

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПБЯ РУ АЭС К ПЛОТНОСТНОЙ КОМПОНЕНТЕ РЕАКТИВНОСТИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ

А.В. Данилычев, Д.Г. Елистратов, В.И. Матвеев

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Наиболее обобщающее требование ОПБ-88/89 ко всем эффектам реактивности расширено в ПБЯ РУ АЭС дополнительным ограничивающим требованием отрицательности натриевого плотностного коэффициента реактивности. При анализе определяющих аварий не обнаружена явно выраженной связи их последствий с данным дополнительным требованием. Показано, что при соблюдении проектантом основных требований ОПБ-88/ в сочетании с правильным подбором взаимосвязи всех остальных компонент реактивности и учетом теплофизических свойств материалов активной зоны дополнительное требование (ПБЯ РУ АЭС) может считаться излишним.

ВВЕДЕНИЕ

Нормативные документы, определяющие условия лицензирования АЭС с быстрыми реакторами, накладывают ряд жестких ограничений на коэффициенты и эффекты реактивности, присущие активной зоне. Наиболее обобщающим и, следовательно, наиболее полным является требование ОПБ-88/89, по которому эффекты реактивности, включая вводимые органами СУЗ, не должны в эксплуатационных и аварийных режимах вызывать неуправляемого роста энерговыделения, приводящего к превышению проектного предела повреждений твэл [1]. Несмотря на то, что это требование можно считать основным и достаточным, в ПБЯ РУ АЭС – 89 вводится дополнительный ограничивающий норматив: **«коэффициенты реактивности по температуре и удельному объему теплоносителя ... должны быть отрицательными...»**[2]. Соответственно с этим требованием, в основу ограничений на эффекты реактивности, связанные с безопасностью, в БН заложено условие достижения нулевого или отрицательного значения натриевого пустотного эффекта (НПЭР) и компоненты реактивности, связанной с изменением плотности и температуры натрия. Однако в такой постановке отсутствует как определенность в непосредственной величине отрицательности плотностной компоненты (0,1, 10, 100 ¢ и т.д.), так и не учитывается ее связь с другими составляющими обратной связи по реактивности.

Это дополнительное требование резко ограничивает свободу разработчиков в выборе технического решения по мощности, компоновке активной зоны и применяемому виду топлива. Найденные технические решения для некоторых типов реакто-

ров (например, переход к гетерогенным компоновкам или введение натриевой полости над активной зоной [3]) не могут рассматриваться как универсальные для всех перспективных быстрых реакторов. Так из рассмотрения оказались выведенными целый класс БН с металлическим топливом или керамические твэлы с натриевым подслоем. В то же время, выполаживание в области больших мощностей основных коэффициентов реактивности свидетельствует о том, что при одинаковом составе и компоновке реакторы мощностью 1200-1600 МВт могут иметь близкие значения наиболее важных коэффициентов реактивности [4]. И поведение реактора в основных авариях, определяемое совокупной обратной связью – в том числе и натриевой плотностной компонентой – может оказаться идентичным для целой группы БН большой мощности.

В большинстве случаев характер протекания аварийных ситуаций определяется не одной, а всей совокупностью компонент температурного и мощностного коэффициентов реактивности. В итоге целесообразно вводить ограничения не по отношению к каждому коэффициенту реактивности (в данном случае – натриевой плотностной компоненте реактивности), а к их совокупности, как это подразумевается в ОПБ-88, ориентируя таким образом разработчиков нормативных документов на корректировку соответствующего пункта ПБЯ.

ПЛОТНОСТНОЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ И НПЭР В АКТИВНЫХ ЗОНАХ РЕАКТОРОВ БН

При анализе требования ПБЯ РУ АЭС по плотностной компоненте возникает неопределенность в интерпретации используемого термина «удельный объем теплоносителя». С одной стороны, применительно непосредственно к плотностному коэффициенту, он рассматривается как производная – небольшое изменение плотности при изменении температуры/мощности. С другой стороны, при значительных изменениях удельного объема (кипение натрия) использование данного термина как понятия коэффициента реактивности по крайней мере некорректно и обычно используется понятие пустотного эффекта (НПЭР).

Достаточно жесткие рамки, обусловленные требованием по знаку плотностной компоненты и НПЭР, в перспективных активных зонах определяют следующие технические решения. Для минимизации эффекта выгорания в большом реакторе (прототип – реактор типа БН-1600) объемная доля топлива должна быть $\epsilon_{fuel} > 0.45$. Требования по отрицательности НПЭР при $\epsilon_{fuel} > 0.45$ задают определенные компоновочные подходы: высота активной зоны большого БН не должна превосходить 80 см при расположении над ней натриевой полости ~50 см (рис. 1А) [4].

В таких компоновках достигается отрицательность как НПЭР в области кипения, так и натриевой плотностной компоненты реактивности обратной связи с учетом аксиального распределения подогрева натрия в переходных процессах – максимальный подогрев приходится на натриевую полость.

Традиционно для реакторов на быстрых нейтронах реактивность обратной связи представляется в виде суммы ее компонент. Часть из них зависит непосредственно от температуры натрия (натриевая плотностная компонента $ТКР_{Na}$ и компонента радиального расширения активной зоны $ТКР_{RAD}$). Вторая часть определяется температурой топлива: доплеровская компонента $ТКР_D$ и компонента аксиального расширения топлива $ТКР_{Ax}$. Однако в реакторах других типов (в частности, в ВВЭР) компоненты реактивности, связанные с температурой теплоносителя не разделяются столь жестко [5]. Такое представление сложилось для БН исторически и отражает условия баланса реактивности для определения требуемой эффективности СУЗ.

Принятая система представления компонент реактивности может формально не

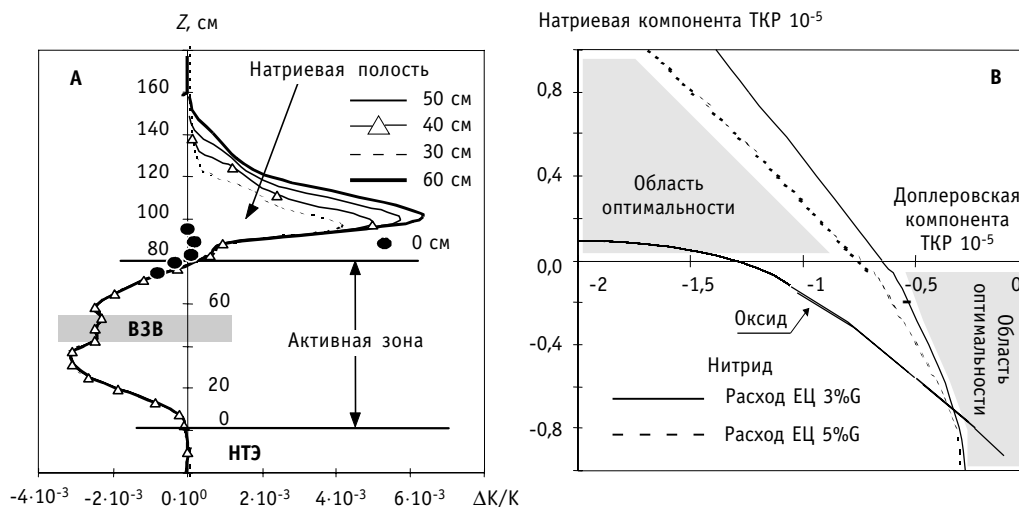


Рис.1. Аксиальное распределение интегральной эффективности натрия в реакторе большой мощности при различной толщине натриевой полости (А) и оптимальное соотношение между натриевой плотностной и доплеровской компонентами температурного коэффициента реактивности в аварии ULOF с условием невоскипания натрия

соответствовать требованиям ПБЯ РУ АЭС. Так, для большого реактора (мощностью 1200-1600 МВт) TKP_{Na} может оказаться близким к нулю, но (в пределах возможной погрешности расчета) положительным. При этом вся сумма коэффициентов реактивности, связанных с температурой теплоносителя (по аналогии с реакторами ВВЭР) всегда остается отрицательной ($TKP_{Na} + TKP_{RAD} < 0$). Однако проектирование направлено так, что в аварийных процессах с разогревом натрия эта плотностная компонента эффекта реактивности с учетом аксиального профиля температур и эффективности натрия (при наличии натриевой полости) отрицательна. Таким образом, требования ПБЯ РУ АЭС по величинам НПЭР в принципе могут быть соблюдены уже на первых этапах проектирования. При этом влияние знака непосредственно натриевой плотностной компоненты в целом ряде случаев может не иметь того принципиального значения, какое ей дается нормативными требованиями. Уже в формализме квазистационарных критериев самозащитности [6] продемонстрирована тесная связь значений плотностной компоненты и доплер-эффекта (см. рис. 1В). Более определенно эта связь может быть продемонстрирована на основе анализа аварийных процессов для реакторов с различными значениями натриевой плотностной компоненты, в том числе и параметрических.

Постулирование наиболее опасной (определяющей) аварии позволяет сконцентрировать внимание на требованиях к коэффициентам реактивности. Такая авария через комплекс коэффициентов реактивности и линейную нагрузку выступает в виде гаранта достижения постулируемой мощности. Для компоновки с минимальным НПЭР определяющей является анализируемая ниже с точки зрения знака плотностного коэффициента реактивности авария ULOF, накладывающая максимальные ограничения на уровень самозащитности [4].

АКТИВНЫЕ ЗОНЫ С БЛИЗКИМ К НУЛЮ НПЭР

Активные зоны с близким к нулю НПЭР ниже представлены двумя группами:

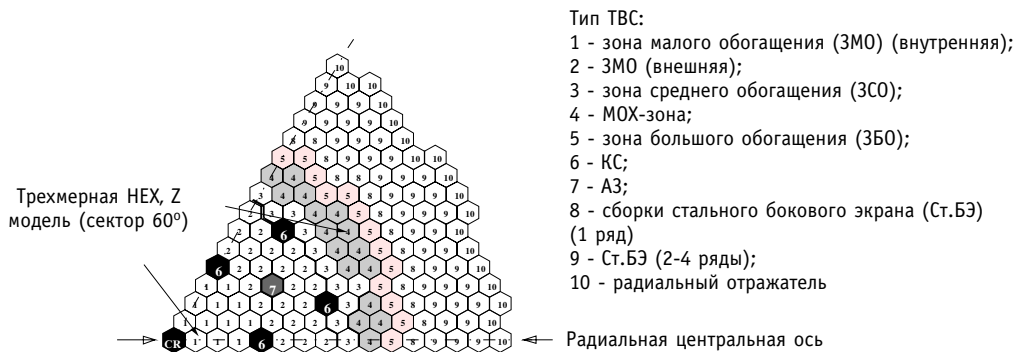
- реакторы традиционной компоновки небольшой мощности с урановым топливом, например, БН-600;
- реакторы с МОХ-топливом (мощностью ≥ 600 МВт) с натриевой полостью над активной зоной.

Для этих двух компоновок под эгидой МАГАТЭ на примере реактора БН-600 в период 1999-2003 гг. проводилась программа исследований CRP по точности расчетного предсказания эффектов реактивности [7]. Участниками программы являются: Англия (SA), Индия (IGCAR), Корея (KAERI), Китай (CIAE), Российская Федерация (ФЭИ и ОКБМ), США (ANL), Франция (CEA), Япония (JNC).

Урановая активная зона традиционной компоновки типа БН-600

В качестве тестовой модели предложен упрощенный вариант гибридной компоновки активной зоны реактора БН-600 с воспроизводящими торцевыми экранами (см. рис. 2), разработанный в ОКБМ и ФЭИ. Анализ допустимости различий в предсказываемых исполнителями коэффициентов реактивности основан на механизме сопоставления упрощенного описания динамики основных аварийных ситуаций [8].

В рассматриваемом реакторе интегральная натриевая плотностная компонента реактивности обратной связи близка к нулю, и в зависимости от страны и метода расчета может принимать как отрицательные, так и положительные значения (рис. 2).



Тестовая модель МАГАТЭ

(АЗ, КС - стержни аварийной защиты и компенсаторы выгорания; NR - центральный компенсатор)

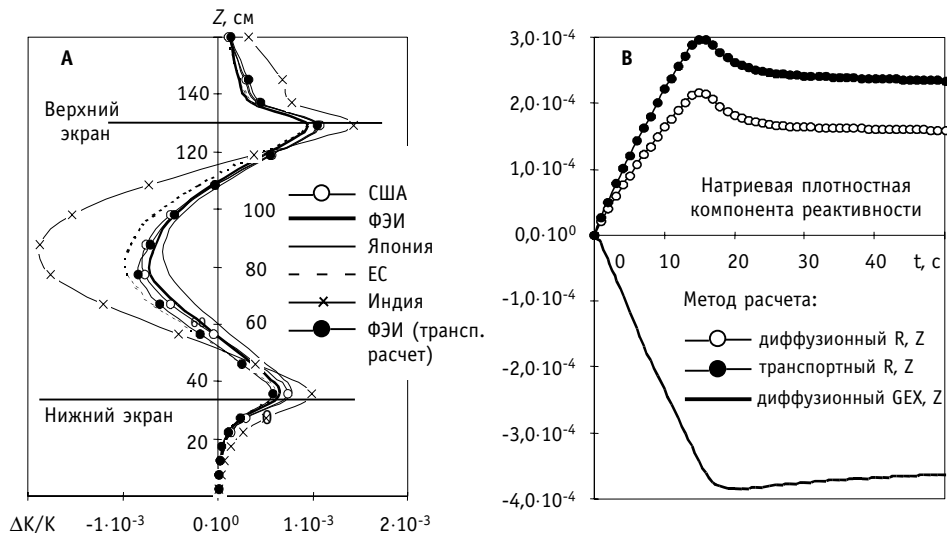


Рис. 2. Эффективность натрия в топливных ТВС (А) и натриевая плотностная компонента реактивности (В) в аварии ULOF ($G = 30 \% G_{\text{ном}}$) при различных методах расчета коэффициентов реактивности KR_i по российским кодам

Таблица 1

Интегральная эффективность натрия, $\Delta K/K$ (теория возмущений)

Страна	РОССИЯ (ФЭИ)/(ОКБМ)	Европа (CEA/SA)	США (ANL)	Китай (CIAE)	Индия (IGCAR)	Япония (JNC)	Корея (KAERI)
Метод	0.00877/ 0.01226						
Diff		0.00771	0.02072	0.00486	0.00668	0.01038	0.0105
Tr		0.00592				0.00664	

Интегральные значения эффективности натрия, полученные основными исполнителями для HEX, Z-расчетов в топливных зонах имеют вид, представлены в табл. 1 [7] (здесь Diff – диффузионный расчет, Tr – транспортный расчет).

Для наиболее опасной, применительно к быстрым реакторам аварии, ULOF для падения расхода до уровня естественной циркуляции (3%) в работе результаты носят качественный характер [8], поскольку не учитывается кипение натрия и связанное с ним изменение баланса реактивности. Однако в данном качественном рассмотрении видно, что при выбранных опорными 3-х российских наборах коэффициентов реактивности (для диффузионных и транспортных 2D-расчетах и в диффузионном HEX, Z-расчете – коды RHEIN, TWODANT, TRIGEX соответственно) и полученных при этом различных по знаку натриевых плотностных компонентах разброс достигаемых конечных параметров может составить:

- ~ 2.5% (~9 МВт) – для мощности;
- ~ 2% (-0.00002 $\Delta K/K$) – для максимального значения реактивности обратной связи;

- ~ 20° – для средней температуры топлива;

- ~ 5° – неопределенность температуры натрия в момент кипения.

Для рассмотренного аналога аварии типа ULOF без кипения натрия ($G = 30\%G_0$) отклонения теплотехнических параметров составят [9]:

- ~14 МВт – для мощности;

- ~ 8% – расхождение в суммарной реактивности между 2D и 3D-расчетом (расхождения транспортных результатов от диффузионных для R, Z-геометрии не превосходит 1%, что определяется, в первую очередь, значением натриевой плотностной компоненты, которая в 3D-расчетах меняет знак);

- ~ колебания температуры натрия составляют <7° и менее 10° для топлива при переходе к 3D коэффициентам реактивности.

Еще меньший диапазон расхождений наблюдается для аварии с вводом реактивности (авария типа UTOP) [9].

Таким образом, для урановых реакторов традиционной компоновки с небольшим вкладом натриевой компоненты в общую реактивность обратной связи (реакторы с близким к нулю НПЭР – БН-600, БН-800, БН-1200) знак натриевой плотностной компоненты может не определять развитие и последствия аварий. В зависимости от знака TKP_{Na} колебания максимальных температур в реакторе типа БН-600 не превосходят 10°(1%).

Из опыта расчетов различных БН следует, что большая отрицательность натриевой плотностной компоненты в авариях типа ULOF приводит к снижению мощности и средней температуры топлива. Проявляется положительный доплер-эффект, стабилизирующий снижение мощности. При выбранном композиционном составе и типе топлива подтверждается наличие области оптимальных соотношении компонент TKP_i , определяемой размерами (мощностью) и составом активной зоны (рис. 1В).

В результате субъективизм требования отрицательности натриевой плотностной компоненты без учета формирования остальных компонент реактивности обратной связи в рассмотренном типе реакторов не позволяет судить о потенциальных возможностях безопасности реактора.

Реактор типа БН-600 с U-Pu-топливом и натриевой полостью

В качестве следующей тестовой модели МАГАТЭ, обладающей большей степенью недиффузионности по сравнению с традиционным вариантом, в ФЭИ разработана модель реактора типа БН-600 с натриевой полостью и центральной воспроизводящей вставкой ВЗВ (рис. 3). Пространственные распределения эффективности натрия, полученные для данной модели, представлены в табл. 2.

Из приведенных данных видно, что наблюдается существенный разброс в эффективности натрия как интегральной так и локальной в различных зонах. Особенно большое различие получено в натриевой полости, определяющей общий знак плотностной компоненты в аварийном процессе.

ΔZ , см	Аксиальный отражатель									
30	Аксиальный отражатель									
25,5	КС	Верхний	К	Защитный	А	экран	КС2	(В,С)	Сталь-	Боковой
23			С	Натриевая	З	Натриевая		Натриевая	ная	отража-
			1	полость		полость		полость	защита	тель
5,3						Концевики		твэл	сборки	
41,1									SSA1	
5		ЗМО		ЗМО		ЗМО		ЗСО	SSA2	
5,1		ВЗВ		ВЗВ		ВЗВ		ЗСО		
41,1		ЗМО		ЗМО		ЗМО		ЗБО		
5										
35,2		Нижний		Торцевой		экран		(НТЭ)		
30	Аксиальный отражатель									
ΔR , см	5,2	27,6	1,8	5,8	1,6	18,9	2,25	10,45	32,72	50

Рис.3. Тестовая модель МАГАТЭ реактора БН-600 с загрузкой МОХ-топливом

Таблица 2

Интегральные эффективности натрия $\Delta K/K$ в физических зонах (теория возмущений первого порядка, диффузионное приближение, HEX,Z-расчеты)

	RUSSIA (IPPE)	US (ANL)	EUROPE (CIA/SA)	GERMANY (FZK)	JAPAN (JNC)	KOREA (KAERI)	INDIA ²⁾ (IG-CAR)	CHINA (CIAE)
Na-полость	3.451E-3	1.036E-2	3.178E-3	3.462E-3	3.820E-3	1.262E-3	3.881E-3 (-6.683E-4)	2.908E-3
ЗМО+ВЗВ ¹⁾	-7.035E-3	-7.372E-3	-8.254E-3	-9.682E-3	-7.131E-3	-7.923E-3	-7.196E-3	-7.950E-3
ЗСО ¹⁾	-1.943E-3	-2.299E-3	-2.385E-3	-2.627E-3	-1.935E-3	-2.166E-3	-2.096E-3	-2.266E-3
ЗБО ¹⁾	8.084E-4	-9.816E-4	-3.433E-4	6.800E-5	8.617E-4	4.783E-3	-2.622E-4	2.009E-4
ВЗВ	-8.649E-4	-8.630E-4	-9.23E-4	-1.081E-3	-8.964E-4	-9.495E-4	-8.614E-4	-9.327E-4
Зона положительности НПЭР	-1.020E-2	-1.250E-2	-1.257E-2	-1.370E-2	-1.042E-2	-1.019E-2	-1.126E-2	-1.177E-2
Активная зона ¹⁾	-8.170E-3	-1.065E-2	-1.098E-2	-1.224E-2	-8.204E-3	-5.306E-3	-7.991E-3	-1.002E-2
НТЭ	9.357E-4	9.433E-4	5.390E-4	7.524E-4	9.267E-4	-4.304E-4	6.934E-4	7.350E-4
СУЗ	2.218E-3	9.470E-3	1.286E-3	2.320E-3	2.128E-3	-1.332E-3	2.194E-3	1.465E-3
SSA-1	1.040E-3	8.280E-4	1.448E-3	2.610E-3	1.796E-3	3.227E-3	1.147E-3	1.503E-3
Полная	1.978E-3	1.905E-03	-1.772E-3	1.267E-3	3.400E-3	4.747E-4	1.48E-4	-1.175E-3

Примечание к табл.2: ¹⁾ Топливный участок ТВС, ²⁾ В скобках приведены предварительные данные IGCAR для эффективности натрия в натриевой полости

В последующих расчетах аварии типа ULOF (расход снижается до 30% от номинального) использованы пространственные распределения эффективности натрия и доплеровской постоянной, полученные различными исследователями. При этом для натриевой полости использованы предварительные данные IGCAR, определяющие в ней положительный TKP_{Na} . Остальные коэффициенты реактивности, поля энерговыделений и параметры нейтронной кинетики во избежание наложения эффектов принимались одинаковыми – использовались результаты расчета ФЭИ. На рис. 4 приведены изменения максимальных температур натрия и топлива, полученные в таких расчетах.

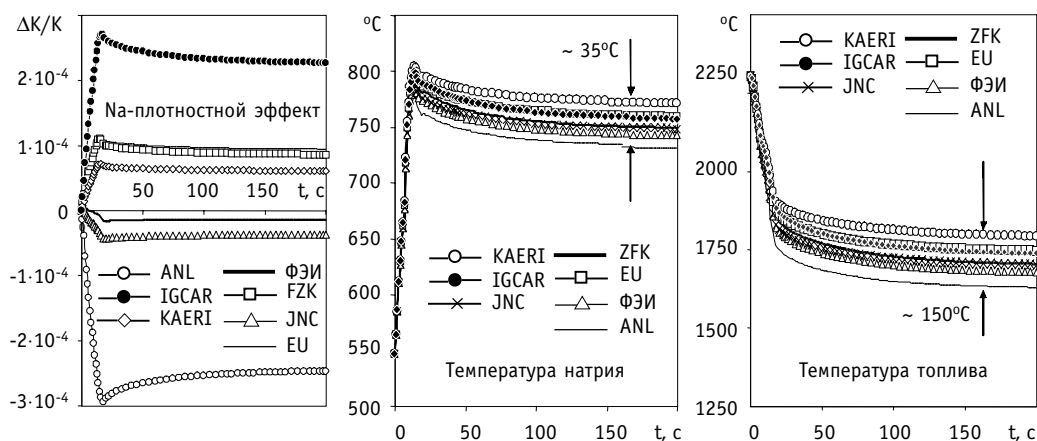
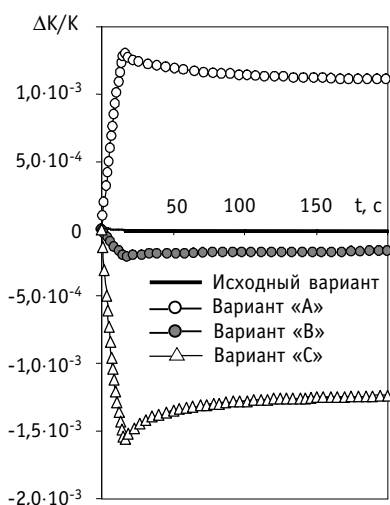


Рис.4. Изменение основных температур в аварии типа ULOF в зависимости от расчетного значения натриевой плотностной компоненты TKP_{Na}

Усредненная по всем странам максимальная температура натрия составляет $\sim 800^\circ\text{C}$ (время ее достижения колеблется от 15 до 18 сек от начала процесса, разбаланс температуры в этот момент составляет менее $\pm 30^\circ$). В конце процесса – на 200 с – усредненная температура натрия снижается до $\sim 750^\circ\text{C}$ при разбалансе $\sim \pm 40^\circ$. Для различных стран максимальные энерговыделения, следовательно, и максимальные температуры могут смещаться из 3С0 в 3Б0. Температура топлива непрерывно снижается, что определяет положительный доплер-эффект, а ее усредненное значение на 20 с составляет $\sim 1700^\circ\text{C}$, при этом наблюдаемый разброс достигает значений $\sim 150^\circ$ (отклонения от среднего значения от -110° до $+155^\circ$).



Вариант	Область изменения эффективности Na	Вариация эффективности натрия	TKP_{Na} , $(\Delta K/K)/\text{град}$
Исходный	-	-	-5.505E-07
Вариант «А»	активная зона	увеличена в 5 раз	8.544E-06
Вариант «В»	активная зона	уменьшена в 5 раз	-2.369E-06
Вариант «С»	натриевая полость	увеличена в 10 раз	-9.194E-06

Рис.5. Значения плотностного температурного коэффициента реактивности при параметрических вариациях эффективности натрия и поведение натриевого плотностного эффекта в аварии ULOF

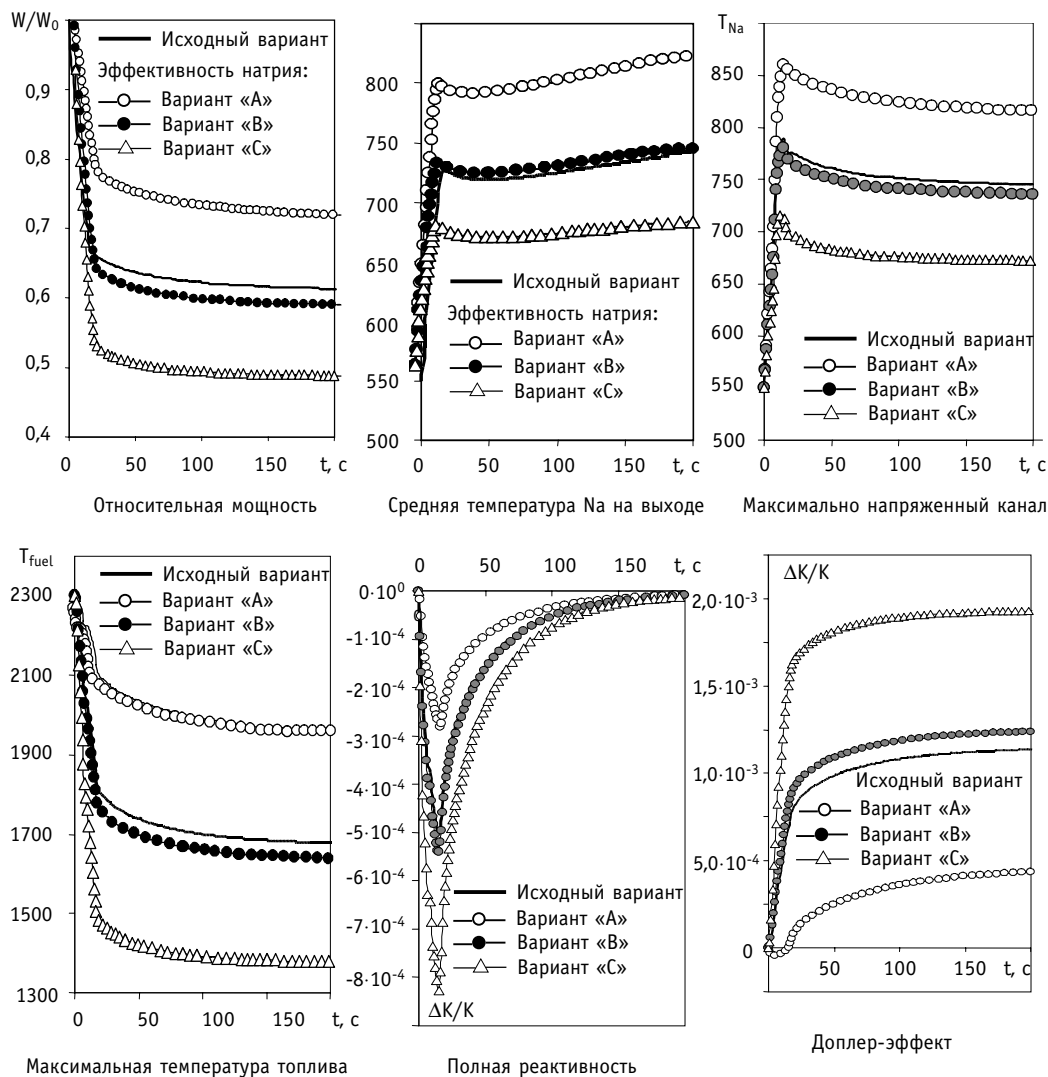


Рис. 6. Изменение основных параметров реактора в аварии ULOF при вариации величины и знака натриевой плотностной компоненты

Влияние знака натриевой плотностной компоненты с учетом величины доплер-эффекта на предсказание протекания аварии типа ULOF ($G = 30\%G_0$) оценено на примере параметрических вариаций данных величин. За основу (исходный вариант взяты данные, полученные в российских расчетах по коду TRIGEX. Для рассмотренных вариаций эффективности натрия (рис. 5) поведение основных параметров представлено на рис. 6, результаты влияния одновременной вариации доплер-эффекта и натриевой плотностной компоненты отражены в табл. 3.

Результаты параметрического исследования демонстрируют следующее.

А. Независимо от рассматриваемого варианта вариаций значений TKP_{Na} время достижения компонентами активной зоны своих максимальных температур колеблется в пределах 1-2 с, что соизмеримо с погрешностью расчета, составляющей $\pm(5-10)^\circ$.

В. Уменьшение эффективности натрия в активной зоне (в 5 раз уменьшающее вклад положительной части НПЭР) практически никак не сказывается на изменении максимальных и итоговых температур материалов. Увеличение эффективности натрия

Таблица 3

Изменение основных параметров в аварии ULOF при параметрических вариациях натриевого плотностного коэффициента и доплеровской постоянной

Вариация доплеровской постоянной	Вариация натриевой компоненты	Относительная мощность W/W_0 (200 с)	T_{Na-MAX}	$\langle T_{Na} \rangle^{OUT}$ (200с)
Исходная	Исходная	0.614	789	746
Исходная	500% Исходной в активной зоне	0.720	842	816
	20% Исходной в активной зоне	0.599	780	736
	1000% в натриевой полости	0.496	717	672
50% Исходной	500% Исходной в активной зоне	0.674	858	783
	20% Исходной в активной зоне	0.517	757	686
	1000% в натриевой полости	0.425	692	628
150% Исходной	500% Исходной в активной зоне	0.751	856	830
	20% Исходной в активной зоне	0.643	794	764
	1000% в натриевой полости	0.565	746	722

в активной зоне в 5 раз резко увеличивает предельные температуры. Однако такое значение TKR_{Na} нереально для реакторов БН: НПЭР становится равным $\sim +4\% \Delta K/K$, в то время как НПЭР активной зоны даже в больших реакторах не превосходит $+2.5\% \Delta K/K$ [3].

С. Наиболее эффективный фактор – увеличение эффективности натрия в натриевой полости, где максимальна температура натрия в аварийном процессе. Это свидетельствует о полезности пространственного профилирования TKR_{Na} (в данном случае за счет введения введения натриевой полости), снижающего «последствия» аварии, однако отсюда не следует категоричность требования отрицательного TKR_{Na} . Совмещение вариантов «А» и «С» возвращает ситуацию к исходному варианту.

Д. Соизмеримое с TKR_{Na} влияние оказывает изменение доплер-эффекта (табл.3). При этом в аварии ULOF параметрическое увеличение доплер-эффекта имеет негативное значение для всех рассмотренных вариаций TKR_{Na} . Уменьшение доплер-эффекта – благоприятный фактор. Другими словами, существуют комбинации по крайней мере двух эффектов, для которых при положительном TKR_{Na} максимальные температуры материалов в аварии ниже, чем при отрицательном TKR_{Na} . Возможность пространственного профилирования доплер-эффекта, с целью минимизацию предельных температур обсуждается в работе [10].

Е. Любое изменение какой-либо компоненты реактивности обратной связи (в данном случае натриевой плотностной) формирует **свой характер** протекания аварийной ситуации и приводит к перераспределению вкладов других компонент, для которых значения коэффициентов реактивности были неизменными.

Ф. Соотношения между компонентами реактивности имеют свои оптимальные значения, нарушение которых приводит к потере требуемого уровня безопасности. Без учета взаимосвязи **всех** коэффициентов реактивности в протекании аварийного процесса принудительное сохранение величины и знака одного из них приведет к нарушению оптимального соотношения между ними.

Г. Тесная взаимосвязь всех компонент реактивности, усиливаемая теплофизическими свойствами активной зоны, не позволяет **однозначно требовать конкретных величины и знака** любой одной из них.

РЕАКТОРЫ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ НАТРИЕВОЙ ПЛОТНОСТНОЙ КОМПОНЕНТОЙ

В реакторе большой мощности с U-Pu-топливом и натриевой полостью для аварии с потерей расхода (ULOF) кипение натрия возможно при несогласованных величинах компонент реактивности обратной связи и мощности активной зоны (величине линейной нагрузки). Причем это кипение также может не зависеть от знака натриевой плотностной компоненты. Отрицательность компонент, связанных с температурой натрия (TKR_{Na} и TKR_{RAD}), определяет снижение мощности и средней температуры топлива в первой фазе аварии. Это приводит к проявлению положительного доплер-эффекта, тормозящего падение мощности. С другой стороны, максимальные температуры напрямую связаны с исходными их значениями через линейную нагрузку и диаметр твэл. При имеющемся наборе коэффициентов реактивности, определяемым составом и компоновкой активной зоны, величина суммарной реактивности обратной связи проявляется непосредственно через изменения температур, т.е. в конечном итоге задана теплотехническими параметрами и линейной нагрузкой.

При линейных нагрузках $q_l > 420$ Вт/см наступает кипение натрия на ~ 60 с [10] независимо от знака натриевой плотностной компоненты. Для предотвращения кипения при таких q_l отрицательная обратная связь должна быть увеличена на $\sim 0,1-0,13\% \Delta K/K$.

Для реактора типа БН-800 в параметрическом исследовании принудительно изменялась плотностная компонента реактивности и ее знак (см.табл. 4) при сохранении всех других компонент и неизменности состава и компоновки активной зоны. Однако в реальном реакторе такое изменение невозможно. Изменение какой-либо

Таблица 4

Параметрические изменения эффективности натрия в реакторе типа БН-800

Вариант	Эффективность натрия в зонах, $\Delta K/K$					TKR_{Na} активной зоны
	Физическая зона	ЗМО	ЗБО	БЭ+СУЗ	Реактор	
	Исходный вариант	-1.06E-02	4.92E-04	-7.56E-03	-1.76E-02	2.81E-06
A	Эффективность в ЗМО взята как в ЗБО	4.92E-04	4.92E-04	-7.56E-03	-6.57E-03	-2.74E-07
B	Эффективность в ЗБО взята как в ЗМО	-1.06E-02	-1.06E-02	-7.56E-03	-2.87E-02	5.90E-06

Примечание к табл.4. В динамическом расчете предполагался разогрев натрия только в топливных ТВС.

Таблица 5

Компоненты ТКР в различных концепциях активной зоны, ($\Delta K/K$)/град

Тип топлива	Нитридное топливо				Оксидное
	натриевый			гелиевый	
Контактный подслон				гелиевый	
Вариант	A	B	C	D	E
Активная зона	Гомогенная (H=100 см)	Гетерогенная (75 см)	Гетерогенная (85 см)	Гомогенная (100 см)	Гомогенная (100 см)
Компонента ТКР:					
Na-плотностная	7.5E-6	6.5E-6	5.7E-6	3.8E-6	2.55E-6
доплеровская	-8.9E-6	-8.8E-6	-8.2E-6	-8.7E-6	-1.16E-5
акс. расширение	-5.3E-7	-8.2E-7	-5.7E-7	-4.8E-7	-8.59E-7
рад. расширение	-6.5E-6	-7.1E-6	-6.7E-6	-7.0E-6	-7.05E-6
суммарный ТКР	-8.4E-6	-1.0E-5	-9.9E-6	-1.2E-5	-1.69E-5

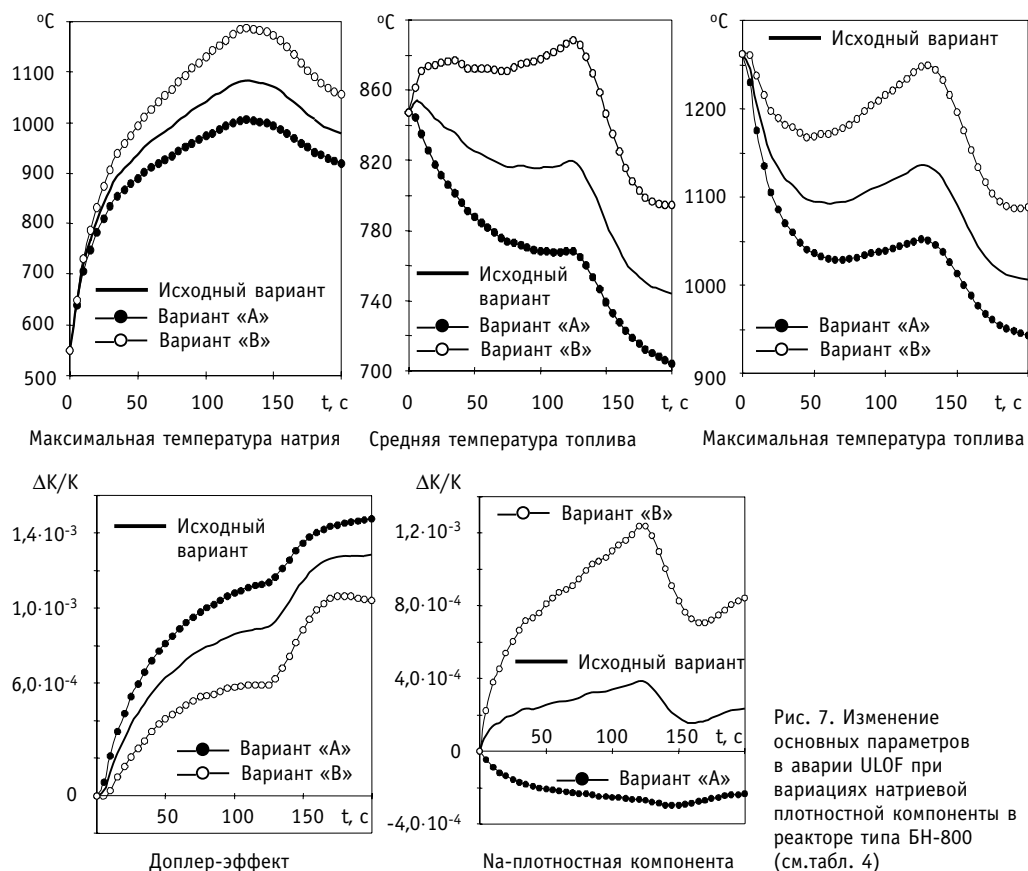


Рис. 7. Изменение основных параметров в аварии ULOF при вариациях натриевой плотностной компоненты в реакторе типа БН-800 (см. табл. 4)

компоненты реактивности обратной связи потребует композиционно-компоновочной перестройки активной зоны, что неизбежно приводит к переформированию **всех без исключения компонент реактивности обратной связи** (см. рис. 7). Течение аварии определяется соотношением между всеми компонентами реактивности обратной связи и, в первую очередь, доплер-эффектом. Значение же доплер-эффекта, возникающего в аварии и (в силу своей положительности) тормозящего снижение мощности, определяется как непосредственно физической величиной – доплеровской постоянной – так и теплофизикой твэл через изменение температур топлива, т.е. теплопроводностью последнего.

Иллюстрацией этому может служить переход к нитриднему топливу и твэлу с натриевым подслоем. В таком реакторе требуется верхнее размещение газосборников твэл. Это приводит к снижению компоненты утечки в эффективности натрия и, как следствие, снижению отрицательного вклада натриевой полости в натриевую плотностную компоненту. Суммарная натриевая плотностная компонента достаточно велика и положительна (табл. 5), что противоречит требованиям ПБЯ. Тем не менее, преимущества натриевого контактного подслоя связаны со снижением температуры топлива и сводятся к

- уменьшению доплеровской составляющей мощностного эффекта реактивности за счет снижения перепада температур на контактом подслое на $\sim 200^\circ\text{C}$ и соответственно средней температуры топлива, что очень важно при прохождении запроектных аварий;
- уменьшению скорости распухания топливных сердечников твэл, что важно для обоснования их работоспособности при высоких выгораниях.

Рассмотрены (сопоставляемые с традиционным вариантом оксидной загрузки) две модели нитридной активной зоны: гетерогенная с аксиальной ВЗВ (при варьируемой высоте активной зоны и типе контактного подслоя) и гомогенная с увеличенной до 1 м высотой. Интегральные значения компонент реактивности обратной связи для рассматриваемых зон представлены в табл. 5. Для выявления чисто реактивных факторов в описании аварийного процесса введен дополнительный искусственный вариант гетерогенной зоны варианта «С» с присущими ей эффектами реактивности, но с газовым подслоем этой (обозначенный ниже индексом «GAS»). Изменение максимальных температур материалов даны на рис.8.

Представленные результаты демонстрируют следующее. Переход на натриевый подслей и связанное с этим изменение знака натриевой плотностной компоненты определяет новое соотношение компонент в балансе реактивности в аварийной ситуации. Размещение в области натриевой полости газосборников твэл снижает вклад утечки нейтронов во всех компонентах обратной связи по реактивности. Именно это и приводит к росту компоненты реактивности от радиального расширения для вариантов с натриевым подслоем и уменьшению компоненты от аксиального расширения, определяемых, соответственно, утечкой нейтронов в аксиальном и радиальном направлениях.

Несмотря на то, что **натриевая плотностная компонента положительна**, сумма ее и компоненты от радиального расширения отрицательна (рис. 9). Поведение во времени этой суммы таково, что в начальной стадии происходит разогрев реактора и доплер-эффект отрицателен. При этом средняя по сечению активной зоны максимальная температура топлива изменяется достаточно слабо (рис. 8) и даже в первой фазе аварии растет за счет высокой теплоотдачи от разогреваемого натрия к топливу в верхней половине реактора. В результате мощность падает быстрее, чем в исходном варианте именно из-за отрицательности доплеровской компоненты. Для зоны с натриевым подслоем суммарная реактивность также отрицательна на всех этапах аварии и гораздо больше, чем в исходной зоне с газовым подслоем. Во второй фазе аварии (>100 с) расход приближается к уровню естественной циркуляции, температура натрия и топлива проходят свое экстремальное значение. Для этой фазы характерно остывание топлива (положительный доплер-эффект), и процесс аналогичен процессу в зоне с газовым контактным подслоем. Однако больший спад мощности из-за большего значения реактивности обратной связи позволяет по предварительным оценкам такой активной зоне иметь максимальную температуру натрия на ~50° ниже, чем в исходном варианте.

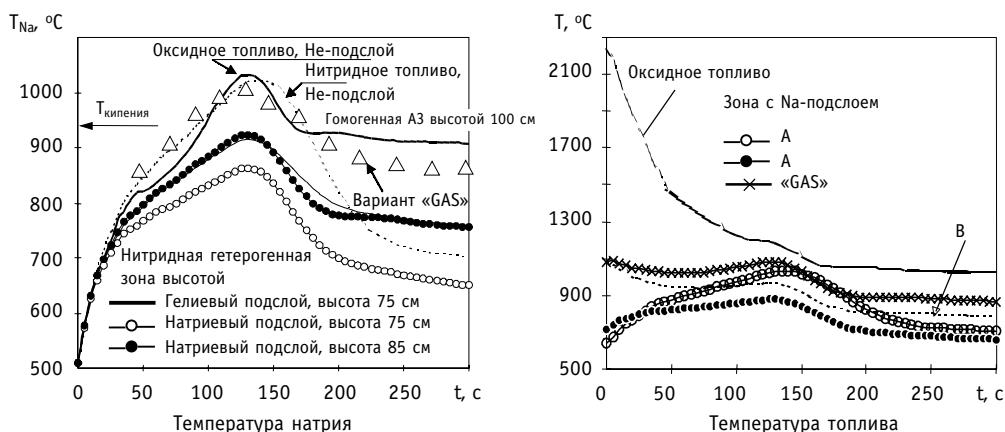


Рис.8. Изменение максимальных температур натрия и средней температуры топлива в аварии типа ULOF для нитридной активной зоны с различными видами контактного подслоя (He и Na), компоновкой и высотой активной зоны

Поведение гомогенной активной зоны с натриевым подслоем приближается к поведению оксидной зоны, несмотря на существенную разницу в формировании баланса реактивности. Это определяется сильно возросшей положительной плотностной компонентой (с возрастанием НПЭР на 0.9% $\Delta K/K$). Невзирая на теплотехнические преимущества контактного подслоя, для рассмотренной гомогенной активной зоны с высотой 1 м невозможно избежать кипения натрия.

Роль соотношений **всех компонент реактивности, а не только знака натриевой компоненты** видна из сопоставления рассматриваемых вариантов с вариантом искусственной замены в исходном варианте компонент ТКР на их значения, полученные для гетерогенного варианта с натриевым подслоем. Одновременная потеря преимуществ и по теплопроводности и по плотностной компоненте приближает по значениям температуры натрия и стали этот вариант к варианту оксидному. Таким образом, **роль взаимодействия всех коэффициентов реактивности** с теплофизическими характеристиками является определяющей и слабо зависит от одного только знака плотностной компоненты, не накладывая формальных ограничений на интегральную величину TKR_{Na} (соответственно и НПЭР).

ГИПОТЕТИЧЕСКАЯ АВАРИЯ С ПОЛНЫМ РАЗРУШЕНИЕМ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Влияние компоновочного решения реактора, обеспечивающего нулевой или отрицательный НПЭР на последствия гипотетической аварии с полным разрушением активной зоны исследовалось на примере реактора БН-800 [11]. Проведенные расчеты активных зон реактора БН-800 как традиционной, так и модернизированной (с натриевой полостью). Как известно, в первоначальном проекте активной зоны БН-800 полный пустотный эффект реактивности составлял ~ 6.5 долл.(\$), поэтому при аварии с отклю-

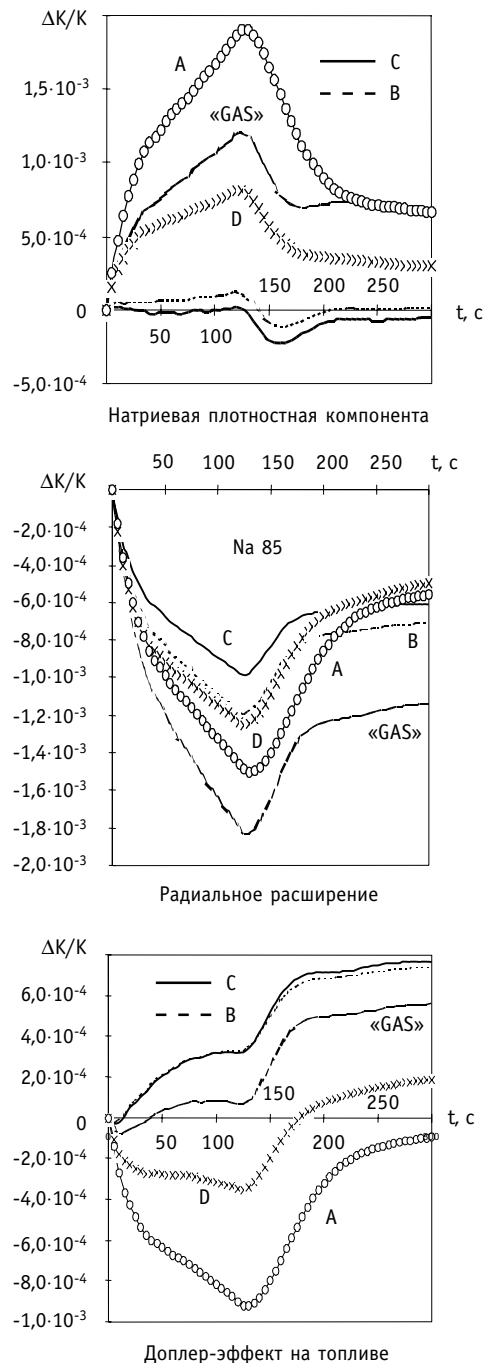


Рис.9. Изменение отдельных компонент реактивности в аварии ULOF при переходе к натриевому контактному подслою. Нитридное топливо

чением насосов первого контура и несрабатыванием аварийной защиты (ULOF) надкритичность реактора возможна в результате ввода положительной реактивности со скоростью ~ 10 $\$/с$. Результаты расчета показали, что суммарное выделение тепловой энергии после завершения вспышки составило ~ 24500.0 МДж, температура топлива ~ 4050 К, а давление ~ 8 атм (см. рис. 10). Эти характеристики аварии в дальнейшем использовались для оценки количества выброшенного из активной зоны топлива, а также выхода механической энергии для анализа поведения корпуса реактора.

Для модернизированной активной зоны с нулевым НПЭР надкритичность реактора при аварии ULOF может образоваться лишь после расплавления твэлов и перемещения топлива под действием сил гравитации. Как показано [11], скорость ввода реактивности в наихудшем варианте составляет ~ 35 $\$/с$. Для точечной «вспышки» результаты расчет дает следующие результаты: температура топлива составляет ~ 3560 К, а суммарное тепловыделение ~ 2700 МДж, что на порядок меньше, чем в случае разгона из-за кипения натрия в традиционной активной зоне (рис. 10).

Это объясняется тем, что жидкое топливо при образовании критической массы и росте его температуры начинает расширяться, вводя отрицательную реактивность. При этом скорость ввода этой отрицательной реактивности превышает скорость ввода положительной реактивности из-за гравитационного перемещения.

Следует заметить, что проект корпуса реактора сделан с учетом выделения энергии для традиционной активной зоны, что представляет собой значительный запас для проекта реактора с модернизированной активной зоной.

Показано, что меньшие тепловые нагрузки, существующие на стадии предшествующей плавлению, определяют более слабую зависимость реактивности от скорости стекания (при малых скоростях плавления меньше и вероятность колапсирования топлива) [11]. Однако при наличии идеального профилирования энерговыделения по высоте преимущество малых нагрузок пропадает, скорость нарастания реактивности будет определяться только скоростью стекания расплава. Таким образом, при известных распределениях мощности и эффективности материалов в начале плавления сам расплав активной зоны играет по сути лишь роль инертной гидродинамической жидкости, движение которой подчиняется главным образом возникающему в

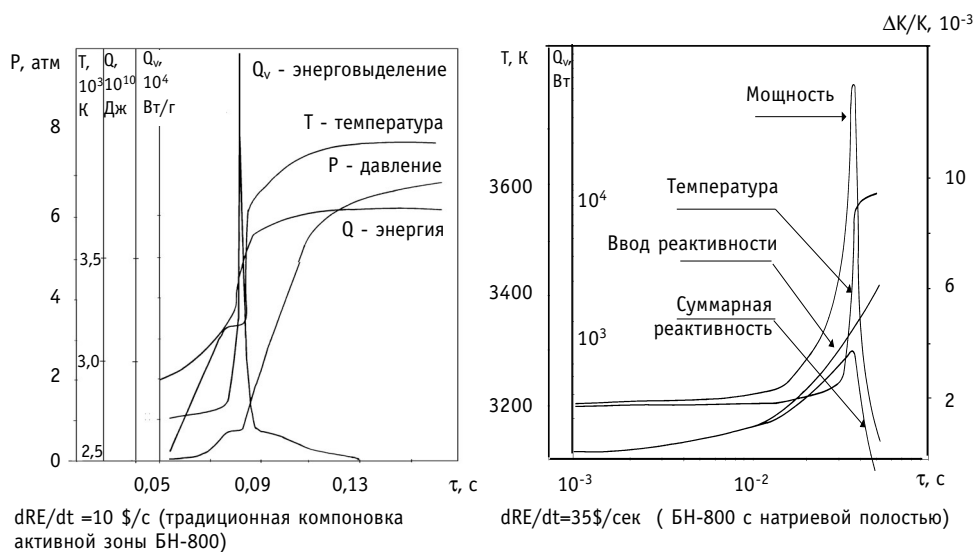


Рис.10. Зависимость основных параметров в точечной нейтронной «вспышке» с введением реактивности

ней давлению. С этой точки зрения интерес представляют два фактора: изменение энергии (соответственно изменение плотности и давления) и уравнение состояния, связывающее плотность и давление.

Величина энергии «вспышки» при перекомпоновке материалов зависит от скорости расплавления и стекания расплава, физических свойств расплавленной среды, от наличия пустот и других включений в композицию расплава, условий на границе зоны расплава с внешней средой. Скорость расплавления и стекания расплава определяется в большой степени запасенной топливом к моменту расплавления энергии, которая выше в реакторах с большим НПЭР. Таким образом, реакторы с натриевой полостью (нулевой НПЭР) при перемещении расплавленного топлива в компактную массу обладают определенными преимуществами с точки зрения суммарного выхода энергии и максимального давления. Для таких реакторов процесс развивается более медленно и приводит к меньшему выходу механической энергии во время вспышки. Однако именно медленное развитие процесса может приводить к большему количеству разрушенных ТВС, чем в реакторах с большим НПЭР, резкое повышение мощности которых при выкипании натрия приводит к быстрому выбросу расплава и переводу реактора в подкритическое состояние [11]. Это еще раз свидетельствует о возможной позитивности пространственного профилирования эффективности натрия, но не подтверждает требования ПБЯ об отрицательности натриевого плотностного коэффициента реактивности.

ВЫВОДЫ

1. Течение аварийных ситуаций определяется **взаимодействием всех коэффициентов реактивности** с теплофизическими характеристиками, слабо завися от одного только знака плотностной компоненты и накладываемых формальных ограничений на интегральную величину последней.
2. Любое изменение какой-либо компоненты реактивности обратной связи (в данном случае натриевой плотностной) формирует **свой характер** протекания аварийной ситуации и приводит к перераспределению вкладов других компонент, для которых значения коэффициентов реактивности были неизменными.
3. Соотношения между компонентами реактивности имеют свои оптимальные значения, нарушение которых приводит к потере требуемого уровня безопасности. Без учета взаимосвязи **всех** коэффициентов реактивности в протекании аварийного процесса принудительное сохранение величины и знака одного из них приведет к нарушению оптимального соотношения между ними.
4. Тесная взаимосвязь всех компонент реактивности, усиливаемая теплофизическими свойствами активной зоны, не позволяет **однозначно требовать конкретных величины и знака** любой из них.
5. Дополнительные требования ПБЯ РУ АЭС по отрицательности натриевого плотностного коэффициента реактивности TKP_{Na} не учитывают его связи с другими компонентами реактивности и, не конкретизируя величину данного коэффициента, являются по крайней мере некорректными. Требования ОПБ-88/97, предъявляемые к коэффициентам реактивности, являются полными и достаточными.
6. При анализе определяющих аварий не обнаружена явно выраженная связь их последствий с требованием отрицательности плотностного коэффициента реактивности, что при соблюдении требований ОПБ-88/97 в сочетании с правильным подбором всех остальных коэффициентов реактивности и учетом теплофизики твэла, позволяет считать обсуждаемое требование ПБЯ РУ АЭС излишним.

Литература

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88), 1989.
2. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. ПБЯ РУ АС-89. – М., 1990.
3. *Matveev V.I., Vorotyntsev M.F., Danilytshev A.V. et al.* Physical Grounds for Further Improvement of Fast Sodium Power Reactor Safety/In Proc.of Int..Fast Reactor Safety Meeting (Snowbird, Utah, August 1990). – V.2. – P. 25.
4. Данилычев А.В., Елистратов Д.Г., Стогов В.Ю. Выбор определяющей аварии при обосновании концепции перспективных активных зон БН большой мощности повышенной безопасности / Препринт ФЭИ-2882, 2001. – 20 с.
5. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.
6. Данилычев А.В., Елистратов Д.Г., Стогов В.Ю., Черный В.А. Взаимосвязь теплотехнических данных и физических параметров безопасности при осуществлении принципа максимальной самозащищенности в быстрых реакторах/Препринт ФЭИ-2813, 2000. – 16 с.
7. *Kim Y.I., Stanculescu A., Finck P. et al.* BN-600 Hybrid Core Benchmark analyses. – PHYSOR 2002, Seoul, Korea, Oct. 7-10, 2002.
8. Елистратов Д.Г. «DICOR» – упрощенная программа динамического расчета аварийных режимов работы для концептуальных исследований самозащищенности быстрых реакторов/Препринт ФЭИ-2869, 2000.
9. Данилычев А.В., Елистратов Д.Г., Стогов В.Ю. Влияние расчетной погрешности исходных нейтронно-физических данных безопасности на предсказание последствий основных аварий в тестовой модели МАГАТЭ // ВАНТ: Сер. Ядерные константы. – 2002. – Вып. 1-2. – С. 109-121.
10. Данилычев А.В., Елистратов Д.Г., Стогов В.Ю., Буренкова Т.М. Физические параметры самозащищенности как гаранты обеспечения предельной мощности перспективного быстрого натриевого реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – №. 4.
11. Букша Ю.К., Данилычев А.В., Иванов А.П. и др. Анализ запроектных аварий в быстрых натриевых реакторах/Препринт ФЭИ-2775, 1999. – 64 с.

Поступила в редакцию 15.01.2004

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.56

On Expediency of Change of Requirements RNS RI APP to Sodium Density a Component of Reactivity of a Feedback In Fast Reactors \A.V. Danilytshev, D.G. Elistratov, V.I. Matveev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 16 pages, 5 tables, 10 illustrations. – References, 11 titles.

Most generalizing requirement GSR-88/89 to all effects of reactivity is added in RNS RI APP with the additional limiting requirement of negativity sodium density reactivity coefficient. At the analysis of the major accidents obviously expressed communication of their consequences with the given additional requirement is not found out. It is shown, that at observance by the designer of basic requirements OPB-88/ in a combination to correct selection of interrelation of all others a component of reactivity and Thermal-physical properties of materials of an active zone the additional requirement of negativity sodium density reactivity may be considered as the account excessive.

УДК 621.039.56

On Inverse Kinetics Method for Reactivity Determination \B.D. Abramov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 13 pages, 1 illustration. – References, 29 titles.

In the paper some mathematical problems of the reactors neutron kinetic simulation and reactivity determination are considered.

УДК 621.039.51:519.85

Direct Simulation of Thermal Neutron Scattering by Monte Carlo Method Using Free Gas Model and Short Collision Time Approximation \P.A. Androsenko, M.R. Malkov, N.A. Soloviev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 11 pages, 6 illustrations. – References, 12 titles.

Direct simulation algorithms of thermal neutron scattering using free gas scattering law and short collision time approximation realized in BRAND code collection are described. The comparison of BRAND algorithms with MCNP algorithms and modified MCU algorithms is given. An example of calculation task on neutron penetration through O in H₂O barrier is given. The agreement between BRAND results and MCU results is rather good but there is disagreement between BRAND results and MCNP results. The reason for this disagreement is likely to be caused in the fact that BRAND carry out the calculations using the algorithms that recommended by ENDF-6 format whereas the algorithms of MCNP is corrected to better coincide with benchmark experiments results.

УДК 621.039.524: 621.039.526

The Method for Description of Fission Fragments by Two Pseudo-Fission Fragments. Part II – Testing. \Yu. V. Volkov, O.B. Duginov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.

The model for description of isotope transitions taking into account the most significant for the neutron balance isotopes and two pseudo-fission fragments has been tested. This model was applied for thermal and fast reactors.

УДК 621.039.524.4: 621.039.519.2

Integral In-Pile Experiments with a VVER-Type Fuel Assembly «SB-LOCA»-Test. A.V. Goryachev, I.V. Kiseleva, V.M. Makhin, V.N. Shulimov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

Results of 19-rod and 7-rod VVER-type fuel assembly tests «SB LOCA» in research reactor MIR are presented. The influence of regime parameters LOCA and design peculiarities of fuel assembly on fuel behaviour was investigated.