

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА БЕЗОПАСНОСТЬ КВАЛИФИКАЦИИ БРУ-А ВВЭР 1000/В-320 ПРИ ДВУХФАЗНЫХ РЕЖИМАХ И В «ЖЕСТКИХ» УСЛОВИЯХ

Ю. А. Комаров, В. Ю. Кочнева, В. И. Скалозубов, А. В. Шавлаков*, С. В. Шигин*

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

** ОП "Запорожская АЭС", Энергодар*

На основании известных результатов вероятностного анализа безопасности энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР 1000/В-320 определены вероятностные оценки изменения общих показателей безопасности в результате установления квалификации БРУ-А Запорожской АЭС при истечении пароводяной среды и в «жестких» условиях эксплуатации.

Ключевые слова: быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в атмосферу (БРУ-А), водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), вероятностный анализ безопасности (ВАБ), запроектная авария, проектная авария, межконтурная течь, парогенератор (ПГ), квалификация, «жесткие» условия, двухфазный режим, частота повреждения активной зоны (ЧПАЗ).

Актуальность вопроса

В рамках важнейших отраслевых программ ядерной энергетики Украины по обеспечению работоспособности и квалификации БРУ-А в условиях возникновения режимов с истечением пароводяной среды (возникающих обычно в результате аварий с течью из 1-го контура во 2-й) и «жестких» условиях эксплуатации основными задачами по оценке влияния на безопасность являются:

оценка условий и значимости для безопасности возникновения не квалифицированных по проекту двухфазных режимов истечения через БРУ-А при авариях с межконтурными течами;

оценка значимости квалификации БРУ-А для безопасности в «жестких» условиях эксплуатации (при возможных внутренних и внешних экстремальных событиях, а также проектных исходных внутренних аварийных событиях).

Результаты этих вероятностных оценок могут выступать обоснованием целесообразности проведения расчетно-экспериментальной квалификации БРУ-А Запорожской АЭС (типы клапанов 1115-300/350-Э и 960-300/350-Э) в двухфазных режимах истечения и «жестких» условиях.

Вероятностные оценки влияния на безопасность квалификации БРУ-А в двухфазных режимах

Исходя из проектно-конструкторской документации, БРУ-А 1115, 960 не квалифицированы на режимы с истечением воды и пароводяной среды. Поэтому возникает неопределенность надежности и работоспособности БРУ-А в таких режимах. Особенно ответственным является отказ на закрытие БРУ-А после открытия, который может привести к:

- недопустимым выбросам радиоактивных продуктов в окружающую среду;
- неуправляемому расхолаживанию РУ и возникновению повторной критичности;
- невосполнимой потере теплоносителя и т.п.

В последних двух случаях с большой вероятностью возможно повреждение активной зоны с превышением проектных пределов. Вместе с тем модернизация или замена действующих клапанов требует значительных материальных затрат. Поэтому для оптимизации затрат и следуя принципу ALARA (повышение безопасности настолько, насколько это разумно достижимо с учетом технических, экономических и социальных факторов) необходимо первоначально изучить вопрос о вкладе возможного отказа БРУ-А при работе на пароводяной смеси в общий уровень безопасности.

Если консервативно постулировать обязательный отказ БРУ-А при попадании в него пароводяной смеси, то вероятность отказа БРУ-А будет определяться вероятностью попадания пароводяной смеси в БРУ-А (переполнение ПГ) с наложением условий по повышению давления в паровом коллекторе ПГ до уставок открытия БРУ-А. Оценку вероятности возникновения указанного сценария можно провести на основе известных результатов углубленного анализа безопасности (ОАБ) АЭС с ВВЭР 1000/В-320, в которых представлено моделирование протекания аварии с течью (эквивалент течи – 100 мм) из 1-го контура во 2-й (ИСА Т42) [1 – 4]. В обоснованиях оргтехмероприятий по управлению аварией с течью теплоносителя из 1-го контура во 2-й эквивалентным сечением 100 мм [7] проведены также варианты теплогидравлические расчеты по выбору стратегии управления аварией на основе кода RELAP5/M3.2. Во всех расчетных обоснованиях принимался запрет на работу (открытие) БРУ-А аварийного ПГ с целью снижения вероятности и величины выброса активности за пределы гермообъема, который возникает на 10 – 15 с процесса после факта срабатывания аварийной защиты (АЗ) и наличия сигналов межконтурной некомпенсированной течи (8 – 10 с процесса).

Анализ результатов расчетных обоснований условий возникновения неквалифицированных режимов БРУ-А с истечением двухфазной среды проведен при следующих основных допущениях:

- 1) переполнение ПГ определялось по значениям уровнемера с базой 4 м при достижении уровня в ПГ значения 4 м;
- 2) момент переполнения ПГ соответствует моменту поступления пароводяной смеси в патрубок БРУ-А;

3) принимается отказ БРУ-А на закрытие при попадании в клапан пароводяной смеси. Попадание пароводяной смеси в БРУ-А возможно при наложении двух событий:

- 1) превышение давления в паропроводе выше уставки на открытие БРУ-А (давление в паровом коллекторе выше 73 кгс/см^2);
- 2) переполнение ПГ.

Результаты анализа возможности возникновения двухфазного режима в БРУ-А при авариях с межконтурными течами на основе детерминистского моделирования аварийных последовательностей теплогидродинамическим кодом RELAP/M3.2 представлены в таблице.

Основные выводы по анализу результатов расчетных обоснований условий возникновения неквалифицированных двухфазных режимов БРУ-А:

1. Возникновение режимов истечения двухфазной среды через БРУ-А возможно при запроектных авариях с межконтурными течами при:

- полной потере функции управления давлением 1-го контура в процессе аварии;
- полном отказе изоляции подпитки аварийного ПГ и отказе БРУ-К.

2. Принятый в [7] запрет на срабатывание БРУ-А аварийного ПГ не позволяет проанализировать процессы после возможного срабатывания (открытие/закрытие) БРУ-А по проектным уставкам. Однако анализ результатов моделирования теплогидродинамических процессов позволяет сделать следующие основные выводы в отношении возможного срабатывания БРУ-А в условиях истечения воды и пароводяной среды.

Во всех рассмотренных режимах проектных и запроектных аварий некомпенсированной межконтурной течи достижение уставок срабатывания БРУ-А (7,15 МПа) происходит до 20 с процесса исходного события, а время возможного наполнения аварийного ПГ водой и возможного попадания в клапана БРУ-А при этом более 1000 с. В соответствии с результатами расчетного моделирования без запрета на срабатывание БРУ-А на аварийном ПГ (например, [6]) при открытии клапанов БРУ-А уставки на закрытие достигаются в течение нескольких десятков секунд. Таким образом, возможное первое срабатывание (открытие/ закрытие) БРУ-А аварийного ПГ происходит в условиях истечения пара. В [7] этот результат объясняется тем, что даже при максимальном диаметре межконтурной течи расход в течь существенно меньше стационарного расхода пара из ПГ, что не приводит к значительному росту уровня в ПГ и изменению положений регуляторов расхода питательной воды.

Таблица

Таблица

Таблица

Отсутствие действий персонала или запоздалые действия персонала (например, по причине задержки характерного сигнала повышения активности в паропроводах) не являются критичными по отношению к возникновению условий истечения воды/пароводяной смеси через клапана БРУ-А, что определяется в первую очередь автоматической изоляцией аварийного ПГ по линии основной, вспомогательной и аварийной питательной воды.

Таким образом, основной причиной возникновения условий срабатывания (открытие/закрытие) при истечении воды через клапаны БРУ-А может быть запроектная авария межконтурной некомпенсируемой течи при полном отказе функции управления давлением по 1-му контуру, управление которой предполагает своевременный перевод насосов системы аварийного охлаждения зоны высокого давления (САОЗ ВД) на рециркуляцию и периодическое (своевременное) регулирование давление 1-го контура открытием задвижек системы аварийного газоудаления.

3. В соответствии с установленными в нормативных документах терминами «квалификация оборудования», «проектные аварии», «запроектные аварии» необходимость установления квалификации БРУ-А на воде/пароводяной смеси отсутствует, так как в условиях проектных аварий (для которых согласно определениям проводится квалификация) эти режимы не возникают.

Необходимость установления работоспособности и надежности выполнения назначенных функций безопасности БРУ-А в неквалифицированных режимах воды/пароводяной смеси определяется обязательным условием повышения надежности и эффективности управления доминантными для безопасности запроектными авариями с межконтурными течами. Необходимость проведения аттестации разгрузочных клапанов ПГ для работы на потоке воды рекомендована в отчете экспертов МАГАТЭ «Вопросы безопасности и их приоритизация для атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000/320» (рекомендация S9, III категория [5]) – консервативная квалификация.

Оценка значимости (приоритетности) консервативной квалификации БРУ-А и оргтехмероприятий по повышению надежности и работоспособности для управления авариями с межконтурными течами проводится при следующих основных положениях и допущениях:

1. Анализ проводится на основании финальной модели и результатов ВАБ первой фазы первого уровня для внутренних исходных событий аварии (ИСА) ЗАЭС-5 (ВВЭР-1000 В-320).

2. Оценка частоты возникновения требуемого сценария проводится для ИСА Т42 «Средняя течь из первого во второй контур (отрыв крышки холодного коллектора ПГ)».

3. Отказ быстродействующего редуцирующего устройства сброса пара в конденсатор (БРУ-К) возможен как по причине отказа самого БРУ-К и элементов, входящих в границы БРУ-К, так и по причине отказа в обеспечивающих системах, и по причине обесточивания собственных нужд энергоблока АЭС. В качестве модели для оценки вероятности отказа БРУ-К принято функциональное дерево отказа (ФДО), представленное в ВАБ ЗАЭС-5 «Управление давлением 2-го контура» (Т42-Е2-1).

4. Вероятность возникновения обесточивания определяется по частоте ИСА Т1 «Обесточивание всех секций 6 кВ нормального электроснабжения». Принято, что наложение обесточивания критично на протяжении всего интервала аварии, который в ВАБ консервативно принимается равным 24 ч.

5. Отказ по изоляции ПГ по питательной воде возможен:

или по причине отказа задвижек на линии основной и аварийной питательной воды (как по причине отказа самих задвижек, так и по причине отказа в обеспечивающих системах);

или по причине ошибки персонала, связанной с невыполнением действий по изоляции аварийного ПГ, которые прописаны в инструкциях по ликвидации аварий (ИЛА).

В качестве модели принято ФДО, представленное в ВАБ ЗАЭС-5 «Изоляция аварийного ПГ по питательной воде» (Т42-Р2).

6. Расхолаживание по 2-му контуру должно осуществляться через БРУ-А с подпиткой ПГ от системы аварийной подпитки парогенератора (АПЭН) или системы вспомогательной подпитки парогенератора (ВПЭН). В качестве модели принято ФДО, представленное в ВАБ ЗАЭС-5 «Отвод тепла по 2-у контуру в режиме расхолаживания» (Т42-Е1Е3).

7. Обеспечение давления в 1-м контуре ниже давления срабатывания БРУ-А на поздней стадии аварии обеспечивается действиями оператора по своевременному переводу САОЗ ВД на рециркуляцию и периодическим открытием арматуры системы аварийного парогазоудаления УР. В качестве модели принято ФДО, представленное в ВАБ ЗАЭС-5 «Управление давлением 1-го контура для недопущения открытия ПСУ» (Т42-Г2-2).

8. При реализации аварийных последовательностей, обозначенных в дереве событий как «VB», создаются условия для срабатывания БРУ-А на пароводяной смеси. Консервативно предполагается, что при этом обязательно происходит заклинивание БРУ-А в открытом состоянии.

На основании указанных выше теплогидравлических расчетов сформировано дерево событий (см. рисунок), моделирующее возможные сценарии срабатывания БРУ-А на пароводяной смеси.

Расчеты по ФДО проводятся методом минимальных сечений, используя соответствующие модели и встроенные функции SAPHIRE. Уровень отсечения минимальных сечений задан (Cutoff Value) 10^{-11} 1/год.

ИСА Т42	Функциональный отказ БРУ-К или обесточивание	Изоляция аварийного ПГ по питательной воде	Отвод тепла по 2-му контуру в режиме расхолаживания	Управление давлением 1-го контура для недопущения открытия ПСУ	№ аварийной последовательности, конечное состояние
Т42	Т42-Е2-1 и р(Т1)	Т24-Р2	Т42-Е2Е3	Т42-Г2-2	
$\lambda_{Т42} = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/год	$P_{БРУ-К} = 4,611 \cdot 10^{-2}$	$P_{и} = 1,487 \cdot 10^{-3}$	$P_{расх} = 4,643 \cdot 10^{-2}$	$P_{ТQ13} = 1,273 \cdot 10^{-1}$	

Уточненное дерево событий «Истечение пароводяной смеси через БРУ-А при ИСА Т42»:

VB – конечное состояние, соответствующее срабатыванию БРУ-А на воде;

OK – отсутствие пароводяной смеси в БРУ-А.

Расчет по ФДО «Управление давлением 2-го контура» (Т42-Е2-1) дал следующий результат: $P_{упр} = 4,6 \cdot 10^{-2}$.

Расчет по ФДО «Изоляция аварийного ПГ по питательной воде» (Т42-Р2) дал следующий результат: $P_{и} = 1,5 \cdot 10^{-3}$.

Расчет по ФДО «Отвод тепла по 2-му контуру в режиме расхолаживания» (Т42-Е1Е3) дал следующий результат: $P_{расх} = 4,643 \cdot 10^{-2}$.

Расчет по ФДО «Управление давлением 1-го контура для недопущения открытия ПСУ» (Т42-Г2-2) дал следующий результат: $P_{ТQ13} = 1,3 \cdot 10^{-1}$.

Вероятности реализации отдельных аварийных последовательностей (АП) составят

$$P_{АП2} = P_{ТQ13}, \quad P_{АП4} = P_{и}P_{расх}, \quad P_{АП6} = P_{БРУ-К}P_{и}.$$

Условная вероятность возникновения сценариев со срабатыванием БРУ-А на двухфазной смеси (при условии реализации ИСА Т42) составит

$$P_{вода} = 1 - (1 - P_{АП2})(1 - P_{АП4})(1 - P_{АП6}).$$

Частота ИСА Т42 «Средняя течь из 1-го во 2-й контур (отрыв крышки холодного коллектора ПГ)» составит $\lambda_{Т42} = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

Частота возникновения режимов со срабатыванием БРУ-А на двухфазной смеси составит

$$\text{ЧПАЗ}_{БРУ-А} = \lambda_{Т42}P_{АП2} + \lambda_{Т42}P_{АП4} + \lambda_{Т42}P_{АП6} = 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год.}$$

Основным вкладчиком в возникновения сценариев со срабатыванием БРУ-А на пароводяной смеси при ИСА Т42 является ошибка персонала «РДП и МД Управление давлением первого контура» (НЕР2-Т42-1YRTQ-DC). Вероятность данной ошибки оценена в ВАБ ЗАЭС-5 как $P_{Воп} = 1,270 \cdot 10^{-1}$.

Условная вероятность возникновения сценариев со срабатыванием БРУ-А на пароводяной смеси (при условии реализации ИСА Т42) составит $1,274 \cdot 10^{-1}$. Частота возникновения режимов со срабатыванием БРУ-А на пароводяной смеси составит $5,098 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

На основании моделей и результатов ВАБ ЗАЭС-5 возможно также провести оценку влияния на безопасность отсутствия квалификации БРУ-А при работе на пароводяной смеси.

Базовое значение суммарной $\text{ЧПАЗ}_{база} = 4,326 \cdot 10^{-5}$ 1/год, а оценка при отсутствии квалификации БРУ-А ($P_{закрБРУ-А} = 1$) составит $\text{ЧПАЗ}_{н} = 7,072 \cdot 10^{-5}$ 1/год, т. е. при отсутствии квалификации БРУ-А значение суммарной ЧПАЗ возрастет в 1,6 раза.

Вероятностные оценки влияния на безопасность квалификации БРУ-А в «жестких» условиях

На основании вероятностных оценок известных результатов углубленного анализа безопасности (ВАБ с учетом внутренних аварийных событий [6], а также экстремальных событий [10]) энергоблока АЭС с ВВЭР 1000/В-320 (5 бл. ЗАЭС) влияние работоспособности БРУ-А в «жестких» условиях на безопасность значимо при сейсмических воздействиях и разрывах паропроводов между ПГ и БЗОК в помещении А-820.

Исключение из рассмотрения влияния на работоспособность БРУ-А других «жестких» условий, вызванных внутренними исходными аварийными событиями и/или экстремальными событиями (пожары, затопления, падения объектов, ураганы и т.п.), осуществлялось на основе одного из следующих критериев:

отсутствие непосредственного влияния на работоспособность БРУ-А;

вероятность возникновения события ниже установленной в ОАБ оценки значимого влияния события на безопасность;

события (воздействия) возникают в процессе развития запроектных аварий или аварийных ситуаций, к которым не определена необходимость квалификации.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Для аварии с исходным событием разрыва (течи) паропровода в помещении А-820 (ИСА Т61-2) срабатывание клапанов аварийных БРУ-А не происходит, а возможный отказ БРУ-А на открытие или закрытие клапанов не является критичным по отношению к ликвидации последствий и управления аварией.

2. Критерии квалификации БРУ-А 1115, 960 ЗАЭС в «жестких» условиях разрыва (течи) паропровода в помещениях А-820 в полном объеме не выполняются, т.к. температура рабочей среды в помещениях А-820 достигает более 100 °С. Поэтому консервативно принимается необходимость мероприятий по замене/модернизации электроприводов БРУ-А, которые также по анализу опыта эксплуатации ЗАЭС являются наименее надежными элементами си-

стемы БРУ-А.

Оборудование ЗАЭС, в том числе и БРУ-А, было спроектировано для следующих условий сейсмического воздействия (п. 2.6.2 [8], таблица 1.5.1 [9]):

проектное землетрясение (ПЗ) – 5 баллов по шкале MSK;

максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) – 6 баллов по шкале MSK.

Тем не менее, существует ряд неопределенностей в оценках ПЗ и МРЗ, поэтому консервативно можно принять, что оборудование ЗАЭС (в том числе БРУ-А) квалифицировано на ПЗ интенсивностью 6 баллов и не квалифицировано на сейсмические воздействия выше 6 баллов.

Консервативно положим, что при воздействии землетрясения выше 6 баллов БРУ-А гарантированно откажет. В этом случае дополнительная вероятность отказа в процессе выполнения БРУ-А своих функций безопасности составит $\Delta P_{\text{БРУ-А}} = 1,1 \cdot 10^{-7}$.

Максимальное процентное увеличение вероятности отказа (оцененное для БС С-ТХN0S05-SDV-C-ABCD) составит 0,64 %. Максимально возможное приращение ЧПАЗ можно определить по суммарному приращению интервалов повышения риска БС БРУ-А

$$R_{\text{ПЗ}} = \frac{R_{\text{П}} \cdot \Delta P_{\text{БРУ-А}}}{1 - P_{\text{ООП}}},$$

где $R_{\text{П}} = 3,195 \cdot 10^{-2}$ – суммарный интервал повышения риска; $P_{\text{ООП}} = 1,723 \cdot 10^{-5}$ – значение вероятности отказа по общим причинам БРУ-А на изменение положения.

Тогда приращение ЧПАЗ по причине неквалифицированности БРУ-А для землетрясений выше 6 баллов составит $3,5 \cdot 10^{-9}$ 1/год, т.е. 0,007 % от базового значения ЧПАЗ.

Основные выводы

1. Выявлено, что необходимость установления квалификации БРУ-А в двухфазных режимах отсутствует, т.к. такие режимы могут возникнуть при запроектных авариях с межконтурными течами. Однако оргтехнические мероприятия по повышению работоспособности и надежности закрытия (после открытия) клапанов БРУ-А значимы для управления запроектными авариями.

2. Квалификация БРУ-А при сейсмических воздействиях свыше 6 баллов по шкале MSK имеет низкий приоритет значимости для безопасности.

3. Отказ БРУ-А аварийной линии паропроводов не является критичным для управления аварией при «запаривании» помещения А-820. Однако критерии квалификации БРУ-А по температуре окружающей среды электротехнической части не выполняются. Необходима модернизация или замена электроприводов БРУ-А 1115, 960.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Расчетное обоснование критериев успеха. Корректировка и обновление ВАБ энергоблока № 5 ЗАЭС // Приложение D.1 к Заключительному отчету по вероятностному анализу безопасности первого уровня для внутренних исходных событий энергоблока № 5 ОП ЗАЭС, EP25-2004.210.ОД.2. – К.: ООО "Энергориск", 2005.*
2. *Отчет по анализу безопасности: Хмельницкая АЭС, энергоблок № 2. Глава 19. Вероятностный анализ безопасности. Дополнительные теплогидравлические расчеты для ВАБ: 43-923.203.022.АВ.01.02. – ОАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Энергопроект», 2004. – 220 с.*
3. *Проект углубленного анализа безопасности энергоблока № 5 Запорожской АЭС. База данных по ядерной паропроизводящей установке. Приложение D к Заключительному отчету по вероятностному анализу безопасности первого уровня, 10044DL12R. – НАЭК "Энергоатом", Запорожская АЭС, 2000.*
4. *Теплогидравлические расчеты в поддержку анализа надежности персонала с использованием полномасштабного тренажера. Корректировка и обновление ВАБ энергоблока № 5 ЗАЭС // При-*

- ложение D.2 к Заключительному отчету по вероятностному анализу безопасности первого уровня для внутренних исходных событий энергоблока № 5 ОП ЗАЭС, EP24-2003.110.ОД.2. – К.: ООО "Энергориск", 2005.
5. *Safety issues and their ranking for WWER 1000 model 320 NPP* : IAEA-EBP-WWER-05. – Vienna: IAEA, 1996.
 6. *Анализ аварийных последовательностей (дерева событий). Корректировка и обновление ВАБ энергоблока № 5 ЗАЭС // Приложение Г к Заключительному отчету по вероятностному анализу безопасности первого уровня для внутренних исходных событий энергоблока № 5 ОП ЗАЭС, EP24-2004.310.ОД.2. – К.: ООО "Энергориск", 2005.*
 7. *Разработка оргтехмероприятий по управлению аварией: течь теплоносителя из 1-го контура по 2-й эквивалентным сечением Ду 100. Анализ возможных мест возникновения течи. Вариантные теплогидравлические расчеты по выбору стратегии управления аварией. Мероприятие 12411: Техотчет КИЭП (энергоблок № 5 ЗАЭС): 18-801.203.002.ОТ00. – ОАО КИЭП, 2009.*
 8. *Техническое обоснование безопасности. Блок № 5. Запорожская АЭС (Книга 4): 21.5.70.ОБ.05.03. – Министерство топлива и энергетики Украины, ГП НАЭК «Энергоатом», 1999.*
 9. *Дополнительные материалы по анализу безопасности. Блок № 5. Запорожская АЭС: 21.5.70.ОБ.01.01-07. – Министерство топлива и энергетики Украины, ГП НАЭК «Энергоатом», 2005.*
 10. *Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. Отчет по анализу безопасности. Вероятностный анализ безопасности. ВАБ для внешних экстремальных воздействий: Финальный отчет: 21.5.59.ОБ.04.03.–Министерство топлива и энергетики Украины, ГП НАЭК «Энергоатом».–90 с.*

ІМОВІРНІСНІ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА БЕЗПЕКУ КВАЛІФІКАЦІЇ ШРУ-А ВВЕР 1000/В-320 ПРИ ДВОФАЗОВИХ РЕЖИМАХ ТА В «ЖОРСТКИХ» УМОВАХ

Ю. О. Комаров, В. Ю. Кочнева, В. І. Скалозубов, О. В. Шавлаков, С. В. Шигін

На підставі відомих результатів імовірнісного аналізу безпеки енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР 1000/В-320 визначено ймовірнісні оцінки зміни загальних показників безпеки в результаті встановлення кваліфікації ШРУ-А Запорізької АЕС при витoku пароводяного середовища та в «жорстких» умовах експлуатації.

Ключові слова: швидкодіюча редуційна установка скидання пари до атмосфери (ШРУ-А), водо-водяний енергетичний реактор (ВВЕР), імовірнісний аналіз безпеки (ІАБ), позапроектна аварія, проектна аварія, міжконтурна течя, парогенератор (ПГ), кваліфікація, «жорсткі» умови, двофазовий режим, частота пошкодження активної зони (ЧПАЗ).

PROBABILISTIC ESTIMATIONS HOW QUALIFICATION OF FAST-ACTING REDUCING VALVES OF VVER 1000/B-320 AFFECTS SAFETY AT BIPHASIC MODES AND “SEVERE” CONDITIONS

Iu. O. Komarov, V. Yu. Kochnyeva, V. I. Skalozubov, O. V. Shavlakov, S. V. Shigin

Based on the known results of probabilistic safety analysis of NPP power units with the reactors VVER 1000/B-320 the article determines the probabilistic estimations of change of general safety factors as a result of assigning qualification for safety relief valves of Zaporizhzhya NPP at the outflow of water-steam medium and “severe” conditions of operation.

Keywords: safety relief valve, water-moderated reactor (VVER), probabilistic safety analysis (PSA), beyond design based accident, design based accident, intercontour leakage, steam generator, qualification, “severe” conditions, biphasic mode, core damage frequency (CDF).

Поступила в редакцию 28.09.09

**Сводная таблица для анализа поведения БРУ-А в авариях со средней течью из 1-го контура во 2-й
РУ ВВЭР-1000 (В-320)**

Код расчета	Закливание БРУ-А	БРУ-К в работе	Обесточивание	Время закрытия БЗОК, с	Время открытия БРУ-А по уставке, с		Время открытия БРУ-А на неаварийном ПГ на расхо- лаживание, с	Время перепол- нения ПГ, с		Расход в течь после 100 с ава- рии, не более, т	Общая длитель- ность расчета, с	Работа БРУ-А на воде	Открытие/ закрытие БРУ-А на воде
					на аварий- ном ПГ	на неава- рийном ПГ		аварийно- го	неаварий- ного				
ВАБ ЗАЭС-5 сценарий 20	Нет	Нет	Нет	55	2500	-	9270	-	-	250	10500	Нет	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 сценарий 21	Да	Нет	Нет	55	2500	-	-	4400	-	1000	15000	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 сценарий 22	Да	Нет	Нет	55	560	-	-	2200	-	1000	8000	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 сценарий 23	Да	Нет	Нет	55	570	-	900	1600	-	1000	14000	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 сценарий 23а	Да	Нет	Нет	55	570	-	1920	1600	-	1000	15000	Да	Нет
АПА ЗАЭС-5 п. 6.6.9	Да	Нет	Да	-	15	16	-	870	-	1657	3600	Да	Нет
ТОБ ОАБ ЗАЭС-5	Да	Нет	Да	-	8	10	900	105	-	1440	1124	Да	Нет
ВАБ ХАЭС-2 разд. 5	Да	Да	Нет	0	8	-	-	1130	-	1800	2450	Нет	Нет
ВАБ ХАЭС-2 разд. 6	Нет	Нет	Нет	1800	275 – 2960	1000 – 2960	1800	1000	-	360	50000	Да	Да
ВАБ ХАЭС-2 разд. 7	Нет	Да	Нет	3600	-	-	3600	-	-	864	10000	Нет	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D1.1	Да	Нет	Нет	-	24	22 – 1220	-	-	-	1000	17893	Нет	Нет

Продолжение таблицы

Код расчета	Закливание БРУ-А	БРУ-К в работе	Обесточивание	Время закрытия БЗОК, с	Время открытия БРУ-А по уставке, с		Время открытия БРУ-А на неаварийном ПГ на расхолаживание, с	Время переполнения ПГ, с		Расход в течь после 100 с аварии, не более, т	Общая длительность расчета, с	Работа БРУ-А на воде	Открытие/закрытие БРУ-А на воде
					на аварийном ПГ	на неаварийном ПГ		аварийного	неаварийного				
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D1.2	Да	Нет	Нет	-	24	22 – 176	-	-	-	1548	10140	Нет	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D1.3	Да	Нет	Нет	-	24	-	3000	-	-	1044	20000	Нет	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D1.5	Да	Нет	Нет	-	24	22 – 1020	-	-	-	1044	20000	Нет	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D1.6	Да	Нет	Нет	-	24	22 – 176	-	3000	-	900	20300	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D2.1	Нет	Да	Нет	1800	2360-5000	-	1800	2600	-	720	5000	Да	Да
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D3.1	Нет	Да	Нет	900	4150	-	-	-	-	720	8000	Нет	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D3.2	Нет	Да	Нет	900	1780 – 10900	-	-	2480	-	396	13600	Да	Да
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D4.1	Нет	Нет	Нет	30	32, 4844 – 11000	32 – 5250	10750	-	10700	900	12500	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D4.3	Да	Нет	Нет	30	32	33	-	1000	-	1548	17390	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D4.5	Да	Нет	Нет	30	34	34	1800	1050	4400	1548	10000	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D4.6	Да	Нет	Нет	1800	34	35	1800	50	-	540	90000	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 КУ-2005 D4.7	Да	Нет	Нет	20	30	32	14400	2500	-	1116	17350	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 АНП-2005 разд.7	Да	Нет	Нет	-	22	25 – 93	-	2400	-	1470	37200	Да	Нет

Код расчета	Заклинивание БРУ-А	БРУ-К в работе	Обесточивание	Время закрытия БЗОК, с	Время открытия БРУ-А по уставке, с		Время открытия БРУ-А на неаварийном ПГ на расхолаживание, с	Время переполнения ПГ, с		Расход в течь после 100 с аварии, не более, т	Общая длительность расчета, с	Работа БРУ-А на воде	Открытие/закрытие БРУ-А на воде
					на аварийном ПГ	на неаварийном ПГ		аварийного	неаварийного				
ВАБ ЗАЭС-5 АНП-2005 разд. 8	Да	Нет	Нет	-	22	25 – 93	-	1750	-	1470	16390	Да	Нет
ВАБ ЗАЭС-5 АНП-2005 разд. 9	Да	Нет	Нет	-	22	25 – 93	2700	3000	-	1470	42470	Да	Нет
МУТ-1 ЗАЭС-5 п. 3.2	Нет	Нет	Да	-	-	15	-	1300	-	1550	28052	Нет	Нет
МУТ-1 ЗАЭС-5 п. 3.6	Нет	Нет	Нет	909	-	-	609	600	1500	1080	8920	Да	Нет
МУТ-1 ЗАЭС-5 п. 3.7	Нет	Нет	Да	909	-	18	609	-	1100	1080	8153	Да	Нет
МУТ-1 ЗАЭС-5 п. 3.8	Нет	Нет	Да	-	-	16	609	1000	1000	1260	3243	Да	Нет
МУТ-2 ЗАЭС-5 п. 2.2	Нет	Нет	Нет	906	-	-	606	1125	-	27000	1500	Нет	Нет

Примечания:

1. Под работой БРУ-А на воде подразумевается истечение пароводяной смеси как через БРУ-А, открытое под воздействием пароводяной смеси, так и при уже открытом БРУ-А. Так, при постулировании заклинивания БРУ-А всегда наблюдается переполнение аварийного ПГ и, хотя давление в таком аварийном ПГ ниже уставок закрытия БРУ-А, через заклинивший БРУ-А будет происходить истечение пароводяной смеси.

2. Под открытием/закрытием БРУ-А на воде подразумевается ситуация с наложением: давления открытия в ПГ 72 кгс/см^2 (либо при открытом положении БРУ-А давления закрытия БРУ-А 68 кгс/см^2); переполнения соответствующего ПГ (уровень 4 м по уровню с базой 4 м).

3. Под временем закрытия быстродействующего запорно-отсечного клапана (БЗОК) подразумевается длительность от начала аварии до закрытия БЗОК аварийного ПГ.