

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР  
ДЛЯ АВАРИИ С БОЛЬШОЙ ТЕЧЬЮ ПЕРВОГО КОНТУРА**

*науч. сопр. Э. А. МИХАЛЫЧЕВА*

*(Объединенный институт энергетических  
и ядерных исследований – Сосны, Минск)*

*В рамках оценки безопасности АЭС с реактором ВВЭР выполнен вероятностный анализ аварийного сценария с большой течью первого контура. Разработаны логико-вероятностные модели для исходного события аварии, выявлены критические пути развития аварий, определены основные вкладчики в снижение безопасности блока АЭС.*

***Ключевые слова:** атомная электростанция, вероятностный анализ, аварийные сценарии, системы безопасности.*

Развитие атомной энергетики предъявляет современные требования к основным принципам обеспечения безопасности в энергетике и предусматривают необходимость проведения качественного и количественного анализа иницирующих событий аварий с оценкой уровня безопасности АЭС. По результатам таких анализов разрабатываются и совершенствуются конструктивно-технологические, организационно-технические и эксплуатационные мероприятия, направленные на повышение безопасности АЭС. Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) является аналитическим методом оценки рисков отдельных энергоблоков АЭС, включающий в себя анализ различных аспектов проектирования и эксплуатации объекта. Методология ВАБ позволяет оценивать риски возможных аварий, произошедших вследствие внутренних иницирующих событий, вызванных отказами систем или ошибками персонала АЭС, а также внешних воздействий [1, 2].

Основной задачей ВАБ для оценки аварий является разработка вероятностных моделей, включающих аварийные последовательности (деревья событий) для каждого исходного события аварии (ИС). Во внимание принимаются эксплуатационные состояния (ЭС) энергоблока, характеристики ИС, конфигурация систем безопасности, возможность выполнения ими функций безопасности. Под «безопасным состоянием» понимается устойчивое состояние реакторной установки с подкритическим состоянием ядерного топлива и непревышением установленных критериев безопасности [2, 3]. Вероятностный анализ сценариев больших течей первого контура АЭС с реактором ВВЭР выполнен с использованием программного кода RiskSpectrum PSA.

Большие течи первого контура в реакторах типа ВВЭР возникают вследствие разрывов «холодных» или «горячих» ниток главного циркуляционного тракта или трубопроводов систем, связанных с первым контуром. В результате возникновения течи происходит резкое снижение давления и количества теплоносителя в первом контуре, а также уровня в компенсаторе давления (КД), с потенциальным риском оголения и повреждения активной зоны. В зависимости от сценария протекания аварии, конфигурации систем, требуемых для выполнения функций безопасности при данном ИС (системы подпитки первого контура, системы отвода тепла), большие течи первого контура делятся на несколько диапазонов с эквивалентными диаметрами в диапазоне  $D_v 140-850$  мм. При данных течах могут возникать зависимые отказы систем – могут быть недоступны отдельные каналы систем подпитки теплоносителем первого контура [4].

Большие течи первого контура имеют небольшую частоту возникновения, например для реакторной установки с ВВЭР в зависимости от диаметра течи частота составляет от  $1,54E-05$  до  $1,02E-07$ , однако последствия развития такого аварийного процесса могут вызвать тяжелую аварию с повреждением ядерного топлива в реакторе и требуют тщательного исследования для определения критических путей протекания аварии и определения основных вкладчиков в вероятность ее возникновения.

Для вероятного анализа больших течей первого контура АЭС разработаны логико-вероятностные модели протекания аварийных процессов. Для различных эксплуатационных состояний энергоблока (работа на мощности, режимы останова) разработаны отдельные деревья событий (аварийные последовательности – АП). Под «успешными окончаниями АП» подразумевается выполнение функций безопасности системами безопасности, под «неуспешными окончаниями» – переход проектной аварии в стадию тяжелой аварии.

Логическая диаграмма дерева событий для исходного события большой течи первого контура эквивалентным диаметром  $D_v 140-346$  мм (ИС LL1) представлена на рисунке 1. Дерево событий для ИС LL1 в режимах останова энергоблока представлено на рисунке 2.

Большая течь с $D_v 140-279$ мм >LL1(14)				Снижение давления под ЗО системами JMN (1/4) & JMP (2/4) CA_AP				Поврежденная часть 1 контура (1-4 - петли, 5-труба к КД, 6-9 трубы к ГЕ) 00_DP_LL1				САОЗ НД (1/4) BA_L				No	Freq	Conseq	Code
																1	1,82E-07	OK	
																2	8,65E-12	3LLCD	BA_L
																3	1,82E-07	OK	00_DP_LL1
																4	6,11E-12	3LLCD	00_DP_LL1-BA_L
																5	1,82E-07	OK	00_DP_LL1(3)
																6	8,65E-12	3LLCD	00_DP_LL1(3)-BA_L
																7	1,82E-07	OK	00_DP_LL1(4)
																8	6,11E-12	3LLCD	00_DP_LL1(4)-BA_L
																9	1,45E-05	OK	00_DP_LL1(5)
																10	4,93E-10	3LLCD	00_DP_LL1(5)-BA_L
																11	9,73E-10	OK	00_DP_LL1(6)
																12	4,64E-14	3LLCD	00_DP_LL1(6)-BA_L
																13	9,73E-10	OK	00_DP_LL1(7)
																14	4,64E-14	3LLCD	00_DP_LL1(7)-BA_L
																15	9,73E-10	OK	00_DP_LL1(8)
																16	4,78E-14	3LLCD	00_DP_LL1(8)-BA_L
																17	9,73E-10	OK	00_DP_LL1(9)
																18	4,78E-14	3LLCD	00_DP_LL1(9)-BA_L
																19	9,38E-15	3LLCD	CA_AP

Рисунок 1. – Дерево событий для большой течи LL1 при работе блока на мощности

vent Tree					No.	Freq.	Conseq.	Code
для течи с Ду 140-279 ЗСС 1,13)	Снижение давления под ЗСО системными JMN (1/4) & JMP (2/4)	Поврежденная часть 1 контура (1-4) - релле, 5- трубы к КД, 6-9 трубы к ГЕ)	САОЗ ВД (1/4)	САОЗ НД (1/4)	1	1,57E-09	OK	
>LL1(1,13)	CA_AP	00_DP_LL1	BA_H1	BA_L	2	5,47E-14	OK	BA_H1
					3	2,95E-14	3LL.CDS	BA_H1-BA_L
					4	1,57E-09	OK	00_DP_LL1
					5	4,38E-14	OK	00_DP_LL1-BA_H1
					6	2,07E-14	3LL.CDS	00_DP_LL1-BA_H1-BA_L
					7	1,57E-09	OK	00_DP_LL1(3)
					8	5,47E-14	OK	00_DP_LL1(3)-BA_H1
					9	2,95E-14	3LL.CDS	00_DP_LL1(3)-BA_H1-BA_L
					10	1,57E-09	OK	00_DP_LL1(4)
					11	4,38E-14	OK	00_DP_LL1(4)-BA_H1
					12	2,07E-14	3LL.CDS	00_DP_LL1(4)-BA_H1-BA_L
					13	1,24E-07	OK	00_DP_LL1(5)
					14	3,47E-12	OK	00_DP_LL1(5)-BA_H1
					15	1,79E-12	3LL.CDS	00_DP_LL1(5)-BA_H1-BA_L
					16	8,35E-12	OK	00_DP_LL1(6)
					17	3,03E-16	OK	00_DP_LL1(6)-BA_H1
					18	1,82E-16	3LL.CDS	00_DP_LL1(6)-BA_H1-BA_L
					19	8,35E-12	OK	00_DP_LL1(7)
					20	2,35E-16	OK	00_DP_LL1(7)-BA_H1
					21	1,21E-16	3LL.CDS	00_DP_LL1(7)-BA_H1-BA_L
					22	8,35E-12	OK	00_DP_LL1(8)
					23	3,03E-16	OK	00_DP_LL1(8)-BA_H1
					24	1,82E-16	3LL.CDS	00_DP_LL1(8)-BA_H1-BA_L
					25	8,35E-12	OK	00_DP_LL1(9)
					26	2,35E-16	OK	00_DP_LL1(9)-BA_H1
					27	1,21E-16	3LL.CDS	00_DP_LL1(9)-BA_H1-BA_L
					28	6,06E-17	3LL.CDS	CA_AP

Рисунок 2. – Дерево событий для большой течи LL1 при работе блока в режимах останова

Результаты анализа минимальных сечений, минимального набора отказов элементов систем и/или ошибок операторов, приводящих к неуспешному окончанию аварийной последовательности, приведены на рисунке 3. На рисунке 4 представлена диаграмма вкладов минимальных сечений в вероятность осуществления неуспешных окончаний АП для ИС LL1 при работе энергоблока на мощности, аналогичная диаграмма для ИС LL1 при работе блока в стояночных режимах приведена на рисунке 5.

No	Probability	%	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
1	3,57E-11	37,98	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DP_LL1	_POS14(LL)		
2	2,39E-11	25,41	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-3AA	_DP_LL1	_POS14(LL)		
3	1,34E-11	14,23	IE-LL1	KLГZ1AN001FAR-ALL	_DP_LL1	_POS14(LL)		
4	6,65E-12	07,07	IE-LL1	KLГZ1AN001FAR-3AA	_DP_LL1	_POS14(LL)		
5	1,43E-12	01,52	IE-LL1	CRAZ1_SwF	_DP_LL1	_POS14(LL)		
6	4,51E-13	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL1_LL1	_POS14(LL)		
7	4,51E-13	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL3_LL1	_POS14(LL)		
8	4,51E-13	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL2_LL1	_POS14(LL)		
9	4,51E-13	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL4_LL1	_POS14(LL)		
10	3,01E-13	00,32	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-3AD	_DL1_LL1	_POS14(LL)		
11	3,01E-13	00,32	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-3AB	_DL3_LL1	_POS14(LL)		
12	2,97E-13	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23-	_DP_LL1	_PEB_22_42	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
13	2,97E-13	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23-	_DP_LL1	_PEB_22_31	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
14	2,97E-13	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23-	_DP_LL1	_PEB_11_32	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
15	2,97E-13	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23-	_DP_LL1	_PEB_12_41	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
16	2,97E-13	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23-	_DP_LL1	_PEB_11_41	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
17	2,97E-13	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23-	_DP_LL1	_PEB_21_42	_POS14(LL)	_T_FACTOR1

Рисунок 3. – Список доминирующих минимальных сечений для ИС LL1 при работе блока на мощности

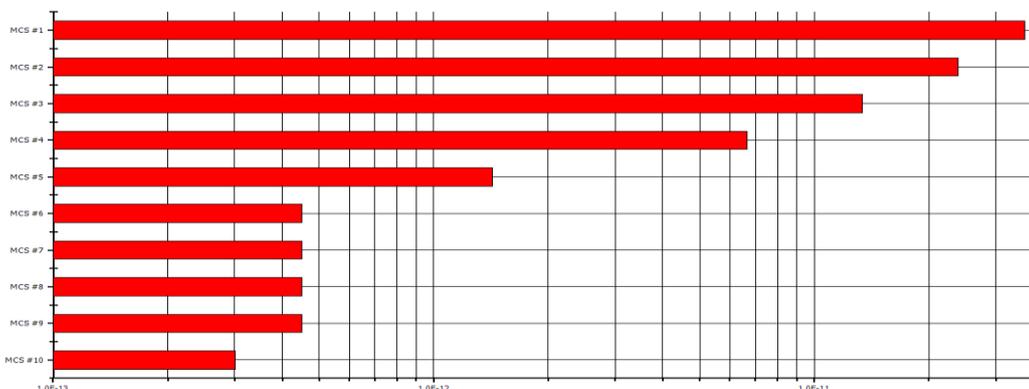
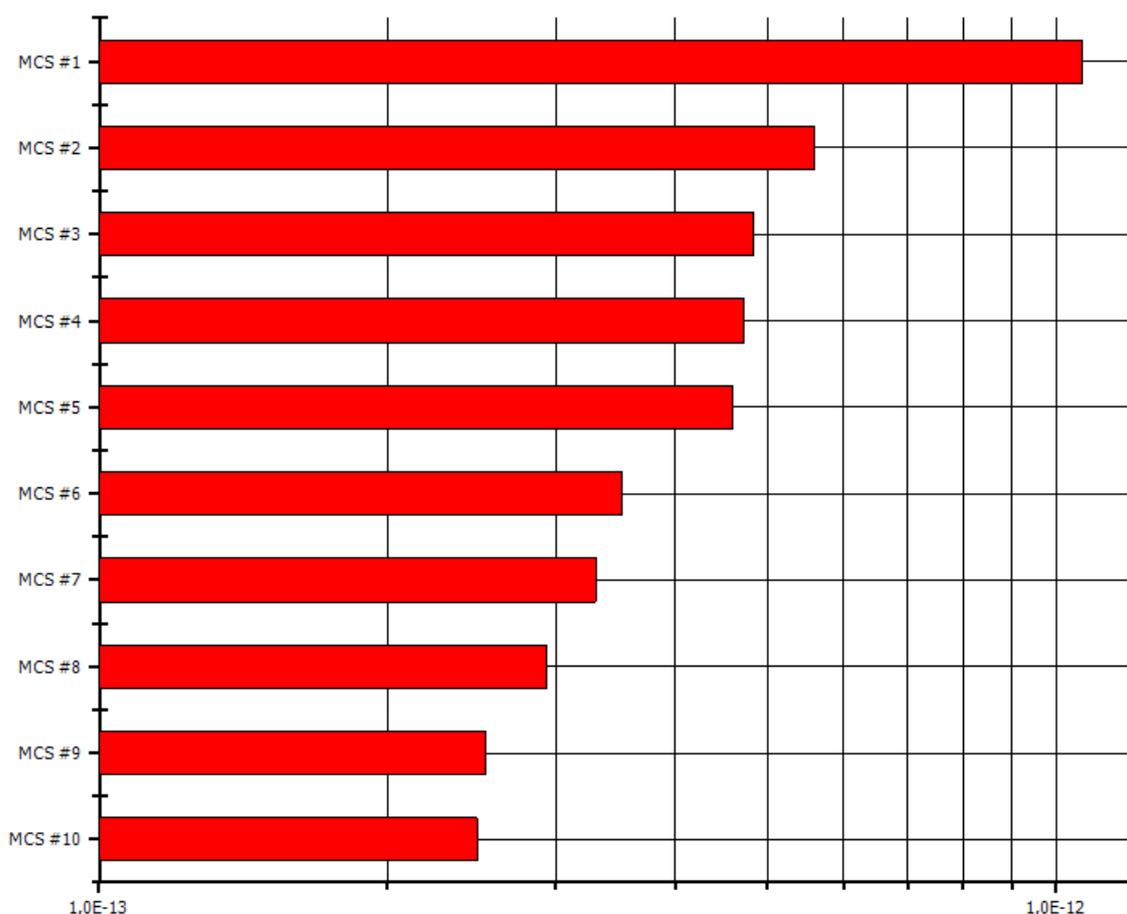


Рисунок 4. – Диаграмма вкладов доминирующих минимальных сечений для ИС LL1 при работе блока на мощности



**Рисунок 5. – Диаграмма вкладов доминирующих минимальных сечений для ИС LL1 при работе блока в режимах останова**

Вероятность возникновения больших течей первого контура LL1 невелика и составляет  $1,54E-05$ , также достаточно высока надежность выполнения функций системами безопасности, вследствие этого вероятности осуществления аварийных последовательностей с неуспешными конечными состояниями составляют от  $4,93E-10$  до  $9,38E-15$ . Критическим путем развития аварии с большой течью LL1 при работе энергоблока как на мощности (вероятность  $4,93E-10$ ), так и в стояночных режимах (вероятность  $4,79E-12$ ) имеет АП 10 с течью трубопровода к компенсатору давления (рисунки 1, 2).

Анализ аварии, связанной с возникновением исходного события с большой течью LL1 показывает, что вероятность достижения всех конечных состояний с повреждением топлива, находящегося в реакторе, составляет  $9,41E-11$  при работе на мощности и  $8,74E-12$  при работе в стояночных режимах.

В результате анализа неопределенности, выполненного для аварийной последовательности ИС LL1, определен 90% доверительный интервал. При работе блока на мощности: нижняя граница (5%) –  $8,71E-10$ , медиана (50%) –  $1,32E-11$ , верхняя граница (95%) –  $4,46E-11$ . Для стояночных режимов: нижняя граница (5%) –  $7,62E-13$ , медиана (50%) –  $2,41E-12$ , верхняя граница (95%) –  $8,43E-12$ .

Наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении исходного события LL1 вносят минимальные сечения с отказами по общим причинам обеспечивающих систем (систем охлаждения оборудования, вентиляции здания систем безопасности), а также отказы по общим причинам элементов системы аварийного впрыска (низкого давления) теплоносителя в первый контур (насосы, обратные клапаны), так как в состояниях останова необходимо осуществление длительного отвода остаточного тепла от активной зоны реактора с помощью насосов данной системы.

Для надежного выполнения функций безопасности системами при возникновении большой течи первого контура LL1 при работе во всех эксплуатационных состояниях следует обеспечить не только надежное функционирование основного оборудования систем, но также повысить надежность работы обеспечивающих систем, в том числе путем изменения процедур обслуживания и проверок работоспособности оборудования.

**Заключение.** Большие течи первого контура реакторов ВВЭР имеют меньшую частоту возникновения, однако последствия развития такого аварийного процесса могут вызвать тяжелую аварию с повреждением ядерного топлива в реакторе и требуют тщательного исследования.

Проведенный вероятностный анализ протекания аварийных сценариев больших течей первого контура эквивалентных диаметров  $D_v$  249–346 мм (ИС LL1) в реакторной установке типа ВВЭР позволил выявить критические пути и вероятности развития аварийных последовательностей, определить наиболее значимых вкладчиков в снижение безопасности реакторной установки.

Критическим путем развития аварии с большой течью LL1 при работе энергоблока во всех режимах работы является аварийная последовательность с течью трубопровода к компенсатору давления, вероятность осуществления которой составляет  $4,93E-10$  при работе энергоблока на мощности и  $4,79E-12$  при работе в стояночных режимах. Наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении исходного события LL1 вносят минимальные сечения с отказами по общим причинам элементов системы аварийного впрыска (низкого давления) теплоносителя в первый контур, так как в состояниях останова необходимо осуществление длительного отвода остаточного тепла от активной зоны реактора с помощью насосов данной системы, а также с отказами по общим причинам обеспечивающих систем (рисунок 3).

Для надежного выполнения функций безопасности системами при возникновении исходного события LL1 при работе во всех эксплуатационных состояниях энергоблока следует обеспечить надежное функционирование оборудования систем безопасности, исключив отказы элементов по общим причинам, а также повысить надежность работы обеспечивающих систем, в том числе путем изменения процедур обслуживания и проверок оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Острейковский, В. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. – М. : Физматлит, 2008. – 352 с.
2. Основные требования к вероятностному анализу безопасности блока атомной станции: НП-095-15. – Введ. 12.08.2015. – М. : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ, 2015. – 10 с.
3. Рекомендации по разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 блока атомной станции для внутренних исходных событий: Руководство по безопасности РБ-024-19 – введ. 17.07.2019. – М. : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ, 2019. – 67 с.
4. Белорусская АЭС Блок 1: окончательный отчет по обоснованию безопасности (предварительная редакция) (ПрООБ). – Н. Новгород : АО ИК «АСЭ», 2021. – Гл. 15. – 1358 с.