

## НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВОЙ ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ БЛОКА №2 ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС С ТВСА НА ЭТАПЕ ФИЗИЧЕСКОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУСКА

Э.С. Сааков\*, В.П. Дерий\*, А.М. Яковлев\*, А.А. Кормилицын\*,  
А.В. Клепов\*\*, М.Х. Гашев\*\*, Ю.А. Крайнов\*\*\*, В.И. Чмыхун\*\*\*,  
В.В. Сарбуков\*\*\*, О.В. Лебедев\*\*\*\*, В.В. Макеев\*\*\*\*,  
А.Ю. Беляков\*\*\*\*

\* ФГУП «Атомтехэнерго», г. Мытищи

\*\* Хмельницкая АЭС, г. Нетешин, Украина

\*\*\* РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва

\*\*\*\* Волгодонская АЭС, г. Волгодонск



В работе представлены результаты экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик первой топливной загрузки энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС с тепловыделяющими сборками альтернативной конструкции (ТВСА) на этапах физического и энергетического пуска. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для корректировки констант и компьютерных программ, применяемых для расчетного моделирования топливных циклов при проектировании и эксплуатации энергетических ядерных реакторов.

Безопасность пуска и последующей эксплуатации ядерного реактора возможны только при знании его нейтронно-физических характеристик с точностью, удовлетворяющей требованиям правил ядерной безопасности и теплотехнической надежности активной зоны [1–3].

Экспериментальное определение нейтронно-физических характеристик (НФХ) реакторов осуществляется как при вводе в эксплуатацию новых, так и после очередной перегрузки топлива действующих энергоблоков АЭС [7,8]. Цель таких исследований – экспериментальное подтверждение безопасности эксплуатации реакторной установки (РУ), правильности выполненных нейтронно-физических расчетов реакторов, а также получение экспериментальных данных для корректировки констант и компьютерных программ, используемых для расчетного моделирования топливных циклов при проектировании и эксплуатации энергетических ядерных реакторов. В техническом обосновании безопасной эксплуатации должны быть представлены расчетные значения НФХ реактора при стационарной работе энергоблока АЭС, в пере-

---

© Э.С. Сааков, В.П. Дерий, А.М. Яковлев, А.А. Кормилицын, А.В. Клепов, М.Х. Гашев, Ю.А. Крайнов, В.И. Чмыхун, В.В. Сарбуков, О.В. Лебедев, В.В. Макеев, А.Ю. Беляков, 2005

ходных динамических режимах, при протекании проектных аварий.

Экспериментальное определение нейтронно-физических характеристик реакторов проводится на минимально контролируемом уровне мощности (МКУ) и энергетических уровнях мощности. В соответствии с [1] значения коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя и топлива, по мощности реактора не должны быть положительными, а барометрический – отрицательным во всем диапазоне изменения параметров при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях. Именно эти характеристики активной зоны (их величина и особенно знак) в большей степени определяют внутреннюю безопасность ядерного реактора.

Экспериментальное определение эффективности органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) проводится для подтверждения выполнения требований, предъявляемых к органам СУЗ:

- эффективность органов СУЗ и скорость высвобождения реактивности должны исключать возможность возникновения неконтролируемого разгона мощности реактора;
- скорость ввода отрицательной реактивности в аварийных режимах должна обеспечивать прекращение цепной реакции деления в реакторе в минимально короткое время;
- обеспечение эффективной компенсации изменений реактивности, связанных с регулированием мощности;
- обеспечение компенсации температурного и мощностного эффектов реактивности; при сбросе мощности до нуля система СУЗ должна обеспечить необходимую подкритичность в горячем остановленном реакторе (с учетом возможного застревания наиболее эффективного ОР в верхнем положении).

В связи с замечаниями по надежности активных зон, связанными с искривлениями ТВС в процессе эксплуатации и для улучшения технико-экономических показателей ядерного топлива, была разработана тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции (ТВСА) с улучшенными характеристиками для использования в активных зонах реактора ВВЭР-1000.

При разработке концепции альтернативной ТВС (ТВСА) главное внимание было направлено на сведение к минимуму отрицательных последствий термомеханического и радиационного воздействий на геометрическую стабильность ТВСА. Конструкция альтернативной сборки занимает в определенной степени промежуточное положение между чехловыми ТВС реактора ВВЭР-1000 пятого энергоблока Нововоронежской АЭС и штатными бесчехловыми ТВС серийного реактора ВВЭР-1000.

В конструкции ТВСА реализованы следующие технические решения:

- введен постоянно действующий силовой каркас;
- применены оптимизированные дистанционирующие решетки (ДР), обеспечивающие уменьшенное взаимодействие в паре «твэл-ячейка ДР»;
- обеспечена «однородность» ТВСА за счет использования на высоте активной части ТВСА конструкционных материалов одного класса (циркониевые сплавы);
- в качестве материала уголков каркаса и направляющих каналов (НК) применен циркониевый сплав Э635, обладающий повышенными по сравнению со сплавом Э110, механическими свойствами и радиационной стойкостью;
- направляющие каналы (НК) имеют возможность терморadiационного роста, независимо друг от друга, а осевая нагрузка распределяется на все 18 НК за счет применения головки специальной конструкции и обеспечения зазора между НК и ячейками ДР.

Топливная загрузка 2 блока Хмельницкой АЭС (см. рис.1) принята в качестве го-

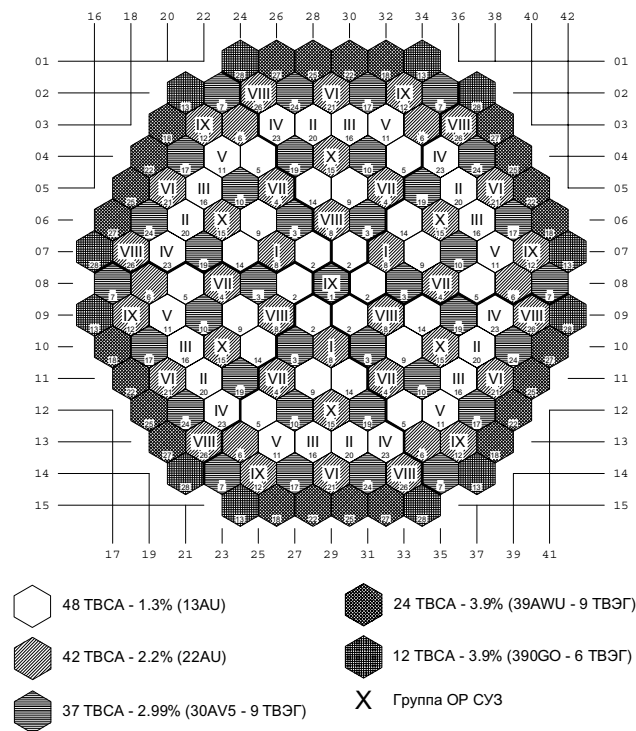


Рис. 1. Картограмма первой топливной загрузки

ловной, т.к. сформирована полностью из ТВСА.

В процессе физического пуска второго энергоблока Хмельницкой АЭС были выполнены следующие исследования:

- проверка симметричности загрузки активной зоны;
- измерение температурного и барометрического (плотностного) коэффициентов реактивности при критических концентрациях борной кислоты в реакторе, соответствующих различным положениям в активной зоне групп ОР СУЗ;
- определение дифференциальной и интегральной эффективности групп ОР СУЗ и коэффициентов реактивности по концентрации борной кислоты;
- измерение мощностного эффекта реактивности и тарировка измерителей нейтронной мощности реактора до 1% номинальной;
- эффективность аварийной защиты, а также эффективность аварийной защиты с имитацией застревания одного наиболее эффективного ОР СУЗ с последующим его добросом.

Измерение и регистрация параметров РУ в ходе экспериментов осуществлялись с помощью штатных средств и специализированного измерительного комплекса (СИК), разработанного в РНЦ «Курчатовский институт». В состав специализированного измерительного комплекса входили:

- система токовых измерений (СТИ-3);
- персональная электронная вычислительная машина (ПЭВМ) типа IBM PC.

СТИ-3 содержит:

- три независимых канала, связанных с ионизационными камерами;
- четыре независимых гальванически развязанных канала нормализованных сигналов напряжения, обеспечивающих сбор информации о технологических параметрах;
- три независимых высоковольтных источника питания ионизационных камер;

- источник питания системы.

Программное обеспечение СИК для ПЭВМ разработано в среде Delphi 6, работает под управлением операционной системы Windows 95/98/2000/NT, позволяет осуществлять сбор, обработку и представление данных в цифровом и графическом виде с частотой 10 Гц, сохраняет данные на диске, обладает возможностью просмотра накопленных данных.

На вход СТИ-3 (в зависимости от проводимых испытаний) поступали сигналы следующих параметров:

- токи ионизационных камер (три канала в диапазоне  $10^{-12}$ – $10^{-3}$  А);
- температура теплоносителя в активной зоне (входная, средняя и т.д., в зависимости от коммутированного сигнала);
- давление в 1 контуре;
- положение ОР СУЗ;
- концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура;
- уровень в компенсаторе давления;
- давление в ГПК.

Все поступающие на вход указанного преобразователя сигналы регистрировались с помощью ПЭВМ.

Для измерения нейтронного потока и реактивности использовались ионизационные камеры типа КНК-4, расположенные в резервных каналах №№ 4, 14 и 24 на высотной отметке соответствующей центру активной зоны.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ РАБОТЕ РЕАКТОРА НА МИНИМАЛЬНО КОНТРОЛИРУЕМОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ**

На минимально контролируемом уровне мощности на втором энергоблоке Хмельницкой АЭС были выполнены следующие исследования:

- определение значений температурного и барометрического (плотностного) коэффициентов реактивности при различных критических концентрациях борной кислоты в реакторе, соответствующих различным положениям в активной зоне групп ОР СУЗ;
- определение асимметрии размножающих свойств активной зоны (эффективностей отдельных органов СУЗ при практически свободной от поглотителей активной зоне);
- определение интегральных и дифференциальных характеристик (эффективностей) 10,9,8 групп ОР СУЗ при их погружении в активную зону в штатной последовательности с передачей движения и извлечение из активной зоны без передачи группового движения ОР СУЗ<sup>1</sup>;
- определение коэффициентов реактивности по концентрации борной кислоты в реакторе при различных состояниях активной зоны;
- определение эффективности аварийной защиты (АЗ) без одного, наиболее эффективного ОР СУЗ, эффективности наиболее эффективного ОР СУЗ и полной эффективности АЗ.

Результаты измерения температурного и барометрического коэффициентов реактивности представлены в табл. 1, 2. Здесь же для сравнения приведены расчетные значения критической концентрации борной кислоты в реакторе  $C_{бк}$ , значения температурного (суммарного по температуре теплоносителя и по температуре топлива)

<sup>1</sup> По штатному алгоритму работы системы группового и индивидуального управления СУЗ, при погружении групп передача движения от группы с большим номером к группе с меньшим номером осуществляется на высоте 50% от низа активной зоны. При извлечении группы передача группового движения осуществляется при достижении группы с меньшим номером крайнего положения.

Таблица 1

**Экспериментальные значения температурного коэффициента реактивности на минимально контролируемом уровне мощности в начале первого топливного цикла блока №2 Хмельницкой АЭС**

H <sub>10</sub> , %	H <sub>9</sub> , %	H <sub>8</sub> , %	H <sub>7</sub> , %	C <sub>бк</sub> , г/кг	T <sub>аз</sub> , °C	P <sub>1</sub> , кгс/см <sup>2</sup>	∂ρ/∂T <sup>(расч)</sup> , %/°C	∂ρ/∂T, %/°C
Первый эксперимент								
76%	ВКВ	ВКВ	ВКВ	7.05	280.4÷276.0	160.1÷160.8	-6.93x10 <sup>-3</sup>	↓T -(4.88± 0.5) x10 <sup>-3</sup>
76%	ВКВ	ВКВ	ВКВ		276.7÷280.2	160.1÷160.8		↑T -(5.39±0.54) x10 <sup>-3</sup>
Второй эксперимент								
НКВ	НКВ	31%	80%	5.70	280.1÷276.0	161.4÷160.2	-16.03x10 <sup>-3</sup>	↓T -(13.58±0.14) x10 <sup>-3</sup>
НКВ	НКВ	31%	80%		276.0÷280.1	161.4÷160.2		↑T -(14.67±0.15) x10 <sup>-3</sup>

ВКВ и НКВ – верхний и нижний концевые выключатели органов системы управления и защиты.

и барометрического коэффициентов реактивности ( $\partial\rho/\partial T, \partial\rho/\partial P$ ). При обработке результатов экспериментов за величину эффективной доли запаздывающих нейтронов принималось ее расчетное значение ( $\beta_{эфф} = 0.73\%$ ).

Из таблиц видно, что экспериментальные значения температурного коэффициента реактивности отрицательны, а барометрического коэффициента реактивности – положительны, что удовлетворяет требованиям безопасной эксплуатации. Отличие экспериментальных значений  $C_{бк}, \partial\rho/\partial T, \partial\rho/\partial P$  от соответствующих расчетных величин обусловлено, очевидно, неточностью констант программ моделирования топливных циклов.

Из табл. 1, 2 следует, что при погружении в активную зону в штатной последовательности 10, 9, 8 групп ОР СУЗ с уменьшением критической концентрации борной кислоты в реакторе температурный коэффициент реактивности уменьшается ( $\partial\rho/\partial T$  по абсолютной величине увеличивается), а барометрический – увеличивается, что удовлетворяет требованиям безопасной эксплуатации.

На минимально контролируемом уровне мощности реактора проведено определение эффективностей отдельных ОР СУЗ и величины асимметрии размножающих

Таблица 2

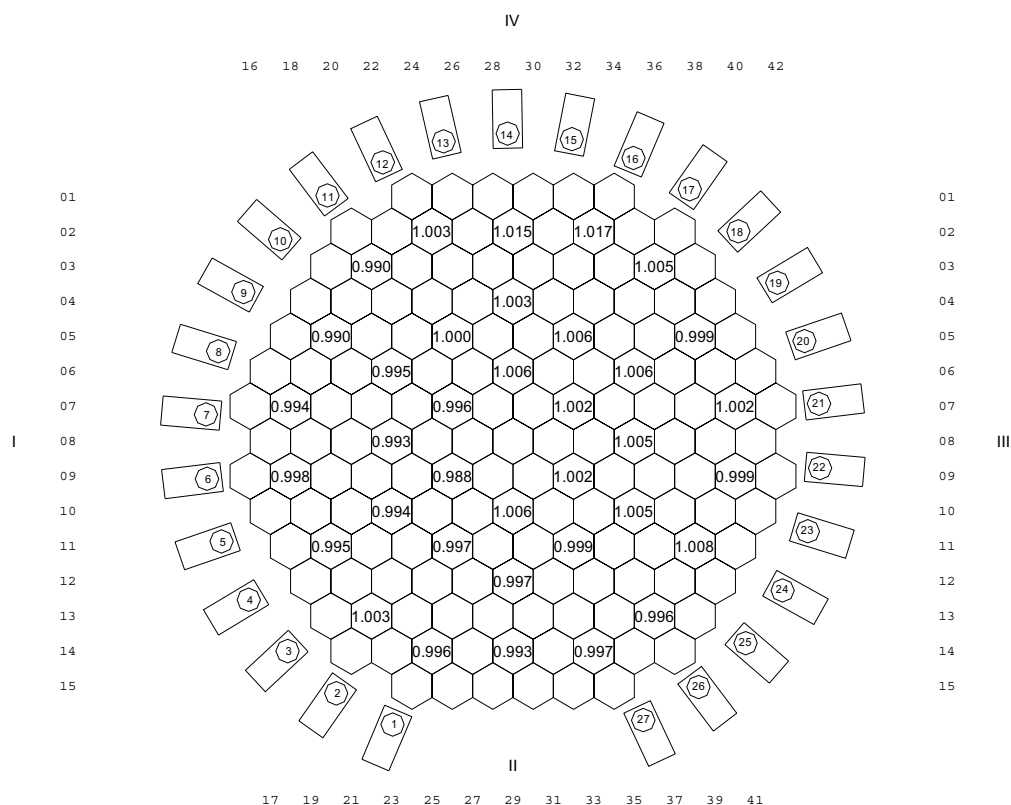
**Экспериментальные значения барометрического коэффициента реактивности на минимально контролируемом уровне мощности в начале первого топливного цикла блока №2 Хмельницкой АЭС**

$H_{10}, \%$	$H_9, \%$	$H_8, \%$	$H_7, \%$	$C_{бк}, \text{г/кг}$	$T_{аз}, ^\circ\text{C}$	$P_1, \text{кгс/см}^2$	$\partial\rho/\partial P^{(расч)}, \%/ \text{кгс/см}^2$	$\partial\rho/\partial P, \%/ \text{кгс/см}^2$
Первый эксперимент								
76%	ВКВ	ВКВ	ВКВ	7.10	279.9÷280.4	164.8÷152.4	0.15×10 <sup>-3</sup>	↓Р (1.03 ±0.69)×10 <sup>-4</sup>
Второй эксперимент								
НКВ	НКВ	31%	80%	5.80	280.0÷280.5	161.2÷164.5	0.84×10 <sup>-3</sup>	↑Р (0.52±0.16) ×10 <sup>-3</sup>
НКВ	НКВ	31%	80%	5.80	280.0÷280.5	164.5÷153.2		↓Р (0.93±0.13) ×10 <sup>-3</sup>

свойств активной зоны реактора. Измерение эффективностей органов регулирования 1, 6, 7, 8, 9, 10 групп осуществлялось методом их сброса в активную зону из крайнего верхнего положения (1÷9 группы на ВКВ, 10 группа – в положении 75÷80%) и органов регулирования 10 группы посредством их сброса из положения 86% (1÷9 группы на ВКВ). Идентичность условий, при которых проводились настоящие испытания, периодически проверялась посредством сброса в активную зону (как правило, перед определением эффективностей ОР очередной группы СУЗ) заранее выбранного «реперного» органа регулирования. В качестве «реперного» был выбран ОР с координатой 09–20 из 5 группы СУЗ, расположенной вблизи ИК № 4 (см. рис. 2).

Асимметрия размножающих свойств активной зоны определялась на основе информации о величине эффективностей симметрично расположенных в активной зоне органов регулирования (сравнение эффективностей ОР по соответствующей измеренной группе). Установлено, что величина асимметрии размножающих свойств активной зоны не превышает 2%, что соответствует критериям программы проведения испытаний (критерий – не превышение 10%). Картограмма исследования симметричности размножающих свойств активной зоны приведена на рис. 2.

На минимально контролируемом уровне мощности проведено определение интегральной и дифференциальной эффективности 10, 9, 8, 7 (до 50%) групп ОР СУЗ при их погружении в активную зону и извлечении из нее и коэффициентов реактивности по концентрации борной кислоты ( $\partial\rho/\partial C$ ) в реакторе. Определение интегральных и дифференциальных эффективностей 10, 9, 8 и 7 групп ОР СУЗ с передачей группового движения на высоте 50% осуществлялось в процессе снижения концентрации



4, 14, 24 - Экспериментальные ИК

Рис.2. Картограмма исследования симметричности размножающих свойств активной зоны

Таблица 3

**Экспериментальные значения интегральных эффективностей отдельных групп ОР СУЗ и коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты на минимально контролируемом уровне мощности в начале первого топливного цикла блока №2 Хмельницкой АЭС**

№ группы*	$\Delta\rho$ , %	$\partial\rho/\partial C$ , %/г/кг
10	(0.458±0.005) (расчетное значение равно 0.43%)	
9	(1.197±0.021) (расчетное значение равно 1.08%)	
8**	(0.791±0.018) (расчетное значение на том же участке равно 0.88%)	
7, 8, 9, 10***	(2.583±0.038) расчетное значение составляет 2.44%	-2.09 расчетное значение составляет -2.119%

\* Определение интегральной характеристики 10, 9, 8 групп ОР СУЗ осуществлялось при их извлечении из активной зоны в штатной последовательности с передачей группового движения на высоте 100%;

\*\* Интегральная характеристика 8 группы при ее извлечении от высоты 32% от нижнего концевой выключателя (НКВ);

\*\*\* Интегральная характеристика групп ОР СУЗ при их штатном погружении в активную зону с передачей группового движения на высоте 50% от низа активной зоны до положения 7 группы - 80%, 8 группы - 30%, 9, 10 групп - НКВ.

борной кислоты в теплоносителе первого контура и соответствующего погружения указанных групп в штатной последовательности. Определение интегральных и дифференциальных эффективностей 7, 8, 9 и 10 групп ОР СУЗ с передачей группового движения на высоте 100% производились в процессе повышения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура и соответствующего извлечения указанных групп.

Интегральная эффективность групп ОР СУЗ на минимально контролируемом уровне мощности приведена в табл. 3.

Проведено определение эффективности аварийной защиты реактора и эффективности наиболее эффективного органа регулирования СУЗ. Определение эффективности аварийной защиты реактора с имитацией застревания в крайнем верхнем положении одного наиболее эффективного органа регулирования (ОР СУЗ 13–22 из

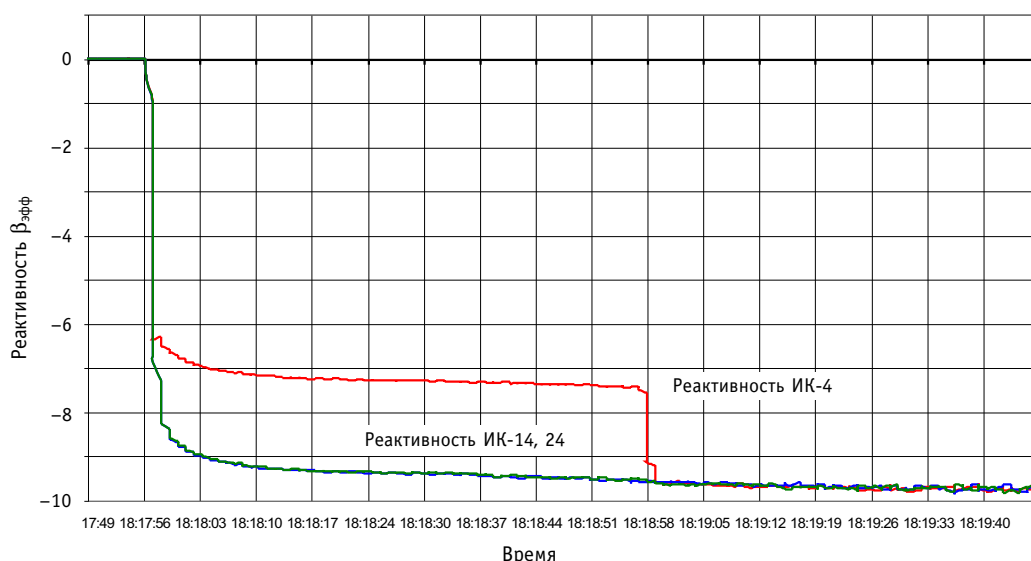


Рис. 3. Измерение реактивности аварийной защиты без одного наиболее эффективного ОР СУЗ 13–22

8-й группы вблизи него находилась ионизационная камера ИК-4) проводилось с удержанием его на ВКВ при прохождении сигнала АЗ и последующем его добросе в активную зону через 60 с. Эффективность аварийной защиты реактора на минимально контролируемом уровне мощности с учетом застревания в крайнем верхнем положении одного наиболее эффективного ОР СУЗ равна  $5.23 \pm 0.31\%$  (расчетное значение  $5.61\%$ ). Полная эффективность АЗ при этом составляет  $7.00 \pm 0.43\%$  (расчетное значение  $7.23\%$ ), что полностью соответствует требованиям нормативных документов и технологического регламента безопасной эксплуатации. На рис. 3 приведены результаты измерений реактивности определенных по ИК (№№ 4, 14, 24), которые получают из СИК в единицах  $\beta_{эфф}$  при сбросе АЗ.

Таблица 4

**Изменение параметров реакторной установки при выполнении измерений коэффициентов реактивности\***

Возмущение	$T_{эфф},$ сут	$C_{бк},$ г/дм <sup>3</sup>	$N_1, \text{ МВт}$	$H_{10}, \%$	$T_{вх}, ^\circ\text{C}$	$T_{вых}, ^\circ\text{C}$	$P_1, \text{ кгс/см}^2$
Изменение давления над активной зоной	3.6	5.07	1459→1450	90	282.9	298.0→297.8	163.2→155.5
Перемещение ОР СУЗ (ЭЧСР** в режиме РД-1)			1480→1462 1438→1469	87→83 83→90	283.0→282.8 283.1→283.3	298.2→297.8 297.9→298.4	160.1→159.8 160.2→160.5
Изменение электрической нагрузки			1411→1447 1444→1397	90 90	282.6→280.5 280.3→282.9	297.2→295.5 295.3→297.3	160.1→160.5 160.5→160.0
Изменение давления над активной зоной	5.6	5.00	1508.4→1496.1	84	282.4→282.1	297.9→297.6	164.0→152.8
Перемещение ОР СУЗ (ЭЧСР в режиме РД-1)			1472.8→1428.9 1410.4→1456.8	86→80 80→86	282.1→282.0 281.8→282.0	297.3→296.8 296.5→297.0	160.3→159.9 161.2→161.2
Изменение электрической нагрузки			1501.2→1436.1 1422.4→1472.2	86 86	281.3→284.9 284.8→281.9	296.7→299.6 299.5→297.1	161.6→160.2 160.5→161.8
Изменение давления над активной зоной	5.7	4.95	1483.0→1470.0	60	282.1→282.1	297.4→297.2	163.5→153.1
Перемещение ОР СУЗ (ЭЧСР в режиме РД-1)			1487.0→1422.0 1422.0→1470.0	60→55 55→58	282.0→281.9 281.8→281.9	297.4→296.5 296.5→297.1	159.5→159.0 159.3→159.7
Изменение электрической нагрузки			1462.0→1408.0 1398.0→1449.0	60 60	281.7→284.5 284.6→281.8	296.7→299.0 299.0→296.7	159.5→160.0 159.7→160.3

\* ХАЭС, блок № 2, первая топливная загрузка, стационарное отравление Xe-135,  $N_t = 50\%N_{ном}$ , 1÷9 группы ОР СУЗ на ВКВ,  $\beta_{эфф} = 0.73\%$ .

\*\* ЭЧСР – электрическая часть системы регулирования турбины. Режим РД-1 (режим поддержания давления по второму контуру).



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ РАБОТЕ РЕАКТОРА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЯХ МОЩНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ОСВОЕНИЯ

На энергетических уровнях мощности объем исследований нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора на втором энергоблоке Хмельницкой АЭС включал, в частности, следующие испытания:

- определение значений мощностного, температурного и барометрического коэффициентов реактивности на различных уровнях мощности при различных критических концентрациях борной кислоты в реакторе, соответствующих различным положениям в активной зоне групп ОР СУЗ;
- определение дифференциальной и интегральной эффективности 10 группы ОР СУЗ при различных уровнях мощности в процессе ее погружения и извлечения из активной зоны;
- определение коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты в реакторе при различных состояниях активной зоны на различных уровнях мощности;
- определение изменения реактивности, обусловленного изменением концентраций ядер йода и ксенона при снижении мощности реактора с одного до другого энергетического уровня;
- определение характеристик «свободных» аксиальных ксеноновых колебаний.

Изменения основных параметров реакторной установки при проведении испытаний по определению коэффициентов реактивности приведены в табл. 4.

Экспериментальные и (для сравнения) расчетные значения температурного (суммарного по температуре теплоносителя и по температуре топлива) барометрического и мощностного коэффициентов реактивности приведены в табл. 5.

Из таблицы видно, что экспериментальные и расчетные значения  $\partial\rho/\partial T$ ,  $\partial\rho/\partial P$  и  $\partial\rho/\partial N$  в пределах погрешности согласуются.

Результаты определения дифференциальной эффективности ( $d\rho/dN$ ) 10 группы ОР СУЗ, приведены в табл. 6.

В связи с незначительным изменением концентрации борной кислоты в 1 контуре определение коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты на основании данных химических анализов не представлялось возможным (погрешность  $\pm 0,1$  г/дм<sup>3</sup>). Оценка величины коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты была произведена с использованием показаний НАР-Б (нейтронный анализатор радиационный – бора), усредненных за интервал времени 5 мин.

Наряду с оказывающими стабилизирующее влияние отрицательными эффектами реактивности любое изменение состояние активной зоны вызывает относительно

Таблица 5

### Коэффициенты реактивности

$T_{эфф}$ , сут.	$C_{бк}$ , г/дм <sup>3</sup>	$H_{10}$ , %	$\partial\rho/\partial T$ , %/°C		$\partial\rho/\partial P$ , %/кгс/см <sup>2</sup>		$(\partial\rho/\partial N)_{аз}$ , %/МВт		$(\partial\rho/\partial N)_{вх}$ , %/МВт	
			Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
3.6	5.07	90	$(-7.870 \pm 3.287) \times 10^{-3}$	$-1.007 \times 10^{-2}$	$(6.166 \pm 3.580) \times 10^{-4}$	$6.6 \times 10^{-4}$	$(-3.523 \pm 1.355) \times 10^{-4}$	$-3.90 \times 10^{-4}$	$(-4.464 \pm 1.984) \times 10^{-4}$	$-4.45 \times 10^{-4}$
5.6	5.00	84-86	$(-8.178 \pm 2.621) \times 10^{-3}$	$-1.011 \times 10^{-2}$	$(6.347 \pm 2.665) \times 10^{-4}$	$6.6 \times 10^{-4}$	$(-3.785 \pm 1.129) \times 10^{-4}$	$-3.91 \times 10^{-4}$	$(-4.635 \pm 1.571) \times 10^{-4}$	$-4.46 \times 10^{-4}$
5.7	4.95	60	$(-9.622 \pm 2.452) \times 10^{-3}$	$-1.110 \times 10^{-2}$	$(7.126 \pm 3.036) \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-4}$	$(-4.212 \pm 0.928) \times 10^{-4}$	$-4.05 \times 10^{-4}$	$(-5.132 \pm 1.443) \times 10^{-4}$	$-4.66 \times 10^{-4}$

\*Расчетные значения коэффициентов реактивности получены при следующих заданных параметрах реакторной установки:  $T_{эфф} = 3.5$  сут, стационарное отравление Xe-135 и Sm-149,  $\beta_{эфф} = 0.73$  %,  $N_r = 1500$  МВт,  $T_{вх} = 283.5^\circ\text{C}$ ,  $H_{10} = 90, 86$  и  $60\%$  от низа активной зоны соответственно,  $C_{бк} = 5.04$  г/дм<sup>3</sup>.

Таблица 6

**Экспериментальные значения дифференциальной  
эффективности 10 группы ОР СУЗ топливной загрузки блока №2  
Хмельницкой АЭС на энергетических уровнях мощности\***

№ п/п.	$H_{op}$ , %	$dH$ , см	$dp/dH$ , $\times 10^3$ %/см
1	85.49	-14	0.8251
2	85.49	-14	0.8392
3	85.50	-12	0.8234
4	85.49	-14	0.8145
5	84.92	18	0.6048
6	85.50	12	0.6335
7	85.50	14	0.6146
8	87.22	10	0.5178
9	87.79	8	0.5379
10	87.79	10	0.5557
11	87.22	-12	0.7416
12	83.78	22	0.7216
13	90.09	-18	0.6036
14	84.93	18	0.6723
15	90.10	-10	0.5984
16	87.23	-8	0.9024
17	84.93	-10	0.9733
18	82.12	-8	1.2062
19	79.31	-8	1.2849
20	77.03	-8	1.4291
21	77.03	-12	1.4078
22	75.88	-10	1.4299
23	75.88	-10	1.4039
24	75.24	10	1.2636
25	75.24	8	1.3419
26	74.09	10	1.3607
27	74.09	8	1.3715
28	74.09	-14	1.3163
29	70.04	4	1.9120
30	71.19	-12	1.8051
31	70.64	-12	1.8205
32	70.03	-10	1.5520
33	67.81	-6	2.0812
34	66.06	-8	2.1319
35	63.69	-10	2.1994
36	60.77	12	2.0792
37	62.39	10	2.0861
38	62.37	8	2.0888
39	62.37	-12	2.3418
40	61.98	-10	2.3996
41	61.97	-10	2.3574
42	60.18	-10	2.3481

\*Экспериментальные значения температурного и барометрического коэффициентов реактивности получены при следующих заданных параметрах реакторной установки:  $T_{эф} = 3.6$  сут., 1÷9 группы ОР СУЗ на ВКВ,  $\beta_{эф} = 0.73$  %

Таблица 7

**Расчетные значения  
дифференциальной эффективности  
( $dp/dH$ ) 10 группы ОР СУЗ первой топливной  
загрузки блока №2 Хмельницкой АЭС**

$H_{10\text{ср}}, \%$	$dp/dH, \times 10^3, \%/см$
91,53	0,54
88,14	0,81
84,89	1,08
81,64	1,34
78,25	1,58
74,86	1,79
71,47	1,98
68,22	2,16
64,97	2,32
61,58	2,46
58,19	2,60

медленные ксеноновые переходные процессы, имеющие характер дестабилизирующей обратной связи. Для эксплуатации реактора практическое значение имеют обусловленные ксеноновыми процессами изменения реактивности при маневре мощности, а также колебания пространственного распределения энерговыделением в активной зоне («свободные ксеноновые колебания»).

На этапах освоения мощности проведено экспериментальное определение изменения реактивности в процессе отравления ксеноном при снижении мощности реактора с 75%  $N_{\text{ном}}$  до 40%  $N_{\text{ном}}$ . Максимальное значение скомпенсированной отрицательной реактивности, равное  $(0.707 \pm 0.225)\%$ , было достигнуто спустя 4 ч 44 мин (согласно расчетным данным  $\rho_{\text{min}} = -0.750\%$  достигается за 4.75 ч после начала снижения мощности реактора).

Отметим также, что реактивность  $\rho_{\text{хер}}$  равная нулю, была зафиксирована спустя 17 ч 42 мин после начала снижения мощности реактора. Соответствующее расчетное значение составляет 19.5 ч.

Максимальное значение реактивности было достигнуто спустя 51 ч с момента начала снижения мощности реактора и составило  $\rho_{\text{max}} = 0.426 \pm 0.225\%$  (согласно рас-

Таблица 8

**Результаты определения коэффициента реактивности  
по концентрации борной кислоты**

Параметр	Исходное состояние	Конечное состояние
$H_{10}, \%$	85	60
$C_{\text{НЗВОЗ}}$ (химанализ), г/дм <sup>3</sup>	5.07	5.04
$C^{\text{ср}}_{\text{НЗВОЗ}}$ (НАР-Б), г/дм <sup>3</sup>	4.94	4.88
$N_{\text{акз}}$ , МВт	1517	1515
$T_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	283.2	283.2
$\Sigma\Delta\rho$ (эксперимент), %	$-0.1404 \pm 0.0115$	
$\Sigma\Delta\rho$ (расчет), %	0.17	
$\partial\rho/\partial C$ (эксперимент по НАР-Б), %/г/дм <sup>3</sup>	-2.34	
$\partial\rho/\partial C$ (расчет), %/г/дм <sup>3</sup>	-2.242	

Таблица 9

**Параметры «свободных» аксиальных ксеноновых колебаний (Хмельницкая АЭС, блок №2, первая топливная загрузка)**

Параметры	Экспериментальные значения	Расчетные значения (КАСКАД)	Расчетные значения (ИР)
$T_{эфф}, \text{эфф.сут}$	15.2 ÷ 17.4	15.2	15.24
$N_t, \%N$	75 ± 1	75	75
$H_{10}, \%$	85	87.6	85
$C_{бк}, \text{г/кг}$	4.70	4.49	4.489
$T_{хе}, \text{ч}$	27.4±0.1	27.925	29.361
$\omega, \text{ч}^{-1}$	0.229±0.011	0.225	0.214
$\alpha, \text{ч}^{-1}$	-(0.033±0.001)	-0.027	-0.034
$\tau_{хе}, \text{ч}$	30.303±1.515	37.037	29.412
$A_0, \%$	14.214±0.711	16.251	16.15
$AO_{стац}, \%$	-(9.00±0.5)	-9.4	-9.77

четным данным  $\rho_{\max} = 0.389\%$  достигается за 49.5 часов после начала снижения мощности реактора).

В процессе освоения мощности на втором энергоблоке Хмельницкой АЭС были определены основные характеристики «свободных» аксиальных ксеноновых колебаний, а именно, амплитуда, период, циклическая частота, постоянная времени затухания и индекс стабильности с относительной погрешностью не более 5%. Параметры «свободных» аксиальных ксеноновых колебаний приведены в табл. 9.

**ВЫВОДЫ**

1. Представленные в настоящей статье результаты экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик первой топливной загрузки энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС с ТВСА на этапах физического и энергетического пуска подтверждают соответствие нейтронно-физических характеристик проектным значениям и требованиям ПБЯ РУ АС-89 и гарантируют проектный уровень безопасной эксплуатации данной топливной загрузки.

2. Полученные данные по параметрам критического состояния удовлетворительно (в пределах расчетных и экспериментальных погрешностей) согласуются с расчетными значениями:

2.1. Температурный коэффициент реактивности отрицателен во всем исследованном диапазоне параметров и удовлетворительно согласуется с данными проекта активной зоны.

2.2. Барометрический коэффициент реактивности при положении рабочей группы (№10) в рабочем диапазоне неотрицателен.

2.3. Эффективность аварийной защиты полная и с учетом «застревания» наиболее эффективного ОР СУЗ в крайнем верхнем положении удовлетворительно (в пределах расчетных и экспериментальных погрешностей) совпадает с проектными значениями.

2.4. Коэффициент асимметрии распределения энерговыделения на МКУ не превышает 1,7%.

2.5. Испытания по измерению мощностного коэффициента реактивности подтвердили, что мощностной коэффициент реактивности отрицателен во всем диапазоне.

Подтверждена саморегулируемость реакторной установки при повышении мощности реактора до  $\sim 1\% N_{\text{ном}}$ .

2.6. В начале топливного цикла аксиальные ксеноновые колебания являются затухающими.

### **Литература**

1. Общие положения обеспечения ядерной безопасности атомных станций. ОПБ-88/97 (ПНАЭ Г-01-011-97).
2. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. ПБЯ РУ АС-89 (ПНАЭ Г-01-024-90).
3. Правила ядерной безопасности атомных электростанций (разд. 4). ПБЯ-04-74.
4. Нейтронно-физический расчет топливного цикла энергоблока № 2 Хмельницкой АЭС: Отчет РНЦ «Курчатовский институт». Инв. № 32/1-60-403 от 30.10.03.
5. Альбом нейтронно-физических характеристик первой топливной загрузки 2-го блока Хмельницкой АЭС/(Альбом НФХ-201). – №2.ЯБ.6100.ИЭ-04.
6. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №2. 2.ГТ.4270.ИЭ-04.
7. Установка реакторная В-320. Экспериментальное определение нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. – Руководящий документ РД ЭО 0150-99.
8. Установка реакторная В-320. Методики расчета коэффициентов и эффектов реактивности по результатам измерений на действующих энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000. – Руководящий документ РД ЭО 0151-99.

Поступила в редакцию 15.03.2005

**УДК 621.311.25:621.039**

*Neutron and Physical Characteristics of the Khmel'nitsk-2 First Loading with Alternative-Design Fuel Assemblies at the Stages of Physical and Power Startup* \ E.S. Saakov, V.P. Derij, A.M. Yakovlev, A.A. Kormilitsin, A.V. Klepov, M.H. Gashev, Yu.A. Krainov, V.I. Chmykhun, V.V. Sarbukov, O.V. Lebedev, V.V. Makeev, A.Yu. Belyakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 13 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

The papers cover the results of the research in the field of physical and neutron characteristics for Khmel'nitsk-2 first loading with alternative-design fuel assemblies at the stages of physical and power startup. The obtained experimental findings could be used to adjust the constants and software to be applied for design modeling of the fuel cycle at the stages of design and operation of the power reactors

**УДК 621.039.55**

*Experimental Investigation of Hydraulic Characteristics of Tank Reactor Model* \ E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.A. Levchenko, Yu.D. Levchenko, Yu.S. Yur'ev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The results of experimental investigation of hydraulic characteristics of tank reactor model on «MP» installation are cited in the paper. Description of hydraulic model of two-loop tank type reactor plant is given. Experimental data cover wide range of installation performance parameters including emergency operational mode of reactor plant model with complete shut down of one feed-pump.

**УДК 621.039.58**

*Experimental Investigations in Substantiation of Design Functions of the Passive System of Filtration of the Leaks to the NPP Annulus* \ S.G. Kalyakin, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 7 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Experimental investigations of heat transfer and heat power of the “air – air” heat exchanger – vent pipe of the passive filtration system are carried out. It's obtained that heat transfer between heating and cold air is increasing below  $Re_h \gg 5 \cdot 10^3$  and when heating air flow is further rising the heat transfer ratio is remain constant. The temperature of the internal surface of the heat exchange pipe in the investigated range of the operating conditions is exceed 120 °C that provide full vaporization of the dropping aerosol before it hit on the filters.

**УДК 621.039,534.6**

*Experimental and Numerical Modelling of Liquid Metal Boiling Heat Transfer in a System of Parallel Fuel Subassemblies under conditions of Natural Convection* \ G.A. Sorokin, X. Ninokata, X. Endo, A.D. Efanov, A.P. Sorokin, E.F. Ivanov, G.P. Bogoslovskaya, V.V. Ivanov, A.D. Volkov, I.R. Zueva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 15 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 32 titles.

The paper presents description of test facility and experimental data on boiling hydrodynamics and heat transfer obtained with eutectic sodium-potassium alloy in a system of two parallel heat generating subassemblies positioned in the natural circulation loop. Also the paper describes briefly the modified numerical model and numerical code for calculations of thermohydraulic characteristics in case of liquid metal boiling as within single subassembly and in a system of parallel subassemblies. It is shown that results of calculations are in a good agreement with experimental data. It is concluded that modeling of natural circulation thermohydraulics in reactor core allows the conditions of stable heat transfer to be determined and such phenomena as heat transfer crisis, fuel pin dryout, reactor core melting to be prevent in the mode of fast reactor emergency cooling up.