

УДК 621.039

ЗЕНЮК Д.А.

ОАО Киевский Институт «Энергопроект»

## АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКОВ ХАЭС-2 И РАЭС-4

Наведено результати ймовірнісного аналізу безпеки першого рівня для нових українських енергоблоків ХАЭС-2 та РАЭС-4 та їх застосування для підвищення безпеки.

Представлены вероятностного анализа первого уровня для новых украинских энергоблоков ХАЭС-2 и РАЭС-4 и их применение для повышения безопасности.

Presented in this work are the results of probabilistic analysis of first level safety for new Ukrainian units KhNPP-2 and RNPP-4 and its application for safety increasing.

АЗ – аварийная защита,  
АПЭН – аварийный питательный электрический насос,  
АЭС – атомная электрическая станция,  
БЗОК – быстродействующий запорно-отсечной клапан,  
БРУ-А – быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в атмосферу,  
ВАБ – вероятностный анализ безопасности,  
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор,

ГО – гермообъем,  
ИСА – исходное событие аварии,  
МАГАТЭ – международное агентство по атомной энергии,  
ОАБ – отчет по анализу безопасности,  
ПГ – парогенератор,  
РАЭС – Ровенская АЭС,  
САОЗ ВД – система аварийного охлаждения зоны высокого давления,  
ХАЭС – Хмельницкая АЭС,  
ЧПАЗ – частота повреждения активной зоны.

### Введение

Реакторы типа ВВЭР мощностью 1000 МВт, эксплуатируемые на атомных электростанциях, являются наиболее мощными современными реакторами третьего поколения, охлаждаемыми водой под давлением. На сегодняшний день в эксплуатации в Украине находится 9 энергоблоков ВВЭР-1000/320.

Энергоблоки № 2 ХАЭС и № 4 РАЭС строятся по унифицированному проекту АЭС с реактором ВВЭР-1000/320. Проект достройки ХАЭС-2 и РАЭС-4 – первый проект, который реализуется на украинских АЭС с участием мирового сообщества.

### Цели и методы исследования

Одним из наиболее действенных и эффективных инструментов в оценке риска эксплуатации действующих и проектируемых энергоблоков АЭС является вероятностный анализ безопасности. ВАБ является составной частью отчетов по

анализу безопасности, которые должны быть выполнены для всех украинских АЭС.

В рамках лицензирования новых энергоблоков ХАЭС-2 и РАЭС-4 украинскими специалистами был выполнен ВАБ первого уровня. В результате был определен основной количественный показатель риска эксплуатации энергоблоков – суммарная частота повреждения активной зоны, величина которой для ХАЭС-2 составила  $4,21 \times 10^{-5}$  1/реакторо-год, а для РАЭС-4, соответственно  $3,19 \times 10^{-5}$  1/реакторо-год (рис. 1).

Согласно ОПБУ-2000 [1], п. 5.2.2 “Целевым показателем для действующих и строящихся блоков АЭС является вероятность тяжелого повреждения активной зоны ниже  $10^{-4}$  на реактор в год. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы оценочное значение вероятности не превышало  $10^{-5}$  на реактор в год”.

ЧПАЗ, рассчитанные в составе ОАБ для энер-

гоблоков АЭС Украины (рис. 1), хоть и соответствуют нормам, установленным в Украине [1] и не превышают рекомендованных МАГАТЭ значений ( $10^{-4}$  1/реакторо-год для действующих АЭС) [2], тем не менее:

- находятся в области, близкой к предельным значениям, установленным в ОПБУ (запас минимальный);
- учитывают только внутренние исходные события аварии (ИСА) при работе на номинальном

уровне мощности.

Необходимы целенаправленные усилия для снижения уровня риска путем реализации мероприятий по повышению безопасности.

Более подробные результаты ВАБ первого уровня для новых украинских энергоблоков ХАЭС-2 [3] и РАЭС-4 [4] представлены в табл. 1.

Для детального анализа исходные события представлены в пределах трех основных групп ИСА:

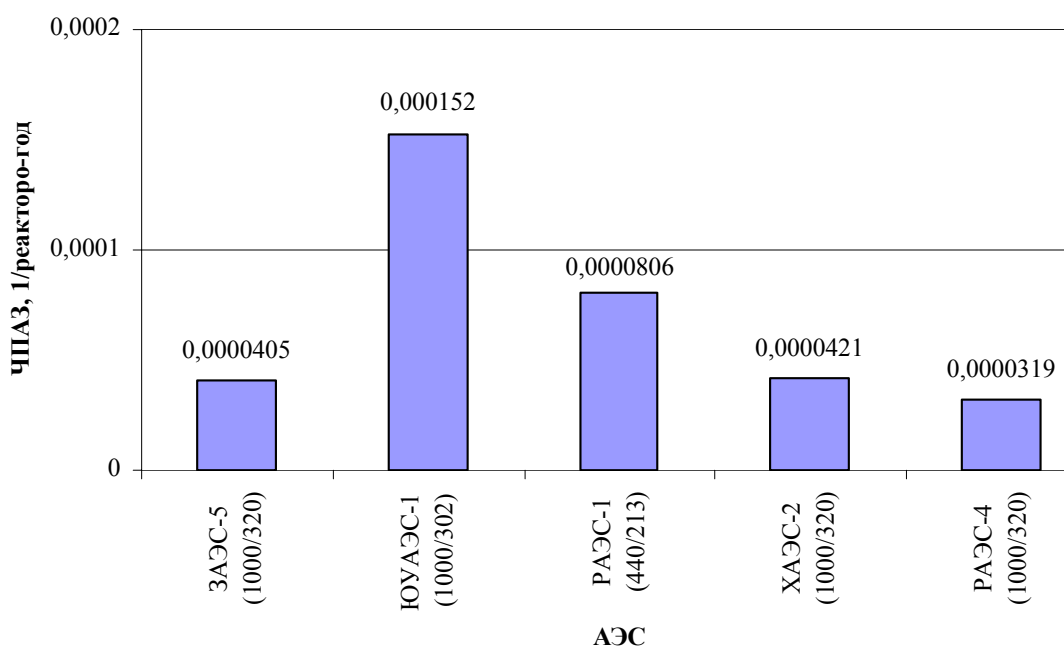


Рис. 1. Сравнение результатов ВАБ первого уровня для украинских АЭС.

Табл. 1. Частота повреждения активной зоны (вклад групп ИСА) для ХАЭС-2 и РАЭС-4

| Блоки  | Группы ИСА             | ЧПАЗ 1/год           | % от ЧПАЗ |
|--------|------------------------|----------------------|-----------|
| ХАЭС-2 | Течи 1-го контура      | $1,73 \cdot 10^{-5}$ | 41,21%    |
|        | Переходные процессы    | $6,11 \cdot 10^{-6}$ | 14,53%    |
|        | Специальные инициаторы | $1,86 \cdot 10^{-5}$ | 44,26%    |
|        | Суммарная ЧПАЗ         | $4,21 \cdot 10^{-5}$ |           |
| РАЭС-4 | Течи 1-го контура      | $1,47 \cdot 10^{-5}$ | 46,01 %   |
|        | Переходные процессы    | $2,55 \cdot 10^{-5}$ | 7,99 %    |
|        | Специальные инициаторы | $1,47 \cdot 10^{-5}$ | 46,00 %   |
|        | Суммарная ЧПАЗ         | $3,19 \cdot 10^{-5}$ |           |

- 1) течи 1-го контура;
- 2) переходные процессы;
- 3) специальные инициаторы.

1) Исходные события аварий с потерей теплоносителя (ЛОСА) включают неизолируемые течи главного циркуляционного контура и смежных трубопроводов в пределах гермооболочки (ГО), т.е. течи, возвращаемые в первый контур с помощью насосов САОЗ. К этой категории относятся течи и разрывы трубопроводов различного диаметра, ложные срабатывания с последующей неподачей предохранительных клапанов, течи через разъемы и уплотнения оборудования первого контура.

Частота повреждения активной зоны в результате возникновения течей 1-го контура:

- для ХАЭС-2 составляет  $1,73 \cdot 10^{-5}$  или 41,21 % от суммарной ЧПАЗ;
- для РАЭС-4 составляет  $1,47 \cdot 10^{-5}$  или 46,01 % от суммарной ЧПАЗ.

Наиболее значимыми с точки зрения риска в пределах группы аварий с потерей теплоносителя 1-го контура являются:

- для ХАЭС-2 - ИСА (S4) "Малые течи 1-го контура, компенсируемые системой продувки-подпитки" (29,47 % от ЧПАЗ);
- для РАЭС-4 - ИСА (S4) "Малые течи 1-го контура, компенсируемые системой продувки-подпитки" (31,09 % от ЧПАЗ).

2) К переходным процессам относятся ИСА, связанные с нарушениями нормальной эксплуатации энергоблока без потери теплоносителя, при которых необходим останов реактора по сигналу автоматики или оператором. В качестве характерных примеров переходных процессов можно привести нарушения расхода питательной воды, нарушения в работе турбины/конденсатора, нарушения в системе управления и защиты реактора.

Частота повреждения активной зоны в результате возникновения переходных процессов

- для ХАЭС-2 составляет  $6,11 \cdot 10^{-6}$  или 14,53 % от суммарной ЧПАЗ;
- для РАЭС-4 составляет  $2,55 \cdot 10^{-6}$  или 7,99 % от суммарной ЧПАЗ.

Наиболее значимыми с точки зрения риска в пределах группы переходных процессов являются:

- для ХАЭС-2 - ИСА (Т1) «Обесточивание всех секций 6 кВ нормального электроснабжения» (7,06 % от ЧПАЗ);
- для РАЭС-4 - ИСА (Т31) «Переходные процессы, приводящие к срабатыванию АЗ» (5,20 % от ЧПАЗ).

3) Специальными инициаторами являются события, приводящие (наряду с необходимостью останова реактора) к зависимому отказу (или неэффективной работе) одной или сразу нескольких систем, требуемых для приведения и поддержания энергоблока в безопасном состоянии. К специальным инициаторам относятся такие события, как отказ обеспечивающих систем, течи из первого во второй контур, разрывы паропроводов острого пара, а также разрыв корпуса реактора.

Частота повреждения активной зоны в результате возникновения специальных инициаторов:

- для ХАЭС-2 составляет  $1,86 \cdot 10^{-5}$  или 44,26 % от суммарной ЧПАЗ;
- для РАЭС-4 составляет  $1,47 \cdot 10^{-5}$  или 46,00 % от суммарной ЧПАЗ.

Наиболее значимыми с точки зрения риска в пределах группы специальных инициаторов являются:

- для ХАЭС-2 - ИСА (Т42) "Средняя течь из 1-го во 2-й контур" (12,36 % от ЧПАЗ);
- для РАЭС-4 - ИСА (Т42) "Средняя течь из 1-го во 2-й контур" (15,37 % от ЧПАЗ).

На основании рекомендаций МАГАТЭ и сводных мероприятий по повышению надежности и безопасности действующих и сооружаемых АЭС с реакторами ВВЭР (СМ-88, СМ-90) [5], КИ «Энергопроект» были разработаны 147 основных мероприятий по повышению безопасности и модернизации, которые отражены в программе модернизации энергоблоков АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000 (В-320) [6]. Эти мероприятия вошли в основу Комплексной программы по модернизации и повышению безопасности для всех украинских энергоблоков с ВВЭР-1000.

По результатам разработки ВАБ и анализа Комплексной программы модернизации и повышения безопасности, для энергоблоков ХАЭС-2 и РАЭС-4 был сформирован ряд комплексных мероприятий, направленных на повышение безопасности, которые представлены в табл. 2. Приоритет отдавался тем мероприятиям, которые не требуют существенных финансовых и технических затрат.

В рамках анализа предлагаемых мероприятий была выполнена их качественная и количественная (для большинства мероприятий) оценка индивидуального влияния предлагаемого мероприятия на:

- итоговую ЧПАЗ;
- ЧПАЗ по отношению к исходным событиям аварии;
- вклад аварийных последовательностей в ЧПАЗ.

Кроме того, был оценен суммарный эффект от совместной реализации этих мероприятий на повышение уровня безопасности энергоблоков № 2 ХАЭС и № 4 РАЭС (расчетные результаты влияния на ЧПАЗ тех мероприятий, которые поддаются количественной оценке на данном этапе). Результаты оценки показали, что совокупное внедрение предлагаемых мероприятий позволит снизить ЧПАЗ, т. е. увеличить уровень безопасности

Табл. 2. Перечень основных мероприятий по повышению безопасности энергоблоков № 2 ХАЭС и № 4 РАЭС

| Мероприятие |   |
|-------------|---|
| 1           | Обеспечение долговременной подпитки ПГ от системы вспомогательной питательной воды в аварийных режимах                                      |
| 2           | Обеспечение возможности изоляции БРУ-А  |
| 3           | Обеспечение долговременной подпитки ПГ от системы АПЭН в аварийных ситуациях (только для ХАЭС-2)  |
| 4           | Обеспечение автоматической подпитки бака ГА201  |
| 5           | Обеспечение автоматической изоляции ПГ по продувке и питательной воде в случае течи из 1-го во 2-й контур                                   |
| 6           | Возможность ввода в работу системы продувки-подпитки в случае локализации ГО  |
| 7           | Обеспечение возможности режима “feed and bleed” по 1-у контуру  |
| 8           | Изменение алгоритма работы САОЗ ВД для течей из 1-го во 2-й контур  |
| 9           | Обеспечение дублирования функции отвода остаточных тепловыделений при низких параметрах в РУ в случае отказа линии планового расхолаживания |
| 10          | Обеспечение автоматического ввода в работу системы ТВ10 в случае течи 1-го контура  |
| 11          | Автоматическое шунтирование блокировки на закрытие БЗОК при переводе БРУ-А в режим расхолаживания   |
| 12          | Оптимизация стратегий техобслуживаний и ремонтов  |
| 13          | Разработка оргтехмероприятий по управлению аварией: течь теплоносителя из 1-го контура во 2-й контур  |
| 14          | Обеспечение резервируемости электроснабжения арматуры линии планового расхолаживания  |

энергоблока № 2 ХАЭС и № 4 РАЭС как минимум на 54 % и 32 % соответственно.

### Результаты

Таким образом, количественная оценка влияния основных мероприятий по повышению безопасности демонстрирует существенное повышение безопасности, т. е. снижение частоты повреждения активной зоны в результате их внедрения.

На ХАЭС-2 и РАЭС-4 эти мероприятия будут реализованы в первую очередь, и безопасность этих блоков покажет будущую безопасность для атомной энергетики Украины. Реализация этой программы даст результаты повышения безопасности новых украинских блоков, а также уменьшения тарифа на страхование ответственности за возможный ядерный ущерб.

### Выводы

Анализ безопасности ХАЭС-2 и РАЭС-4 показывает, что частоты повреждения активной зоны находятся в области, близкой к предельным значениям, установленным в ОПБУ.

Внедрение предлагаемых мероприятий по повышению безопасности позволяют снизить ЧПАЗ, т. е. повысить уровень безопасности энергоблоков

№2 ХАЭС и №4 РАЭС как минимум на 54 % и 32 % соответственно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. НП 306.1.02./1.034-2000. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБУ-2000). Утверждены ГАЯР Украины, - 1999.
2. Основные принципы безопасности атомных станций. Серия безопасности № 75. INSAG-3, IAEA, Vienna,- 1988.
3. ОАО КИ «Энергопроект». Хмельницкая АЭС. Энергоблок №2. Отчет по анализу безопасности. Глава 19. Вероятностный анализ безопасности. 43-923.203.254.ОБ.19.03, - 2004.
4. ОАО КИ «Энергопроект». Ровенская АЭС. Энергоблок №4. Отчет по анализу безопасности. Глава 19. Вероятностный анализ безопасности. 38-223.203.003.ОБ.19.03, - 2004.
5. СМ-88, СМ-90 «Сводные мероприятия по повышению надежности и безопасности действующих и сооружаемых АЭС с реакторами ВВЭР».
6. Программа модернизации энергоблоков АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000 (В-320). Часть 1, 2. ОАО КИ «Энергопроект»,- 1996.

Получено 07.10.2004 г.

УДК. 504.4.054:621.311.25

Мороз Н.А.

Севастопольский Национальный университет ядерной энергии и промышленности

## АЛГОРИТМИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ МЕДИ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ РЕГИОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС

На основі схеми нодалізації систем охолодження ставу охолоджувача Запорізької АЕС розроблено алгоритм визначення концентрації міді у воді ставу. Встановлено, що порівняно високе значення концентрації міді у воді обумовлене виключно значеннями ви-

На основе схемы нодализации систем охлаждения пруда – охладителя Запорожской АЭС разработан алгоритм определения концентрации меди в воде пруда – охладителя. Выяснено, что сравнительно высокое установившееся значение концентрации меди в воде обусловлено только зна-

An algorithm of definition of the copper concentration in pond-cooler water on basis of nodalization scheme of pond-cooler cooling system in Zaporozhskaya NPP is developed. It is determined that high stabled values of copper concentration in water depends only on values of