

Д. В. Билей¹, Г. С. Драган², В. Г. Соловьев³, В. Ю. Кочнева¹

¹ *НАЭК “Энергоатом”*

² *Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова*

³ *Одесский государственный экологический университет*

Анализ применения риск-ориентированных подходов для оптимизации эксплуатационного контроля атомных электростанций

В работе проведен анализ организации эксплуатационного контроля на АЭС и, в частности, организации контроля концентрации борного раствора теплоносителя. Рассмотрено использование риск-ориентированных подходов для анализа эффективности системы контроля концентрации борного раствора на АЭС.

Эксплуатационный контроль оборудования и трубопроводов АЭС является важнейшим аспектом системы организационных и технических мер по сохранению эффективности физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ. Согласно [1] первый уровень такой системы включает “поддержание в исправном состоянии систем (элементов), важных для безопасности, путем своевременного определения дефектов ... и организации эффективно действующей системы документирования результатов работ и контроля”.

Практическая реализация эксплуатационного контроля на АЭС Украины претерпевает изменения, обусловленные развитием научных подходов к обоснованию целостности оборудования и трубопроводов, внедрением более совершенных средств и систем контроля, повышением требований к поддержанию необходимых запасов безопасности и уровня надежности, стремлением к снижению дозовых нагрузок на персонал при проведении регламентных работ и др.

Современные подходы к организации и проведению эксплуатационного контроля находят внедрение на АЭС Украины. Так, при поддержке Департамента энергетики США внедряется риск-ориентированный эксплуатационный контроль (RIISI) [2]. Опыт реализации RIISI на АЭС США (Vermont Yankee, Arkansas Nuclear One и Surry) показал, что такая методика проведения эксплуатационного контроля является экономически выгодной, технически обоснованной, эффективно объединяет опыт эксплуатации и программы контроля, учитывает процессы деградации металла, снижает дозовые нагрузки на персонал.

Под риск-ориентированными подходами понимаются методы количе-

ственной и качественной оценки риска в зависимости от различных факторов, влияющих на безопасность эксплуатации оборудования и энергоблоков. На основе этой зависимости можно проанализировать влияние изменений, вызванных различными причинами (модернизация, изменение количественного / качественного состава оборудования и т.п.), на показатели риска. В качестве показателей риска (функции риска / критерии риска) могут быть использованы различные параметры, выбор которых определяется в первую очередь решаемыми задачами. Так, в Вероятностном анализе безопасности (ВАБ), как одном из основных видов риск-ориентированных подходов, в качестве показателей риска используется, в основном, частота повреждения активной зоны (ЧПАЗ) или частота сверхплановых выбросов радиоактивных продуктов в окружающую среду (ЧСВ). В риск-ориентированном подходе эксплуатационного контроля состояния металла оборудования/трубопроводов RИISI в качестве целевой функции риска используются вероятностные показатели, отражающие вероятность разрушения элемента/системы и влияние этих элементов/систем на общую безопасность эксплуатации. Использование этих показателей позволяет определить различные области риска и соответствующим образом оптимизировать количество средств эксплуатационного контроля.

Планирование эксплуатационного контроля на АЭС Украины регламентировано требованиями НД [3], которые устанавливают разработку типовых (инструкций, регламентов) и рабочих программ контроля. Этим же документом определены требования к содержанию этих программ. Типовые программы контроля разрабатываются для каждого типа ЯЭУ (ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМК) и подлежат согласованию с регулирующим органом.

Сравнение содержания типовых программ эксплуатационного контроля АЭС Украины и США представлены в табл. 1. Приведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что структура типовых программ эксплуатационного контроля для АЭС Украины и США в основном совпадают. Различия и особенности программ состоят в следующем:

- типовые программы контроля для АЭС Украины разрабатываются для каждого типа ЯЭУ;
- для АЭС США с легководными реакторами типовая программа содержится в разделе XI Кодекса ASME [4];
- в типовых программах контроля для АЭС Украины ключевое положение занимает конкретный тип оборудования или трубопровода; в аналогичных документах США – категория контроля.

Одной из важных систем эксплуатационного контроля является система непрерывного и периодического контроля концентрации борного раствора теплоносителя.

В соответствии с п.4.4.6 ОПБ-88 [7] “должны быть предусмотрены указатели положения органов воздействия на реактивность, автоматический контроль концентрации растворимого поглотителя и указатели состояния других

средств воздействия на реактивность”. Необходимость контроля концентрации борного раствора также регламентируется ПБЯ РУ АС-89 [8] п.2.4.13, 2.4.15, где указывается, что “на РЩУ должны быть выведены сигналы о состоянии систем отдельных элементов систем РУ, как минимум, включая следующие: ... параметры состояния поглотителя (температура, давление, концентрация и т.п.)...”. “Должны быть предусмотрены технические средства контроля содержания протонов поглотителей нейтронов в жидком и газообразном поглотителе (в случаях их использования) в реакторной установке и в емкостях аварийного запаса поглотителя в процессе эксплуатации РУ”.

Таблица 1

Содержания типовых программ эксплуатационного контроля АЭС Украины и США

	Украина	США
Нормативный документ	ПН АЭ Г-7-008-89 [3]	Раздел XI Кодекса ASME [4]
	Требования к содержанию типовой программы контроля для каждого типа АЭУ	Требования к эксплуатационному контролю компонентов АЭС с легководными реакторами
Типовая программа контроля	Унифицированная инструкция по периодическому контролю состояния основного металла, сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных электростанций с ВВЭР-1000 (АИЭУ-9-94) [5]	Требования к эксплуатационному контролю, включая сведения об оборудовании, методах, объемах и периодичности контроля для компонентов легководных АЭС, содержащиеся в подразделах IWB, IWC, IWD [4]
Содержание	Классификация оборудования и трубопроводов по группам А, В и С	Классификация компонент по 1, 2 и 3 классу
	Указаны конкретные виды контролируемого оборудования и трубопроводов	Указаны компоненты АЭС, которые подлежат эксплуатационному контролю
	Определены зоны контроля	Определены зоны контроля
	Определены методы контроля	Определены методы контроля
	Определена периодичность	Определена периодичность
	Даны ссылки на НД по неразрушающим методам контроля и оценке результатов	В разделе XI Кодекса ASME [4] представлены методики контроля и нормы оценки качества. Для некоторых методик даны соответствующие ссылки
	Согласовывается с органом государственного регулирования ядерной и радиационной безопасности	Входит в состав Кодекса ASME, обязательного к использованию на АЭС США [6]

Приведенные нормативные требования указывают на важность и необходимость измерения концентрации борной кислоты в растворах. Действующий в настоящее время отраслевой нормативный документ ГНД 95.1.06.02.001–97 [9]¹ устанавливает требования к качеству теплоносителя первого контура, качеству воды и растворов вспомогательных систем первого контура, к объему химического контроля. Данный документ не распространяется на систему борного регулирования. Требования к этой системе представлены в ГОСТ 24693–81 [10]. Нормы концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура и растворах вспомогательных систем сведены в табл.2 [9]. В качестве примера в табл.2 приведены позиции НАР-Б, которые обеспечивают автоматический контроль концентрации H_3BO_3 на энергоблоках 1, 2 и 3 ЮУАЭС и периодичность проведения лабораторного химического контроля (ЛХК). Как видно из табл.2, на ЮУАЭС не для всех нормированных точек контроля предусмотрен автоматический контроль. Точки контроля, в которых НАР-Б не используется, контролируются с помощью периодического проботбора.

Несмотря на имеющиеся различия в системах, при контроле концентрации используются два способа: непрерывный, с помощью датчиков НАР-Б (анализатор раствора нейтронный базовый) и периодический, путем отбора проб с последующим анализом в химлаборатории. Причем, оба способа контроля концентрации применяются для одной и той же точки замера. Следует отметить, что наличие двух способов контроля обусловлено, прежде всего, условиями использования НАР-Б. В техническом описании и инструкции по эксплуатации НАР-Б [11] указывается, что анализатор предназначен для измерения концентрации борной кислоты в реакторной установке **с использованием систем проботбора** в трубопроводах и емкостях вспомогательных систем АЭС с ВВЭР.

Для РУ В-320 контроль концентрации с помощью НАР-Б производится в следующих системах:

1. Система аварийного охлаждения активной зоны реактора высокого давления с насосами аварийной подпитки 1-го контура и аварийного впрыска борного раствора.
2. Система аварийного охлаждения активной зоны реактора низкого давления.
3. Система гидроаккумуляторов.
4. Ядерный реактор (система внутрореакторного контроля).
5. Компенсатор давления.
6. Система подпитки и продувки первого контура.
7. Система спецводоочистки. Установка СВО-1.
8. Система подачи химреагентов.

¹ В настоящее время введен новый документ ГНД95.1.06.02.001-02.

Таблица 2

Нормы концентрации борных растворов

Теплоноситель первого контура и растворы вспомогательных систем	Норма, г/дм ³	Позиции измерительно го канала		Используемый диапазон, г/дм ³	Периодичность проведения ЛХК
		Блок №1	Блок №2		
Теплоноситель 1-го контура: При работе реактора на мощности При останове реактора для перегрузки и ремонта оборудования В период физического пуска и перед выходом реактора на мощность	От 0 до 10,0 Не менее 16,0 Не менее 16,0	49 50 78 49 50 78 49 50 78	49 50 78 49 50 78 49 50 78	0±20 0±20 0±20	1 раз/сутки 1 раз/смену 1 раз/смену
Подпиточная вода	От 0 до 40,0	АП-102 АА 201 АА 202 АА 203	АП-102 АА 201 АА 202 АА 203	0±20	1 раз/смену 1 раз/неделю и по распоряжению
Раствор в баках аварийного запаса бора	Не менее 16,0	АА 201 АА 202 АА 203	АА 201 АА 202 АА 203	0±20	
Раствор в баках концентрированного раствора борной кислоты	40,0-44,0	АА 207	АА 207 Т295В01 Т294В01	0±50	1 раз/неделю

¹ Датчики НАР-Б установлены на напоре насосов аварийного и планового расхолаживания ТQ12(22,32)D01. Установка датчика НАР-Б на бак приемка технологически невозможна. Концентрация Н₃ВО₃ непосредственно в баке аварийного запаса бора измеряется с помощью проботбора.

Окончание табл. 2

Теплоноситель первого контура и растворы вспомогательных систем	Норма, г/дм ³	Позиции измерительного канала	Используемый диапазон, г/дм ³			Периодичность проведения ЛХК
			Блок №1	Блок №2	Блок №3	
Раствор в гидроемкостях САОЗ	Не менее 16,0	I-158	I-158	УТ11Q01	0÷20	1 раз/неделю
		III-158	II-158	УТ12Q01		
		IV-158	III-158	УТ13Q01		
			IV-158	УТ14Q01		
Щелочной раствор борной кислоты (вводится в боросодержащую воду при работе спринклерной установки)	Не менее 150,0	Отсутствует ¹	Отсутствует ¹	Отсутствует ¹	-	1 раз/неделю
Борный раствор спринклерной установки	От 12,0 до 16,0	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	-	-
Раствор борной кислоты в бассейне выдержки	Не менее 16,0	Отсутствует ¹	Отсутствует ¹	Отсутствует ¹	-	1 раз/неделю

¹ По данным точкам контроля существует химический контроль с помощью периодического проботбора.

Предварительная оценка позволяет предположить, что по некоторым позициям замеров можно отказаться от непрерывного контроля, сохранив периодический, возможно изменив его частоту. Такие изменения системы контроля борных растворов могут являться допустимыми при условии, что надежность контроля не будет снижена. Обоснование таких изменений в системе контроля требует разработки критериев надежности контроля и проведения анализа по каждой из позиций замера концентрации борного раствора. Это позволит определить оптимальное количество НАР-Б для конкретного энергоблока с учетом особенностей системы контроля концентрации борных растворов.

Решением Коллегии Госатомрегулирования Украины №9 от 13.11.01г. применение риск-ориентированных подходов при регулировании безопасности ЯЭУ (также и в части эксплуатационного контроля) является приоритетным направлением. Однако до последнего времени методологическое обеспечение риск-ориентированных подходов оптимизации эксплуатационного контроля развивалось, в основном, за рубежом. Наибольшее развитие получили методики риск-ориентированного эксплуатационного контроля Westinghouse и EPRI (RIISI – Risk-Informed Inservice Inspection).

Оценка риска в ходе RIISI [12] позволяет определить влияние разрушения трубопроводов на частоту повреждения активной зоны реактора (ЧПАЗР) и частоту сверхнормативного выброса активности из контейнмента (ЧСВАК). При этом, величины этих параметров риска вычисляют путем объединения результатов оценок последствий отказа и структурной надежности и риска отказа трубопровода. Расчеты выполняют для каждого сегмента с использованием соответствующих математических выражений, определенных в тематическом отчете WCAP-14572 [13]. Результаты расчетов оформляют в виде электронных таблиц, в которых приводят данные как с учетом вмешательством оператора, так и без него, при прохождении события, связанного с отказом трубопровода.

На основании полученных количественных оценок сегменты трубопроводов классифицируют по влиянию отказа на безопасность АЭС. При этом в качестве критерия используют величину “стоимость снижения риска” (ССР). Чем выше значение ССР для данного сегмента, тем выше влияние его отказа на безопасность [13].

Рассмотренные риск-ориентированные подходы могут быть использованы в основе и для анализа эффективности системы контроля концентрации борного раствора на энергоблоках АЭС. Однако все этапы процесса RIISI, методически проработанные для анализа системы эксплуатационного контроля трубопроводов АЭС должны быть пересмотрены с учетом специфики системы контроля концентрации борного раствора. При этом основные этапы процесса сохраняются и требуют решения следующих задач:

– определение объема и позиций контроля концентрации борного раствора в системах безопасности АЭС;

- оценка вероятности отказа системы безопасности, приводящей к изменению концентрации борного раствора в точке замера;
- оценка надежности системы контроля с учетом используемых способов контроля;
- оценка риска невыполнения системой контроля назначенных функций;
- категоризация позиций контроля и выбор оптимальных способов контроля.

В результате такой оптимизации системы контроля с учетом возможных рисков следует ожидать повышения надежности системы, что достигается за счет пересмотра объемов и способов контроля при повышенном внимании к позициям контроля с высокой оценкой риска. При этом возможно снижение дозовых нагрузок на обслуживающий персонал.

Литература

1. НП 306.1.02/1.034-2000. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
2. Стив Госслин, Брайан Гор. Оптимизация порядка проведения контроля трубопроводов и оборудования на основании оценки риска: Материалы совещания в ИПЭ АЭС. — Киев, 1999.
3. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
4. Rules for inservice inspection of nuclear power plant components. Code ASME, section XI. — New York, 1998.
5. АИЭУ-9-94. Унифицированная инструкция по периодическому контролю за состоянием основного металла, сварных соединений и наплавов оборудования и трубопроводов атомных электростанций с ВВЭР-1000.
6. 10 CFR 50. Code of Federal Regulation, U.S. Office of the Federal Register, 1989.
7. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88). ПНАЭ Г-1-011-89 / Госатомэнергонадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 48 с.
8. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89). ПНАЭ Г-1-024-90/ Госпроматомнадзор СССР. — 1990.
9. ГНД 95.1.06.02.001-97. Отраслевой нормативный документ. Теплоноситель первого контура концентрации ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000. Технические требования к качеству. Способы обеспечения/ Госкоматом Украины. — К., 1997. — 25 с.
10. ГОСТ 24693-81. Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе борного регулирования. — Введ. 01.07.82. Ограничение срока действия снято. — М.: Изд-во стандартов, 1981.
11. Анализатор раствора нейтронный — базовый НАР-Б. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. еИ1.560.040. — 1990. — 125 с.

12. N.V.Closky. Risk-Informed Inservice Inspection (Westinghouse RI-ISI) // Доклад в SCIENTECH на семінаре для спеціалістів ГНТЦ ЯРБ и ДЯР України. — США, Gaithersburg, 2 марта 2001.
13. Westinghouse Owners Group Application of Risk-Informed Methods to Piping Inservice Inspection Topical Report WCAP-14572. Revision 1-NP-A. — Dec. 1998.

Д. В. Білей, Г. С. Драган, В. Г. Соловійов, В. Ю. Кочньєва

Аналіз застосування ризик-орієнтованих підходів для оптимізації експлуатаційного контролю атомних електростанцій

АНОТАЦІЯ

У роботі проведений аналіз організації експлуатаційного контролю на АЕС і, зокрема, організації контролю концентрації борного розчину теплоносія. Розглянуте використання ризик-орієнтованих підходів для аналізу ефективності системи контролю концентрації борного розчину на АЕС.

Biley D. V., Dragan G. S., Solovyov V. G., Kochnyeva V. Yu.

Analysis of application of risk-informed approaches for optimisation of inservice inspection at npp

SUMMARY

There is an analysis of an organisation of inservice inspection at NPPs and an organisation of boric solution concentration inspection in coolant. This paper considers an application of risk-informed approaches for an analysis of efficiency of boric solution concentration inspection system at NPPs.