

Б. Ю. Грищенко<sup>1</sup>, М. А. Полянский<sup>2</sup>,  
А. Е. Севбо<sup>3</sup>, И. А. Семенюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

<sup>2</sup>ООО «Энергориск», г. Киев, Украина

<sup>3</sup>Государственный научно-технический центр по ядерной  
и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

## Применение вероятностных методов анализа безопасности АЭС при исследовании нарушения хрупкой прочности корпуса реактора

Выполнен анализ вероятностных моделей ВАБ 1-го уровня с целью идентификации, группирования и оценки частот потенциальных сценариев хрупкого разрушения корпуса реактора вследствие термоудара и холодной переопрессовки на примере энергоблока № 1 Запорожской АЭС. Расчетами с использованием модифицированных моделей ВАБ 1-го уровня определены наиболее значимые с точки зрения риска группы потенциальных сценариев хрупкого разрушения корпуса реактора.

Ключевые слова: корпус реактора, термоудар, сценарий хрупкого разрушения, вероятностный анализ, частота реализации.

**Б. Ю. Грищенко, М. О. Полянський, А. Є. Севбо, І. О. Семенюк**

### Застосування імовірнісних методів аналізу безпеки АЕС у дослідженні порушення крихкої міцності корпусу реактора

Виконано аналіз імовірнісних моделей ІАБ 1-го рівня з метою ідентифікації, групування та оцінки частот потенційних сценаріїв крихкого руйнування корпусу реактора внаслідок термоудару та холодної переопресування на прикладі енергоблока № 1 Запорізької АЕС. Розрахунками з використанням модифікованих імовірнісних моделей ІАБ 1-го рівня визначено найбільш значущі з погляду ризику групи потенційних сценаріїв крихкого руйнування корпусу реактора.

Ключові слова: корпус реактора, термоудар, сценарій крихкого руйнування, імовірнісний аналіз, частота реалізації.

© Б. Ю. Грищенко, М. А. Полянский, А. Е. Севбо, И. А. Семенюк, 2013

**В** настоящее время в Украине в промышленной эксплуатации находятся 15 энергоблоков АЭС, расположенных на четырех площадках. Большинство из них были введены в эксплуатацию с 1980 по 1990 г. Следовательно, на сегодняшний день актуальна проблема продления срока эксплуатации действующих энергоблоков АЭС Украины в сверхпроектный период. Одним из основных факторов, влияющих на возможность работы энергоблока в сверхпроектный период, является техническое состояние корпуса реактора (КР) — одного из основных элементов реакторной установки (РУ).

Оценка технического состояния КР за проектный период — комплексная задача, которая включает в себя множество подзадач, в том числе выполнение нейтронно-физических расчетов, теплогидравлических анализов, прочностных расчетов и т. д., а также исследования возможных факторов термодара или холодной переопрессовки на КР.

При выполнении исследований указанных факторов, кроме теплогидравлических анализов и прочностных расчетов, применяются вероятностные методы анализа, которые позволяют сконцентрировать внимание на наиболее значимых механизмах (сценариях) нарушения хрупкой прочности КР, сформировать профиль риска возникновения термодара или холодной переопрессовки КР, дополнить перечень необходимых теплогидравлических анализов, сформулировать рекомендации по снижению риска возникновения нарушения хрупкой прочности КР.

В статье на примере энергоблока № 1 Запорожской АЭС (далее — ЗАЭС) приведены методология выполнения оценки риска нарушения хрупкой прочности КР по причине возникновения термодара или холодной переопрессовки с использованием существующих вероятностных моделей ВАБ 1-го уровня (далее — ВАБ-1), а также основные результаты вероятностных расчетов. При этом использованы вероятностные модели и документация ВАБ-1 для энергоблока № 1 ЗАЭС, разработанные в рамках выполнения адаптации глав ВАБ отчетов по анализу безопасности пилотных энергоблоков АЭС Украины на непилотные.

**Методологические подходы.** В общем случае методология вероятностного анализа нарушения условий хрупкой прочности КР аналогична методологии, используемой при разработке ВАБ-1, за исключением некоторых отличий. При выполнении анализа в качестве основы используются существующие вероятностные модели ВАБ-1, которые в процессе выполнения работы модифицируются для идентификации, группирования и количественной оценки частоты реализации сценариев, приводящих к нарушению условий хрупкой прочности КР. Вероятностный анализ сценариев с термоударом или холодной переопрессовкой выполняется в несколько этапов и является итеративным процессом.

Основные этапы выполнения работы:  
идентификация сценариев хрупкого разрушения (СХР) из аварийных последовательностей (АП), смоделированных в ВАБ-1;  
идентификация СХР из АП, исключенных из рассмотрения в ВАБ-1;  
группирование идентифицированных СХР;  
предварительная количественная оценка частот реализации групп СХР;  
модификация вероятностной модели ВАБ-1 с целью более детального моделирования факторов СХР;  
финальная количественная оценка частот СХР и анализ результатов.

Отметим, что при выполнении идентификации СХР используется консервативный подход: к СХР относятся АП,

которые потенциально, но не обязательно, приводят к возможным нарушениям условий хрупкой прочности КР.

При отборе СХР из вероятностной модели, ведущих к *термоудару*, используются следующие критерии, сформулированные на основании [1, 2, 3]:

*критерий 1.* После возникновения исходного события аварии (ИСА) на номинальной мощности, на пониженной мощности или в горячем останове средняя температура в первом контуре снижается до 150 °С со скоростью более 50 °С/ч, или

*критерий 2.* После возникновения ИСА (на номинальной мощности, на пониженной мощности или в горячем останове) средняя температура в первом контуре не снижается до 150 °С, но на первый контур работает как минимум один насос САОЗ ВД или САОЗ НД (но не только TQ14,24,34D01) и отключены все ГЦН, или

*критерий 3.* После возникновения ИСА (на номинальной мощности, на пониженной мощности или в горячем останове) произойдет внешнее затопление КР до нижнего сварного шва (шов № 3).

*Критерием* для идентификации сценариев, которые ведут к *холодной переопрессовке*, является превышение кривой «давление—температура» (при постоянной температуре и возрастании давления или при постоянном давлении и падении температуры или при комбинации этих процессов).

При выполнении идентификации СХР также учитывались рекомендации, изложенные в [1]. Анализ выполнен для всех АП, смоделированных в ВАБ-1 для внутренних ИСА при номинальном уровне мощности, пониженном уровне мощности и в состоянии останова, а также для АП вследствие внутренних экстремальных воздействий (пожары и затопления). Особенность анализа существующих деревьев событий (ДС) с точки зрения хрупкого разрушения КР заключается в том, что в соответствии с приведенными критериями к термоудару могут привести АП, которые в рамках ВАБ-1 являются успешными и не ведут к повреждению активной зоны.

Группирование идентифицированных СХР выполняется для упрощения процесса дальнейшего анализа и интерпретации результатов. В группы объединялись идентифицированные СХР по следующим признакам:

сценарии, которые можно отнести к некоторому одному теплогидравлическому расчету;

сценарии, инициированные одним и тем же ИСА, для которых выполняется один из критериев нарушения условий хрупкой прочности КР независимо от наложения дополнительных отказов систем (функций) или действий персонала, если они не оказывают отрицательного влияния на протекание процесса;

подобные друг другу сценарии для разных исходных событий (например, открытие и не посадка ПСУ второго контура для различных переходных процессов, процедура «сброс—подпитка» и т. д.);

подобные друг другу сценарии одного и того же ИСА, смоделированные для различных эксплуатационных состояний (ЭС).

Процесс группирования потенциальных СХР также является итеративным. На начальном этапе выделяется несколько обобщенных групп в зависимости от критерия идентификации и перечисленных признаков. В дальнейшем эти группы разделяются на несколько, в зависимости от уровня детализации моделирования факторов, влияющих на возникновение термоудара или холод-

ной переопрессовки. Часто необходимость моделирования дополнительных сценариев приводит к возникновению новых групп СХР.

На практике основные модификации вероятностной модели ВАБ-1 для более детального моделирования факторов хрупкого разрушения КР заключались в следующем:

разделении ИСА из ВАБ-1 на несколько составляющих; например моделирование АП для течи первого контура Ду 90—350 мм и Ду >350 мм (разделение ИСА S1 на составляющие S1-A и S1-B) или отделение ИСА S3-2 «Ложное открытие и не посадка ПК КД» из группы ИСА S3 «Малые некомпенсируемые течи первого контура»;

моделировании дополнительных функций в ДС, например, функции закрытия ПК КД или паросбросных устройств второго контура оперативным персоналом, в зависимости от аварийного сценария;

моделировании новых АП в ДС для возможности оценки сценариев с разной конфигурацией работы систем безопасности, которые влияют на формирование условий нарушения хрупкой прочности КР (работа 1/3 или 3/3 каналов САОЗ ВД, САОЗ НД);

модификации и моделировании новых по сравнению с ВАБ-1 функциональных деревьев отказов (ФДО) и т. д.

В объем анализа по отношению к термоудару были включены ИСА, возникновение которых возможно в период ЭС с изначально высокими параметрами первого контура:

ЭС 0 «Работа на номинальном уровне мощности»<sup>\*</sup>;

ЭС 1 «Снижение мощности реактора от 40 % до МКУ и перевод реактора в подкритическое состояние»;

ЭС 2 «Горячий или полугорячий останов»;

ЭС 3 «Расхолаживание РУ до 200 °С»;

ЭС 14 «Разогрев блока до 260 °С и установление горячего состояния перед пуском блока»;

ЭС 15 «Перевод реактора в критическое состояние и увеличение мощности реактора до 75 %».

Кроме того, для критериев, связанных с холодной переопрессовкой, в объем анализа включены следующие эксплуатационные состояния:

ЭС 6 «Расхолаживание РУ со 140 °С до 80 °С»;

ЭС 7 «Холодный останов без разуплотнения первого контура»;

ЭС 11 «Холодный останов после ремонта или перегрузки топлива»;

ЭС 12 «Гидроиспытания по первому контуру (плотность / прочность)»;

ЭС 13 «Разогрев блока до 150 °С».

Количественная оценка идентифицированных групп СХР выполняется с помощью средств расчетного кода SAPHIRE. Для каждой группы СХР определяется частота их возникновения как сумма частот возникновения отдельных сценариев в группе. При этом, по аналогии с ВАБ-1, степень отсекаемых минимальных сечений была принята равной 1.0E-12. Для облегчения группирования и количественной оценки в качестве конечного состояния вместо общепринятого обозначения CD для каждого конкретного сценария присваивался код группы СХР, к которой относится тот или иной сценарий. Процесс количественной оценки сводится к оценке частот конечных состояний, которые соответствуют группам СХР.

<sup>\*</sup> Детальное описание эксплуатационных состояний для энергоблока № 1 ЗАЭС приведено в отчете «Запорожская АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по анализу безопасности. Вероятностный анализ безопасности ОР и БВ. Адаптация. Итоговый отчет. 21.1.59.ОБ.04.04/05.» [4].

Таблица 1. Результаты количественной оценки групп СХР

№ группы	Код группы	Частота, 1/год	Вклад в суммарную частоту, %	Описание группы	Доминантный вкладчик в группу
1	K2-2N-4	6.79E-03	40,74	Малая некомпенсируемая течь первого контура (Ду 11÷50 мм) с работой более одного канала САОЗ ВД на первый контур для ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарий проектного протекания аварии для ЭС 0
2	K2-10N-4	3.01E-03	18,02	Аварийный процесс при плотном первом контуре с отказом расхолаживания по второму контуру и реализация режима Feed & Bleed по первому контуру	Сценарий проектного протекания аварии для ЭС 0 при возникновении ИСА Т61-2 «Неизолируемый разрыв паропровода за пределами ГО между ПГ и БЗОК» (разрыв трубопровода острого пара в помещении А820, А826, А910, зона затопления FZ-215-AA)
3	K2-14N-2	2.89E-03	17,35	Разрыв нескольких трубок ПГ с работой более одного САОЗ ВД на первый контур для ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарий проектного протекания аварии для ЭС 0
4	K2-14N-3	9.64E-04	5,78	Отрыв крышки коллектора ПГ с работой более одного канала САОЗ ВД на первый контур для ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарий проектного протекания аварии для ЭС 0
5	K1-1N-1	7.16E-04	4,30	Отказ на закрытие после открытия БРУ-А (ПК ПГ) при плотном первом контуре для ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарии с отказом на закрытие после открытия БРУ-А (ПК ПГ) для ЭС 0 для ИСА Т1 «Обесточивание всех секций нормального электроснабжения» и Т32 «Отказ конденсатно-вакуумной системы»
6	K1-3N-2	6.28E-04	3,77	Аварийный процесс при плотном первом контуре. Отказ на закрытие после открытия ПСУ после БЗОК или СК ТГ с последующим отказом на закрытие 4/4 БЗОК для ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарий проектного протекания аварии для ЭС 0
7	K2-2N-3	4.33E-04	2,60	Средняя течь первого контура (Ду 50÷90 мм) с работой более одного канала САОЗ ВД на первый контур для ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарий проектного протекания аварии для ЭС 0
8	K1-2N-1	4.25E-04	2,55	ИСА Т61-1 «Непреднамеренное открытие БРУ-А или ПК ПГ» при работе РУ в состояниях ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарий RB-112-01-2-06 с частотой 2.085E-04 1/год (возгорание кабельной трассы или сборки РТЗО в пределах пожарного отсека RB-112-01)
9	K1-3N-1	3.10E-04	1,86	Аварийный процесс при плотном первом контуре. Отказ на закрытие после открытия ПСУ после БЗОК или СК ТГ и наложение отказа на закрытие после открытия БРУ-А (ПК ПГ) для ЭС 0, ЭС 1, ЭС 15	Сценарий FZ-215-AB-23-1-08 (9.044E-05 1/год)

**Основные результаты количественной оценки групп СХР.**

В ходе идентификации и группирования потенциальных сценариев хрупкого разрушения выделено 83 группы, подлежащих количественной оценке. Рассчитанная суммарная частота групп СХР составляет 1.67E-02 1/год. Частота реализации 20 из 83 групп составляет менее 1.0E-08 1/год. Для таких групп рекомендуется не выполнять термодинамические анализы и они не учитывались при расчете суммарной частоты реализации нарушения условий хрупкой прочности КР. Получено 9 доминантных групп с общим вкладом в суммарное значение частоты хрупкого разрушения КР 97,4 %, которые требуют особого внимания (табл. 1).

В графическом виде результаты количественной оценки приведены на рис. 1.

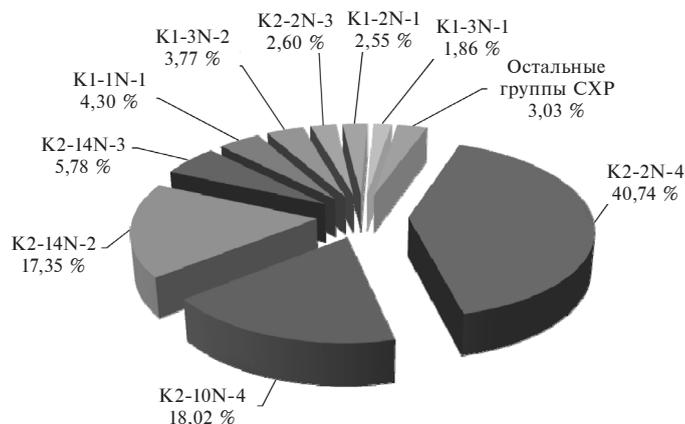


Рис. 1. Профиль риска для групп СХР

## Выводы

Исследование факторов, ведущих к нарушению хрупкой прочности корпуса реактора, на сегодня является важной задачей в условиях необходимости продления срока эксплуатации энергоблоков АЭС и оценки технического состояния корпусов реакторов.

В статье приведен обзор методологии и основных результатов оценки годовой частоты реализации сценариев, потенциально ведущих к нарушению условий хрупкой прочности корпуса реактора для энергоблока № 1 ЗАЭС.

В ходе выполнения работы получены значения частот реализации сценариев, потенциально ведущих к возникновению термоудара на корпус реактора. В дальнейшем полученные группы СХР должны быть сопоставлены с соответствующими теплогидравлическими расчетами, которые выполняются в рамках обоснования сопротивления корпуса реактора хрупкому разрушению. Для некоторых сценариев могут потребоваться дополнительные теплогидравлические расчеты. В итоге на основании результатов вероятностного и теплогидравлического анализов для идентифицированных групп СХР выполняются вероятностные анализы механики разрушения и определяются условные вероятности возникновения трещин в основном металле корпуса реактора.

По результатам вероятностной оценки СХР, основным механизмом возможного хрупкого разрушения КР является возникновение термоудара. Группа СХР с холод-

ной переопрессовкой составляет всего  $7.3E-07$  1/год, или 0,004 % суммарной частоты реализации СХР, что вызвано реализацией на энергоблоке № 1 ЗАЭС мероприятия по повышению безопасности 12101 «Повышение надежности защиты первого контура от высокого давления в холодном состоянии».

## Список использованной литературы

1. Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock (PTS) Screening Limit in the PTS Rule (10 CFR 50.61). Summary Report / US Nuclear Regulatory Commission. — NUREG-1806. — Vol. 1. — 2007.
2. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in VVER NPPs “VERLIFE”, ver. 2008: Report Number: COVERS-WP4-D4.10, Project COVERS of 6th Framework Programme of EU, Contract N°12727 (FI60).
3. Guidelines on pressurized thermal shock analysis for WWER Nuclear Power Plants. IAEA-EBP-WWER-08 (Rev. 1). — 2006.
4. Запорожская АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по анализу безопасности. Вероятностный анализ безопасности ОР и БВ. Адаптация. Итоговый отчет. — 21.1.59.ОБ.04.04/05.

*Получено 14.12.2012.*