

## АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ С БЛОКИРОВКОЙ ОТДЕЛЬНОЙ ТВС РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Власичев Г.Н.

*Нижегородский Государственный Технический Университет им.Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, e-mail: vlas@mts-nn.ru*

Выполнен анализ проектной аварии с блокировкой проходного сечения отдельной тепловыделяющей сборки быстрого реактора с натриевым теплоносителем. Получены времена плавления оболочки и топливного сердечника твэла с учетом выпаривания натрия, перемещения расплавленной оболочки, затвердевания ее материала на более холодных участках твэла и повторного плавления образующихся твердых корок. Получены времена плавления стенок чехлов ТВС в зависимости от различных параметров. Получена глубина проплавления конструкций под активной зоной тепловыделяющей массой из расплава топлива с остаточным уровнем тепловыделения при разной теплоотдаче к окружающим ТВС. Анализ показал, что проектный предел при данной аварии выполняется. Срабатывание аварийной защиты по сигналу системы контроля герметичности оболочек твэлов ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов.

Ключевые слова: безопасность реакторов БН, проектная авария, выкипание натрия, плавление твэлов, перемещение материалов, тепловыделяющая масса.

## ANALYSIS OF THE DESIGN-BASIS ACCIDENT WITH BLOCKAGE OF LIQUID METAL FAST REACTOR INDIVIDUAL FUEL ASSEMBLY

Vlasichev G.N.

*Nizhny Novgorod State Technical University im.R.E.Alekseeva, Nizhny Novgorod, e-mail: vlas@mts-nn.ru*

Analysis of the design-basis accident with blockage of Liquid Metal Fast Reactor individual assembly is executed. The melting times of pin cladding and fuel are received in view of evaporation of sodium, molten cladding relocation, freezing of its material on more cold pin sites and repeat frozen crust melting. The melting times of the wrapper tubes are received depending on various parameters. The depth of melting front for structures under the core of fuel melt heat-generating mass with a residual heat generation level is received for different factors of heat transfer to adjacent FAs. Analysis showed that design limit under this accident is executed. The emergency protection actuation by fuel failure detection system signal will limited the accident within one damaged FA – by design pins failure limit.

Keywords: BN reactors safety, design-basis accident, sodium boiling over, melting of fuel rods, material relocation, heat-generating mass.

Процесс развития проектной аварии с блокировкой проходного сечения отдельной ТВС при работе реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН) на мощности представляет интерес с точки зрения распространения повреждений на соседние ТВС и перемещения вниз расплавленных компонентов. Анализ распространения аварии в радиальном направлении важен для разработки в проекте реакторной установки мер по предотвращению повреждения тепловыделяющих элементов (твэлов) в объеме за пределами аварийной ТВС. Важны также последствия такой аварии для нижележащих конструкций – будет ли расплав удержан внутри аварийных ТВС или проплавит их до хвостовиков и выйдет на плиту напорной камеры, причинив повреждения и плите. Для предотвращения развития аварии в от-

дельной ТВС за ее пределы в активной зоне и соответственно перехода аварии в разряд за-проектных необходима своевременная остановка реактора средствами воздействия на реак-тивность (аварийной защитой). Чтобы избежать распространения аварии за пределы аварий-ной ТВС, реактор должен быть остановлен до достижения кипящего бассейна в этой сборке [6]. Для доказательства эффективности средств обнаружения аварий и аварийной защиты – доказательства своевременности срабатывания аварийной защиты необходим детальный анализ аварии, в результате которого должны быть определены временные параметры ее развития.

### **Цель исследования**

Целью анализа является обоснование эффективности третьего уровня глубокоэшелони-рованной защиты, связанного с предотвращением развития проектной аварии в запроектную [4] – распространения повреждения и расплавления твэлов от одной аварийной ТВС на окружающие ТВС активной зоны сверх проектного предела повреждения твэлов. Проектный предел повреждения твэлов для проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС для реак-тора БН состоит в разрушении твэлов аварийной ТВС с неперевышением пределов безопас-ной эксплуатации по повреждению твэлов во всем остальном объеме активной зоны.

### **Методика исследования**

Для численного моделирования процессов, необходимость рассмотрения которых возник-ает при анализе аварий с плавлением материалов активной зоны в быстрых реакторах, был разработан комплекс расчетных моделей [1]. Расчетные модели для анализа проектной ава-рии:

- модель разогрева твэла, плавления оболочки и топливного сердечника с приближен-ным учетом выпаривания натрия и с учетом перемещения расплавленной оболочки при пре-кращении расхода теплоносителя в ТВС быстрого реактора, реализованная в программах TRAMS-TWEL и MOTE [2];

- модель проплавления чехлов аварийной и окружающих ТВС расплавленным топливом при проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС быстрого реактора, реализованная в программе TRAMS-DUCT [3];

- модель опускного продвижения расплавленной тепловыделяющей массы из активной зоны в нижнюю часть корпуса быстрого реактора при авариях с плавлением ТВС в активной зоне, реализованная в программе TRAMS-FDOWN [8].

В результате расчетов по программе TRAMS-TWEL для ряда высотных участков опреде-ляются времена выпаривания натрия по высоте отдельного твэла, расплавления оболочки и топливного сердечника, полной или частичной блокировки межтвэльного пространства за-

твердевающим материалом, а также повторного расплавления слоя затвердевшего материала (твердой корки) за счет теплопереноса в радиальном направлении. Времена начала и окончания перемещения расплавленного материала поверх твердой оболочки твэла в рассчитываемых высотных участках выше области расплавления оболочки, начала такого перемещения ниже области расплавления и заполнения расплавом всего сечения ячейки в нижней части активной зоны определяются в результате расчетов аксиального перемещения расплавленного материала оболочки по программе MOTE. По данной программе определяются также время смены восходящего движения на нисходящее, длина проникновения расплавленного материала, возможно, в верхнюю и в нижнюю зоны воспроизводства до момента полной блокировки последней, а затем время образования и высота слоя из расплавленного материала оболочки над блокировкой каналов под активной зоной. Расчетная модель теплообмена в твэле с твердой коркой связана по итерационной схеме с моделью перемещения расплавленной оболочки. В результате расчетов по программе TRAMS-DUCT определяются времена полного проплавления либо глубина частичного проплавления стенок чехлов аварийной и соседней ТВС. В результате расчетов по программе TRAMS-FDOWN определяются глубина и время опускного продвижения расплавленной тепловыделяющей массы из активной зоны через нижнюю зону воспроизводства и последующие конструкции с учетом отвода тепла от тепловыделяющей массы в радиальном направлении к соседним неповрежденным ТВС.

### **Результаты исследования**

В результате расчетов по программе TRAMS-TWEL получено, что температура натрия достигает точки насыщения сначала в центре по высоте активной зоны примерно через 0,7 с после прекращения расхода в ТВС, далее зона кипения расширяется вверх и вниз. Расплавление оболочки твэла наступает первоначально в центре через 3,1 с после прекращения расхода.

Восходящее движение увлекаемого парами натрия, испаряющегося в нижней части активной зоны, жидкого материала оболочки начинается с момента ее расплавления на наиболее горячем участке. В момент 4,4 с происходит изменение направления движения расплава. При этом верхняя граница стальной пленки достигает высоты  $z = 78,6$  см, далеко не доходя до верха активной зоны. Следовательно, блокировок каналов для прохода теплоносителя затвердевающим расплавом оболочек в верхней части активной зоны и в области необогреваемого участка твэла не произойдет. При этом источники запаздывающих нейтронов будут выноситься к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва либо расплавления оболочек твэлов.

Нижняя граница движущейся стальной пленки начинает опережать границу зоны расплавления оболочки с высоты  $z \approx 13$  см. В момент 5,9 с жидкий материал достигает зоны воспроизводства и затвердевает. В результате затвердевания происходит полная закупорка проходного сечения в нижней зоне воспроизводства на глубину 1,8 см. Продолжающееся опускное движение расплава в активной зоне приводит ко времени 6,4 с после прекращения расхода к заливу сталью канала над блокировкой на высоту 29,4 см. Перемещение оболочки в данном случае завершается при частично расплавленном материале внутри топливного сердечника. В нижней части активной зоны образование твердой корки поверх твердой оболочки начинается с высоты  $z \approx 4$  см.

Плавление топливного сердечника в центральной плоскости активной зоны начинается в момент 5,4 с и заканчивается через 7,8 с после прекращения расхода. В момент 16,6 с топливо расплавляется до верха активной зоны.

Ко времени расплавления топлива в центральной области активной зоны на участке, составляющем примерно одну треть ее высоты, в области стального бассейна будет расплавлена лишь малая доля топлива. Следовательно, жидкое топливо из средней и верхней частей активной зоны будет собираться над стальным бассейном при преимущественно твердых пеньках топливных сердечников в нижней части активной зоны. При этом образуется конфигурация, при которой около двух третей топлива собирается в компактную массу в центральной части по высоте активной зоны, вносящую наибольший вклад в реактивность. Такое перемещение расплава может быть использовано для обнаружения аварии системой вычисления баланса реактивности.

Расчеты проплавления стенок чехлов аварийной и окружающих ТВС расплавом топлива проведены по программе TRAMS-DUCT. В результате расчетного анализа выявлены основные параметры, определяющие конечный результат и продолжительность плавления стенок чехлов. Получено, что с момента контакта начинается плавление стенки чехла аварийной ТВС и затвердевание расплавленного топлива у стенки. Через 0,9 с вскипает натрий в межпакетном зазоре. Это приводит к расплавлению стенки чехла аварийной ТВС. Расплавление соседней стенки произойдет при кризисе теплоотдачи к теплоносителю соседней ТВС. Плавление стенки чехла предотвращается срабатыванием системы аварийной защиты (АЗ) до начала ее плавления.

Время проплавления стенки чехла аварийной ТВС тонким неподвижным слоем топлива при сохранении прослойки из расплава стенки в месте плавления составит около 8 с, в случае вытекания расплава плавление стенки происходит быстрее – примерно за 5 с.

Расчеты, проведенные по двум схемам, показали, что время плавления стенок чехлов зависит от массы топлива у стенки и интенсивности теплоотдачи от расплавленного топлива к стенкам. Время проплавления стенки чехла аварийной ТВС первоначально большой неподвижной массой расплавленного топлива составит  $\sim 7$  с при сохранении прослойки из жидкой стали, а при ее вытекании –  $\sim 4$  с. Минимальное время проплавления стенки в соответствии со второй схемой составит  $\sim 5$  с при сохранении жидкой стали, а в случае полного ее оттока – всего  $\sim 3$  с.

Расчеты опускного продвижения тепловыделяющей массы в аварийной и окружающих ТВС выполнены по программе TRAMS-FDOWN. Рассматривается медленное продвижение при остаточном тепловыделении, при котором радиальное распространение прекратилось, т.е. предполагаемая конфигурация не может нарушиться. Расчеты показали значительное замедление продвижения тепловыделяющей массы в ограниченном числе ТВС по сравнению с перемещением в значительном числе ТВС, характеризующемся малой долей боковых потерь тепла. Получено, что в семи ТВС тепловыделяющая масса проплавляет лишь около  $1/3$  части зоны воспроизводства, после чего происходят прекращение движения и охлаждение расплава с сопутствующей конденсацией паров топлива из вышележащего парового объема. Для одной ТВС получено, что при принятых предпосылках тепловыделяющая масса практически не будет плавить нижележащие конструкции. Такой результат для случая одной ТВС качественно согласуется с результатами экспериментов серии VE+ программы SCARABEE [7], в которых не было движения расплава вниз после остановки реактора.

Выполненный анализ проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора БН показал, что проектный предел при данной аварии выполняется. Проектный предел повреждения твэлов для проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС для реактора БН состоит в разрушении твэлов аварийной ТВС с непревышением пределов безопасной эксплуатации по повреждению твэлов во всем остальном объеме активной зоны. Время срабатывания АЗ по сигналу системы контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) после выхода источников из твэлов в соответствии с оценками специалистов составит примерно 5–10 с [5]. Тогда время срабатывания АЗ после плавления оболочек в центральной плоскости активной зоны составит 8–13 с от момента исходного события аварии (рис. 1). В результате, топливо будет локализовано пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов. В маловероятном случае слабого сигнала системы КГО после плавления оболочек твэлов со свежим топливом произойдет срабатывание АЗ по несколько более позднему сигналу системы КГО после выноса источников при плавлении топлива. В случае проплавления стенки чехла аварийной ТВС топливо с остаточным тепловыделением затвердеет на стенке чехла

соседней ТВС. В результате, топливо также фактически будет локализовано пределами одной аварийной ТВС. Срабатывание АЗ остановит формирование бассейна расплавленного топлива в аварийной ТВС и, следовательно, проплавление стенок чехлов ТВС. Получение достаточно сильного сигнала системы КГО для срабатывания АЗ должно быть подтверждено экспериментально для штатных ТВС конкретного проекта реактора БН. Тепловыделяющая масса при аварии будет удержана внутри аварийной ТВС и в высотном направлении, не причинив повреждений нижележащим конструкциям, в частности плитам напорной камеры.

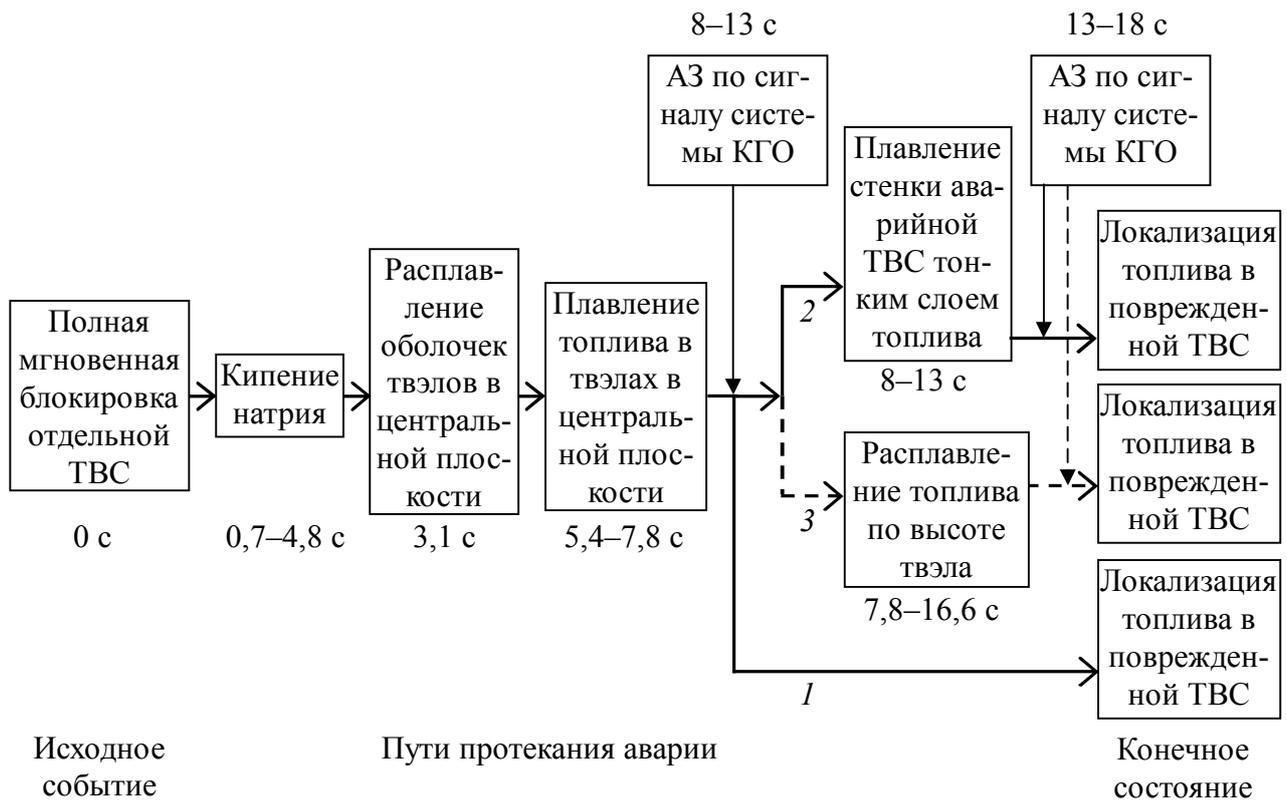


Рис. 1. Последовательность событий при проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС.

### Заключение

Выполнен анализ проектной аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора БН в обоснование эффективности его защиты. Анализ показал, что проектный предел при данной аварии выполняется. Срабатывание АЗ по сигналу системы КГО ограничит аварию пределами одной аварийной ТВС – проектным пределом повреждения твэлов.

### Список литературы

1. Власичев Г.Н., Комплекс программ расчета аварийных процессов с плавлением внутрикорпусных материалов быстрого реактора / Г.Н. Власичев // Атомная энергия. – 1994. – т. 76. – вып. 6. – с.459–465.

2. Власичев Г.Н., Расчетная модель расплавления твэла с учетом перемещения расплавленной оболочки в активной зоне реактора БН при запроектной аварии // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – № 3. – с.20–30.
3. Усынин Г.Б., Анализ условий ограничения области плавления материалов активной зоны РБН при максимальной проектной аварии / Г.Б. Усынин, Ю.И. Аношкин, Г.Н. Власичев, А.И. Кирюшин. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика и техника ядерных реакторов. – 1987. – вып. 2. – с.14–20.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97: НП-001-97 (ПНАЭ Г-1-011-97): введ. 01.07.98. // Атомная энергия. – 1997. – т. 83. – вып. 6. – с.469–497.
5. Швецов, Ю.Е. Расчетный анализ эффективности контроля повреждений твэлов с помощью секторной системы «КГО» / Ю.Е. Швецов // В кн.: Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах: Материалы Российской межотрасл. конф. «Теплофизика-2005». т. 1. Тез. докл. – Обнинск, 16–18 ноября 2005 г. – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2005. – с.44–45.
6. Kayser, G. Main SCARABEE Lessons and Most Likely Issue of the Sub-assembly Blockage Accident / G. Kayser, G. Berthoud, K. Schleisiek et al. – Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3–7, 1994. – Obninsk, 1994. – Vol. 2. – p.2/146–2/155.
7. Papin, J. The SCARABEE Total Blockages Test Series: Synthesis of the Interpretation / J. Papin, J. Mac dougall, R. Sesny [et al.] // Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet., Snowbird, 12–16 August 1990. – ANS, 1990. – Vol. 1. – p.367–376.
8. Vlasichev, G.N. Calculation Model of Molten Materials Movement Following LMFR Fuel Assemblies Meltdown / G.N. Vlasichev, A.I. Kiryushin, N.G. Kuzavkov // In: Eighth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto Japan, September 30 – October 4, 1997. – p.1365–1371.

**Рецензенты:**

Сухарев Ю.П., д.т.н., главный специалист, Открытое Акционерное Общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им.И.И.Африкантова» (ОАО «ОКБМ Африкантов»), г. Н. Новгород;

Радионов А.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой общей и ядерной физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева», г. Н.Новгород.