить изложенную выше концепцию к Анализу проектных аварий энергоблока № 5 Запорожской АЭС [3], то обнаружится, что наиболее критическая ситуация наблюдается для пределов безопасности по давлению 1-го и 2-го контуров для большого количества исходных событий, т.е. нарушается детерминистический критерий безопасности. При этом, наихудший показатель дефицита безопасности 0,985 для предела безопасности по давлению 1-го контура имеет место для исходного события «Разрыв коллектора питательной воды». В этом случае, согласно рис. 4, время работы энергоблока с такими показателями должно быть ограничено 5-ю годами, когда должны быть разработаны и реализованы специальные мероприятия для снижения дефицита безопасности. Проанализировав результаты АПА энергоблока № 5 ЗАЭС [3] и оценив динамику роста давления после открытия предохранительного клапана, предлагается недорогое и достаточно эффективное мероприятие – снижение уставок открытия предохранительных клапанов компенсатора объёма. На сегодняшний день для предохранительного клапана компенсатора давления ВВЭР-1000/320 применяются следующие уставки:

- 186 кгс/см² для контрольного клапана и 190 кгс/см² для рабочего.

Однако, ограничивающим фактором для снижения уставок по давлению является уставка аварийной защиты по давлению 1-го контура 180 кгс/см². Также, при выполнении теплогидравлических расчётов [3] консервативно учитывалась существенная погрешность измерения давления – 2,5 кгс/см². Это 2-й фактор, влияющий на переопределение величин уставок по давлению.

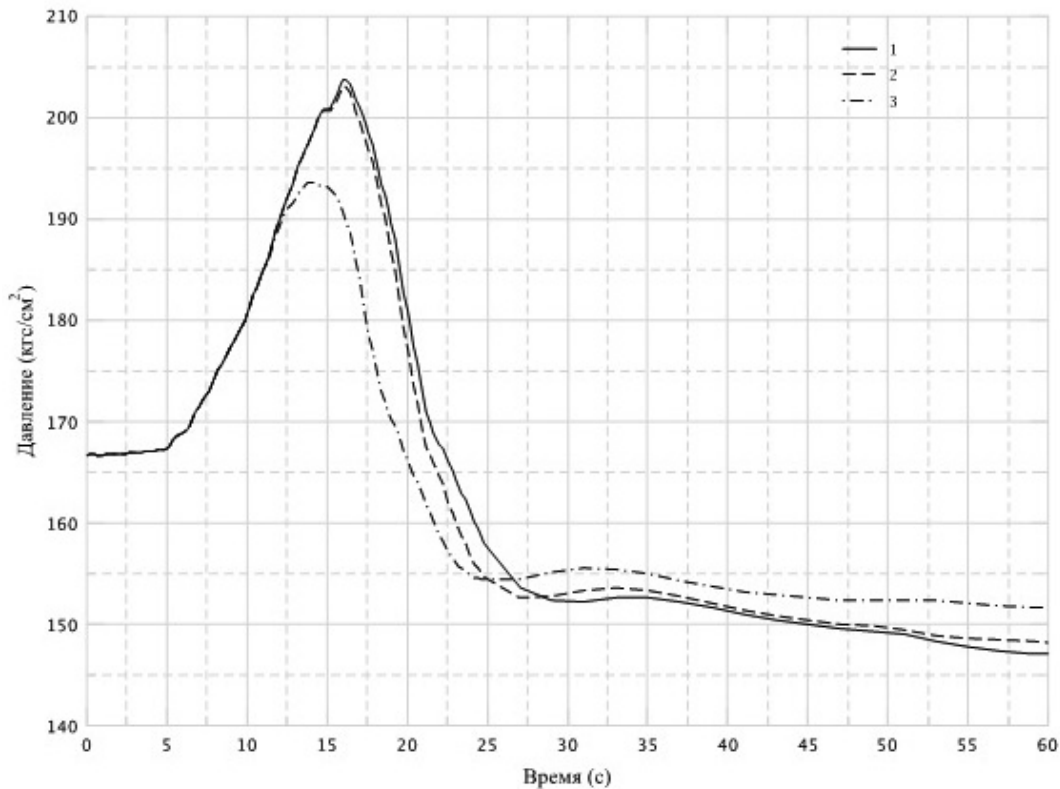


Рисунок 5. Расчётное пиковое давление 1-го контура для трёх случаев: 1 – базовый расчёт, 2 – расчёт только с изменёнными уставками открытия ПК КД и 3 – расчёт с изменёнными уставками открытия ПК КД и АЗ

Обосновывающие расчёты по пересмотру уставок выполняли с использованием валидированного и верифицированного расчётного кода RELAP5 Mod 3.2 и набора исходных данных, разработанного специально для АПА ЗАЭС-5. Набор исходных данных также валидирован, верифицирован и прошёл государственную экспертизу в регулирующем органе.

Для оценки эффекта снижения уставок открытия предохранительных клапанов, сначала необходимо было воспроизвести расчёт (назовём его базовым), выполненный в [3] для анализируемой аварии. На рис. 5 ему соответствует кривая № 1. После этого, была проведена серия расчётов с несколькими вариантами снижения уставок (в том числе, по аварийной защите реактора). Эти расчёты представлены кривыми № 2 и 3.

Поскольку снижение только уставок предохранительных клапанов не приводит к необходимому результату, предлагается также изменение уставки аварийной защиты по давлению 1-го контура:

- новая уставка предохранительных клапанов: 180 кгс/см² – контрольный клапан и 184 кгс/см² – рабочий;

- уставка аварийной защиты по давлению 1-го контура снижена со 180 кгс/см² до 175 кгс/см²;

Как видно из рис. 5, имеет место существенное снижение пикового давления 1-го контура, которое в результате снизилось с 203,79 до 193,63 кгс/см². Тогда, новое значения дефицита безопасности будет 0,935 и эксплуатация такого энергоблока разрешена в течении 30 лет (рис. 4).

Дальнейшее увеличение запасов безопасности для критерия приемлемости по давлению 1-го контура требует дополнительных мероприятий и обоснований по переопределению уставки 170 кгс/см² предупредительной защиты реактора.

Помимо снижения дефицитов безопасности, предлагаемая методология позволяет также оптимизировать запасы безопасности. Под оптимизацией понимается снижение издержек на поддержание тех запасов безопасности, которые имеют кратный запас до критериев приемлемости, что может привести к их снижению, но без ущерба для высокого уровня безопасности. Данный процесс имеет смысл инициировать после решения проблемы дефицитов безопасности, ко-

торые нарушают установленные детерминистические критерии безопасности.

В случае, если нет возможности снизить дефициты безопасности, попавшие в красную зону (рис. 2), или мероприятия по безопасности потребуют существенных расходов, то руководствуясь рекомендациям МАГАТЭ [4] и законами Украины [5], не допускать неоправданных ограничений эксплуатации АЭС, запасы безопасности следует переопределить на основании реалистичного подхода (улучшенной оценки). Однако, следует учесть, что в этом случае требуется выполнение оценки неопределённости запасов безопасности и, возможно, более частой их переоценки, связанной с изменением параметров, состояния или модернизации энергоблока АЭС.

ВЫВОДЫ

Предложенная концепция методологии может применяться для различных целей на разных этапах жизненного цикла энергоблока АЭС, среди которых можно выделить следующие:

- проектирование и конструирование;
- эксплуатация и продление эксплуатации.

С точки зрения применения методологии можно выделить четыре основные цели:

1. мониторинг текущего уровня запасов безопасности;
2. оценка влияния изменений энергоблока (модернизация, реконструкция и другие причины) на запасы безопасности;
3. устранение дефицитов безопасности;

4. оптимизация запасов безопасности для снижения издержек эксплуатации.

Концепция методологии имеет хороший потенциал 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.

1. INSAG-25, Структура процесса принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода, МАГАТЭ, Вена, 2014. STI/PUB/1499, ISBN 978-92-0-406814-6, ISSN 1025-2193.
2. International Atomic Energy Agency, Safety Standard, Integrated Risk Informed Decision Making Process Guidance, IAEA-TECDOC DS 365 Draft 1, IAEA, Vienna, April 2008.
3. Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий. Блок 5 Запорожская АЭС. 21.5.70. ОБ.02., 2003.
4. Основополагающие принципы безопасности, Нормы МАГАТЭ по безопасности, Серия основы безопасности № SF-1, МАГАТЭ, Вена, 2007.
5. Закон Украины «О разрешительной деятельности в сфере использования ядерной энергии», 2000.

Поступила в редколлегию 04.06.2018