

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В РЕАКТОРАХ ТИПА БН БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ С НЕТРАДИЦИОННОЙ ФОРМОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В.С. Окунев

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва*



Переход к нетрадиционной форме активной зоны (ленточной или кольцевой) быстрого реактора позволяет достичь оптимальных значений пустотного эффекта реактивности, плотностного и доплеровского коэффициентов реактивности. Представлены результаты анализа аварийных ситуаций, сопровождающихся отказом аварийной защиты, для реактора типа БН-1600 с кольцевой активной зоной. Рассмотрены компоновки со смешанным оксидным и смешанным моноксидным топливом.

ВВЕДЕНИЕ

Переход к нетрадиционной (кольцевой или ленточной) форме активной зоны быстрого реактора позволяет увеличивать мощность реактора, сохраняя пустотный и плотностной эффекты и коэффициенты реактивности на уровне, соответствующем реактору малой мощности, т.е. на безопасном уровне, что способствует повышению внутренней самозащищенности от аварий с осушением активной зоны и ухудшением условий теплоотвода. Но есть одна проблема: при увеличении мощности и переходе к нетрадиционной форме активной зоны доплеровский коэффициент реактивности также сохраняется на уровне, приблизительно соответствующем реактору малой мощности, что не всегда желательно.

Рассмотрим особенности развития аварийных ситуаций типа ATWS (сопровождающихся отказом аварийной защиты) и роль доплеровского коэффициента реактивности в обеспечении безопасности реакторов типа БН-1600 со смешанным оксидным и моноксидным топливом с кольцевой активной зоной с точки зрения целесообразности перехода к нетрадиционным формам активной зоны.

НЕТРАДИЦИОННАЯ ФОРМА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Основные факторы опасности, внутренне присущие реакторам на быстрых нейтронах - возможность реализации положительного пустотного эффекта реактивности (ПЭР) и потенциальная опасность реактивных аварий с разгоном на мгновенных нейтронах [1] (аварийные ситуации с нарушением условий теплообмена типичны для реакторов всех типов). В реакторах типа БН большой мощности с традиционной ком-

поновкой ПЭР положителен и при осушении центральной части активной зоны в несколько раз превышает эффективную долю запаздывающих нейтронов. Потенциальная опасность разгона связана с малым временем жизни мгновенных нейтронов при отсутствии замедлителя и относительно малой долей запаздывающих нейтронов при наличии плутония в активной зоне.

Известны способы минимизации факторов опасности, внутренне присущие реакторам на быстрых нейтронах [2-4].

Отказ от традиционной формы активной зоны быстрых реакторов большой мощности позволяет разрешить конфликт между стремлением увеличить мощность энергоблока и обеспечить его безопасность. Концепция быстрого реактора с активной зоной в форме цилиндрической трубы («кольцевая» активная зона) и натриевой полостью, расположенной непосредственно над активной зоной, предложена в начале 60-х годов А.Чалмерсом (см. [5], а также ссылки к этой монографии). Такая компоновка позволяет минимизировать ПЭР, в том числе локальный, реализующийся при осушении части активной зоны. (Специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ впервые предложено реализовать идею натриевой полости в проекте БН-800 [4, 6]. В проектах быстрых реакторов со свинцовым охлаждением также предусмотрена полость над активной зоной). В конце XX столетия как альтернатива кольцевой компоновке В.В. Орловым для реактора БРЕСТ большой мощности была предложена активная зона в форме вытянутого прямоугольного параллелепипеда с двумя полуцилиндрами на торцах со стороны малых граней - «ленточная» активная зона).

Увеличение утечки нейтронов из активной зоны способствует не только минимизации ПЭР, но и снижению плотностной составляющей температурного коэффициента реактивности (по теплоносителю), которая как и ПЭР, обычно положительна в центральной области цилиндрической активной зоны быстрого реактора средней и большой мощности. Снижение этой составляющей ведет к повышению самозащищенности реактора от тяжелых аварий (типа ATWS) и, в первую очередь, от аварий с ухудшением условий теплоотвода (LOF WS - нарушение принудительной циркуляции теплоносителя первого контура с отказом аварийной защиты, LOHS WS - нарушение теплоотвода ко второму контуру с отказом аварийной защиты).

Кроме того, в ряде случаев необходимо ограничить отрицательный доплеровский коэффициент реактивности: в быстрых реакторах средней и большой мощности при относительно большой разности температур топлива и теплоносителя в номинальном режиме (что характерно при использовании оксидного топлива) роль доплеровского коэффициента в аварийных ситуациях типа LOF (LOF WS) негативна [5, 7]. Снижению по абсолютному значению отрицательного доплеровского коэффициента реактивности также способствует переход к кольцевой или ленточной форме активной зоны. Уменьшение утечки нейтронов при увеличении мощности (объема) реактора с цилиндрической активной зоной приводит к увеличению доли нейтронов относительно низких энергий: нейтроны, не покинувшие активную зону в результате утечки продолжают замедляться, рассеиваясь на ядрах. Увеличение доли нейтронов относительно низких энергий, соответствующих резонансам в энергетической зависимости сечения радиационного захвата на ядрах ^{238}U , приводит к повышению по абсолютному значению отрицательного доплеровского коэффициента реактивности. Характерные значения коэффициентов чувствительности доплеровского коэффициента к тепловой мощности реактора типа БН с оксидным топливом и цилиндрической активной зоной лежат в диапазоне $(-4,6 \dots -1,3) \cdot 10^{-9} \text{ МВт/т/}^{-1} \text{ К}^{-1}$. (Все расчеты, представленные в статье, проводились с помощью оптимизационного комплекса DRACON-M и программ FRISS [7]. Модель позволяет рассматривать многозонные быстрые реакторы в двумерной цилиндрической геометрии. Распределения нейтронов

и ценностей нейтронов определяются с использованием 26-групповой системы констант в диффузионном приближении с использованием идей итерационно-синтетических методов. Аварийные процессы - программа FRISS - описываются в приближении точечной нейтронной кинетики с учетом обратной связи по средним температурам топлива и теплоносителя. Оптимизационная задача решается с помощью метода последовательной линеаризации [8]. Программа FRISS работает в составе оптимизационного комплекса DRACON-М или автономно). Необходимо отметить, что эффект увеличения по абсолютному значению отрицательного доплеровского коэффициента при увеличении мощности может быть замечен и в реакторах с относительно жестким спектром (например, при использовании мононитридного топлива и свинцового теплоносителя).

Роль доплеровского коэффициента реактивности в быстрых реакторах средней и большой мощности (при большой разности температур топлива и теплоносителя в номинальном режиме) в аварийных ситуациях TOP WS (ситуация, инициированная вводом положительной реактивности при несрабатывании аварийной защиты) и LOF WS противоположна: большой по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности приводит к усугублению аварийных ситуаций типа LOF WS и к повышению самозащищенности от реактивных аварий. Таким образом, оптимизация компоновки при условии обеспечения внутренней самозащищенности от аварий LOF WS и TOP WS носит конфликтный характер. Как правило, в реакторах типа БН-800 достаточно легко обеспечить внутреннюю самозащищенность от аварий типа TOP WS при вводе реактивности, меньшей доли запаздывающих нейтронов: в такой ситуации температура натрия и оболочек твэлов увеличивается не так сильно, как температура топлива и за счет оптимального выбора параметров компоновки можно сохранить температурный запас до плавления топлива и значительный запас по температурам теплоносителя и оболочек [5]. Самозащищенности от аварий типа LOF WS добиться труднее: это требует и оптимизации параметров компоновки, и повышения доли естественной циркуляции, и увеличения времени выбега главных циркуляционных насосов при их обесточивании. Снижая по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности, можно несущественно ухудшить внутреннюю самозащищенность от реактивных аварий (TOP WS), одновременно повысив самозащищенность от аварий типа LOF WS. С другой стороны, при этом может получиться, что практически незаметное повышение самозащищенности от аварий типа LOF WS приведет к заметному ухудшению самозащищенности от реактивных аварий [9].

Итак, при нетрадиционной (кольцевой или ленточной) форме активной зоны быстрого реактора можно увеличивать мощность реактора, сохраняя утечку нейтронов на уровне, характерном для реактора малой мощности и, следовательно, обеспечить независимость (или крайне слабую зависимость) ПЭР, плотностного и доплеровского коэффициентов реактивности от мощности (объема) реактора. В результате, значительно увеличивая мощность реактора, можно сохранить эти эффекты и коэффициенты реактивности на уровне, соответствующем реактору малой мощности, т.е. на безопасном уровне: отрицательные или близкие к нулю локальный ПЭР и плотностной коэффициент, небольшой по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности.

КОМПОНОВКА РЕАКТОРА ТИПА БН-1600 С КОЛЬЦЕВОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

Рассматриваются две компоновки быстрого реактора-размножителя типа БН-1600 со смешанным оксидным (MOX) и смешанным мононитридным (MN) топливом. Схема

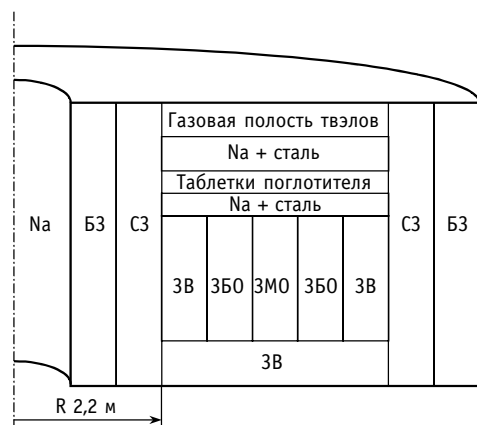


Рис. 1. Схема компоновки

компоновки представлена на рис. 1. Для обоих вариантов полость для сбора газообразных продуктов деления размещена в верхней части (в отличие от известного проекта РУ БН-800 с МОХ-топливом [4]). Активная зона реактора состоит из трех зон с топливом разного обогащения: зоны малого обогащения (ЗМО на рис. 1), которая окружена двумя зонами большого обогащения (ЗВО). Используются гексагональные бесчехловые тепловыделяющие сборки с центральным каналом (трубой) пассивной аварийной защиты (по аналогии с БРЕСТ-ОД-300). Активную зону окружают внутренняя и внешняя

боковая зоны воспроизводства, а также нижняя торцевая зона воспроизводства (ЗВ). По аналогии с проектами БРЕСТ-ОД-300 и БН-800 с целью минимизации ПЭР над активной зоной расположена полость. В верхней части твэлов расположены таблетки поглотителя. С внешней и внутренней стороны кольцевая активная зона и зоны воспроизводства окружены сборками стальной защиты (СЗ), за внешним «кольцом» стальной защиты расположены сборки борной защиты (БЗ). Внутренние сборки стальной защиты с «холостыми» твэлами важны при осушении центральной части реактора и способствуют снижению ПЭР, в том числе локального). Сборки борной защиты можно разместить и с внутренней стороны внутреннего кольца стальной защиты. Это способствует минимизации ПЭР. В центре реактора расположена полость, заполненная жидким натрием (рис. 1).

Компоновки получены при решении задачи минимизации ПЭР, который реализуется при осушении центральной части активной зоны (ЗМО) при условии выполне-

Таблица 1

Компоновка реактора

Параметр	БН-1600-МОХ	БН-1600-МН
Радиус центральной полости, включая сборки стальной и борной защиты (рис. 1), м	2,20	
Высота топливного столба твэлов активной зоны, м	0,954	0,750
Радиальные размеры (толщина) активной зоны, м:		
внутренняя ЗВО	0,167	0,325
ЗМО	0,237	0,317
Внешняя ЗВО	0,167	0,325
Толщина ЗВ (внутренняя + внешняя), м	0,475 + 0,475	
Толщина торцевой ЗВ (нижняя + верхняя), м	0,45 + 0,45	
Диаметр топливной таблетки в сборках активной зоны (ЗВО / ЗМО), мм	5,315 / 5,295	7,253 / 7,253
Толщина оболочки твэлов активной зоны, мм	0,4	
Относительный шаг решетки твэлов в ЗВО и ЗМО	1,176 / 1,178	1,209 / 1,206
Обогащение топлива (по ^{235}U) в ЗМО и ЗВО, %	15,0 / 19,9	13,0 / 14,0
Доплеровский коэффициент реактивности, $10^5 \Delta k / k$	-1,39	-0,92
Температура натрия на входе в активную зону, К	630	

ния ограничений для ряда функционалов, характеризующих номинальный (функционалы надежности) и аварийные режимы типа ATWS (функционалы безопасности), в том числе при условии неположительности ПЭР, реализующегося при осушении активной зоны.

В компоновке с нитридным топливом учитывалось ограничение $K_{BA} \approx 1$. Максимальные линейные нагрузки не превышают 450 Вт/см для обеих компоновок (ограничение не активно). Для полученных компоновок локальный ПЭР (при осушении ЗМО) меньше эффективной доли запаздывающих нейтронов.

В табл. 1 представлены основные характеристики компоновок реакторов типа БН-1600 с кольцевой активной зоной.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В РЕАКТОРЕ С МОХ-ТОПЛИВОМ

Временная зависимость температур, мощности и расхода натрия для реактора типа БН-1600 с МОХ-топливом в аварийной ситуации LOF WS представлена на рис. 2 (а,б). Постулируется одновременное обесточивание всех насосов первого контура при несрабатывании аварийной защиты. Для исключения кипения натрия при малой доле естественной циркуляции (около 6%) необходимо оснастить насосы высокоинерционными маховиками (увеличить время t_n выбега насосов до 60 с, как следует из рис. 2в) или предусмотреть возможность ввода отрицательной реактивности на пассивных принципах (например, при уменьшении расхода теплоносителя, как это предусмотрено в проектах РУ БРЕСТ). Скачок температур приблизительно на 80-й секунде процесса LOF WS, связанный с поступлением «горячего» натрия на вход в активную

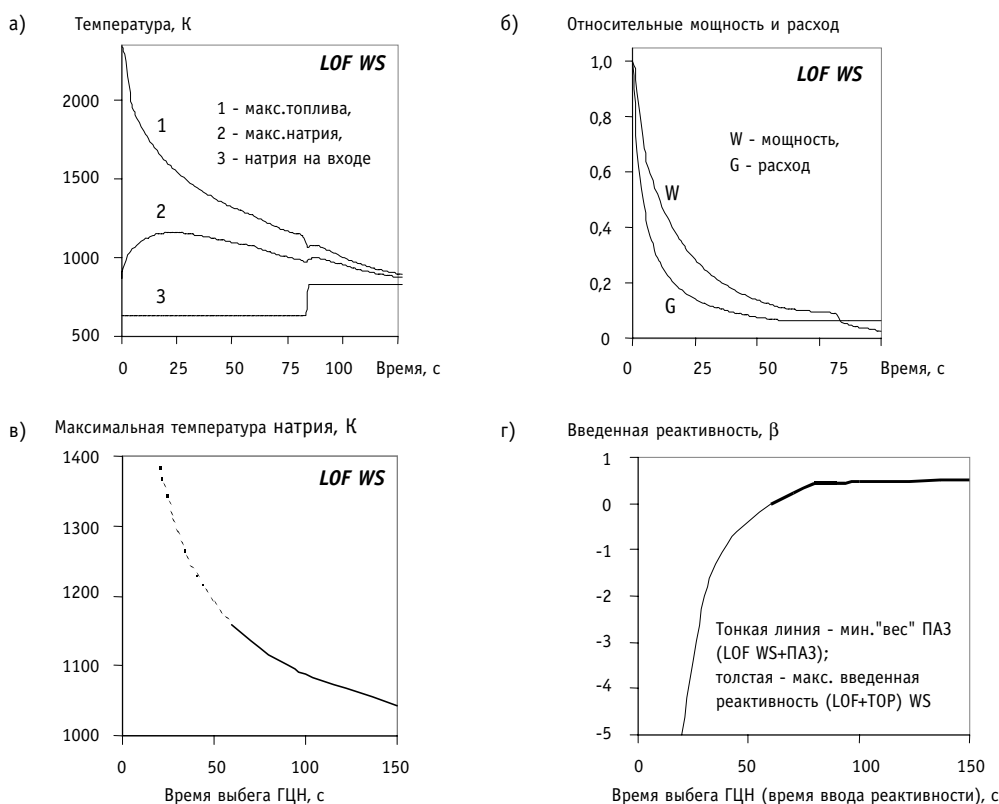


Рис. 2. Аварийные ситуации в реакторе с МОХ-топливом

зону после прохождения по первому контуру (при переходе к режиму естественной циркуляции), не представляет опасности: отрицательная обратная связь по расширению опорного коллектора нейтрализует это возмущение по температуре натрия. Второй максимум температуры натрия, связанный с поступлением «горячего» теплоносителя на вход (увеличению T_{BX}), значительно меньше первого максимума, связанного с уменьшением расхода. Таким образом, изменением T_{BX} при анализе аварийного режима LOF WS можно пренебречь.

Реактивный «вес» пассивных систем защиты в зависимости от времени выбега насосов (при $t_H < 60$ с) можно определить по данным рис. 2з (тонкая линия). Предполагается, что отрицательная реактивность вводится одновременно с уменьшением расхода («поплавок» из поглощающего материала тонет в активной зоне). При больших временах выбега в пассивных системах защиты нет необходимости и реактор обладает свойством внутренней самозащитности при одновременном наложении аварийных режимов (LOF + TOP) WS. При этом максимально введенная положи-

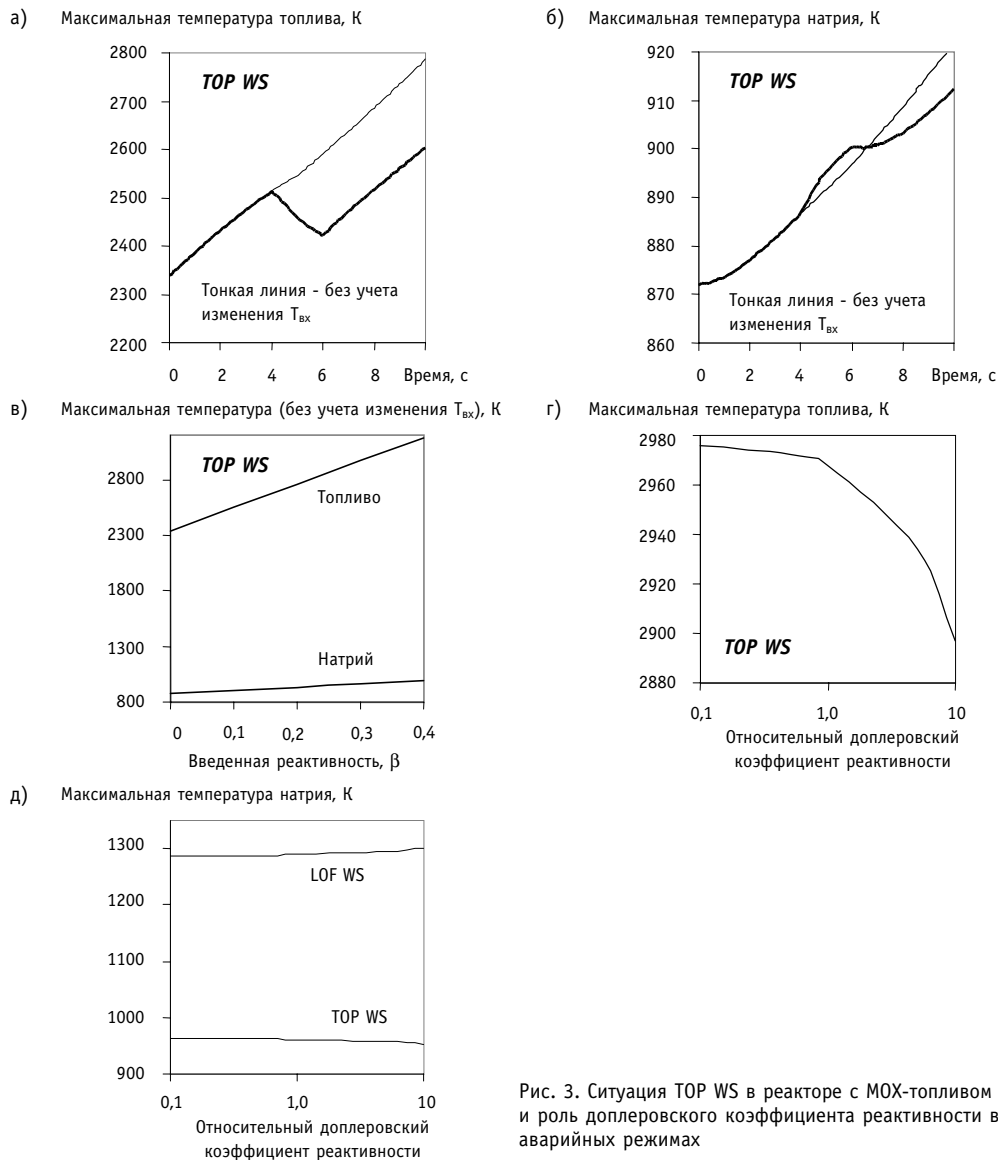


Рис. 3. Ситуация TOP WS в реакторе с MOX-топливом и роль доплеровского коэффициента реактивности в аварийных режимах

тельная реактивность, при которой не происходит кипения натрия, разрушения оболочек твэлов и имеется температурный запас до плавления топлива, может быть определена на основе рис. 2г (толстая линия).

Аварийную ситуацию TOP WS и роль доплеровского коэффициента реактивности в реакторе с MOX-топливом иллюстрирует рис. 3 (исследования проводились в приближении точечной нейтронной кинетики и носят оценочный характер). На рис. 3 (а, б) представлена временная зависимость температур в аварийной ситуации TOP WS при вводе положительной реактивности $0,3\beta$ за 10 с. Поступление «горячего» натрия на вход в активную зону происходит намного раньше, чем в режиме LOF WS (т.к. расход натрия не изменяется и время транспорта по контуру мало). Расширение опорного коллектора и, как следствие, ввод отрицательной реактивности приводит к нейтрализации повышения температуры теплоносителя и уменьшению максимальных температур топлива, натрия и оболочек твэлов (толстая линия на рис. 3а, 3б). Таким образом, консервативная оценка максимальных температур в аварийной ситуации типа TOP WS может быть получена в предположении $T_{ex} = const$. Максимальное значение температуры топлива в ситуации TOP WS достигается в установившемся (в результате действия обратных реактивностных связей) режиме. Ввод реактивности более $0,4\beta$ быстрее, чем за 4 с при несрабатывании аварийной защиты и отсутствии пассивных систем защиты приводит к плавлению топлива (при большем времени ввода реактивности максимум температуры топлива достигается в установившемся режиме и уже не зависит от времени ввода реактивности). Важно отметить, что процессы TOP WS и LOF WS нейтрализуют друг друга по температуре топлива (в процессе TOP WS максимальная температура топлива увеличивается, в LOF WS - уменьшается). В результате при наложении процессов (LOF + TOP) WS можно ввести большую положительную реактивность, чем при постоянном (номинальном) расходе, т.е. при TOP WS.

Влияние доплеровского коэффициента реактивности на максимальные температуры в аварийных режимах TOP WS и LOF WS иллюстрирует рис. 3 (г, д). Очевидно, что доплеровский коэффициент оказывает значительно большее влияние на температуру топлива, чем натрия. Чувствительность максимальной температуры натрия к доплеровскому коэффициенту реактивности мала (см. рис. 3д). Следует также отметить нелинейность коэффициентов чувствительности: при уменьшении по абсолютному значению доплеровского коэффициента температуры изменяются на гораздо меньшее значение, чем при его увеличении. Это характерно и для температуры топлива, и для температуры натрия (оболочек твэлов), хотя наиболее ярко выражено для температуры топлива (см. рис. 3г). В ситуации LOF WS максимальная температура топлива уменьшается со временем и основную роль в обеспечении безопасности реактора определяет возможность ограничения температуры теплоносителя. Но даже при десятикратном увеличении доплеровского коэффициента по модулю, максимальная температура натрия увеличивается лишь на 12 К (рис. 3д). При этом максимальная температура топлива в режиме TOP WS уменьшается приблизительно на 70 К (рис. 3г), т.е. в целом для повышения безопасности реактора увеличение по абсолютному значению отрицательного доплеровского коэффициента играет благоприятную роль и переход к кольцевой форме активной зоны с этой точки зрения нецелесообразен.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В РЕАКТОРЕ С MN-ТОПЛИВОМ

Компоновка реактора с мононитридным топливом получена в результате минимизации ПЭР с ограничениями для функционалов надежности и безопасности, в том числе функционалов, характеризующих аварийные ситуации LOF WS (при времени

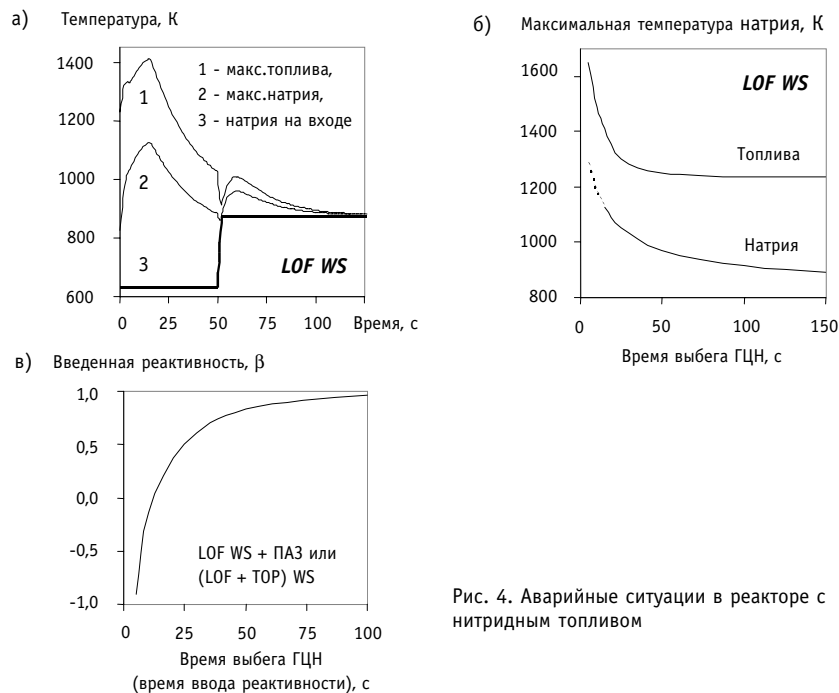


Рис. 4. Аварийные ситуации в реакторе с нитридным топливом

выбега насосов 15 с) и TOP WS (при вводе реактивности $0,9\beta$ за 10 с). Для обеих компоновок выполнены ограничения: ПЭР (при осушении реактора) ≤ 0 , ПЭР (при осушении ЗМО) $< \beta$, где β - эффективная доля запаздывающих нейтронов.

В реакторах с более плотным, чем оксид топливом (мононитридное, монокарбидное, металлическое) при относительно небольшой разности температур топлива и теплоносителя в номинальном режиме ситуация противоположна. Температура топлива увеличивается в аварийном режиме LOF WS (рис. 4). Для уменьшения максимальной температуры топлива в режимах LOF WS и TOP WS необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности. Таким образом, переход к нетрадиционной форме активной зоны благоприятно сказывается на роли доплеровского коэффициента в аварийных ситуациях. Однако для рассматриваемой компоновки это влияние не существенно: коэффициенты чувствительности максимальных температур к доплеровскому коэффициенту реактивности малы (на фоне прочих составляющих обратных связей доплер-эффект практически не влияет на развитие аварийной ситуации LOF WS).

При $t_n < 12$ с для обеспечения внутренней самозащитности от аварий типа LOF WS необходимы пассивные системы защиты, при $t_n > 12$ с реактор безопасен при наложении ситуаций (LOF + TOP) WS (см. рис. 4в). Наложение (LOF + TOP) WS с точки зрения увеличения температуры топлива более опасно, чем каждый из этих режимов: в отличие от реактора с MOX-топливом режимы усугубляют, а не нейтрализуют друг друга.

Увеличение по абсолютному значению отрицательного доплеровского коэффициента (переход к цилиндрической форме активной зоны) даже в 10 раз (гипотетический случай) приводит к уменьшению максимальной температуры топлива всего лишь на 20 К в аварийной ситуации TOP WS, инициированной, например, вводом реактивности $0,3\beta$ за 10 с. В аварийной ситуации LOF WS при одновременном обесточивании всех насосов первого контура, максимальные температуры практически не изменяются при гипотетическом увеличении доплеровского коэффициента в 10 раз.

Таблица 2

Максимальные температуры в аварийных ситуациях типа ATWS

Параметр	БН-1600-MOX	БН-1600-MN
Аварийный режим LOF WS ($t_n = 60$ с):		
макс.температура топлива, К	Уменьшается со временем	1246 (повышается несущественно)
макс.температура натрия, К	1156*	953
Аварийный режим LOF WS ($t_n = 15$ с):		
макс.температура топлива, К	—	1445**
макс.температура натрия, К	Кипение	1127
Аварийный режим TOP WS (ввод 0,3 β за 10 с):		
макс.температура топлива, К	2968	1566
макс.температура натрия, К	961	935
Аварийный режим OVC WS (увеличение расхода в 1,2 раза за 10 с):		
макс.температура топлива, К	2533	1294
Аварийный режим OVC WS (подключение «холодной» резервной петли: уменьшение $T_{вх}$ на 30 К за 10 с):		
макс.температура топлива, К	2872	1278
Одновременное наложение (LOF + TOP + LOHS) WS ($t_n = 15$ с, ввод 0,3 β за 10 с, поступление на вход натрия, нагретого до температуры выхода в рабочем режиме):		
макс.температура топлива, К	—	1322**
макс.температура натрия, К	Кипение	1122

Примечания: * соответствует началу кипения натрия; аварийный режим LOHS WS вследствие отрицательной обратной связи по расширению опорного коллектора не представляет опасности; максимумы температур достигаются во внутренней ЗБО, за исключением случая, отмеченного двумя звездочками (**).

Роль доплеровского коэффициента в последнем случае не существенна на фоне меньшего плотностного коэффициента реактивности и большой отрицательной обратной связи при расширении опорного коллектора.

Значения максимальных температур в аварийных ситуациях для реакторов типа БН-1600 с оксидным и нитридным топливом представлены в табл. 2. Для удобства сравнения вариантов рассматривались одинаковые возмущения, инициирующие аварийные режимы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на возможность влияния на доплеровский коэффициент реактивности при переходе к кольцевой активной зоне реактора типа БН-1600, коэффициенты чувствительности функционалов безопасности, характеризующих аварийные режим LOF WS, к доплеровскому коэффициенту невелики даже при использовании оксидного топлива. При использовании моноснитридного топлива в БН-1600 уменьшение по абсолютному значению доплеровского коэффициента при переходе к кольцевой компоновке практически не приводит к заметному ухудшению самозащищенности от аварий типа LOF WS и TOP WS.

Таким образом, значение и роль доплеровского коэффициент реактивности не может быть определяющей при выборе формы активной зоны быстрого реактора, а предпочтительность нетрадиционных компоновок по безопасности наиболее ярко проявляется за счет возможности минимизации пустотного и плотностного эффектов и коэффициентов реактивности.

Литература

1. Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. и др. Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа)//Атомная энергия. - 1992. - Т. 72. - Вып. 4. - С. 317-329.
2. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах/Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. БРЕСТ-ОД-300/Под ред. Е.О. Адамова, В.В. Орлова. – М.: Изд-во ФГУП НИКИЭТ им. Н.А.Доллежалева, 2001.
4. Status of Liquid Metal Cooled Fast Reactor Technology / IAEA, Vienna, 1999. IAEA-TECDOC-1083 (Chapter 9.3).
5. Хаммел Г., Окрент Д. Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах/Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1975.
6. Матвеев В.И., Черный В.А., Чебесков А.Н. и др. Концепция активной зоны быстрого энергетического реактора типа БН-800 с нулевым натриевым пустотным эффектом реактивности/Кн.: Внутренняя безопасность ядерно-энергетических установок: Тез. докл. VII Всесоюзного семинара по проблемам физики реакторов. (Москва, 3-7 сентября 1991 г.) - М.: ЦНИИ атоминформ, 1991. - С.53-55.
7. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. - М.: МИФИ, 1999.
8. Хромов В.В., Кузьмин А.М., Орлов В.В. Метод последовательной линеаризации в задачах оптимизации реакторов на быстрых нейтронах. - М.: Атомиздат, 1978.
9. Окунев В.С. О роли доплеровского коэффициента реактивности в обеспечении безопасности реакторов на быстрых нейтронах/Сб.: Физические проблемы эффективного и безопасного использования ядерных материалов: Материалы XII семинара по проблемам физики реакторов. (Москва, 2-6 сентября 2002 г.). - М.: МИФИ, 2002. - С. 171-173.

Поступила в редакцию 20.04.2003

УДК 621.039.54

Mathematical Equipment for Flow Rate Identification in the Fuel Channels of RBMK-Reactor Based on Nitrogen Activity Data \ A.M. Zagrebayev, N.V. Ovsyannikova, A.Y. Artemiev, N.I. Mironov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 7 titles.

A mathematical model of the coolant activation by fast neutrons in the fuel channels of RBMK reactor and possibilities of its application to flow rate identification during operating at nominal and low power levels as well as to interpreting active and passive experiments on flow rate identification are described. A flow rate restoring algorithm is considered based on experimental data on nitrogen activity of the coolant provided by fuel elements covers intactness control system (SKGO), reactor status files and the mathematical model of coolant activation. The results of coolant flow rate restoring using experimental data from Kurskaya and Ignalinskaya Atomic Power Stations with the help of proposed mathematical equipment are given.

УДК 621.039.52

Peculiarities of Realization of the Abnormal Events in Large Power BN-type Reactors with Non-traditional Form of Core \ V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 10 pages, 4 illustrations, 2 tables. – References, 9 titles.

The non-traditional form (ring or band) of the LMFR's core can be provided the optimal values of the void reactivity effect, density reactivity factor and Doppler-effect. The analysis of anticipated transients without scram in the MOX-fuelled and MN-fuelled BN-1600-type LMFRs with ring-shaped core are presented.

УДК 539.1.07+621.039.516

The Analysis of Possibilities to Use Single-Type Hardware and Methodology for Real Time Monitoring of Nuclear Fuel and Nuclear Materials Condition \ O.V. Maslov, M.V. Maximov, S.G. Oleynik; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 11 pages, 6 illustrations, 1 table. – References, 26 titles.

There is proved a need for real time monitoring of nuclear fuel and nuclear materials condition. The fundamental principle of the nuclear fuel monitoring system is measuring spectra of a spent fuel assembly g-irradiation. Based on over 200 measurements, a procedure for real time monitoring of burnout in spent fuel assemblies in the course of handling was proposed. Also, this article demonstrates a possibility to monitor by applying a measuring system based on CdZnTe-detectors to fresh nuclear fuel. The provision of priority systems with digital spectrometers improves the measurement quality. The use of CdZnTe-detectors allows to monitor the spent nuclear fuel burnout and enrich fresh nuclear fuel in real time during handling operations.

УДК 621.039.73

Some Features of Burn-up of Curium Fraction from Minor Actinides in Neutron Field \ A.E. Sintsov, V.A. Apse, A.N. Shmelev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 9 pages, 9 illustrations, 2 tables. – References, 14 titles.

Some neutronic features of curium minor actinides fraction burn-up in neutron field of nuclear reactors are analysed. It is demonstrated that fuel composition containing a mixture of curium isotopes can become critical with neutron multiplying properties substantially better than those of traditional uranium dioxide UOX-fuel. The results obtained in numerical analyses of curium oxide Cm_2O_3 -fuel burn-up in different neutron spectra are presented. Two mathematical models are applied: cell of VVER-type reactor and cell of micro particle fuel of HTGR-type reactor. It is demonstrated that rather high fuel burn-up can be achieved for one irradiation cycle. There are considered the specific features of curium-based fuel management related with intense heat generation and helium accumulation in α -decays.