

2. Киселев А.Н. Сколько же ядерного топлива находится в лавообразной топливосодержащей массе 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС? — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 4, с. 256—259.
3. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ. Ч. 1, 2. (25—29 августа 1986 г.).
4. Седов В.М., Курносов В.А., Епифанов А.В. Проект захоронения 4-го блока Чернобыльской АЭС. Главный корпус (реакторное отделение и машинный зал). Т. 1. Общая пояснительная записка. С-Петербург, ВНИПИЭТ, инв. № 34304 от 03.08.1986.
5. Дикарев В.С., Шикалов В.Ф., Шерашев Г.С. Концепция безопасности объекта «Укрытие» (требования обеспечения ядерной безопасности). Отчет, РНЦ «Курчатовский ин-т», инв. № 30/1-1029-90 от 18.03.90 г.
6. Объект «Укрытие» сегодня. — НИМБ, 1994, № 4, с. 27—30.
7. Вазингер В.В., Василевский В.П., Десятников И.И. и др. Чернобыльская авария, исходные данные для анализа. Ч. 2. Отчет НИКИЭТ, инв. № 270-Шт-3966 от 06.02.92.
8. Габарев Б.А., Жуков Н.В., Кобзев П.В. и др. Исследование факторов, действовавших при разрушении реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС. Отчет НИКИЭТ, инв. № 270-001-4025 от 29.06.92.
9. Киселев А.Н., Ненагляднов А.Ю., Сурин А.И., Чечеров К.П. Экспериментальные исследования лавообразных топливосодержащих масс (ТСМ) на 4-м блоке ЧАЭС (по результатам исследований 1986—1991 годов): Препринт ИАЭ-5533/3, 1992.
10. Киселев А.Н., Сурин А.И., Чечеров К.П. Результаты дополнительных исследований мест скоплений лавообразных топливосодержащих масс на 4-м блоке Чернобыльской АЭС: Препринт ИАЭ-5783/3, 1994.
11. Карасев В.С. Концепция преобразования объекта «Укрытие» и проблемы воздействия высоких радиационных полей на конструкции и материалы объекта. Доклад на научно-практической конф. «Проблемы преобразования объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС». Киев, 23—25 марта 1993 г.
12. Боровой А.А., Огородник С.С., Попов В.Д. Уточнение оценки количества ядерного топлива, находящегося в помещениях ПРК объекта «Укрытие» реактора 4-го блока ЧАЭС. Промежуточный отчет КЭ при ИАЭ, инв. № 11.07-06/188, Чернобыль, 1986.
13. Боровой А.А., Огородник С.С., Попов В.Д. Оценки количества топлива в скоплениях ТСМ в подпаратном помещении. Промежуточный отчет КЭ при ИАЭ, инв. № 11.06/26, Чернобыль, 1990.
14. Боровой А.А. Расчетные оценки по уточнению места нахождения и количества топлива в объекте «Укрытие». Отчет ИАЭ, инв. № 50.05/82 от 31.01.90 г. 17 с.

Поступила в Редакцию 14.02.96

УДК 621.039.58

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ И УСУГУБЛЕНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТИПА ATWS ПРИ ИХ НАЛОЖЕНИИ В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ

Кузьмин А.М., Окунев В.С. (МИФИ)

Основной задачей развития ядерной энергетики является радикальное повышение безопасности реакторных установок нового поколения за счет максимального использования внутренне присущих реактору свойств и пассивных систем обеспечения безопасности.

Рассмотрим одну из главных задач обеспечения безопасности — защиту реакторных установок от возможных тяжелых аварий. Как известно, современным требованиям самозащищенности удовлетворяют проекты быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

Опыт эксплуатации АЭС привел к необходимости рассмотрения причин и последствий аварийных ситуаций, вызванных нарушением режимов эксплуатации с одновременным отказом аварийной защиты (в зарубежной литературе известных под названием ATWS), — крайне маловероятных аварий с катастрофическими последствиями. При проектировании быстрых реакторов в первую очередь анализируются следующие события, инициирующие аварии с отказом аварийной защиты: нарушение принудительной циркуляции теплоносителя в первом контуре (LOF WS), нарушение теплоотвода от первого контура к окружающей среде (LOHS WS), переохлаждение теплоносителя первого контура (OVC WS), несанкционированный ввод ограниченной

положительной реактивности — аварийный режим с повышением мощности (TOP WS) и различные комбинации этих процессов [1]. Хотя вероятность наложения этих ситуаций крайне мала — определяется частотой событий 10^{-7} (реактор·год) $^{-1}$, она не исключена детерминистически. Поэтому при анализе самозащищенности проектов быстрых реакторов нового поколения следует рассматривать и такие события.

Программное обеспечение. Исследования проводили с помощью программы FRISS-2D, позволяющей моделировать аварийные ситуации в быстрых реакторах.

Расчетная модель позволяет рассматривать реакторы цилиндрической формы с жидкометаллическим теплоносителем в двумерной r — z -геометрии. Предполагается, что реактор состоит из нескольких кольцевых зон и слоев по высоте, различающихся составом.

Математическая модель динамики быстрого реактора основана на решении трех групп уравнений:

системы уравнений точечной кинетики с многогрупповым описанием запаздывающих нейтронов — для связи мощности и реактивности;

нестационарного уравнения теплопроводности, представляющего собой уравнение теплового баланса, и уравнения энергии теплоносителя в приближениях параболического описания температуры по сечению топлива в твэле, линейного распределения температуры теплоносителя по высоте твэла, пренебрежения изменением количества тепла, аккумулированного в теплоносителе, — для определения связи мощности реактора и изменения температуры;

условия баланса реактивности, связывающего изменение температуры с реактивностью.

Вводятся температурные коэффициенты реактивности по топливу (доплер-эффект, температурное расширение топлива) и теплоносителю (плотностной коэффициент, увеличение размеров опорной плиты и др.) [2].

Предварительные исследования условия нейтрализации и усугубления аварийных ситуаций. Анализ результатов исследований наложений аварийных ситуаций в быстрых реакторах средней и малой мощности (до тепловой мощности 2100 МВт включительно) с разным топливом и теплоносителем показывает, что наиболее опасной аварийной ситуацией как для быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, так и для реакторов со свинцовым, свинцово-висмутовым теплоносителем является наложение процессов LOF, TOP и OVC, сопровождающихся отказом аварийной защиты, если OVC запаздывает по времени. Добавление процесса LOHS WS к этим трем «смягчает» ситуацию.

Как известно, все возможные аварийные ситуации в быстрых реакторах могут моделироваться возмущениями по реактивности ρ — $\delta\rho$, расходу G — δG , температуре теплоносителя на входе в активную зону реактора $T_{\text{вх}}$ — $\delta T_{\text{вх}}$ и их комбинациями [1].

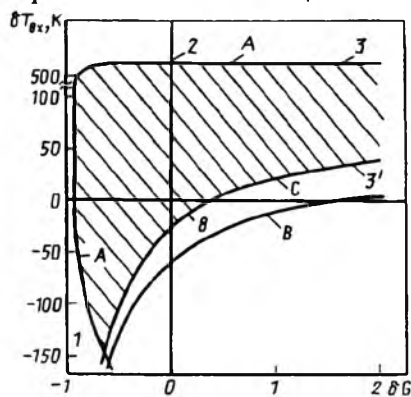
Как показано в работе [2], возмущения по ρ , G и $T_{\text{вх}}$ могут нейтрализовываться, а могут и усугублять аварийную ситуацию. Так, в результате исследований наложения аварийных режимов LOHS WS (повышение $T_{\text{вх}}$) и OVC WS (увеличение расхода теплоносителя) получено, что в зависимости от возмущений $\delta T_{\text{вх}}$ и δG можно выделить три области. В одной из них доминирующим оказывается процесс LOHS WS. В этом случае температура теплоносителя и оболочек твэлов в аварийной ситуации значительно увеличивается и может превысить предельно допустимую. В другой доминирует процесс OVC WS, что приводит к росту максимальной температуры топлива. И, наконец, можно выделить область нейтрализации процессов LOHS WS и OVC WS, где максимальная температура топлива, теплоносителя и оболочек твэлов ниже, чем для каждого из этих режимов.

Условие нейтрализации различных возмущений (аварийных режимов) можно сформулировать как $\sum_{n=1}^N \delta\rho_n < \delta\rho_n$, где $\delta\rho_n$ — изменение реактивности системы вследствие n -го возмущения; N — количество возможных возмущений. Условие усугубления аварийных ситуаций записывается как $\sum_{n=1}^N \delta\rho_n > \delta\rho_n$, т.е. суммарная реактивность от внесения различных возмущений превышает реактивность от внесения одного (любого) из них. При $\sum_{n=1}^N \delta\rho_n = \delta\rho_n$ наложение аварийных процессов не изменяет (не усугубляет и не нейтрализует) ситуацию.

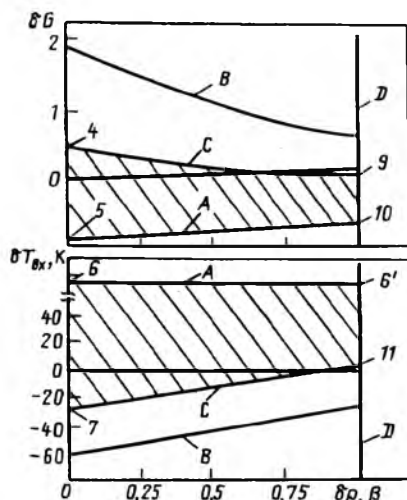
Области самозащитенности. Исследования нейтрализации и усугубления аварийных ситуаций (возмущений по ρ , G и $T_{вх}$) предлагается проводить на основе областей самозащитенности реактора к авариям. В качестве таких областей обычно рассматриваются области максимально допустимых изменений $\delta\rho$, δG , $\delta T_{вх}$ и скорость их изменения. Особый интерес представляет решение простейших оптимизационных задач о максимально допустимых возмущениях $|\delta\rho|$, $|\delta G|$ и $|\delta T_{вх}|$, при которых для сохранения барьеров безопасности не требуется воздействия специальных средств защиты [2]. Время ввода реактивности принималось равным 15 с, изменения G и $T_{вх}$ — 30 с.

На рис. 1, 2 представлены проекции области самозащитенности к авариям в координатах $(\delta T_{вх}, \delta G)$, $(\delta G, \delta\rho)$ и $(\delta T_{вх}, \delta\rho)$ для традиционной компоновки быстрого реактора средней мощности с нитридным уран-плутониевым топливом [2]. Области самозащитенности на рис. 1, 2 заштрихованы. Проекция области в координатах $(\delta G, \delta\rho)$ иллюстрирует самозащитенность реакторной установки к аварийным ситуациям LOF WS, OVC WS, TOP WS и наложениям (OVC+TOP) WS и (LOF+TOP) WS, проекции в координатах $(\delta T_{вх}, \delta\rho)$ — LOHS WS, OVC WS, TOP WS, (LOHS+TOP) WS, (OVC+TOP) WS, $(\delta T_{вх}, \delta G)$ — LOF WS, LOHS WS, OVC WS, (LOF+LOHS) WS, (OVC+LOHS) WS, (LOF+OVC) WS.

Границы областей определяются максимально допустимыми значениями так называемых функционалов безопасности (максимальной температуры, мощности и др.): $T_{тн}^{\max} = T_{тн}^{\text{доп}}$ (обозначен А на рис. 1, 2), где $T_{тн}^{\text{доп}} = 1157$ К — температура начала пузырькового кипения теплоносителя; $T_t^{\max} = T_t^{\text{доп}}$ (обозначен В), где $T_t^{\text{доп}} = 1800$ К — температура начала интенсивного газыделения в нитридном топливе; в соответствии с требованиями безопасности [3] тепловая мощность реактора в установившемся в результате срабатывания обратных реактивностных



Р и с. 1. Проекция области самозащитенности в координатах $(\delta T_{вх}, \delta G)$, $\delta\rho = 0$



Р и с. 2. Проекция области самозащитенности в координатах $(\delta G, \delta\rho)$ при $\delta T_{вх} = 0$ и $(\delta T_{вх}, \delta\rho)$ при $\delta G = 0$

связей режиме $W_{yp} = 1,2 W_0$ (обозначен С), где W_0 — номинальная тепловая мощность. Рассматриваются $\delta\rho \in [0, \beta)$, где β — эффективная доля запаздывающих нейтронов. Верхняя граница интервала изменения ρ (обозначена D на рис. 2) определяется требованием детерминистического исключения разгона реактора на мгновенных нейтронах. Ситуации $\delta\rho < 0$ (срабатывание аварийной защиты и т.п.) не исследуются.

Анализ областей самозащищенности и обсуждение результатов. Для удобства анализа результатов пронумеруем вершины и некоторые точки областей на рис. 1, 2.

Как видно из рис. 2, $|\delta T_{вх}|$ и $|\delta G|$ максимальны при $\delta\rho = 0$ (точки 4—7). Таким образом, наложение аварийных процессов типа TOP WS (моделируются возмущением $\delta\rho > 0$) с любыми другими всегда усугубляет ситуацию. Если рассматривать интервал изменения реактивности $\delta\rho < 0$, то любые возмущения по G или $T_{вх}$ можно нейтрализовать отрицательным $\delta\rho$.

Следствием нейтрализации различных возмущений является достижение минимума $\delta T_{вх}$ при расходе теплоносителя $G = G^*$, отличном от единицы ($\delta G^* \neq 0$): $0 < G^* < 1$ (точка 1 на рис. 1), т.е. снижение $T_{вх}$ (аварийная ситуация типа OVC WS) компенсируется уменьшением расхода теплоносителя (LOF WS). Максимальное δG достигается при определенных $\delta T_{вх} = \delta T_{вх}^*$, также отличных от нуля ($\delta T_{вх}^* > 0$). В этом случае нейтрализуются процессы OVC WS и LOHS WS (точки 3, 3' на рис. 1). При добавлении аварийного режима TOP WS к рассмотренным ситуация качественно не изменяется, однако область самозащищенности сужается, что приводит к уменьшению максимально возможных $|\delta T_{вх}|$, если $\delta T_{вх} < 0$.

Максимально возможное $|\delta G|$ при $\delta G < 0$ достигается в аварийной ситуации LOF WS, причем добавление процессов OVC WS или TOP WS усугубляет аварийную ситуацию, а наложение процессов LOHS WS и LOF WS ее не изменяет. Добавление аварийной ситуации TOP WS к процессам (LOF+LOHS) WS и (OVC+LOHS) WS также не изменяет границ области самозащищенности. Максимальное δG ($\delta G \rightarrow +\infty$) реализуется при наложении ситуаций LOHS WS и OVC WS. Добавление к этим двум режимам процесса TOP WS не влияет на максимально возможное значение δG . Таким образом, возможна ситуация, когда при $G \rightarrow +\infty$ функционалы безопасности конечны и, более того, не превышают допустимых значений. (Не учитывался функционал по увеличению расхода теплоносителя через реактор, ограничение для которого не допускает всплытия ТВС.) Наложение аварийных режимов, вызванных снижением $T_{вх}$ и увеличением расхода теплоносителя (OVC WS), усугубляет ситуацию.

О нейтрализации или усугублении аварийных ситуаций можно судить по углу при вершине проекции области самозащищенности. (Вершинами являются точки кривой, ограничивающей область, где кривизна имеет максимум или минимум). Так, если угол при вершине тупой, то рассматриваемые возмущения усугубляют аварийную ситуацию (точки 8—11 на рис. 2). Наибольший эффект усугубления процессов реализуется вблизи развернутого угла (точка 8 на рис. 1). Если угол при вершине острый или область не ограничена, что можно интерпретировать как нулевое значение угла (точки 1, 3, 3', 4, 5, 7), возмущения нейтрализуются. Прямой угол при вершине означает, что наложения аварийных процессов не изменяют ситуацию, иначе говоря,

$\sum_{n=1}^N \delta\rho_n = \delta\rho_n$ (точки 6, 6' на рис. 1, 2). В этом случае максимальные функционалы

безопасности при наложении аварийных ситуаций определяются поведением реактора в одном из этих процессов.

Следствием этих выводов является возможность достижения максимальных возмущений $|\delta\rho|$, $|\delta G|$, $|\delta T_{вх}|$ в вершинах проекции области самозащищенности, где граница области образует острый угол. Если угол при вершине прямой, то решением

задачи о максимальных возмущениях $|\delta\rho|$, $|\delta G|$ или $|\delta T_{\text{вх}}|$ являются луч (неограниченный полуоткрытый интервал) или отрезок (ограниченный замкнутый интервал) — участок границы 2—3 на рис. 1, луч с вершиной вблизи точки 3' (асимптота к границе), отрезок 6—6'.

В табл. 1 приведены точки, где достигается максимальное или минимальное значение возмущений, в табл. 2 — точки, в которых реализуются наиболее опасные наложения аварийных ситуаций.

Т а б л и ц а 1. Нейтрализация аварийных процессов

Точка на рис. 1, 2	Нейтрализация аварийных ситуаций	Минимальное (максимальное) возмущение, которое может быть реализовано в данном случае
1	(OVC+LOF) WS	$\delta T_{\text{вх}} \rightarrow \min$
3, 3'	(OVC+LOHS) WS	$\delta T_{\text{вх}} \rightarrow \max$, $\delta G \rightarrow \max$
4	(OVC+TOP) WS	$\delta G \rightarrow \max$
5	(LOF+TOP) WS	$\delta G \rightarrow \min$
6, 6'	(LOHS+TOP) WS	$\delta T_{\text{вх}} \rightarrow \max$
7	(OVC+TOP) WS	$\delta T_{\text{вх}} \rightarrow \min$

Примечание. Точки 4—7 принадлежат границе области самозащитенности ($\delta\rho = 0$). Нейтрализация процессов OVC WS, LOF WS, LOHS WS и $\delta\rho < 0$ наблюдается левее этих точек (если рассматривать случай $\delta\rho < 0$)

Т а б л и ц а 2. Усугубление аварийных ситуаций

Точка на рис. 1, 2	Аварийные ситуации	Возмущения, инициирующие аварийные ситуации
8	OVC WS	$\delta G > 0$, $\delta T_{\text{вх}} < 0$
9	(OVC+TOP) WS	$\delta G > 0$, $\delta\rho > 0$
10	(LOF+TOP) WS	$\delta G < 0$, $\delta\rho > 0$
11	(OVC+TOP) WS	$\delta T_{\text{вх}} < 0$, $\delta\rho > 0$

Отметим, что подобные результаты были получены для быстрого реактора со смешанным оксидным топливом.

Основные выводы. На основе результатов исследований нейтрализации и усугубления аварийных ситуаций сделаны следующие выводы.

О нейтрализации или усугублении аварийных ситуаций, вызванных возмущениями $\delta\rho$, δG , $\delta T_{\text{вх}}$, можно судить по углу при вершине проекции области самозащитенности.

Утверждение 1.1. Если угол при вершине проекции области самозащитенности тупой, то возмущения усугубляют аварийную ситуацию.

Утверждение 1.2. Если угол при вершине проекции области самозащитенности острый или область не ограничена, то возмущения нейтрализуются.

Утверждение 1.3. Если угол при вершине проекции области самозащитенности прямой, то наложение аварийных процессов (возмущений) не изменяют ситуацию.

В последнем случае максимальное значение функционалов безопасности при наложении аварийных ситуаций определяется поведением реактора в одном из этих процессов.

Утверждение 2.1. Если есть такие, вообще говоря, не равные нулю значения изменения температуры теплоносителя на входе в активную зону, при которых изме-

нение расхода максимально, и/или такие не равные нулю значения изменения расхода, при которых изменение температуры теплоносителя на входе максимально, то такие возмущения по расходу и температуре теплоносителя на входе нейтрализуются.

Утверждение 2.2. Если область самозащищенности, представляющая собой область максимально допустимых изменений $|\delta\rho|$, $|\delta G|$ и $|\delta T_{\text{вх}}|$, при которых гарантировано сохранение работоспособности барьеров безопасности, ограничена, то всегда есть такие, вообще говоря, не равные нулю значения изменения расхода, при которых изменение температуры теплоносителя на входе в активную зону максимально. Иначе говоря, такие возмущения нейтрализуются.

Заключение. В заключение отметим, что в работе делается попытка с помощью достаточно простых математических моделей исследовать возможность нейтрализации и усугубления аварийных ситуаций типа ATWS при их наложении. Подобные исследования следует проводить как на этапе предварительных поисков в общем процессе проектирования быстрых реакторов нового поколения, так и на заключительных этапах для обоснования безопасности. Тем не менее некоторые практические выводы, сделанные на основе анализа результатов, могут быть полезны для безопасной эксплуатации современных АЭС с быстрыми реакторами.

Работа поддержана грантом по исследованиям в области энергетики и электротехники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wade D., Fujita E. Trends versus reactor size of passive reactivity shutdown and control performance. — Nucl. Sci. Engng, 1989, v. 103, p. 122—195.
2. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Методика анализа областей самозащищенности реакторных установок. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 1995, № 5, с. 24—30.
3. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89. — Атомная энергия, 1990, т. 69, вып. 6, с. 155—158.

Поступила в Редакцию 10.01.96

УДК 621.039.654.5

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КУМУЛЯТИВНЫХ СУММ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОТЕЧЕК ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Лазаревская И.Е., Морозов С.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ)

Быстрое обнаружение протечек парогенераторов натрия—вода актуально и сегодня. На базе современных ЭВМ с развитыми возможностями для оперативной обработки экспериментальных данных можно реализовать сложные, но эффективные алгоритмы последовательного обнаружения изменения свойств сигналов первичных измерительных преобразователей. Цель настоящей работы — показать возможность компьютерной индикации малых течей парогенераторов натрия—вода по сигналам штатных магнитных расходомеров на основе модифицированного алгоритма кумулятивных сумм.

Как известно, при внезапной разгерметизации трубок парогенератора модуляция проходного сечения контура в месте истечения продуктов реакции воды с натрием приводит к скачкообразному изменению расхода натрия («поршневой» эффект), затем появляются пузырьки водорода в контуре. Обычно магниторасходомерные методы учитывают поршневые эффекты, возникающие при больших (десятки граммов в секунду) течах воды. Предполагалось, что в случае сравнительно малых течей анализ сигналов магнитных расходомеров на флуктуационном уровне позволит до появления «пузырькового сигнала» выявить те изменения-предшественники, которые обусловлены порш-