

P13-2012-41

В. Д. Ананьев, А. В. Виноградов, А. В. Долгих, Л. В. Едунов,
Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов, С. А. Царенков,
А. А. Заикин*, А. А. Локанцев*

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК МОДЕРНИЗИРОВАННОГО
РЕАКТОРА ИБР-2 (ИБР-2М)**

*СНИИП-Систематом, Москва

Ананьев В. Д. и др.

P13-2012-41

Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М)

Приводятся основные результаты исследования модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М), выполненного по программе физического пуска реактора в 2010–2011 гг. на малой мощности до 30 кВт. Реактор ИБР-2 был остановлен в 2006 г. в связи с достижением ресурсных ограничений, установленных проектом. На реакторе была заменена значительная часть основного оборудования, за исключением биологической защиты, модулятора реактивности и технологических систем. По итогам физического пуска ИБР-2М критическая нагрузка активной зоны составила 64 ТВС. Оставшиеся незагруженными пять ячеек в ходе эксплуатации обеспечат длительность работы реактора в течение не менее 20 лет. Эффективность рабочих органов СУЗ и быстрдействие блоков аварийной защиты удовлетворяют требованиям ядерной безопасности. Имитация аварий по отключению различных технологических систем, обеспечивающих нормальное функционирование реактора, показала, что скорость ввода реактивности во всех случаях существенно меньше допустимого значения и блоки аварийной защиты в любой ситуации снизят мощность за время между импульсами до безопасного уровня. Технологические системы реактора во время физического пуска работали без замечаний. Форма импульса по быстрым нейтронам близка к гауссовой с длительностью (220 ± 3) мкс. Стандартные значения флуктуации энергии импульсов не превышают 5 %.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Ananiev V. D. et al.

P13-2012-41

Physical Start-up of the IBR-2 Modernized Reactor

Here we present the main results of the investigation of the IBR-2 reactor after the completion of its modernization, which was carried out within the framework of the program of the physical start-up of the reactor in 2010–2011 operated at a low power of up to 30 kW. The IBR-2 reactor was shut down in 2006 since it reached its design service life limits. A considerable part of the reactor main equipment was replaced except for a biological shield, reactivity modulator and technological systems. According to the results of the physical start-up of the modernized IBR-2 reactor the critical loading of the core was 64 fuel assemblies. The remaining uncharged five cells will ensure the reactor service life for no less than 20 years. The efficiency of the control roads of the reactor safety system and the operating speed of the emergency protection system units meet the nuclear safety requirements. The imitation of the accidents connected with the failures of various technological systems that maintain normal functioning of the reactor has demonstrated that in all cases the reactivity insertion rate is less than the acceptable value and the emergency protection system units in any situation will decrease the reactor power to a safe level during the period between pulses. The fast neutron pulse shape is close to Gaussian with a halfwidth at maximum of $(220 \pm 3) \mu\text{s}$. Mean square values of the pulse energy fluctuations do not exceed 5 %. The technological systems of the reactor during the physical start-up operated trouble free.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Исследовательская ядерная установка ИБР-2, в состав которой входит исследовательский импульсный реактор на быстрых нейтронах, предназначена для использования в качестве источника нейтронов для исследований в области физики конденсированных сред, биологии, химии, материаловедения.

Модернизированный реактор ИБР-2 (ИБР-2М) является последующей версией реактора ИБР-2, пущенного в эксплуатацию в 1984 г. и остановленного в 2006 г. в связи с выработкой ресурса. В процессе модернизации реактора были вновь разработаны, изготовлены и смонтированы

- корпус реактора с компактной активной зоной на 69 ТВС;
- подвижный отражатель гетерогенного типа ПО-3 на пониженную скорость вращения и ресурс работы 55 000 ч;
- тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) с глубиной выгорания 9 %;
- стационарные отражатели с блоками регулирования и аварийной защиты;
- исполнительные механизмы СУЗ;
- водяные гребенчатые замедлители с устройствами для их оперативной замены;
- иницилирующая часть СУЗ — комплекс АСУЗ-12Р (АСУЗ);
- система контроля технологических параметров (СКТП);
- пульт управления реактором.

Сохранены здание реактора, его биологическая защита и технологические системы реактора.

Таким образом, после модернизации был создан совершенно новый реактор ИБР-2М, работающий в составе исследовательской ядерной установки ИБР-2.

Физический пуск ИБР-2М проводился с 10 декабря 2010 г. по 10 июня 2011 г. Программа физического пуска ИБР-2М включала в себя эксперименты по определению фактических величин критических параметров активной зоны, эффективностей органов управления, контроля и защиты реактора, длительности импульсов мощности и величины флуктуации их амплитуд, а также ряда других физических характеристик реактора, необходимых для

подтверждения проектных возможностей реактора и определения безопасных пределов его работы.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА ИБР-2

Реактор ИБР-2М с проектной мощностью 2 МВт отличается от ИБР-2 прежде всего меньшей по размеру активной зоной и отсутствием центрального канала. Емкость активной зоны ИБР-2М 69 тепловыделяющих сборок (ТВС), идентичных ТВС ИБР-2. Топливом служат таблетки втулочного типа, выполненные из PuO_2 . Охлаждение активной зоны реактора обеспечивается натриевым жидкометаллическим теплоносителем. Циркуляция теплоносителя по петлям системы охлаждения реактора обеспечивается электромагнитными насосами.

Для создания нейтронных импульсов используется модулятор реактивности, работавший на реакторе ИБР-2 с 2004 по 2006 г. [1]. Модулятор реактивности состоит из основного (ОПО) и дополнительного (ДПО) подвижных отражателей, вращающихся в противоположные стороны со скоростью 600 об./мин (ОПО) и 300 об./мин (ДПО). Ротор ОПО представляет собой

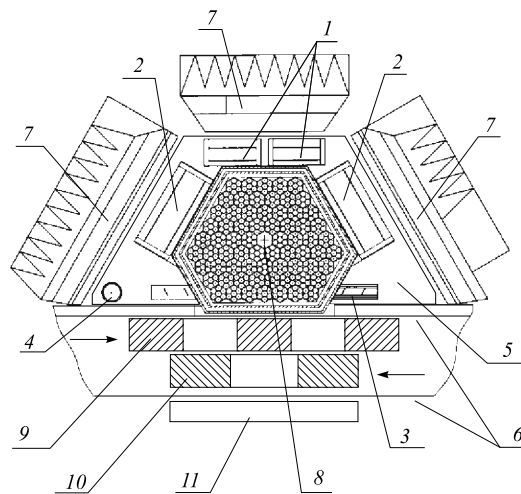


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны (АЗ) реактора ИБР-2М перед загрузкой: 1 — блоки аварийной защиты; 2 — компенсирующие блоки; 3 — блок промежуточного регулятора; 4 — стержень автоматического регулятора; 5 — матрица стационарного отражателя; 6 — кожух подвижного отражателя; 7 — водяные гребенчатые замедлители; 8 — источник; 9 — ОПО; 10 — ДПО; 11 — водяной плоский замедлитель

лопасть с тремя «зубьями», выполненными из никелевого сплава, а ДПО — лопасть с двумя «зубьям» также из никелевого сплава.

Уровень реактивности ИБР-2М регулируется органами СУЗ, представляющими собой перемещаемые вольфрамовые блоки в матрице стационарных стальных отражателей: компенсирующие органы КО — 2 шт., блоки аварийной защиты АЗ — 2 шт., блок ручного (промежуточного) регулятора РР и орган автоматического регулятора АР. Расположение органов СУЗ относительно активной зоны реактора ИБР-2М показано на рис. 1.

В процессе модернизации был проведен ряд конструктивных усовершенствований, призванных улучшить физические характеристики реактора и повысить надежность и безопасность его работы:

- с целью повышения надежности и эффективности органов аварийной защиты установлены два блока АЗ высокой эффективности;
- обеспечен независимый от срабатывания АЗ автоматический вывод компенсирующих блоков (КО) при сбросе мощности.

Работа по программе физического пуска проводилась в трех режимах:

- в режиме набора критической массы;
- в режиме стационарной мощности на уровне 0,1–20 Вт;
- в импульсном режиме с частотой 5 Гц при средней мощности до 100 кВт.

2. НАБОР КРИТИЧЕСКОЙ МАССЫ

Загрузка активной зоны ИБР-2М была начата 17 декабря 2010 г. и окончена 14 февраля 2011 г. До начала загрузки активная зона была заполнена кассетами-имитаторами, в центральную ячейку № 1 был загружен Cf-источник с интенсивностью потока нейтронов $8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ (на 1.11.2010 г.). Контроль нейтронного потока обеспечивался с помощью трех штатных каналов с камерами деления типа КНУ-3. Измерения по загрузке топливных кассет проводились по методу обратного умножения (ОУ), при котором умножение нейтронов оценивалось относительно «нулевой» скорости счета без топлива в активной зоне.

2.1. Измерение «нулевой» скорости счета. Нулевой счет измерялся в зависимости от положения органов регулирования и лопастей модулятора реактивности (МР), экранирующих штатные каналы контроля нейтронного потока. При загрузке 62 ТВС Cf-источник был извлечен и нулевой счет N_0^0 был перенормирован на N_0^1 по формуле

$$N_0^1 = N_0^0 \left(\frac{N_1}{N_2} - 1 \right)^{-1},$$

где N_1, N_2 — скорость счета до и после извлечения внешнего источника соответственно. В конце загрузки (64 ТВС) нулевой счет после измерений эффективности органов регулирования вновь был перенормирован на N_0^2 :

$$\Delta\rho = N_0^0 \left(\frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \right),$$

где $\Delta\rho$ — возмущение реактивности, вызванное перемещением органа регулирования КО1 на величину ΔX в критическом состоянии реактора; N_1, N_2 — счет в канале до и после перемещением КО1 на ΔX в подкритическом состоянии. Величина $\Delta\rho$ определялась по реактиметру. Значения нулевого счета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Изменение «нулевого» счета (имп./с) для трех пусковых каналов в процессе загрузки АЗ ИБР-2М

Обозначение	1-й канал	2-й канал	3-й канал	Число ТВС в активной зоне
N_0	1,6517	1,9677	1,6243	$M = 0$; Cf в АЗ
N_0^1	1,0406	1,2829	1,0477	$M = 62$ ТВС
N_0^2	0,8754	1,0625	0,8852	$M = 64$ ТВС

При загрузке активной зоны реактора распадом внешнего источника можно было пренебречь, и нулевой счет мог меняться только за счет роста спонтанных нейтронов при добавлении новых ТВС. На момент извлечения внешнего источника первоначальная оценка умножения 45 после извлечения внешнего источника снизилась до 29. Извлечение Cf-источника позволило дополнительно оценить интенсивность источника спонтанных нейтронов $n_{\text{сп}}$ (сюда входят и нейтроны от (α, n) -реакций на кислороде ^{18}O):

$$n_{\text{сп}} = n_{\text{Cf}} \left(\frac{N_1}{N_2} - 1 \right)^{-1},$$

где $n_{\text{Cf}} = 8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ — интенсивность Cf-источника.

При полной загрузке 64 ТВС — $n_{\text{сп}} = 5,3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Расчетное значение интенсивности спонтанных нейтронов при данной загрузке равно $7,1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, что на 34 % выше измеренного.

2.2. Загрузка активной зоны и выход на критичность по запаздывающим нейтронам. Загрузка активной зоны рабочими тепловыделяющими сборками осуществлялась в два этапа.

На первом этапе производилась загрузка ТВС до умножения 50. Основной целью первого этапа набора критической массы до умножения 50 являлась оценка эффективности органов регулирования и аварийной защиты, тепловыделяющих сборок и т. д., а также уточнение положения физического

центра основного (ОПО) и дополнительного (ДПО) модуляторов реактивности.

На втором этапе производилась догрузка активной зоны до критического состояния с запасом реактивности, необходимым для вывода реактора на мощность 2 МВт и работы в течение 2–3 лет без догрузки топлива. При этом с целью обеспечения ядерной безопасности загрузочные работы про-

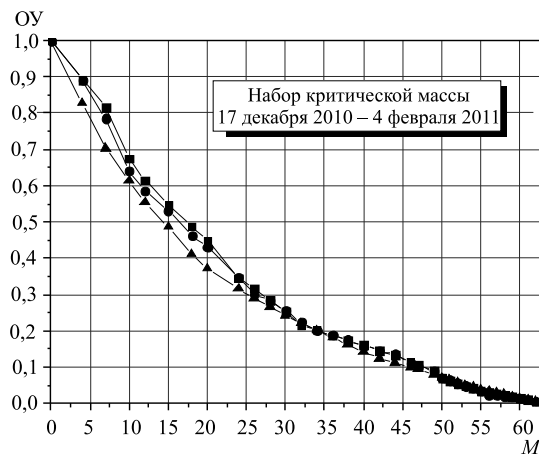


Рис. 2. Зависимость обратного умножения (ОУ) от числа загруженных в активную зону ТВС (M). Экстраполированное число ТВС для всех трех пусковых каналов равно 63

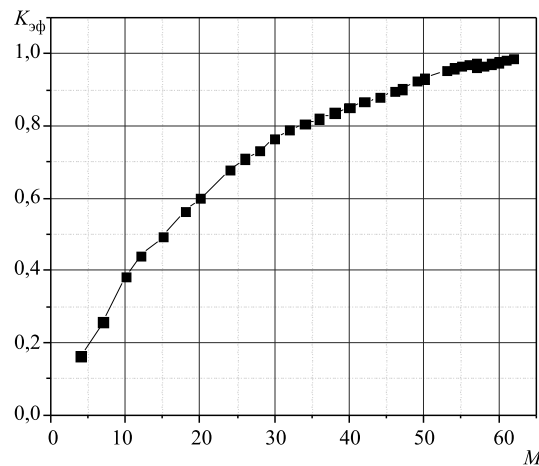


Рис. 3. Зависимость $K_{эф}$ от числа загруженных ТВС (M). Все органы регулирования вверху; начиная с 57-й ТВС компенсирующий блок КО1 был опущен в положение 200 мм

водились при одном выведенном блоке КО1, чтобы загрузка ТВС в активную зону заведомо не могла привести к умножению выше 50. Зависимость обратного умножения (ОУ) от числа загруженных ТВС приведена на рис. 2, значение $K_{эф}$ — на рис. 3. Перед выходом на критичность на умножении 500–1000 проводилось уточнение градуировки всех органов регулирования и защиты.

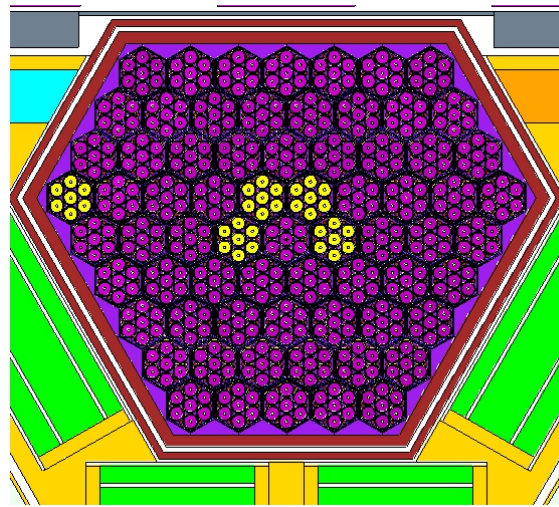


Рис. 4. Картограмма итоговой загрузки реактора ИБР-2М

Первый выход в критическое состояние на запаздывающих нейтронах был проведен 4 февраля 2011 г. при загрузке 63 ТВС. К концу загрузки число ТВС в активной зоне составило 64, запас реактивности — 1,27%. Картограмма полной загрузки активной зоны приведена на рис. 4.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНОВ СУЗ

Основные измерения эффективности органов регулирования проводились в подкритическом состоянии реактора на умножении 500–1000 и в критическом — на мощности 0,1–10 Вт при загрузке 63 и 64 кассет. При измерениях в критическом состоянии реактора использовался реактиметр, регистрирующий переходные процессы изменения мощности и реактивности при перемещении органов регулирования из критического состояния. В памяти реактиметра были воспроизведены константы запаздывающих нейтронов деления Pu^{239} , Pu^{238} и Pu^{240} быстрыми нейтронами. Для измерения мощности использовался дополнительный токовый канал с камерой КНК-53М, установленной вблизи поверхности замедлителя на 1-м горизонтальном нейтронном

пучке. Собственная погрешность реактиметра не превышала 2%. Калибровка реактиметра по периоду разгона, а также сравнение хода реактивности с данными Кипина по запаздывающим нейтронам [2] дали расхождение в пределах 1%. Погрешность определения положения органов регулирования была оценена равной 0,1 мм, что вносило в погрешность измерения реактивности $\sim 1\%$. Полная погрешность составляла $\pm 4\%$.

На рис. 5, 6 приведены результаты измерения кривых эффективности органов СУЗ, а в табл. 2 — полные и дифференциальные эффективности органов. Ожидаемым результатом было повышение в 1,3 раза по сравнению с ИБР-2 эффективности КО1 и КО2.

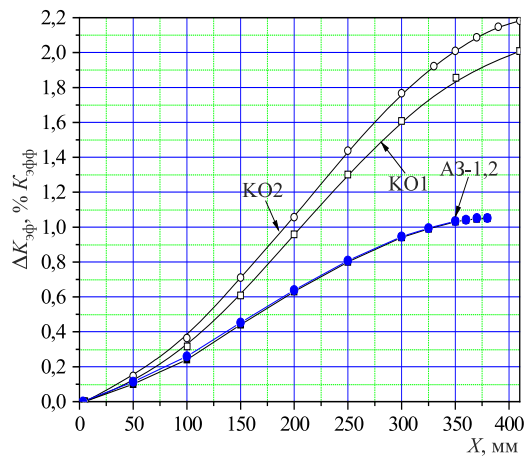


Рис. 5. Градуировочная кривая эффективности компенсирующих блоков КО1, КО2 и аварийной защиты АЗ1 и АЗ2

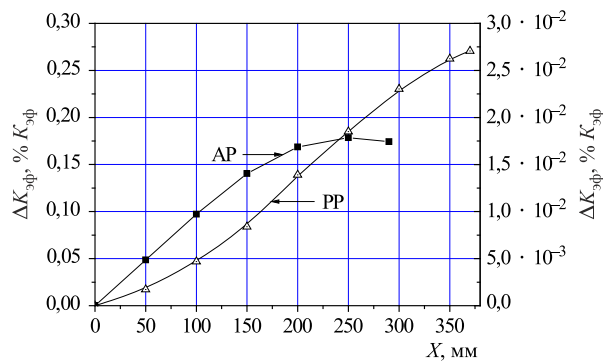


Рис. 6. Градуировочные кривые эффективности блоков РР (Δ) и АР (■)

Таблица 2. Эффекты реактивности рабочих органов СУЗ ИБР-2М

РО СУЗ	Рабочий ход от НКВ до ВКВ, мм	Эффективность					
		Полная			Дифференциальная		
		% $K_{эф}$	Доли $\beta_{эф}$	Линейный участок	% $K_{эф}/мм$	$10^{-2} \beta_{эф}/мм$	
АР	0–295	$(1,73 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$	0,0805	0–130	$(9,67 \pm 0,39) \cdot 10^{-5}$	$0,045 \pm 0,0018$	
РР	0–370	$0,27 \pm 0,011$	$1,25 \pm 0,05$	150–250	$(9,6 \pm 0,038) \cdot 10^{-4}$	$0,44 \pm 0,018$	
КО1	0–410	$2,01 \pm 0,08$	$9,3 \pm 0,37$	150–250	$(6,9 \pm 0,28) \cdot 10^{-3}$	$3,2 \pm 0,13$	
КО2	0–410	$2,18 \pm 0,08$	$10,1 \pm 0,4$	150–250	$(7,3 \pm 0,29) \cdot 10^{-3}$	$3,4 \pm 0,14$	
А31	0–380	$1,04 \pm 0,042$	$4,80 \pm 0,19$	120–220	$(3,6 \pm 0,14) \cdot 10^{-3}$	$1,64 \pm 0,066$	
А32	0–381	$1,05 \pm 0,042$	$4,85 \pm 0,19$	120–220	$(3,4 \pm 0,14) \cdot 10^{-3}$	$1,57 \pm 0,063$	

Примечание. НКВ, ВКВ — нижний и верхний концевые выключатели соответственно.

4. ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ ПОДВИЖНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Эффективность модулятора реактивности — кривая реактивности $K(\varphi)$ при смещении ОПО (ДПО) на угол φ около активной зоны — измерялась в стационарном режиме работы реактора. По этой кривой были оценены коэффициент параболы α и глубина модуляции ΔK . Параметры кривой реактивности подвижных отражателей приведены в табл. 3, а на рис. 7 представлено изменение реактивности от совместного перемещения ОПО–ДПО относительно активной зоны.

Таблица 3. Параметры кривой реактивности подвижных отражателей модернизированного реактора ИБР-2 в статике

Параметры МР	ДПО в физ. центре	ОПО в физ. центре	ОПО–ДПО
$\alpha_{\text{ОПО-ДПО}}, 1/\text{град}^2$			$1,29 \cdot 10^{-3}$
$\Delta K_{\text{ОПО}}, 10^{-2}$	2,30		
$\Delta K_{\text{ДПО}}, 10^{-2}$		0,65	
$\Delta K_{\text{МР}}, 10^{-2}$			3,0

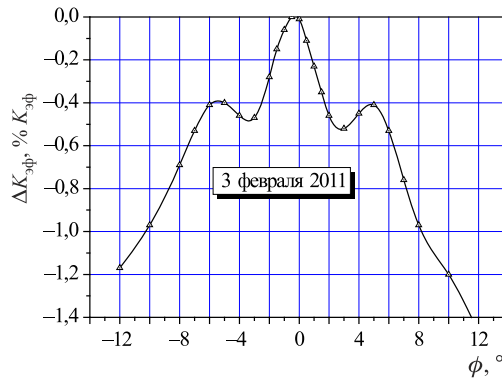


Рис. 7. Ход реактивности при встречном перемещении роторов ПО-3 в интервале $\pm 12^\circ$. По оси абсцисс — смещение ОПО (в градусах), по оси ординат — отклонение коэффициента размножения от единицы

5. БЫСТРОДЕЙСТВИЕ АЗ И КО

Проводились эксперименты по определению реактивности при сбросе блоков аварийной защиты и блоков КО. Измерялось положение блоков регулирования от времени при сбросе и далее по известному ходу реактивности от

положения органов относительно активной зоны определялись кривые вывода реактивности при сбросе органов в зависимости от времени. Исследования показали, что блоки АЗ полностью (до срабатывания нижнего концевого выключателя (НКВ) выводятся через 0,3 с после появления сигнала аварийного сброса. Блоки КО полностью выводятся из активной зоны за время 0,7–0,8 с. Вывод блоков АЗ и КО из активной зоны при обесточении шаговых двигателей производится за счет свободного падения рабочих органов за время 0,7–0,8 с.

В табл. 4 представлены эффективности и времена вывода органов СУЗ по сигналу АЗ. Изменение реактивности при сбросе блоков АЗ1 и АЗ2 во времени приведено на рис. 8. Как видим, за время 0,1 с выводимая реактивность составляет 0,12 %, что гарантировано переводит реактор за время между импульсами мощности в состояние ниже мгновенной критичности и гасит мощность.

Таблица 4. Эффективности и время вывода органов СУЗ ИБР-2М

Исполнительные органы СУЗ		Эффективность ($\beta_{эф}$)	Время вывода органов СУЗ по сигналу АЗ, с
АЗ1	режим быстрой АЗ	0,55	0,1 (на 80 мм)
	полный вывод АЗ	4,8	0,293
АЗ2	режим быстрой АЗ	0,55	0,1 (на 80 мм)
	полный вывод АЗ	4,85	0,3
КО1		9,3	Менее 0,7
КО2		10,1	Менее 0,7
РР		1,25	17
АР		0,0824	14

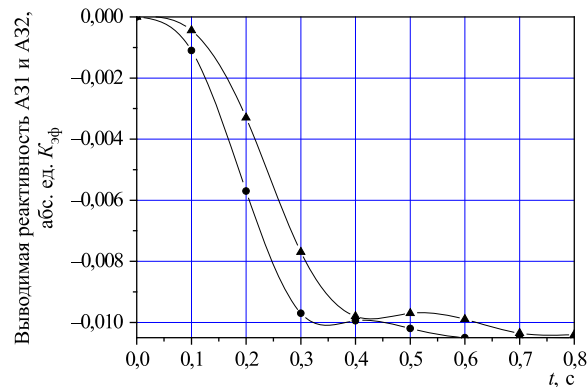


Рис. 8. Зависимость вывода реактивности от времени (t) при принудительном срабатывании АЗ под действием шагового двигателя и пружины (●) и только под действием пружины (▲)

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2М

Исследовались эффекты реактивности, связанные с изменением режима работы или отказа различных технологических систем, обеспечивающих нормальное функционирование реактора. Оценивались также эффекты реактивности при догрузке или перегрузке топливных кассет.

6.1. Эффективность тепловыделяющих сборок. Измерение эффективности проводилось для трех ТВС в ячейках активной зоны 63, 1 и 67, загружаемых в последнюю очередь, когда основная конфигурация активной зоны уже собрана. Результаты измерений следующие:

- ΔK (ТВС ячейки 63) = 0,47 %, расчет — 0,47 %,
- ΔK (ТВС ячейки 1) = 1,24 %, расчет — 1,33 %,
- ΔK (ТВС ячейки 67) = 0,57 %, расчет — 0,57 %.

6.2. Гидродинамический эффект реактивности (ГЭР). Гидродинамический эффект есть изменение реактивности при изменении расхода натрия через активную зону при «нулевой» мощности. Эксперименты по исследованию ГЭР проводились в подкритическом и критическом состояниях реактора с повышением и понижением расхода через активную зону по 7–10 м³/ч. Результаты измерений ГЭР, проведенные в критическом состоянии реактора, представлены на рис. 9. Видно, что кривые ГЭР при повышении и понижении расхода натрия через активную зону близки, а сам эффект отрицателен (при повышении расхода реактивность уменьшается) и в зависимости от расхода приблизительно описывается параболой

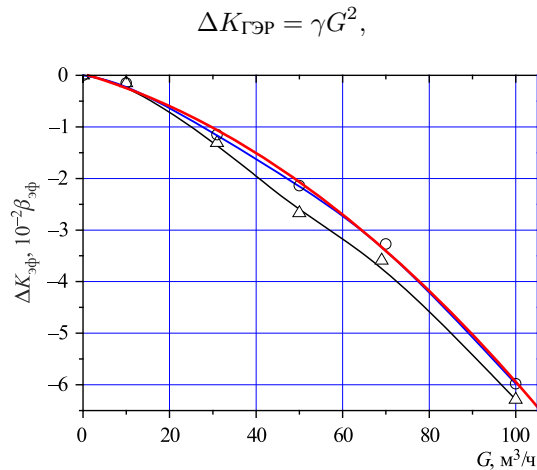


Рис. 9. Изменение ГЭР в зависимости от расхода натрия через активную зону в критическом состоянии реактора: Δ — повышение расхода, ○ — понижение расхода

где $\gamma = -(6,24 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$, $10^{-2} \beta_{эф} / (\text{м}^3/\text{ч})$, $[G] = \text{м}^3/\text{ч}$. Гидродинамический коэффициент реактивности при номинальном значении расхода равен

$$\frac{dK}{dG} = -0,12 \frac{10^2 \beta_{эф}}{\text{м}^3/\text{ч}}.$$

Гидродинамический коэффициент реактивности с ростом или уменьшением расхода натрия ведет себя единым образом, меняется только знак. Полное значение ГЭР при изменении расхода ступенями от режима холостого хода до номинального равно

$$\Delta K_{ГЭР} = -(6,24 \pm 0,20) \cdot 10^{-2} \beta_{эф} = -(1,35 \pm 0,43) \cdot 10^{-4}.$$

Характер изменения ГЭР для реактора ИБР-2М аналогичен ИБР-2 и позволяет сказать, что природа данного эффекта на малой мощности есть поперечное смещение ТВС потоком натрия.

6.3. Эффект реактивности при отключении циркуляционных насосов в обеих петлях 1-го контура охлаждения активной зоны. Отключение циркуляционных насосов 1-го контура охлаждения активной зоны реактора проводилось на мощности 2 Вт путем одновременного обесточивания насосов в обеих петлях первого контура (А и Б). Суммарный расход натрия через активную зону изменялся от номинального $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ до нуля. График изменения реактивности в этом эксперименте приведен на рис. 10.

Изменение реактивности во времени при сбросе расхода натрия через АЗ практически повторяет ход расхода. Можно считать, что ГЭР следует за изменениями расхода без запаздывания (запаздывание не более $0,1 \text{ с}$). Полный быстрый эффект от сброса расхода натрия через АЗ составил $+4,1 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$.

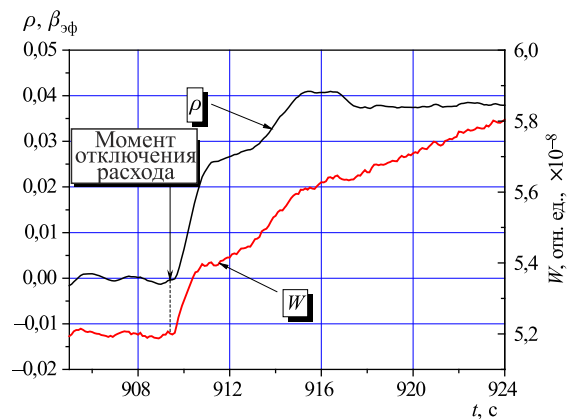


Рис. 10. Изменение мощности (W) и реактивности (ρ) после обесточивания циркуляционных насосов 1-го контура системы охлаждения активной зоны

Полное время развития эффекта от сброса расхода составляет 5,9 с, что с точностью 0,1 с равно времени сброса расхода.

6.4. Эффект слива воды из замедлителей. Эффект воды в замедлителях, окружающих активную зону, измеряли для оценки флуктуации мощности в случае кипения воды в замедлителях и для анализа аварийных ситуаций в случае потери воды в замедлителях. Измерения проводились для замедлителей ВЗ-302 и ВЗ-303. Замедлитель за ПО находился на штатном месте. Величину измеряемого эффекта определяли по реактиметру. Слив воды из указанных замедлителей дает значительный положительный эффект, приведенный в табл. 5. При сливе воды из отдельных замедлителей эффекты слива модернизированного реактора практически полностью совпадают с аналогичными эффектами для ИБР-2. Положительный эффект реактивности при сливе воды из замедлителей обусловлен изменением условий экранировки активной зоны от обратного рассеяния быстрых нейтронов.

Таблица 5. Эффект слива воды из основных замедлителей (в скобках — данные для ИБР-2 до модернизации)

Замедлитель	Эффект слива воды, $\Delta\rho, 10^{-2}\beta_{эф}$
ВЗ-303	+32 (31)
ВЗ-302	+17 (16)
ВЗ-303 + ВЗ-302	$\sum \Delta K_i = +49$

6.5. Прекращение циркуляции воды в замедлителях и в кожухе подвижного отражателя. Цель работы — изучить динамику изменения реактивности при вероятных отказах в системах охлаждения замедлителей и кожуха ПО. Эксперименты показали, что на интервалах времени до 40 с после отключения насосов при любых комбинациях включения-выключения циркуляции воды в замедлителях наблюдается быстрое незначительное изменение реактивности ($+0,6 \cdot 10^{-2}\beta_{эф}$ — включение, $-0,45 \cdot 10^{-2}\beta_{эф}$ — выключение), которое практически без задержки следует за выполнением той или иной операции.

При отключении циркуляции воды в кожухе подвижного отражателя наблюдался незначительный положительный эффект от $+0,07 \cdot 10^{-2}\beta_{эф}$ до $+2,0 \cdot 10^{-2}\beta_{эф}$. Эффект от последующего возобновления циркуляции составил $-0,1 \cdot 10^{-2}\beta_{эф}$. Скорость ввода реактивности не превышала $0,4 \cdot 10^{-2}\beta_{эф}/с$.

6.6. Отключение воздушного охлаждения стационарных отражателей. Прекращение расхода воздуха через стационарный отражатель вызвало выведение за время 650 с реактивности, равной $0,066\beta_{эф}$. Спад реактивности близок к экспоненциальной зависимости (см. рис. 11). Поскольку изменение реактивности обусловлено нагревом отражателей, из кривой спада реак-

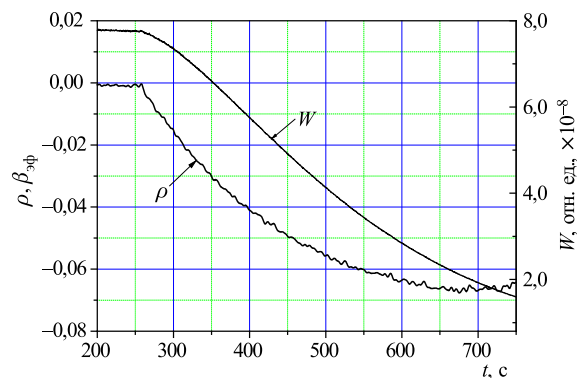


Рис. 11. Изменение мощности (W) и реактивности (ρ) после отключения воздушного охлаждения стационарных отражателей

тивности получена оценка константы тепловой инерционности отражателей, равная 180 с.

6.7. Температурный (изотермический) эффект. Изотермический коэффициент реактивности (ИКР) определяется как изменение реактивности при медленном (квазистатическом) повышении температуры натрия на входе в активную зону на $1\text{ }^\circ\text{C}$ при постоянных значениях мощности и расхода.

Оценка ИКР была получена на мощности 500 Вт при разогреве натрия в первом контуре охлаждения активной зоны с помощью электрических нагревателей. Прирост температуры натрия на входе в активную зону составил $6,5\text{ }^\circ\text{C}$. Мощность реактора и расход натрия поддерживались на постоянном уровне. Изменение реактивности составило $0,065\beta_{\text{эф}}$.

Таким образом, на малой мощности до 500 Вт значение изотермического температурного коэффициента равно

$$dk/dt = -(1,0 \pm 0,05) \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}.$$

7. ВЫВОД РЕАКТОРА НА ИМПУЛЬСНУЮ КРИТИЧНОСТЬ И ЗАПАС РЕАКТИВНОСТИ

Первый вывод реактора на импульсную критичность был осуществлен 29.03.2011 г. с 64 ТВС с расходом натрия через активную зону $60\text{ м}^3/\text{ч}$. Экстраполяция на импульсную критичность велась как по линейной зависимости обратной скорости счета в импульсе N^{-1} , так и по N^{-2} и $N^{-1,2}$. Наилучшую экстраполяцию показали зависимости типа $N^{-1,2}$. Кривая экстраполяции на критичность при первом выводе реактора в критическое состояние в импульсном режиме приведена на рис. 12.

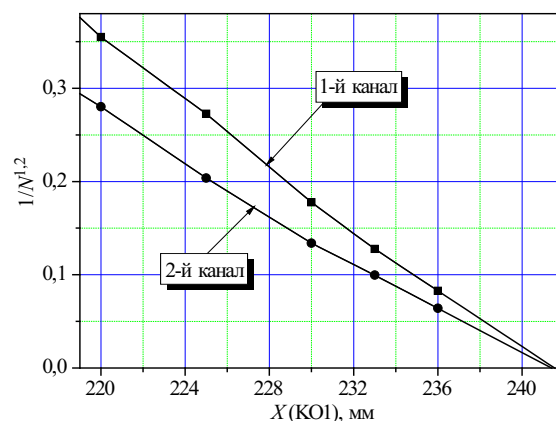


Рис. 12. Первый выход на импульсную критичность реактора ИБР-2М с 64 топливными кассетами. По оси абсцисс — положение компенсирующего органа КО1, по оси ординат — обратный счет в импульсе для двух независимых измерительных каналов

Отметим, что положение импульсной критичности выше уровня критичности на запаздывающих нейтронах на величину $\beta_{эф} + \varepsilon_{m0}$, где $\beta_{эф} = 2,165 \cdot 10^{-3} \Delta K / K$, ε_{m0} — равновесная импульсная надкритичность. Из анализа формы импульса получена оценка величины $\varepsilon_{m0} = (9 \pm 1) \cdot 10^{-4} \Delta K / K$.

Изменение запаса реактивности при выводе органов регулирования из состояния импульсной критичности «нулевой» мощности (5 Вт) схематично представлено на рис. 13.

8. ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА МОЩНОСТИ

Форма импульса была измерена по быстрым и тепловым нейтронам.

По быстрым нейтронам форма импульса измерялась на мощности 30 кВт в счетном режиме с помощью Th-камеры деления, установленной на 1-м горизонтальном нейтронном пучке на базе 11 м. Использовалась система временного анализа. Форма импульса быстрых нейтронов близка к гауссовой с длительностью на половине высоты (220 ± 3) мкс, близкой к расчетной 215 мкс.

Форма импульса тепловых нейтронов измерялась на мощности 20 Вт с помощью камеры КНК-53М, установленной вблизи замедлителя со стороны 1-го пучка. Измерение проводилось в токовом режиме детектора с помощью цифрового осциллографа Tektronix 3014С (рис. 14).

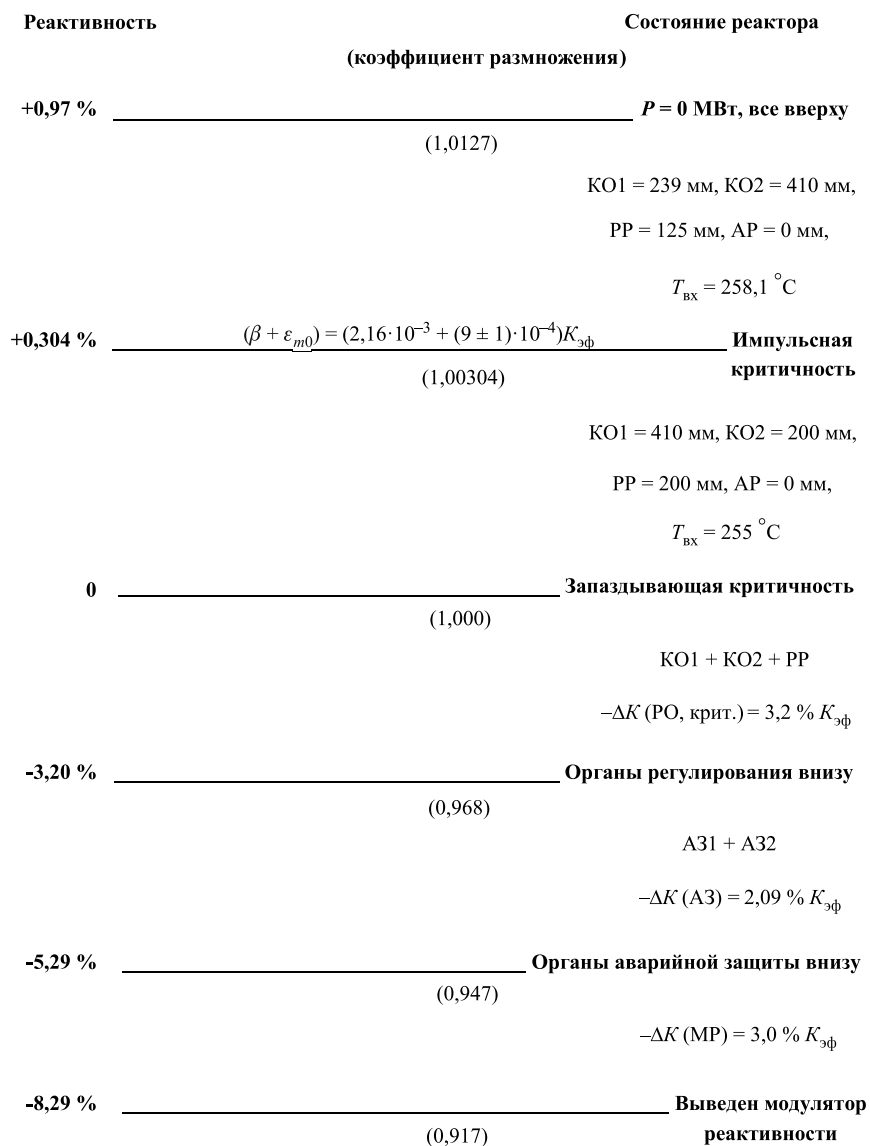


Рис. 13. Баланс реактивности реактора ИБР-2М

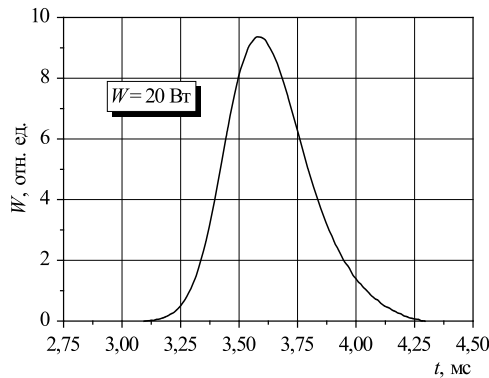


Рис. 14. Форма импульса мощности по тепловым нейтронам вблизи поверхности замедлителя реактора ИБР-2М

9. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКТОРНЫХ ШУМОВ

Исследование нейтронных шумов и флуктуации реактивности важно тем, что при переводе реактора в импульсный режим чувствительность реактора к возмущениям внешней реактивности увеличивается в 15 раз. Нейтронные шумы исследовались при работе реактора в стационарном и импульсном режимах.

В стационарном режиме, как показали исследования, практически весь нейтронный шум находился в частотном диапазоне менее 0,05 Гц. Шумы имели значительную стохастическую компоненту, в которой технологические шумы не проявлялись.

В импульсном режиме измерялась спектральная плотность флуктуации энергии импульсов и определялись некоторые статистические характеристики шумов, характеризующие их разброс. Использовалась измерительная система, с помощью которой регистрировался временной ряд 8192 последовательных значений энергии импульсов. Далее проводился обычный статистический анализ временных рядов. Исследовались две характерные области средней мощности:

- состояние реактора близко к импульсной критичности, средняя мощность 0,01–10 Вт;
- режим импульсной критичности, средняя мощность 100 Вт–~ 20 кВт.

9.1. Стохастические флуктуации энергии импульсов мощности. Изменялись в диапазоне 0,05–10 Вт в подкритическом или близком к критическому режиму работы реактора. Определялась относительная дисперсия флуктуации энергии импульсов в зависимости от обратной мощности ($1/W$). В указан-

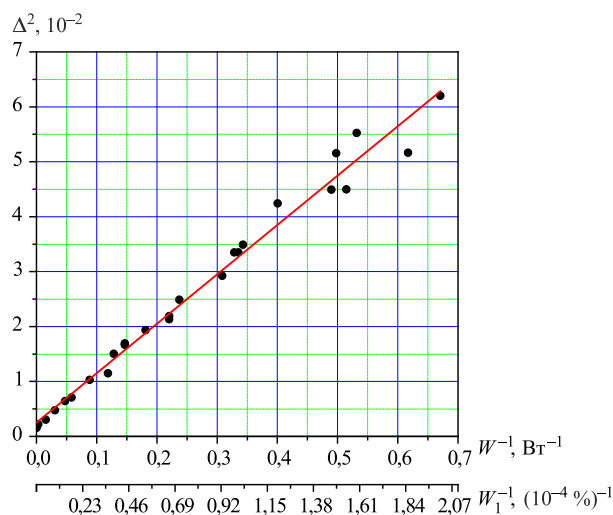


Рис. 15. Зависимость относительной дисперсии колебаний энергии импульсов (Δ^2) от обратной мощности ($1/W$) и показаний 1-го штатного канала ($1/W_1$)

ном диапазоне средней мощности относительная дисперсия шумов хорошо аппроксимируется линейной зависимостью от $1/W$ (см. рис. 15):

$$\Delta^2(W) = \Delta_0^2 + (0,0898 \pm 0,002)/W,$$

где Δ_0^2 — экстраполированное (при $W \rightarrow \infty$) значение дисперсии, обусловленное флуктуациями внешней реактивности.

Второе слагаемое — стохастические флуктуации. Величина $\Delta_0^2 = \Delta^2(0) \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$. Расчетная зависимость дисперсии стохастических шумов практически совпадает с измеренной:

$$\Delta^2(W) = (0,0895 \pm 0,0022)/W.$$

9.2. Корреляционный анализ флуктуации энергии импульсов мощности и колебаний подвижных отражателей. Параллельно с энергией импульсов мощности измерялись параметры реактора, в наибольшей степени влияющие на флуктуации энергии импульсов:

- $X_{\text{ОПО}}$ — поперечные смещения ОПО;
- $X_{\text{ДПО}}$ — поперечные смещения ДПО;
- φ — угол рассинхронизации между ОПО и ДПО во вращении.

Спектральные плотности флуктуации энергии импульсов и осевых колебаний лопастей ОПО и ДПО показаны на рис. 16, 17 соответственно. Данные по уровню флуктуации энергии импульсов и осевых вибраций отражателей представлены в табл. 6.

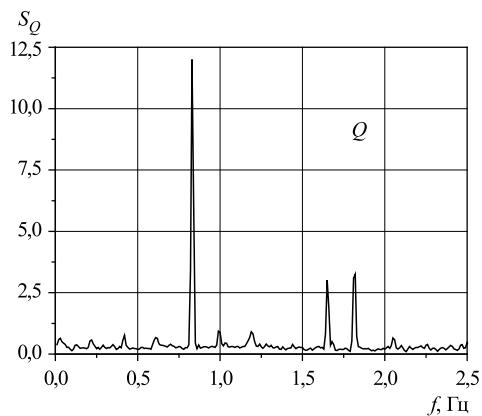


Рис. 16. Спектральная плотность флуктуации энергии импульсов мощности S_Q

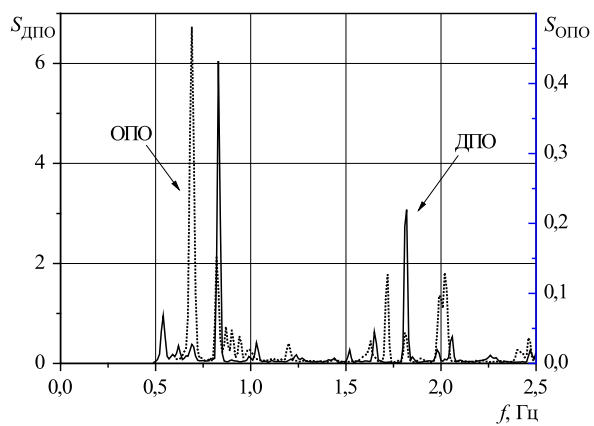


Рис. 17. Спектральная плотность осевых колебаний лопастей ДПО и ОПО

Таблица 6. Среднеквадратические (σ) и максимальные (Δ) значения флуктуации энергии импульсов (Q), осевых ($X_{\text{опо}}$, $X_{\text{дпо}}$) и фазовых (φ) колебаний лопастей подвижных отражателей на мощности 100 Вт – 1,5 кВт

Параметр	σ	Δ
Q , %	$4,9 \pm 0,5$	33 ± 3
$X_{\text{опо}}$, мм	$(3,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$0,02 \pm 0,005$
$X_{\text{дпо}}$, мм	$0,015 \pm 0,005$	$0,12 \pm 0,005$
φ , мкс	24 ± 4	160 ± 20

Как видно из рис. 17, в спектре флуктуации энергии импульсов видны линии 0,61; 0,83; 0,99; 1,19; 1,65; 1,82; 2,05 Гц, связанные с осевыми (по нормали к активной зоне) колебаниями лопастей ОПО и ДПО.

По данным, представленным в табл. 6, среднеквадратические флуктуации энергии импульсов на малой мощности не превышают в среднем 5 %, т. е. достаточно малы и находятся в диапазоне предсказанных значений. Максимальный зарегистрированный размах флуктуации энергии импульсов равен (33 ± 3) %. Спектральный состав колебаний отражателей, влияющих на реактивность и определяющих уровень флуктуации мощности, представляет собой в основном гармонические колебания, «замаскированные» в спектрах колебаний исследуемых параметров в диапазоне частот до 2,5 Гц. Фазовые колебания между лопастями ОПО и ДПО малы и в спектре флуктуации мощности не проявляются. Таким образом, основными источниками флуктуации энергии импульсов на начальном этапе работы реактора на мощности до 1,5 кВт являются осевые колебания отражателей.

10. РАБОТА СУЗ

Для управления модернизированным реактором ИБР-2 была разработана и изготовлена совершенно новая, отвечающая всем современным требованиям безопасности, система управления и защиты реактора (СУЗ ИБР-2), предназначенная для контроля мощности реактора, управления, поддержания и аварийного прекращения цепной реакции деления, контроля состояния модулятора реактивности, контроля технологических параметров систем, важных для безопасности, недопустимое отклонение которых требует аварийного останова реактора.

В составе СУЗ ИБР-2М были модернизированы следующие составные части:

- исполнительные механизмы СУЗ (разработка НИКИЭТ);
- иницирующая часть СУЗ — комплекс аппаратуры системы управления и защиты реактора ИБР-2М (АСУЗ-12Р), включая подвески ионизационных камер (разработка СНИИП-Систематом);
- полномасштабный пульт для организации рабочих мест инженера СУЗ, инженера КИП и начальника смены (разработка СНИИП-СИСТЕМАТОМ);
- аппаратура резервного пункта управления (разработка СНИИП-Систематом).

Введен ряд новых функций, определяемых комплексом АСУЗ-12Р:

- автоматизированная предпусковая проверка контроля срабатывания аварийной защиты, что значительно сократило время на подготовку реактора к работе;

- архивация, отображение и документирование контролируемых параметров;
- плановый останов с мощности менее 1 % $W_{\text{ном}}$;
- контроль времени падения рабочих органов СУЗ;
- автоматический останов реактора на заданном уровне мощности.

Качественно изменились предоставление информации по контролируемым параметрам на пульте управления реактором и ряд технических характеристик каналов защиты и контроля, так, чувствительность пусковых каналов контроля нейтронного потока по сравнению с предыдущей аппаратурой повысилась в 3–5 раз.

На этапе физического пуска ИБР-2М были проведены испытания узланых частей и аппаратуры комплекса АСУЗ-12Р при совместной работе в составе СУЗ ИБР-2М:

- приводов органов регулирования (КО-1, КО-2, РР, АР) и защиты (АЗ-1, АЗ-2), подвесок блоков детектирования нейтронного потока ПИК1–ПИК5;
- комплекса АСУЗ-12Р.

Исследование СУЗ ИБР-2М проводилось как в стационарном, так и в импульсном режимах работы реактора. Была выполнена проверка и настройка узлов АСУЗ-12Р вплоть до 30 кВт мощности. Определено оптимальное расположение блоков детектирования в каналах массива биологической защиты, в результате чего обеспечено требуемое условие перекрытия измерительными каналами контроля мощности на десятичный порядок. В комплексе АСУЗ-12Р отработан канал автоматического регулирования мощности, функционирующий в режиме стабилизации и автоматического изменения мощности до 6 % $W_{\text{ном}}$. СУЗ ИБР-2М в процессе физического пуска реактора работала в соответствии с проектом, без замечаний. Ложных срабатываний аварийной защиты во время физического пуска реактора не было.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Исследование реактора ИБР-2М, выполненное по программе физического пуска на малой мощности до 30 кВт, показало следующее.

- Критическая загрузка реактора ИБР-2М составила 64 ТВС. Оставшиеся незагруженными пять ячеек по мере их загрузки в ходе эксплуатации обеспечат длительность работы реактора в течение не менее 20 лет.
- Эффективность рабочих органов СУЗ и быстродействие блоков аварийной защиты удовлетворяют требованиям ядерной безопасности.
- Имитация аварий по отключению различных технологических систем, обеспечивающих нормальное функционирование реактора, показала, что скорость ввода реактивности во всех случаях существенно меньше допустимого

значения, и блоки аварийной защиты в любой ситуации снизят мощность за время между импульсами до безопасного уровня.

- Форма импульса по быстрым нейтронам близка к гауссовой с длительностью на половине высоты (220 ± 3) мкс.

- Стандартные значения флуктуации энергии импульсов на мощности до 30 кВт не превышают 5%. Основным источником флуктуации являются осевые колебания лопастей подвижных отражателей.

- Технологические системы реактора — подвижный отражатель ПО-3, системы натриевого охлаждения, охлаждения водяных замедлителей, охлаждения тепловой защиты, охлаждения стационарных отражателей — и система контроля технологических параметров во время физического пуска работали без замечаний.

В заключение авторы выражают благодарность персоналу установки ИБР-2, силами которого была выполнена топливная загрузка реактора ИБР-2М и осуществлялась подготовка реактора к проведению многочисленных экспериментов.

Авторы признательны дирекции ОИЯИ за постоянное внимание и помощь в проведении модернизации и пуска ИБР-2М, А. В. Белушкину за постоянное внимание и поддержку этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В. Д. и др.* Пуск и исследование основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Препринт ОИЯИ Р13-2004-156. Дубна, 2004.
2. *Кипин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.

Получено 16 апреля 2012 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 28.06.2012.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 1,98. Тираж 280 экз. Заказ № 57694.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/