

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

**ВСЕСОЮЗНЫЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
(ВИНИТИ)**

НОВОСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Серия. Атомная энергетика

Реферативный сборник

Выпуск 2

Издается с 1962 г.

Москва 1989

Выходит 12 раз в год

БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ**89.2.6. Вероятностный анализ безопасности АЭС
с реакторами PWR 1-го уровня**

В настоящее время на основе вероятностного анализа безопасности (ВАБ) АЭС выполнена оценка уровня безопасности большого числа действующих и проектируемых АЭС.

Полномасштабный вероятностный анализ безопасности включает три уровня его проведения — ВАБ-1, -2 и -3, которые различаются между собой как по целям, определяемым видами рассчитываемых показателей, так и по методам, применяемым на каждом уровне. ВАБ-1 имеет целью получение вероятности разрушения активной зоны ядерного реактора, ВАБ-2 предусматривает оценку выхода радионуклидов при тяжелых авариях, ВАБ-3 — определение индивидуального и коллективного риска смерти или заболевания для населения в окрестностях АЭС и сравнение его с риском от других видов человеческой деятельности.

В настоящей работе рассмотрен ВАБ-1 для АЭС с ядерными реакторами типа PWR (ВВЭР). Вероятность разрушения (расплавления) активной зоны реактора в рамках ВАБ-1 определяется на основании анализа комбинаций всех возможных внутренних причин аварии, т. е. отказов оборудования систем, важных для безопасности, и ошибок оперативного и технического персонала АЭС с учетом их последствий. Эти так называемые внешние исходные события — падение самолета на АЭС, воздействие ударной волны, землетрясения, наводнения и т. п. — являются целью дальнейших исследований. Результаты ВАБ-1 дают исходную информацию для оценки выхода радионуклидов, радиоактивных выбросов (ВАБ-2), воздействия АЭС на здоровье населения и окружающую среду (ВАБ-3). Таким образом ВАБ-1 направлен на предупреждение аварий, в то время как ВАБ-2 и -3 предусматривают уже смягчение их последствий.

Методология ВАБ

При проведении ВАБ-1 обязательными являются следующие исследования:

— сбор исходной информации для анализа, включающей схемы, характеристики оборудования, инструкции по эксплуатации и ликвидации аварий, регламенты технического обслуживания и т. д.;

— идентификация, классификация и количественная оценка исходных событий аварии, таких как потеря теплоносителя 1-го или 2-го контуров, аварийное изменение реактивности, прекращение расхода в 1-ом контуре, нарушение теплоотвода через 2-й контур, обесточивание АЭС;

— построение деревьев событий (дерево событий — логическая диаграмма, определяющая причинно-следственные связи и условия достижения множества конечных состояний АЭС в зависимости от реализации промежуточных событий отказов или выполнения функций систем безопасности в процессе развития аварии после возникновения исходного события); при этом определяются функции систем безопасности в процессе развития аварии;

— моделирование надежности систем — построение деревьев отказов (дерево отказов — логическая диаграмма, определяющая комбинации отказов элементов систем безопасности, приводящих к неработоспособности всей системы);

— анализ множественных отказов, вызванных общей причиной или зависимостью между системами и оборудованием;

— анализ надежности персонала АЭС;

— создание базы данных по надежности; при этом отдается предпочтение информации (интенсивность отказов, время восстановления отказавшего оборудования и т. п.), собранной на АЭС и являющейся объектом анализа;

— анализ аварийных последовательностей: определение критериев успешного выполнения функций системами безопасности АЭС для каждого исходного события аварии, очередности возникновения событий, времени их наступления и длительности, теплогидравлическое моделирование аварийных процессов и получение вероятности реализации различных конечных состояний, соответствующих определенным последовательностям развития аварии, при этом применяются интерактивный метод анализа: расчет аварийных процессов проводится после определения с помощью дерева событий факторов, влияющих на их протекание, а результаты расчетов процессов, в свою очередь, влияют на форму дерева событий;

— оценка неопределенностей.

Что касается трудозатрат на проведение ВАБ-1 одного энергоблока АЭС, то американские исследователи выполняют такую

работу силами 8—10 специалистов за 17 мес., а трудозатраты на ВАБ-1 1-го блока Lovüsa (Финляндия) к моменту завершения примерно 50% работы составили 10 человеко-лет.

Анализ тенденции изменения методологии ВАБ-1 показывает, что в настоящее время используются более реалистичные подходы. Некоторые наиболее консервативные предположения заменены более мягкими: так, приняты более реалистичные оценки теплогидравлических процессов, например охлаждения оголенных твэлов паром; улучшен анализ взаимосвязи расплавления активной зоны и разрушения защитной оболочки; улучшено моделирование восстановительных действий оператора при отказах оборудования в аварийной ситуации. Эти изменения приводят к уменьшению вычисляемой частоты разрушения активной зоны. В то же время проводимый в последних исследованиях более детальный анализ обеспечивающих систем безопасности (электрических секций, коммутационной аппаратуры, управляющих пневмосистем, технического водоснабжения) и отказов по общей причине может привести к увеличению этой частоты.

Результаты ВАБ

Опыт проведенных исследований показывает, что схемные и конструктивные особенности применяемых ядерных паропроизводящих установок и различия эксплуатационных характеристик оборудования и площадок АЭС приводят к значительному разбросу результатов. Из табл. 1 видно, что частота расплавления активной зоны различных АЭС изменяется от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Более того, оценки вероятности разрушения активных зон реакторов АЭС, сооруженных по серийным проектам, также могут не совпадать по ряду причин, таких как различия изготовителей оборудования; отличия в схемах 2-го контура, встречающиеся в серийных проектах; денежные затруднения фирм, участвующих в сооружении или эксплуатации АЭС; устойчивость и надежность энергосистемы; различные стандарты обеспечения качества; опыт и квалификация персонала. Значительное влияние на результаты ВАБ-1 оказывают и методики анализа. Более глубокое понимание протекания аварий явилось одной из основных причин изменения оценки частоты расплавления активных зон на АЭС Surry, Zion и Sequoyah (США) в более поздних исследованиях. Несмотря на сильную зависимость оценок ВАБ-1 от специфики конкретных АЭС, завершённые к настоящему времени исследования позволяют сделать некоторые выводы, применимые для других АЭС или позволяющие облегчить проведение их ВАБ-1. Важным результатом являются доминантные аварийные последовательности, вносящие наибольший вклад в частоту разрушения активной зоны.

Вероятность разрушения активной зоны ядерных реакторов PWR

Название АЭС	Электрическая мощность АЭС, МВт	Страна	Фирма-поставщик	Год завершения	Вероятность разрушения активной зоны, 1/год
Arkansas-1	853	США	Combustion Engineering	1981	$5 \cdot 10^{-5}$
Biblis B	1240	ФРГ	KWU	1977	$4 \cdot 10^{-5}$
Calvert Cliffs-1	865	США	Combustion Engineering	1982	$2 \cdot 10^{-3}$
Crystal River-3	821		Babcock and Wilcox	1980	$4 \cdot 10^{-4}$
Indian Point-2	864		Westinghouse	1982	$4 \cdot 10^{-4}$
Indian Point-3	965		»	1982	$9 \cdot 10^{-5}$
Millstone-3	1150		»	1983	$1 \cdot 10^{-4}$
Oconee-3	886		Babcock and Wilcox	1980	$8 \cdot 10^{-5}$
Ringhals-2	800	Швеция	Westinghouse	1983	$4 \cdot 10^{-5}$
Seabrook-1	1148	США	»	1983	$2 \cdot 10^{-4}$
Sequoyah-1	1148		»	1981	$6 \cdot 10^{-5}$
	1148	»	»	1986	$1 \cdot 10^{-4}$
Sizewell B	1100	Великобритания	»	1982	$1 \cdot 10^{-6}$
	822	США		1975	$6 \cdot 10^{-5}$
				1986	$5 \cdot 10^{-5}$
Rowe	175			1982	$2 \cdot 10^{-5}$
	1040			1981	$7 \cdot 10^{-5}$
	1040			1987	$5 \cdot 10^{-4}$
				1988	$1 \cdot 10^{-4}$

Рекомендуемое МАГАТЭ допустимое значение вероятности разрушения активной зоны

В табл. 2 приведены доминантные аварийные последовательности для АЭС Sully-1 (трехпетлевой PWR фирмы Westinghouse электрической мощностью 788 МВт с сухой защитной оболочкой под давлением, США), АЭС Sizewell B (четырёхпетлевой PWR фирмы Westinghouse электрической мощностью 1100 МВт с сухой защитной оболочкой под давлением, Великобритания) и АЭС Sequoyah-1 (четырёхпетлевой PWR фирмы Westinghouse электрической мощностью 1128 МВт с ледовым конденсатором в защитной оболочке, США). Общее число рассматриваемых аварийных последовательностей велико. Так, для АЭС Sizewell B анализировалось несколько десятков тысяч аварийных цепочек. Поэтому для экономии трудозатрат анализ цепочки обычно прерывают при достижении очень малой вероятности события ($\sim 1 \cdot 10^{-7}$ 1/год).

Доминантные аварийные последовательности на АЭС Sizewell B, Sequoyah-1, Surry-1

Исходное событие аварии	Зависимые от исходного события отказы систем безопасности	Независимые от исходных событий отказы систем безопасности	Частота расплавления активной зоны при рассматриваемой аварийной последовательности, 1/год
-------------------------	---	--	--

Sizewell B

1. Малая течь теплоносителя 1-го контура	Нет	Впрыск высокого давления	$9,4 \cdot 10^{-8}$
2. Потеря внешнего электроснабжения		Аварийное электроснабжение и питательная вода	$3,7 \cdot 10^{-9}$
3. Разрыв трубы парогенератора		Впрыск высокого давления и системы сброса давления	$1,03 \cdot 10^{-8}$
4. Течь теплоносителя 1-го контура через систему отвода остаточных тепловыделений		Нет	$2,7 \cdot 10^{-8}$, наибольший радиоактивный выброс

Sequoyah-1

Малая течь теплоносителя 1-го контура	Нет	Аварийное охлаждение активной зоны высокого давления в режиме рециркуляции	$2,9 \cdot 10^{-5}$
2. Отказ по общей причине всех насосов системы охлаждения оборудования 1-го контура и систем безопасности, приводящий к малой течи через уплотнение главных циркуляционных насосов 1-го контура	Аварийное охлаждение активной зоны высокого давления и спринклерная система	Нет	$2,7 \cdot 10^{-5}$
3. Малая течь теплоносителя 1-го контура	Нет	Аварийный впрыск низкого давления	$9,7 \cdot 10^{-6}$

4. То же		Аварийное охлаждение активной зоны низкого давления и спринклерная система в режиме рециркуляции	7·10 ⁻⁶
5. Длительное полное обесточивание АЭС, приводящее к малой течи через уплотнения главных циркуляционных насосов 1-го контура из-за потери их охлаждения	Впрыск высокого давления	Нет	9·10 ⁻⁶
6. Средняя течь теплоносителя 1-го контура	Нет	Впрыск высокого давления	6·10 ⁻⁶
Surry-			
1. Идентично аварийной последовательности № 5 на АЭС Sequoyah-1		Нет	6,6·10 ⁻⁶
2. Очень малая течь теплоносителя 1-го контура	Нет	Впрыск высокого давления	2,6·10 ⁻⁶
3. Обесточивание секций надежного питания 480 В		Предохранительный клапан компенсатора давления и аварийное охлаждение активной зоны в режиме рециркуляции	9·10 ⁻⁶
4. Длительное полное обесточивание АЭС, приводящее к истощению аккумуляторных батарей	Аварийное охлаждение активной зоны высокого давления и аварийная подача питательной воды в парогенераторы	Нет	3·10 ⁻⁶
5. Полное обесточивание АЭС	Аварийное охлаждение активной зоны высокого давления	Аварийный питательный насос с турбоприводом	1,3·10 ⁻⁶
6. Потеря внешнего электроснабжения	Нет	Отказ на открытие клапанов, осуществляющих сброс пара	10 ⁻⁶
7. Переходный процесс		Аварийная защита и аварийный ввод бора в 1-й контур	1,1·10 ⁻⁶
8. Течь теплоносителя 1-го контура через смежные с ним системы подобно последовательности № 4 на АЭС Sizewell B		Нет	9,0·10 ⁻⁷

Общим для большинства результатов ВАБ-1 является относительно высокая опасность малых течей теплоносителя 1-го контура. В этом классе аварий ранее не учитывались процессы, вызванные или приводящие к течи через уплотнения главных циркуляционных насосов 1-го контура, хотя последние анализы, проведенные в США, показали их большое значение для реакторов PWR.

Другой значимой по последствиям аварийной последовательностью является полное обесточивание АЭС, т. е. потеря нормального и аварийного электроснабжения переменным током; обесточивание приводит к нарушению теплоотвода от активной зоны и может вызвать течь через уплотнения главных циркуляционных насосов из-за неработоспособности их систем охлаждения в этой ситуации. ВАБ-1 1-го энергоблока АЭС Surry показал, что вклад обесточивания составляет 38% (т. е. 1×10^{-5} 1/год) в суммарную частоту разрушения активной зоны, а для АЭС Crystal River (США) это значение составляет 29%, или $1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/год. Противоречивые результаты получены для 3-го энергоблока АЭС Millstone (США). Специалисты Комиссии по регулированию ядерной деятельности США считают, что вклад полного обесточивания в общий риск расплавления активной зоны достигает 40%, в то время как фирма, отвечающая за эксплуатацию АЭС, оценивает эту величину в 3,5%. Разброс в оценке опасности полного обесточивания может объясняться применением различных моделей восстановления электроснабжения. Так, для АЭС Zion-1 риск разрушения активной зоны из-за обесточивания во время планового ремонта или перегрузки изменился с $2,3 \cdot 10^{-7}$ до $5,9 \cdot 10^{-6}$ 1/год при использовании более адекватной модели.

Для ряда АЭС большую опасность представляет отказ системы, обеспечивающей подачу охлаждающей воды на насосы и теплообменники систем безопасности. Отказ этой системы в аварийной ситуации может привести к неработоспособности сразу нескольких систем безопасности. Наиболее неблагоприятна в этом плане АЭС Zion, где аварийные последовательности, связанные с отказами вышеуказанной системы, вносят вклад 79% в полную частоту расплавления активной зоны.

Важный вывод многочисленных исследований ВАБ-1 заключается в том, что аварии типа «большая течь» (разрыв главного циркуляционного трубопровода 1-го контура) не являются доминантной аварийной последовательностью при анализе разрушения активной зоны. Это доказывает необходимость изменения приоритетов в исследованиях безопасности, установленных на основании детерминистского подхода, когда значительные средства тратились на анализ аварии типа «большая течь».

Результаты ВАБ-1 содержат полезную информацию об индивидуальных составляющих в аварийных последовательностях.

Опыт исследований показывает важность человеческого фактора. Оценки вклада ошибок персонала в частоту расплавления активной зоны находятся в диапазоне 10—87%. Основными действиями человека, учитываемыми в анализах, являются следующие:

— некорректное проведение регламентных процедур проверок и технического обслуживания, что может привести к неготовности оборудования или к переходным процессам, которые могут стать исходными событиями аварий;

— ошибочные действия оператора в аварийной ситуации, приводящие к более тяжелым последствиям;

— неточность диагностики нарушения и непринятие персоналом надлежащих корректирующих действий, например восстановления отказавшего во время аварии оборудования.

Установлена тенденция роста удельного веса ошибок человека с увеличением срока службы АЭС, с ее старением исключаются многие отказы оборудования, вызванные проектными просчетами.

На большинстве АЭС с PWR системы безопасности (аварийное охлаждение активной зоны, дизель-генераторы, техническое водоснабжение, аккумуляторные батареи и т. д.) имеют многоканальное исполнение. Поэтому важным фактором, влияющим на частоту расплавления активной зоны, являются отказы по общей причине параллельно установленного резервируемого оборудования, например аварийных дизель-генераторов. Из результатов ВАБ-1 также следует важность другого типа зависимых отказов, в результате которых обеспечивающие системы безопасности выводят из строя защитные. Поэтому и структура, и конструктивное исполнение обеспечивающих систем оказывают большое влияние на частоту разрушения активной зоны.

Применимость результатов ВАБ-1 во многом зависит от степени их неопределенности. Для АЭС Sully-1 и Sequoyah-1 анализ неопределенности оценок параметров, проведенный методом Монте-Карло, показал, что 90%-ный доверительный интервал частоты расплавления активной зоны составляет 1 порядок для Sully-1 и 2,5 порядка для Sequoyah-1. Наибольшее влияние на значение этой частоты оказывают следующие факторы: вероятность, время возникновения и размеры течи теплоносителя 1-го контура через уплотнения главных циркуляционных насосов в случае потери охлаждения уплотнения; время восстановления напряжения на шинах переменного тока (для Sequoyah-1 также и на шинах постоянного тока); вероятность отказов по общей причине; вероятность отказов обратных клапанов при рассмотрении течи теплоносителя через смежные системы; работоспособность системы аварийного охлаждения активной зоны после разрушения защитной оболочки.

Вероятностные методы стали необходимым инструментом как для оценки существующего уровня безопасности АЭС, так и для выработки мер по повышению безопасности вновь создаваемых и действующих АЭС. Аппарат ВАБ-1 широко применяется для решения конкретных проектных и эксплуатационных задач.

Старение конструкционных материалов, недоработки проекта АЭС, выявляемые при эксплуатации или при анализе аварий, новые результаты научных исследований, рекомендации поставщика АЭС и требования надзорного органа могут поставить вопрос о модернизации или реконструкции систем и оборудования. Методы ВАБ позволяют количественно оценить влияние предлагаемых изменений на безопасность. Это особенно полезно при выяснении целесообразности реализации дорогостоящих мероприятий. В качестве критерия принятия решения можно выбрать величину уменьшения частоты расплавления активной зоны. Так, ВАБ-1, проведенный для АЭС Crystal River, показал, что вероятность плавления топлива из-за обесточивания может быть уменьшена на 39% (или общая вероятность плавления на 12%) за счет увеличения времени работы аккумуляторных батарей системы надежного электроснабжения до 8 ч. Альтернативным путем достижения такого же результата на этой АЭС является уменьшение вероятности отказа аварийных дизель-генераторов при запуске на 33%.

Очень важен опыт Финляндии, где сооружены два энергоблока производства СССР. Для АЭС Loviisa в 1984—1987 гг. проведены вероятностные исследования аварийных последовательностей, связанных с тепловым ударом (резким захолаживанием) при высоком давлении в 1-ом контуре. Была исследована 121 аварийная последовательность, причем для 55 из них проведены теплогидравлические анализы, а для 26 — анализы механики разрушения. Получено, что нижняя граница 90%-ного доверительного интервала частоты разрушения корпуса реактора не превышает $1 \cdot 10^{-5}$ 1/год; на основании анализа рекомендованы изменения конструкции активной зоны, снижение напора и подачи насосов аварийного впрыска борного раствора и повышение температуры в емкостях системы аварийного охлаждения активной зоны.

Возможно проведение совместных вероятностных и экономических оценок; например, для 2-го и 3-го энергоблоков АЭС San Onofre (США) рассматривался вопрос о сооружении дополнительных клапанов, предназначенных для быстрого сброса давления в 1-ом контуре и облегчения условий аварийного охлаждения активной зоны. Были проанализированы три аварийные последовательности, связанные с полным прекращением подачи питательной воды в парогенераторы, разрывом трубы парогене-

ратора и малой течью теплоносителя 1-го контура. Получено уменьшение частоты разрушения активной зоны на небольшую величину порядка $1 \cdot 10^{-7} \div 10^{-6}$ 1/год, в то же время затраты на реализацию мероприятий прогнозировались в размере 2—3 млн. долл. на один энергоблок, поэтому от модернизации пришлось отказаться.

Часто предлагаемые на основе результатов ВАБ-1 изменения технологических схем и цепей управления АЭС не связаны со значительными экономическими затратами, однако позволяют заметно повысить безопасность. На АЭС Surry модернизация автоматики переключения на рециркуляционный режим аварийного охлаждения активной зоны и объединение некоторых элементов систем аварийного впрыска и обеспечивающих систем снизило вероятность многочисленных неблагоприятных аварийных последовательностей с течью теплоносителя и переходными процессами. На двухблочной АЭС Midland (США) обеспечено снижение риска тяжелых аварий путем организации перекрестного электро- и водоснабжения смежных блоков. Для этой же АЭС Комиссия по регулированию ядерной деятельности США предписала обязательную установку дополнительного аварийного питательного насоса на каждом энергоблоке. ВАБ позволил определить наиболее оптимальный путь реализации этого требования. Детальный анализ зависимых отказов, включая обеспечивающие и управляющие системы, показал, что число и тип аварийных питательных насосов не являются определяющими при выявлении вклада системы в частоту разрушения активной зоны. Ключевым оказался тот факт, что оба существующих аварийных насоса зависят от электропитания системы охлаждающей воды; это было учтено при установке третьего насоса.

Известны случаи применения ВАБ-1 для корректировки технологического регламента АЭС с целью повышения безопасности или облегчения условий эксплуатации без снижения безопасности. При пересмотре этого основного эксплуатационного документа ВАБ может быть полезен для решения целого ряда задач. Так, на АЭС LaSalle (США) установлено, что из 100 проблем, поставленных Комиссией по регулированию ядерной деятельности США в плане усовершенствования эксплуатационного регламента, 28 могут быть решены вероятностными методами. Наиболее важными проблемами являются обременительные требования к проверкам дизель-генераторов в период восстановления после отказа на одном из них, допустимое время вывода в ремонт оборудования систем безопасности при работающем реакторе и установки срабатывания аварийной защиты реактора по некоторым параметрам. Последний вопрос очень важен для снижения частоты внеплановых остановов энергоблоков. Его решение проводилось путем идентификации основных причин остановов. В результате исследований определены из-

менения в конструкции, режимах работы и порядке технического обслуживания такого оборудования, приводящие к уменьшению частоты внеплановых остановов энергоблоков без снижения уровня безопасности. Одно из таких изменений заключается в увеличении временных интервалов между проверками работоспособности элементов систем аварийной защиты и аварийного охлаждения активной зоны, ошибки персонала в ходе которых были причиной многих аварийных остановов.

Существуют и противоположные выводы по результатам ВАБ в отношении временных интервалов между испытаниями элементов систем безопасности. На АЭС Surry их уменьшение для обратных клапанов позволило снизить вероятность течи теплоносителя 1-го контура через смежные с ним системы. Это указывает на проблему оптимизации таких проверок, стоящую перед участвующими в ВАБ исследователями, что может быть показано на примере АЭС ANO-1 (США). Здесь было изучено влияние испытаний разных элементов систем безопасности на вероятность разрушения активной зоны. Было учтено как уменьшение этой вероятности за счет выявления элементов, отказавших в режиме ожидания, так и ее увеличение из-за риска, вносимого самими проверками. Выяснено, что существующая периодичность испытаний для 14% элементов уменьшает частоту разрушения активной зоны на значительную величину порядка $1 \cdot 10^{-4}$ — 10^{-5} 1/год, в то время как проверки 35% элементов не оказывают на нее заметного влияния, уменьшая частоту менее чем на $1 \cdot 10^{-8}$ 1/год, т. е. являются практически бесполезными.

Аналогичные исследования проводятся и в отношении оптимизации допустимого времени вывода в ремонт различного оборудования систем безопасности при работе реактора на мощности. Раньше эти требования, так же как и периодичность испытаний, включались в регламент, главным образом, на основе инженерных экспертных оценок. Вероятностные оценки позволяют сделать вывод, что такие решения подчас далеко не оптимальны. На АЭС ANO-1, например, отключение для ремонта 9% элементов систем безопасности, не нарушающее требования регламента, увеличивает частоту разрушения активной зоны на $1 \cdot 10^{-5}$ — 10^{-6} 1/год, а ремонт 37% элементов — менее чем на $1 \cdot 10^{-9}$ 1/год, т. е. для последней группы оборудования установлены необоснованно жесткие требования. На АЭС Вугоп (США) применение методологии ВАБ позволило обосновать увеличение допустимого времени ремонта с 3 до 7 сут. для шести систем. Это спринклерная и вентиляционная системы защитной оболочки, подпиточные насосы 1-го контура, насосы аварийного впрыска и отвода остаточных тепловыделений, а также система промежуточного контура охлаждающей воды. Для двух основных вкладчиков в вероятность расплавления активной зоны — дизель-генераторов и системы подачи питательной воды в парогенераторы — требования остались без изменений.

Перспективной областью практического применения ВАБ-1 являются системы поддержки оператора, которые помогают ему принять оптимальное решение при отказах систем безопасности или проведении операций технического обслуживания, влияющих на безопасность. В этих случаях оперативно проводимый ВАБ-1 обеспечивает оператора информацией о степени изменения вероятности расплавления активной зоны по сравнению с базовым вариантом, когда все оборудование работоспособно. Оператор также получает основанные на вероятностных оценках рекомендации о наиболее оптимальных действиях с точки зрения безопасности. Ими могут быть следующие: оптимальный вариант проверок и включения в работу работоспособных каналов системы безопасности при отказе одного из них; порядок вывода оборудования, важного для безопасности, из эксплуатации для ремонта или технического обслуживания при обнаружении нескольких дефектов; продолжение работы реактора на стационарном уровне мощности при превышении допустимого времени ремонта оборудования систем безопасности (что особенно важно в случае значительной неготовности систем расхолаживания с точки зрения исключения опасных для данного случая возмущений, которые может внести переходный процесс при останове реактора).

Г. В. Токмачев

1. Nucl. Eng. Des. — 1986. — 93. — С. 349—356.
2. Nucl. Eng. Int. — 1987. — 32, № 390. — С. 25—26.
3. Ibid. — 1988. — 33, № 404. — С. 38.
4. Trans. ANS. — 1986. — 53. — С. 315—325, 444—445.
5. Ibid. — 1987. — 55. — С. 452—453.
6. Nucl. Safety. — 1986. — 27, № 1. — С. 15—27.
7. Nucl. Technol. — 1987. — 76, № 1. — С. 27—40.
8. Atom. — 1987. — № 372. — С. 7—13.
9. Nucl. News. — 1987. — 30, № 5. — С. 27.