

УДК 621.039.58

Ю.А. Мухряков², А.В. Дунцев¹, В.В. Андреев¹, Ю.В. Кучеров², В.Н. Хохлов¹**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НА ЧАСТОТУ ПОВРЕЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ
ОТ ВНЕДРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК
И ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ НА АЭС**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Акционерное общество Инжиниринговая компания «АСЭ», Нижний Новгород²

Посвящена исследованию влияния мероприятий, нацеленных на уменьшение последствий запроектных аварий на частоту повреждения топлива в активной зоне реактора на атомных электрических станциях. В качестве мероприятий рассматривались: обеспечение аварийного электроснабжения (при помощи передвижных дизельных генераторов) и меры против потери систем конечного поглотителя тепла (при помощи мобильных насосных установок). Инструментом исследования был выбран вероятностный анализ безопасности, выполненный с помощью программного обеспечения Risk Spectrum PSA. При разработке логико-вероятностной модели энергоблока в качестве основы использовались логические элементы – деревья отказов систем безопасности (систем отвечающих за приведение энергоблока в безопасное состояние).

Также был определен перечень иницирующих событий и проведено моделирование аварийных последовательностей. Выполнена качественная и количественная оценка уровня безопасности энергоблока с учетом систем и мероприятий, направленных на снижение последствий запроектных аварий. Проведен анализ результатов, сделаны выводы о том, что внедрение предлагаемых мероприятий даст возможность уменьшить вероятность повреждения активной зоны, выявлены элементы, отказ которых вносит наибольший вклад в определенную вероятность, а также найдены «слабые», с точки зрения безопасности, места.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности, атомная электростанция, мобильная насосная установка, конечный поглотитель тепла, активная зона.

11 марта 2011 года на японской атомной электростанции «Фукусима-Дайичи» произошла авария, возникшая в результате разрушительного землетрясения. Эта авария заставила человечество повторно убедиться, насколько сильными и опасными могут быть последствия аварии на АЭС и в тоже время подорвала доверие к атомной энергетике. Разрушительные последствия цунами и землетрясений были усугублены радиационным загрязнением, вызванным ядерной аварией, исходы которой устранять придется еще долгие годы и с огромными затратами средств. Также нанесен большой ущерб окружающей среде. В связи с недопущением подобных инцидентов, государства, использующие атомные электростанции, инвестируют финансовые и другие ресурсы в повышение безопасности и надежности как действующих, так и сооружаемых атомных электростанций. На АЭС, эксплуатируемых в России, проводились так называемые стресс-тесты, по результатам которых были предложены специальные мероприятия, целью которых является недопущение подобных аварий.

В данной работе как запроектные рассматривались следующие аварии, причинами которых являлись внешние факторы:

- полная потеря электроснабжения энергоблока, включая внешние и внутренние генерирующие мощности;
- утрата поглотителя тепла, отводящего остаточные тепловыделения от топлива в активной зоне (АЗ), бассейне выдержки (БВ) и мест хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) (система технической воды ответственных потребителей).

Для повышения безопасности энергоблока АЭС при возникновении иницирующих событий (ИС), рассмотренных ранее, реализовывались следующие мероприятия:

- запитка потребителей, принимающих участие в управлении запроектными авариями от передвижной дизель-генераторной установки (ПДГУ);
- использование передвижной насосной установки (ПНУ) для подачи воды в парогенератор (ПГ);

- использование ПНУ для подачи воды в бассейн выдержки (БВ);
- отвод тепла, посредством подачи воды от ПНУ, от потребителей реакторного отделения (РО), принимающих участие в обеспечении безопасности энергоблока.

Возникает вопрос: как оценить уровень безопасности, как определить соответствует ли уровень безопасности того или иного проекта действующим нормам, а также выявить вклад в повышение безопасности того или иного технического решения. Кроме того, неплохо было бы иметь возможность определить слабые, с точки зрения безопасности, места в проекте и предусмотреть организационные и технические мероприятия по их «усилению», а также выяснить, насколько сбалансированы проектные решения. Основным инструментом, с помощью которого можно получить ответы на поставленные вопросы, является вероятностный анализ безопасности (ВАБ).

ВАБ преследует следующие цели [1, 2]:

- определение уровня безопасности. Определение частоты повреждения активной зоны, по величине которой определяется уровень безопасности;
- оценка сбалансированности проектных решений.

Моделирование аварийных последовательностей (АП) или моделирование путей протекания аварий выполняется для определения полных множеств конечных состояний без повреждения или с повреждением ядерного топлива для каждой группы инициирующих событий (ИС), входящих в перечни групп ИС.

В качестве методологической основы для моделирования АП используется метод деревьев событий. Дерево событий – это логическая диаграмма, определяющая возможные пути протекания аварийных сценариев, а также показывающая возможные конечные состояния энергоблока без повреждения и с повреждением ядерного топлива. Графически дерево событий изображается в виде таблицы состояний и собственно логической диаграммы АП в форме разомкнутого бинарного графа или дерева. Пример дерева событий приведен на рис. 1.

Иницирующее событие	Функциональное событие1	Функциональное событие 2	Функциональное событие 3	Функциональное событие4	No.	Freq.	Conseq.	Code
IE	FUNC_EV_1	FUNC_EV_2	FUNC_EV_3	FUNC_EV_4	1		OK	
					2		CD1	FUNC_EV_3
					3		OK	FUNC_EV_2
					4		CD1	FUNC_EV_2-FUNC_EV_4
					5		OK	FUNC_EV_1
					6		CD1	FUNC_EV_1-FUNC_EV_3

Рис. 1. Пример дерева событий

Интенсивность реализации i -й ветви для заданного инициирующего события определяется следующим образом:

$$P_{Ci} = I_i \cdot Q_i$$

где I_i – интенсивность i -го инициирующего события; Q_i – вероятность реализации определенных состояний систем, образующих i -ю ветвь дерева событий.

Для проведения количественных расчетов сформированы базы данных со значениями частот инициирующих событий, показателями надежности оборудования и элементов по параметрам моделей отказов общего вида. База данных по значениям частот ИС формировалась с использованием следующих источников:

- данные по частотам ИС, полученные из опыта эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000;
- показатели надежности арматуры из нормативно-технической документации [3];
- результаты расчетов частот течей из первого контура на основе вероятностно-прочностных моделей;

- результатов оценок частот с применением моделей надежности систем.

Основные задачи анализа надежности систем состоят в разработке моделей надежности систем с применением метода деревьев отказов [4]. Дерево отказов – это логический граф, который позволяет определить возникновение основного или вершинного события, которое заключается в отказе системы осуществить предназначенную функцию по причине комбинаций первичных (базисных) событий, которые моделируют отказы отдельных элементов системы.

Дерево отказов – это графическое построение, с помощью которого моделируются отказы исполнительных (защитных и локализирующих), управляющих и обеспечивающих систем. В качестве базисных событий деревьев отказов рассматриваются отказы оборудования этих систем, а также ошибки персонала. Связь событий в дереве отказов осуществляется с помощью логических операторов «и», «или» и др. Пример дерева отказов приведен на рис. 2.

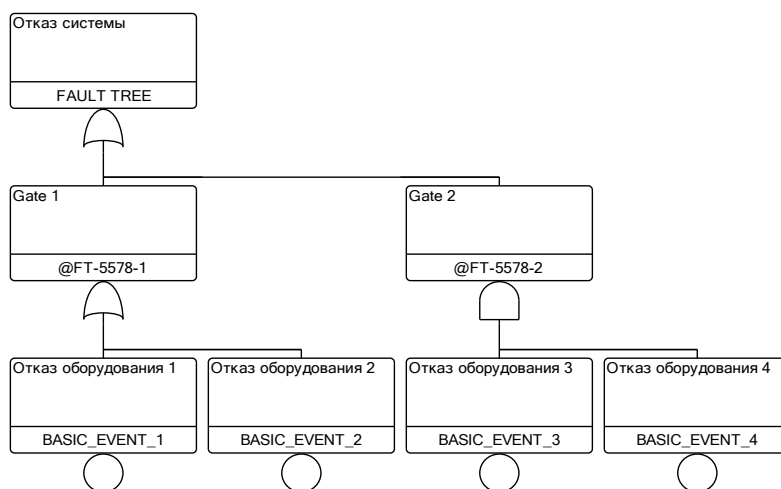


Рис. 2. Пример дерева отказов

Разработка интегральной вероятностной модели включает следующие этапы:

- объединение вероятностно-логических моделей АП и систем (деревьев событий и деревьев отказов) с учетом взаимосвязей;
- разработка функциональных деревьев отказов и других частей логики для адекватного отражения всех необходимых взаимосвязей и зависимостей;
- включение всех вероятностных показателей, определенных в рамках задач анализа данных, определения частот ИС, анализа ошибок персонала;
- предварительные расчеты для выявления зависимых ошибок персонала и учет зависимостей ошибок персонала в модели для окончательного расчета.

В представленной работе для проведения исследования был выбран энергоблок АЭС с РУ-320 (Ростовская АЭС- 2).

Для проведения исследования, выполняемого в рамках данной работы, была разработана логико-вероятностная модель с помощью программного кода Risk Spectrum PSA, не учитывающая введение мероприятий, направленных на снижение последствий запроектной аварии. После этого разрабатывались новые деревья отказов, моделирующие отказы систем, которые предусмотрены внедрением рассмотренных мероприятий, вносились изменения в деревья событий. Новые деревья отказов и измененные деревья событий интегрировались в базовую логико-вероятностную электронную модель энергоблока. Графический интерфейс программного кода Risk Spectrum PSA запрограммирован в MS C#, все алгоритмы, используемые для численного анализа, запрограммированы в MS C++. Основные математические методы включают теорию множеств, Булеву алгебру и теорию вероятности.

Полученные в результате настоящего исследования данные позволяют оценить влия-

ние мероприятий по снижению последствий ЗПА на уменьшение вероятности повреждения топлива в АЗ и БВ.

ИС с полной потерей электроснабжения энергоблока, включая внешние и внутренние генерирующие мощности

Целью внедрения предлагаемых мероприятий является возможность питания потребителей, участвующих в приведении энергоблока в безопасное состояние, от ПДГУ.[5]

От передвижного дизель-генератора предусмотрено электроснабжение насосов химически обессоленной воды, насосов системы аварийного охлаждения активной зоны низкого давления (САОЗ НД), насосов системы аварийного ввода бора в первый контур, которое выполняется следующим образом: от распределительного шкафа ПДГУ питание подается на распределительные коробки, монтируемые со стороны улицы на стене реакторного отделения (РО), из коробки отдельными кабельными трассами питание подается к потребителям.

В состав ПДГУ входят силовые кабели и разъемы для присоединения к сети АЭС соответствующего напряжения для электроснабжения оборудования (систем важных для безопасности) СВБ при ЗПА с учетом подключения потребителей на разных каналах систем безопасности (СБ). Кабельные трассы от распределительных коробок до потребителей проложены, согласно *базовому* проекту, и готовы, в случае возникновения аварийной ситуации, к отключению. Для аппарата бесперебойного питания информационно-вычислительной системы (АБП ИВС), АБП СБ, электродвигателей насосов дренажной системы машзала и насоса химически обессоленной воды предусмотрено электроснабжение от передвижного дизель-генератора, которое осуществляется следующим образом: от распределительного шкафа передвижного дизель-генератора напряжение подается на распределительные коробки, монтируемые на наружной стене РО. Кабели от шкафов ПДГУ до распределительных коробок по наружной стене РО поставляются комплектно с передвижными дизель-генераторами. При выполнении анализа надежности было разработано дерево отказов (ДО), включающее отказ передвижного дизель-генератора и возможные ошибки персонала по включению ПДГУ в работу.

Реконструкция системы подачи воды в ПГ от ПНУ

Рассматриваемая реконструкция представляет собой внедрение дополнительных технологических и конструктивных элементов, обеспечивающих возможность подачи химически обессоленной воды из баков аварийного запаса химически обессоленной воды и баков дистиллята в любой из парогенераторов с помощью автономного источника – передвижного насосного устройства.

Для реализации данного мероприятия предусмотрена разработка схемного решения по прокладке трубопроводов и гибких шлангов, соединяющих оборудование в следующей последовательности: баки – ПНУ – штатный трубопровод подачи аварийной питательной воды в ПГ. При выполнении анализа надежности построены деревья отказов, моделирующие отказы передвижного насосного устройства, запорной арматуры, открытие/закрытие которой требуется для успешной реализации требуемых функций.

Реконструкция системы подачи воды в БВ от ПНУ

Рассматриваемая реконструкция представляет собой внедрение дополнительных технологических и конструктивных элементов, обеспечивающих возможность подачи раствора борной кислоты из баков очищенного борного концентрата и борного раствора из бака-приямка в бассейн выдержки при помощи мотопомпы.

Для реализации данного мероприятия предусмотрена разработка схемного решения по организации подачи раствора борной кислоты от баков запаса раствора борной кислоты в БВ, а также в напорный трубопровод спринклерной системы, способной осуществлять подпитку бассейна выдержки по штатной схеме. На всех вновь монтируемых трубопроводах

предусмотрена установка запирающей арматуры с ручным приводом, что позволяет производить сборку схемы в условиях обесточивания.

При выполнении анализа надежности построены дерево отказов, моделирующее отказы передвижного насосного устройства, запорной арматуры, открытие/закрытие которой требуется для успешной реализации требуемых функций.

Реконструкция системы подачи охлаждающей воды мотопомпой к потребителям РО

Рассматриваемая реконструкция представляет собой внедрение дополнительных мероприятий, обеспечивающих возможность подачи воды из каналов водоема-охладителя в напорные трубопроводы каналов системы технической воды ответственных потребителей посредством мотопомпы. Для этого реализованы следующие мероприятия: в колодцах рядом с РО осуществлено соединение трубопровода с трубопроводами каждого канала системы охлаждения ответственных потребителей. Конец трубопровода оборудован специальным устройством, обеспечивающим быстрое подключение к трубопроводу от напорного трубопровода мотопомпы. При выполнении анализа надежности построены деревья отказов, моделирующие отказы передвижного насосного устройства и запорной арматуры, открытие/закрытие которой требуется для успешной реализации требуемых функций.

Количественный анализ разработанной логико-вероятностной расчетной модели, анализ результатов

В результате анализа доминирующих аварийных последствий с учетом мероприятий, направленных на снижение последствий запроектных аварий в базовом вероятностном анализе безопасности, установлено, что значительный вклад в частоту повреждений активной зоны (ЧПАЗ) в обоих ВАБ вносят аварийные последовательности с отказом САОЗ НД в ИС «Малая течь из первого во второй контур DN ≤13», АП с отказом системы аварийного расхолаживания в режиме расхолаживания совместно с отказом режима «сброс-подпитка» в ИС «Большая течь паропровода в неизолируемой от ПГ части вне ГО» (рис. 3).

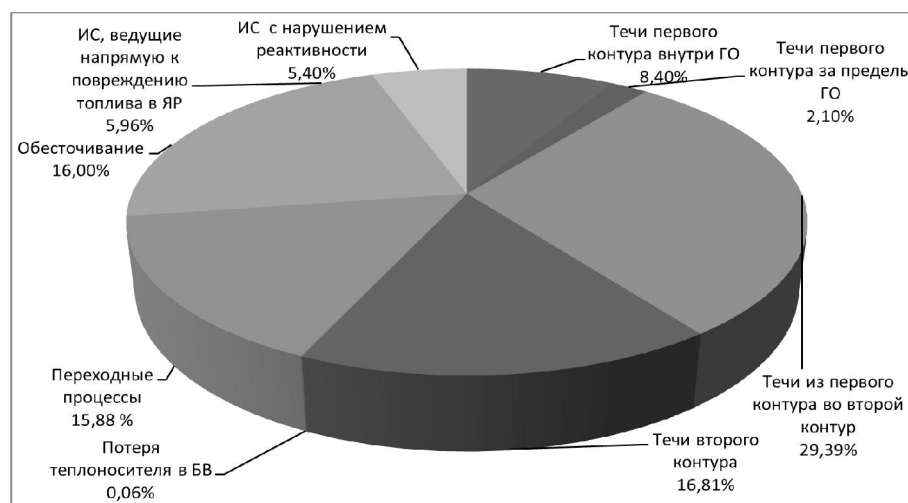


Рис. 3. Распределение вкладов групп исходных событий в ЧПАЗ в ЯР и топлива в БВ при работе энергоблока на мощности и в стояночных режимах

В результате проведенных расчетов было определено, что значение общей частоты разрушения активной зоны в ядерном реакторе и топлива в бассейне выдержки для рассматриваемых иницирующих событий при работе на энергетических уровнях мощности и в стояночных режимах составляет $1,61 \cdot 10^{-5}$ на реактор в год. В том числе, значение частоты повреждения топлива (ЧПТ) в ядерном реакторе составило $1,57 \cdot 10^{-5}$ на реактор в год, значе-

ние ЧПТ в БВ – $3,85 \cdot 10^{-7}$. То есть показано, что благодаря внедрению мероприятий, направленных на уменьшение последствий запроектных аварий, ЧПАЗ и топлива в БВ для энергоблока №2 Ростовской АЭС для рассматриваемых ИС уменьшилась на 39,5%, что подтверждает правильность предложенных мероприятий и повышает живучесть энергоблоков. Кроме того, предложенная концепция позволяет использовать другие мобильные циркуляторы, например, пожарные или поливочные машины.

Библиографический список

1. НП-095-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомной станции» // Утвержден приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12.08.2015 г. №311. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420296469/>.
2. РБ-024-11. Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних иницирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции // [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200113881/>
3. ГОСТ 31901-2013. Арматура трубопроводная для атомных станций. Общие технические условия // [Электронный ресурс]. – URL: http://standartgost.ru/g/ГОСТ_31901-2013/
4. РБ-100-15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций». // [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200117032/>
5. Исследование влияния мероприятий по снижению последствий запроектных аварий на частоту повреждения АЗ на примере энергоблока №3 Калининской АЭС // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. тр. 10-й Международной научно-технической конференции. – Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 2017. [Электронный ресурс]. – URL: <http://gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/autorun/article35-ru.html> .

*Дата поступления
в редакцию 05.04.2018*

Y.A Mukhryakov², A.V.Duncev¹, V.V. Andreev¹, Y.V. Kucherov², V.N.Khokhlov¹

THE ANALYSIS OF INFLUENCE ON THE FREQUENCY OF DAMAGE OF THE ACTIVE ZONE FROM IMPLEMENTATION OF MOBILE PUMPING INSTALLATIONS AND DIESEL GENERATORS ON THE NPP

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Joint-stock company ASE Engineering Company²

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: This article is devoted to research the actions directed to decrease beyond design basis accidents effects influence the frequency of damage of the NPP core.

Methodology: The probabilistic analysis of safety made in the Risk Spectrum PSA program code was chosen for the research. Logical fault trees were used in development of the logic-probability model of the unit. Also the list of the initiating events was defined and modeling of sequences of accident was made. Quantification of a logic-probability model was carried out taking into account systems and actions directed to decrease beyond design basis accidents effects.

Results: The analysis of the received results was made; the conclusion about appearance of the opportunity to reduce probability of core damage by implementation of suggested actions was made; elements failure of which would contribute the most into received probability were defined; also "weak" places from the safety point of view were revealed.

Key words: probabilistic safety assessment, nuclear power plant, mobile pumping installation, ultimate heat, active zone.