

УДК 621.039.58

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС НА ДЛИТЕЛЬНОМ ПОСЛЕАВАРИЙНОМ ПЕРИОДЕ

В.Б. Морозов, Г.В. Токмачев, Е.В. Байкова, В.Р. Чулухадзе,  
М.В. Федулов

*ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва*



В статье рассмотрены проблемы, которые связаны с вероятностным моделированием поведения АЭС, разрабатываемых по новым проектам, начиная со вторых суток после начала аварии. Обычной практикой при проведении вероятностного анализа безопасности (ВАБ) действующих АЭС является выбор времени моделирования аварийных последовательностей в течение 24 ч, поэтому методологическим вопросам моделирования на поздних фазах аварии не уделялось должного внимания.

Для решения методологических проблем был разработан специальный метод, позволяющий моделировать аварийные последовательности за пределами 24-часового интервала.

Приведены результаты оценки частоты повреждения активной зоны (ПАЗ) для 24-часового периода моделирования аварийных последовательностей и за пределами 24-часового временного интервала.

**Ключевые слова:** вероятностный анализ безопасности, атомная электростанция, аварийная последовательность, частота повреждения активной зоны, инициирующее событие, отказ по общей причине.

**Key words:** probabilistic safety assessment, nuclear power plant, accident sequence, core damage frequency, initiating event, common cause failure.

Основной отечественный нормативный документ по безопасности АЭС ОПБ-88/97 [1] устанавливает вероятностные критерии для тяжелых запроектных аварий и предельного аварийного выброса, но не определяет, на каком интервале времени необходимо проводить оценки. Обычной практикой при проведении вероятностного анализа безопасности (ВАБ) действующих АЭС является выбор времени моделирования аварийных последовательностей в течение 24 ч, поэтому методологическим вопросам моделирования на поздних фазах аварии не уделялось должного внимания. Это объясняется тем, что к концу первых суток острая быстротекущая фаза аварии, как правило, заканчивается повреждением активной зоны (ПАЗ) реактора или устойчивым состоянием с заглушенным реактором и стабильным отводом остаточного тепла, который может продолжаться неограниченное время.

Для новых проектов АЭС повышенной безопасности выбор расчетного интервала моделирования работы систем при аварии имеет большее значение. Например, в проектах АЭС-2006 для различных российских площадок и зарубежных АЭС, разрабатываемых инжиниринговой компанией ОАО «Атомэнергопроект», применены пассивные системы отвода тепла и залива активной зоны (гидроемкости второй ступени), что позволило существенно снизить вероятность тяжелого повреждения активной зоны на начальном этапе аварии. Однако время эффективной работы пассивных систем при авариях с течами теплоносителя первого контура ограничено (в частности, запасом воды в гидроемкостях второй ступени), поэтому необходимо показать, что увеличение расчетного интервала времени не приведет к существенному изменению полученных для периода 24 ч вероятностных показателей безопасности. Как следствие, в последнее время возникла тенденция к рассмотрению в ВАБ более длительных периодов, в частности, из-за так называемого «эффекта утеса» (cliff edge effect), когда может произойти скачкообразное изменение способности АЭС противостоять аварии из-за исчерпания тех или иных ресурсов.

Проблемы моделирования на длительном послеварийном периоде связаны еще и с тем, что расчетные программы для ВАБ, в частности, наиболее широко используемая программа RiskSpectrum PSA Professional, которая аттестована российским надзорным органом [2], не разрабатывались для целей моделирования длительных аварийных последовательностей.

Для решения методологических проблем разработан специальный метод, позволяющий моделировать аварийные последовательности за пределами 24-часового временного интервала, который представлен в настоящей статье.

## НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Вопрос вероятностного моделирования аварийных последовательностей за пределами первых 24 ч после начала аварии был поднят в Требованиях европейских эксплуатирующих организаций к АЭС с легководными реакторами [3, пп. 2.17.1.2 и 3.3.3] и закреплен в документе МАГАТЭ [4, пп. AS-C01 и SC-A05].

Российские нормативные документы также содержат аналогичные требования. В п. 3.2.3 РБ024-02 [5] рекомендуется для ВАБ первого уровня, чтобы интервал времени моделирования аварийных последовательностей составлял не менее 24 ч с момента начала аварии. Кроме того, в [5] подчеркивается, что этот интервал должен быть расширен, если за пределами 24 ч возможно достижение неуспешного конечного состояния аварийной последовательности из-за причин, не связанных с отказами оборудования и ошибками персонала, например, вследствие:

- исчерпания запасов охлаждающей среды, топлива, масла, сжатых газов и т.п. при невозможности возобновить эти запасы;
- устойчивого развития неблагоприятных физических процессов, приводящих к неуспешным конечным состояниям аварийных последовательностей и т.п.

Если проецировать требования [5] на проект АЭС-2006, то необходимо проводить долговременное вероятностное моделирование течей теплоносителя первого контура при отказе активной части систем аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) с успешным срабатыванием гидроемкостей первой и второй ступеней. Упомянутые гидроемкости могут обеспечивать поддержание запаса теплоносителя первого контура, как минимум, сутки, после чего требуется оценивать эффект, связанный с исчерпанием в них запасов воды.

При проведении ВАБ второго уровня расчеты вероятности предельно допустимого аварийного выброса изначально предполагают анализ развития аварии на интервале до 10 суток, что следует из требований отечественных нормативных

документов НП-032-01 [6] и НРБ-99/2009 [7], связывающих допустимую вероятность предельно допустимого аварийного выброса и временной интервал, на котором он рассчитывается.

Таким образом, в действующей нормативной документации содержатся требования о проведении вероятностного моделирования на интервале, превышающем 24 ч.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Метод моделирования аварийных последовательностей за пределами 24-часового временного интервала основан на анализе возможности восстановления отказавшего оборудования за время работы пассивных систем.

Для решения данной задачи были определены два типа аварийных последовательностей, не приводящих к ПАЗ на послеаварийном интервале 24 ч:

- аварийные последовательности, для которых ПАЗ предотвращается функционированием соответствующих систем безопасности в течение неограниченного времени после начала аварии;
- аварийные последовательности, для которых ПАЗ предотвращается в течение ограниченного времени после начала аварии.

В новых проектах АЭС аварийные последовательности второго типа характерны для иницирующих событий с течами из первого контура и отказом активной части САОЗ высокого и низкого давления. Предотвращение ПАЗ для этих аварийных последовательностей обеспечивается работой гидроемкостей первой и второй ступеней, объем борного раствора в которых ограничен, но достаточен для поддержания запаса теплоносителя в реакторе в течение, как минимум, 24 ч с момента начала их работы. Создаваемый работой гидроемкостей резерв времени может быть использован для восстановления отказавшего оборудования и, следовательно, возобновления отвода тепла активными системами.

Для каждого иницирующего события с течами из первого контура, приводящего к аварийным последовательностям второго типа, исследовался состав минимальных сечений этих последовательностей с целью выявления основных вкладчиков в частоту ПАЗ как для восстанавливаемого оборудования, так и для невосстанавливаемого. Цель данного анализа состояла в определении полного набора систем, отказы активных частей которых определяют отнесение аварийной последовательности к одному из двух упомянутых выше типов. В результате анализа полный набор минимальных сечений был разделен на две группы. При этом анализ сечений с отказами оборудования, не подлежащего восстановлению, показал, что более 99 % таких сечений представлено отказами арматуры на линиях забора воды из прямка защитной оболочки. Для сечений с отказами оборудования, которое можно восстановить в аварийных условиях, определяющий вклад вносят отказы четырех каналов обеспечивающих систем и их комбинации.

На следующем этапе для основных деревьев событий, моделирующих развитие аварий с течью теплоносителя первого контура, разрабатывались трансферные (переходные) деревья событий, кодируемые следующим образом: к коду иницирующего события добавлялось «-LTC», что обозначает отдаленное по времени последствие (Long-Time-Conditions), на которых в качестве функциональных событий в заголовках деревьев событий отображались состояния невосстанавливаемой части систем (рис. 1, 2). Для указанных функциональных событий строились соответствующие деревья отказов, а конечное состояние последовательностей каждого трансферного дерева с отказом функции невосстанавливаемого оборудования классифицировалось как «CD-LTC» (отдаленное по времени ПАЗ - Core Damage under Long-Time-Conditions). Такие «неуспешные» последовательности с

Малая течь первого контура	Останов реактора	Закрытие стопорных клапанов турбины	Системы нормального отвода тепла	Закрытие БРУ-К	Системы аварийного отвода тепла	1 насос САОЗ ВД	1 насос САОЗ НД	6 гидроемкостей второй ступени	Номер	Частота	Последствие	Код
LCS	A	TS	H	TC	RC	FH	FL	G6				
									1	2,50E-03	OK	
									2	2,31E-06	OK	FH
									3	1,07E-06	LCS-LTC	FH-FL
									4	1,69E-09	CD	FH-FL-G6
									5	2,40E-10	OK	RC
									6	5,86E-11	CD	RC-FH
									7	4,59E-05	LCS-SLI	TC
									8	7,98E-06	LCS-H	H
									9	2,50E-07	LCS-SLI	TS
									10	1,05E-11	CD	A

Рис. 1 Дерево событий малой течи первого контура (основное)

Завершение работы гидроемкостей второй ступени	Арматура на линии подачи воды из приемка 30	Номер	Частота	Последствие	Код
LCS-LTC	SUMP				
		1	9,79E-07	OK-LTC	
		2	9,07E-08	CD-LTC	SUMP

Рис. 2 Трансферное дерево событий, отображающее возможность восстановления оборудования на длительном послеварийном периоде

отказами невосстанавливаемой части вносят дополнительный вклад в частоту ПАЗ при моделировании за пределами 24-часового временного интервала.

Конечное состояние аварийных последовательностей каждого трансферного дерева без отказа невосстанавливаемого оборудования классифицировалось как «ОК-LTC» (успешное конечное состояние). Для реалистичной оценки ПАЗ на длительном временном отрезке требуется оценить вклад от таких «потенциально успешных» последовательностей. Следует отметить, что до проведения оценки необходимо проверить полноту разработанной модели, чтобы убедиться, что предположение об определяющем вкладе обеспечивающих систем в «потенциально успешные» аварийные последовательности верно. Для этого была разработана модель надежности одного канала комплекса обеспечивающих систем в виде деревьев отказов. Далее путем расчетов была определена вероятность события с отказом всех каналов. Ее перемножение с частотами инициирующих событий, связанных с течами из первого контура, позволило получить искомую оценку вклада комплекса обеспечивающих систем в частоту ПАЗ. Указанное значение сравнивалось с суммарной частотой всех «потенциально успешных» последовательностей в модели ВАБ. Для проекта АЭС повышенной безопасности с реакторами типа ВВЭР этот вклад составил 93 % (см. табл. 1), что говорит о достаточной адекватности модели, разработанной для моделирования расширенного временного интервала.

**Результаты анализа полноты модели, разработанной для оценки вклада от длительных аварийных последовательностей**

Группа инициирующих событий	Частота группы инициирующих событий, 1/год	Частота ПАЗ для разработанной модели комплекса обеспечивающих систем 1/год	Частота «потенциально успешных» последовательностей в ВАБ (ОК-ЛТС), 1/год
Большая течь внутри защитной оболочки $130 \leq \text{Ду} \leq 200$ мм	2,5E-05	1,98E-09	2,15E-09
Большая течь внутри защитной оболочки $200 < \text{Ду} \leq 279$ мм	2,2E-05	1,74E-09	1,91E-09
Большая течь внутри защитной оболочки $279 < \text{Ду} \leq 850$ мм	7,9E-05	6,25E-09	8,60E-09
Средняя течь внутри защитной оболочки $70 \leq \text{Ду} < 100$ мм	5,9E-04	4,67E-08	5,01E-08
Средняя течь внутри защитной оболочки $100 \leq \text{Ду} < 130$ мм	1,4E-05	1,11E-09	1,18E-09
Малая течь внутри защитной оболочки $10 < \text{Ду} \leq 40$ мм	9,4E-04	7,44E-08	7,98E-08
Малая течь внутри защитной оболочки $40 < \text{Ду} < 70$ мм	6,3E-04	4,98E-08	5,35E-08
Непреднамеренное открытие ИПУ КД с последующей неподачей	1,1E-04	8,70E-09	9,33E-09
Течь первого контура, компенсируемая системой подпитки-продувки	1,4E-01	1,02E-06	1,10E-06
Всего	-	$\Sigma=1,2E-06$	$\Sigma=1,3E-06$

На основании данных по показателям надежности элементов, принятых в модели ВАБ, были определены суммарная интенсивность отказов одного канала комплекса обеспечивающих систем при работе и среднее время его восстановления:

- интенсивность отказов оценивается значением  $3,03E-04$  1/ч;
- среднее время восстановления составляет 35,7 ч.

Закон распределения времени восстановления принимается экспоненциальным.

Последнее допущение объясняется следующим образом. Любое крупное оборудование, например насосный агрегат, включает в себя множество элементов различных типов: механическую часть, электротехнические устройства (например, выключатель, электродвигатель), элементы контроля и автоматики, времена ремонтов которых существенно разные. Такой же вывод в еще большей степени справедлив по отношению к каналу обеспечивающих систем безопасности в целом. В этом случае время восстановления канала представляет собой взвесь времен восстановлений элементов (то есть случайный выбор случайной величины), вся совокупность которых характеризуется большим разбросом средних значений (от 4 до 100 ч). Такая случайная величина в отсутствие ярко выраженных доминант, определяющих общий показатель надежности канала, наилучшим образом описывается экспоненциальным законом. В рассматриваемом случае указанные доминанты отсутствуют, что подтверждается статистическими данными.

Для реалистичной оценки вклада «потенциально успешных» аварийных последовательностей в ПАЗ была разработана модель надежности комплекса обеспечивающих систем безопасности для периода более 24 ч с момента начала аварии в виде графа полумарковского процесса с пятью состояниями (рис. 3).

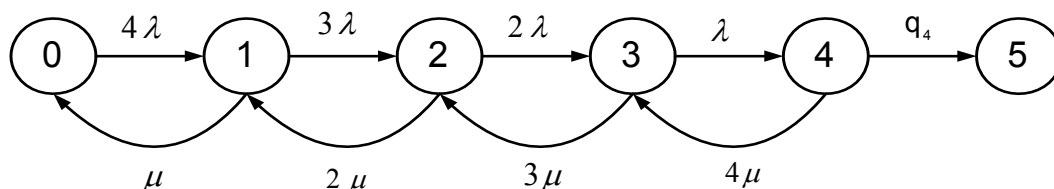


Рис. 3 Полумарковская модель надежности обеспечивающих систем безопасности при аварии

В данной модели состояния  $k=0, 1, \dots, 4$  соответствуют отказу при работе во время аварии  $k$  каналов обеспечивающих систем. При этом состояние «0» означает работоспособность всех четырех каналов. Состояние «5» графа соответствует полному отказу обеспечивающих систем с учетом исчерпания резерва времени на восстановление в связи с окончанием работы гидроемкостей.

Переходы из состояний с меньшим в состояния с большим номером соответствуют отказам каналов обеспечивающих систем в режиме работы, а обратные переходы – восстановлениям. Граф, представленный на рисунке 3, является примером классической схемы «размножения – гибели», в котором последнее состояние «5» является поглощающим. Следует отметить, что в силу сделанного ранее допущения об экспоненциальных законах наработки до отказа и времени восстановления, состояния  $k=0, 1, \dots, 3$  являются марковскими, т.е. переходы между ними характеризуются постоянными интенсивностями. В модели было принято, что одновременно работают все работоспособные каналы, поэтому интенсивности переходов, обусловленные отказами, кратны числу работоспособных каналов в каждом состоянии, т.е.  $4\lambda, 3\lambda, 2\lambda, \lambda$ . При определении интенсивностей переходов, вызванных восстановлением оборудования, принято, что персонал оптимизирует ремонтный процесс, выбирая из числа отказавших канал с наиболее быстро устранимым отказом, либо выполняя ремонтные работы одновременно на нескольких каналах. При этих допущениях интенсивности переходов – восстановлений пропорциональны числу отказавших каналов в каждом состоянии, т.е.  $3\mu, 2\mu, \mu$ .

Состояние «4» в данной схеме отлично от состояний  $k=0, 1, \dots, 3$ , так как переход из «4» в «5» обусловлен не отказом оборудования, а исчерпанием запаса воды в гидроемкостях второй ступени. Время нахождения процесса, описываемого графом, в состоянии «4» есть минимум двух величин. Этими величинами являются:

- период времени до достижения проектного предела по температуре оболочек твэлов (в соответствии с результатами расчетов для компенсируемых и малых течей размером не более  $D_u$  50 мм это время консервативно принято равным 47 ч, а для остальных течей - 31 ч);
- случайное время восстановления одного из четырех отказавших каналов обеспечивающих систем, характеризующееся в модели интенсивностью  $4\mu$ . При этом  $q_4$  представляет собой вероятность не восстановить ни один канал.

На представленном графе не показаны переходы, обусловленные отказами элементов по общей причине. Следует отметить, что подобные отказы рассматривались при разработке моделей ВАБ в режиме ожидания и на периоде до 24 ч после начала аварии. При более длительной работе обеспечивающих систем безопасности новых АЭС, имеющих полное физическое разделение каналов, такие отказы потенциально могут произойти по двум причинам. Одной из них может являться внешнее глобальное воздействие (например, землетрясение, удар самолета и т.п.), а другой - быстрое развитие деградиционных механизмов вследствие, например, ошибок, допущенных персоналом АЭС при техническом обслуживании, либо ошибок в документации на оборудование. В первом случае упомянутые выше отказы элементов возникают практически одновременно, но рассматриваются в рамках

специальных анализов (например, в ВАБ для сейсмических воздействий). Во втором случае необходимо учесть, что имеется естественная вариативность скорости процесса деградации, что приводит к неодновременным отказам элементов. Разброс во времени проявления таких отказов сравним с периодом времени, необходимым для восстановления оборудования, и даже может превышать его. Подобные зависимости не требуют специального выделения доли указанных отказов в общей массе и моделирования их на графе в виде отдельных дуг переходов, но могут быть учтены в рамках существующей модели путем увеличения интенсивностей перехода из состояний 1, 2, 3 в состояния 2, 3, 4, соответственно. В настоящее время не имеется достоверных данных по отказам по общей причине длительно работающего оборудования после успешного начального периода работы. При необходимости оценки влияния этого фактора на результат расчетов можно выполнять анализ чувствительности.

### **ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ПАЗ ЗА ПРЕДЕЛАМИ 24 ЧАСОВ С МОМЕНТА НАЧАЛА АВАРИИ С УЧЕТОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С КОНЕЧНЫМ СОСТОЯНИЕМ «ОК-ЛТС»**

При выполнении расчетов по описанной выше модели были приняты следующие допущения:

- начальным моментом для полумарковской модели, представленной выше, является момент времени  $(t_0+24)$  ч ( $t_0$  – момент начала аварии);
- начальными вероятностями состояний являются вероятности отказов одного, двух, трех или четырех каналов на момент 24 ч после начала аварии, рассчитанные в рамках базовой модели ВАБ;
- предполагается, что при успешной работе активной части САОЗ персонал прекращает подачу воды от гидроемкостей второй ступени через полчаса после начала аварии;
- предполагается, что всякий раз после восстановления функций активных систем персоналом предпринимаются меры по пополнению запасов воды в гидроемкостях;
- также учитывается, что резерв времени на восстановление функции активных систем в состоянии «4» не уменьшается с течением времени (это консервативное предположение, так как в действительности он возрастает ввиду снижения уровня остаточных тепловыделений).

Существенной чертой применяемого подхода является то, что для определения вероятностей различных состояний системы безопасности в начальный послеаварийный период (до 24 ч) используются вероятностные модели в виде деревьев отказов. Такая общепринятая методика позволяет учесть многообразие факторов, моделирование которых возможно только на элементном уровне (например, отказы по общей причине), но все это проводится в предположении отсутствия восстановления оборудования в течение 24 ч после начала аварии. На более длительном периоде времени работы системы после возникновения инициирующего события состояние ее элементов стабильно, переключения обусловленные причинами, связанными с процессом протекания аварии, отсутствуют, поэтому отказы по общей причине не моделируются. Такая ситуация дает возможность применить другую модель надежности комплекса обеспечивающих систем, которая базируется на применении полумарковского процесса.

Оценка частоты ПАЗ выполнена для «потенциально успешных» аварийных последовательностей с конечным состоянием «ОК-ЛТС» при работе систем в течение времени  $t$  после окончания периода 24 ч с момента начала аварии.

Для решения указанной задачи необходимо вычислить вклад таких «потенциально успешных» аварийных последовательностей в частоту ПАЗ на длительном периоде на основе формулы полной вероятности, описываемой следующим соотношением:

$$F(t) = \sum_i v_i \left( \sum_{j=1}^4 P_{0j}^{(i)} P_{j5}^{(i)}(t) \right) \quad (1)$$

где  $P_{0j}^{(i)}$  - вероятность нахождения комплекса обеспечивающих систем безопасности в состоянии  $j$  в момент времени  $(t_0+24)$  ч при  $i$ -ой группе инициирующих событий;  $v_i$  - частота  $i$ -ой группы инициирующих событий;  $P_{j5}^{(i)}(t)$  - вероятности перехода полумарковского процесса, характеризуемого графом на рисунке 3, из начального состояния  $j$  в поглощающее состояние «5» при  $i$ -ой группе инициирующих событий.

Точное вычисление вероятностей перехода полумарковского процесса может быть получено на основе численного решения системы интегральных уравнений [8]. Однако такой подход не позволяет выполнять анализы параметрической чувствительности и неопределенности, а также прогнозировать изменение частоты ПАЗ при увеличении моделируемого периода времени работы при аварии.

Консервативная и, вместе с тем, достаточно точная оценка частоты ПАЗ может быть получена на основе конечных формул с использованием асимптотического подхода. В этом случае следует отдельно моделировать начальный период изменения состояний графа, поскольку начальное распределение вероятностей состояний графа с различным числом отказов каналов в момент  $t_0+24$  ч может существенно отличаться от квазистационарных значений. При этом частота ПАЗ на длительном периоде после 24 ч с момента начала аварии определяется как сумма по девяти рассматриваемым в ВАБ группам инициирующих событий с течами из первого контура по формуле:

$$F(t) = \sum_1^9 [F_{R_1}^i + F_0^i(t)] = \sum_1^9 F_{R_1}^i + \sum_1^9 F_0^i(t) = F_{R_1} + F_0(t), \quad (2)$$

где  $F_{R_1}^i$  - частота ПАЗ при  $i$ -ой группе инициирующих событий вследствие неуспешного восстановления рассматриваемого комплекса систем при условии, что его начальным состоянием (в момент  $t_0+24$  ч) может быть состояние с  $k>0$  неработоспособными каналами;  $F_0^i(t)$  - частота ПАЗ при  $i$ -ой группе инициирующих событий за время  $t$  с учетом того, что начальным состоянием комплекса систем (в момент  $t_0+24$  ч) является состояние с полностью работоспособными каналами.

Проведем оценку вероятностных показателей безопасности АЭС на длительном послеварийном периоде  $t = 720$  ч, или 30 сут.

В формуле (2) первое слагаемое характеризует вероятность наступления тяжелых последствий на начальном периоде, который завершается либо полным восстановлением работоспособного состояния, либо отказом функции безопасности.

Второе слагаемое есть асимптотическая экспоненциальная оценка частоты ПАЗ, вычисленная на основе рассмотрения полумарковского графа на длительном периоде работы. Указанная оценка является консервативной на периоде времени меньшем, чем среднее время нахождения четырехканальной обеспечивающей системы в начальном состоянии  $T_0 = \frac{1}{4\lambda}$ .



Для больших периодов времени данное асимптотическое выражение довольно точно приближает искомую функцию.

Методика выполнения расчетов отдельных слагаемых  $F(t)$  и полученные результаты представлена ниже.

$F_{R_1}^i$  вычисляется по формуле:

$$F_{R_1}^i = \nu_i \cdot \sum_{j=1}^4 P_{0j}^{(i)} \pi_{j5}^{(i)}, \quad (3)$$

где  $\pi_{j5}$  - вероятность перехода из состояния  $j$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) в состояние «5» за один начальный цикл регенерации полумарковского процесса.

В свою очередь, вероятности  $\pi_{j5}$  вычислены путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \pi_{j5}^{(i)} = q_j \cdot \pi_{j+1,5}^{(i)} + p_j \cdot \pi_{j+1,5}^{(i)} & \text{при } j=2,3 \\ \pi_{15}^{(i)} = q_1 \cdot \pi_{2,5}^{(i)}, \\ \pi_{45}^{(i)} = q_4^{(i)} + p_4^{(i)} \cdot \pi_{3,5}^{(i)}. \end{cases} \quad (4)$$

В указанной системе уравнений величины  $q_j$  и  $p_j=1-q_j$  представляют собой вероятности перехода вправо и влево из состояния  $j$  полумарковского процесса, схема которого представлена на рис. 3.

В рассматриваемом случае

$$q_1 = \frac{3\lambda}{3\lambda + \mu}, \quad q_2 = \frac{2\lambda}{2\lambda + 2\mu} = \frac{1}{1 + \mu}, \quad q_3 = \frac{\lambda}{\lambda + 3\mu}, \quad q_4 = \exp[-4\mu \cdot T_p^{(i)}], \quad (5)$$

где  $T_p^{(i)}$  - резерв времени на восстановление в связи с окончанием работы гидроемкостей

Система уравнений (4) имеет следующее решение

$$\pi_{15}^{(i)} = \frac{q_1 q_2 q_3 q_4^{(i)}}{\Delta}, \quad \pi_{25}^{(i)} = \frac{q_2 q_3 q_4^{(i)}}{\Delta}, \quad \pi_{35}^{(i)} = \frac{q_3 q_4^{(i)} \Delta_3}{\Delta}, \quad \pi_{45}^{(i)} = \frac{q_4^{(i)} \Delta_4}{\Delta}, \quad (6)$$

$$\Delta = 1 - q_1 p_2 - q_2 p_3 - q_3 p_4 + q_1 p_2 \cdot q_3 p_4, \quad \Delta_3 = 1 - q_1 p_2, \quad \Delta_4 = 1 - q_1 p_2 - q_2 p_3. \quad (7)$$

Вычисления по приведенным формулам привели к результатам, представленным в табл. 2.

Таким образом, общая оценка  $F_{R_1}$  за период  $t = 720$  ч составляет  $1,1E-08$  1/год.

$F_0^{(i)}(t)$  представляет собой оценку частоты ПАЗ вследствие отказа рассматриваемого комплекса систем при  $i$ -ой группе инициирующих событий на длительном периоде работы с учетом того, что начальным состоянием в момент времени  $(t_0+24)$  ч является состояние «0» (рис. 3).

$F_0^{(i)}(t)$  вычисляется по асимптотической формуле:

$$F_0^{(i)}(t) = \nu_i \cdot \left( 1 - \sum_{j=1}^9 P_j \pi_{j5}^{(i)} \right) \cdot \left[ 1 - \exp\left( -\frac{\pi_{15}^{(i)} \cdot t}{T_0} \right) \right], \quad (8)$$

где  $T_0 = \frac{1}{4\lambda}$  - среднее время нахождения рассматриваемого четырехканального комплекса систем в состоянии «0» (средняя наработка до первого отказа), ч;

$\pi_{15}^{(i)}$  - вероятность перехода из состояния «1» в состояние «5» за один цикл регенерации;  $\nu_i$  - частота  $i$ -ой группы инициирующих событий.

Вероятность  $\pi_{15}^{(i)}$  получена выше (см. формулы (6) и (7)).

**Частота ПАЗ вследствие неуспешного восстановления обеспечивающих систем безопасности**

Группа инициирующих событий	Частота группы инициирующих событий $V_i$ , 1/год	Вероятность $\sum_j P_{0j}^i \pi_{js}^i$ (см. формулу 3)	Вклады в частоту ПАЗ от различных групп инициирующих событий, $F_{R_1}^i$
Большая течь внутри защитной оболочки $130 \leq D_{\text{у}} \leq 200$ мм	2,5E-05	2,3E-06	5,8E-11
Большая течь внутри защитной оболочки $200 < D_{\text{у}} \leq 279$ мм	2,2E-05	2,3E-06	5,1E-11
Большая течь внутри защитной оболочки $279 < D_{\text{у}} \leq 850$ мм	7,9E-05	2,3E-06	1,8E-10
Средняя течь внутри защитной оболочки $70 \leq D_{\text{у}} < 100$ мм	5,9E-04	2,3E-06	1,4E-09
Средняя течь внутри защитной оболочки $100 \leq D_{\text{у}} < 130$ мм	1,4E-05	2,3E-06	3,2E-11
Малая течь внутри защитной оболочки $10 < D_{\text{у}} \leq 40$ мм	9,4E-04	4,9E-07	4,6E-10
Малая течь внутри защитной оболочки $40 < D_{\text{у}} < 70$ мм	6,3E-04	2,3E-06	1,5E-09
Непреднамеренное открытие ИПУ КД с последующей непосадкой	1,1E-04	2,3E-06	2,6E-10
Течь первого контура, компенсируемая системой подпитки-продувки	1,4E-01	4,7E-08	6,6E-09
Всего	-	-	1,1E-08

Результаты оценки  $F_0^{(i)}(t)$  за время  $t=720$  ч представлены в табл. 3.

Как следует из результатов, представленных в таблице 3, общая оценка  $F_0^{(i)}(t)$  за время  $t = 720$  ч составляет  $9,6E-10$  1/год.

Таким образом, с учетом формулы 2 частота ПАЗ на интервале 720 ч с момента начала аварии увеличится по сравнению с базовым вариантом для 24-часового интервала работы систем после аварии на  $1,1E-08+9,6E-10=1,2E-08$  1/год. При этом общая оценка частоты ПАЗ составит не более чем  $1,1E-07$  1/год.

Расширение моделируемого периода времени работы системы при аварии за пределы 720 ч (например, до одного года) также не приведет к существенному увеличению полученной величины, поскольку в общей сумме доминирует первое слагаемое (см. формулу 2).

Следует отметить, что полученные результаты в основном характеризуют возможности методологического подхода к решению поставленной задачи и в меньшей степени претендуют на окончательность оценки значения частоты ПАЗ для конкретного проекта на длительном периоде времени. Более достоверные оценки могут быть получены путем выполнения детальных расчетов для всех диапазо-

**Частота ПАЗ вследствие отказа комплекса обеспечивающих систем при  $i$ -м инициирующем событии на длительном периоде работы**

Группа инициирующих событий	Частота группы инициирующих событий $\nu_i$ , 1/год	$\frac{\pi_{15}^{(i)}}{T_0}$ (формула (8))	$\left[1 - \exp\left(-\frac{\pi_{15}^{(i)} \cdot t}{T_0}\right)\right]$ (формула (8))	Вклад в частоту ПАЗ $F_0^{(i)}(t)$ (формула (8))
Большая течь внутри защитной оболочки $130 \leq \text{Ду} \leq 200$ мм	2,5E-05	4,3E-11	3,1E-08	7,7E-13
Большая течь внутри защитной оболочки $200 < \text{Ду} \leq 279$ мм	2,2E-05	4,3E-11	3,1E-08	6,8E-13
Большая течь внутри защитной оболочки $279 < \text{Ду} \leq 850$ мм	7,9E-05	4,3E-11	3,1E-08	2,4E-12
Средняя течь внутри защитной оболочки $70 \leq \text{Ду} < 100$ мм	5,9E-04	4,3E-11	3,1E-08	1,8E-11
Средняя течь внутри защитной оболочки $100 \leq \text{Ду} < 130$ мм	1,4E-05	4,3E-11	3,1E-08	4,3E-13
Малая течь внутри защитной оболочки $10 < \text{Ду} \leq 40$ мм	9,4E-04	9,1E-12	6,5E-09	6,1E-12
Малая течь внутри защитной оболочки $40 < \text{Ду} < 70$ мм	6,3E-04	4,3E-11	3,1E-08	2,0E-11
Непреднамеренное открытие ИПУ КД с последующей непосадкой	1,1E-04	4,3E-11	3,1E-08	3,4E-12
Течь первого контура, компенсируемая системой подпитки-продувки	1,4E-01	9,1E-12	6,5E-09	9,1E-10
Всего	-	-	-	9,6E-10

нов течей с учетом специфического резерва времени, разработки детальных моделей, учитывающих необходимые действия персонала, а также с учетом исследования влияния отказов по общей причине. Однако, принимая во внимание заложенный при определении резерва времени консерватизм, можно утверждать, что рассмотрение более длительных (по сравнению с 24 ч) периодов времени работы систем безопасности при аварии не приведет к существенному увеличению частоты ПАЗ для проектов АЭС повышенной безопасности. Этот вывод является прямым следствием выбора в проектах конструкции и соответствующих характеристик пассивных систем (системы пассивного отвода тепла и гидроемкостей второй ступени), обеспечивающих возможность эффективного управления запроектной аварией, в том числе и на длительном периоде времени.

## ВЫВОДЫ

Разработанный метод позволяет провести оценку вероятностных показателей безопасности на «неограниченном» (после 24 ч с начала аварии) интервале времени для АЭС повышенной безопасности, таких как АЭС «Белене» в Болгарии, Нововоронежская-2, Северская, Центральная и Южно-Уральская АЭС, генеральным проектировщиком которых является инжиниринговая компания ОАО «Атомэнергопроект».

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что увеличение рассматриваемого периода времени работы систем при аварии за пределы 24 ч после начала аварии не скажется существенным образом на значении частоты повреждения активной зоны реактора для указанных проектов АЭС повышенной безопасности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). – М.: Госатомнадзор России, 1997.
2. Программа Risk Spectrum PSA. Аттестационный паспорт программного средства, регистрационный номер 160 от 28.03.2003. - М.: Госатомнадзор России, НТЦ ЯРБ, 2003.
3. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Volume 2 Chapter 17. Revision C State 05 – 2001.
4. Determining the Quality of Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Applications in Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1511. - Vienna, IAEA, 2006.
5. РБ-024-02. Рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций уровня 1 для внутренних иницирующих событий. – М.: Госатомнадзор России, 2002 г.
6. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-032-01. – М.: Госатомнадзор России, 2002.
7. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
8. А.И. Клемин, В.С. Емельянов, В.Б. Морозов Надежность ядерных энергетических установок. Марковская модель.- М.: Энергоатомиздат, 1982.

Поступила в редакцию 8.12.2009