

P13-2014-31

В. Д. Ананьев, А. В. Долгих, Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК
МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА
ИБР-2 (ИБР-2М).
ЗАГРУЗКА АКТИВНОЙ ЗОНЫ**

Ананьев В. Д. и др.

P13-2014-31

Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М).
Загрузка активной зоны

В работе представлены основные результаты по загрузке активной зоны реактора ИБР-2М и выводу реактора в критическое состояние, выполненным специалистами ЛНФ ОИЯИ в соответствии с программой физического пуска модернизированного реактора ИБР-2. Загрузка активной зоны ИБР-2М была начата 17 декабря 2010 г. и окончена 14 февраля 2011 г.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Ananiev V. D. et al.

P13-2014-31

Physical Start-Up of the IBR-2M Reactor. Core Fuel Loading

The results of the work on core fuel loading and bringing the IBR-2M reactor to critical state, carried out by the JINR FLNP researchers in accordance with the Program of physical start-up of the modernized IBR-2 reactor, are presented. Core fuel loading of IBR-2M was begun on 17 December 2010 and completed on 14 February 2011.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Загрузка активной зоны любого реактора является наиболее важным этапом его работы. Как правило, информация по загрузке реактора ограничена или вообще недоступна. Это связано со многими причинами. Для энергетических реакторов отсутствие детальной информации по загрузке в большей степени связано с коммерческими интересами. Данные по топливной загрузке существующих многочисленных подкритических и критических сборок ввиду специфики их применения также ограничены. Загрузки исследовательских реакторов, введенных в эксплуатацию в 1960–70-е гг., освещены в малодоступной форме. Пуски исследовательских реакторов, в том числе реакторов, выполняющих функцию источников нейтронов, редки. Например, пуск реактора ИБР-2М в 2011 г. был первым в России за последние 19 лет. Общий интерес к результатам топливной загрузки реактора важен по многим причинам. Например, сравнение расчетных значений критических параметров реальной конструкции реактора с экспериментальными данными дает определенный «толчок» в развитии той или иной реакторной тематики. Возникают требования к уточнению расчетных методик, ядерных данных, программных средств и т. д. или, например, к отработке технологии производства ядерного топлива, материалов для изготовления ТВЭЛов и т. д. В работе представлены основные результаты по загрузке активной зоны реактора ИБР-2М и выводу реактора в критическое состояние, выполненные специалистами ЛНФ ОИЯИ в соответствии с программой физического пуска модернизированного реактора ИБР-2 [1, 2]. Загрузка активной зоны ИБР-2М была начата 17 декабря 2010 г. и окончена 14 февраля 2011 г.

1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА ИБР-2М

Модернизированный импульсный исследовательский реактор на быстрых нейтронах ИБР-2М является последующей версией реактора ИБР-2, остановленного в 2006 г. в связи с выработкой ресурса. В процессе модернизации были полностью заменены активная зона с корпусом аппарата, стационарные

отражатели, органы регулирования и аварийной защиты. Полностью заменена система управления и защиты реактора (СУЗ): в штатных каналах установлены новые камеры нейтронного потока, введена в строй новая, построенная на современной электронной базе система управления и защиты. Активная зона ИБР-2М отличается от активной зоны ИБР-2 меньшим размером и отсутствием центрального канала (см. рис. 1). Топливные элементы ИБР-2М идентичны топливным элементам ИБР-2. Кассета (ТВС) высотой по топливу 444 мм набрана из шестигранных семитвальных тепловыделяющих сборок; емкость корзины активной зоны — 69 ТВС; топливом служат таблетки втулочного типа из PuO_2 . В качестве теплоносителя для охлаждения активной зоны реактора используется жидкий натрий при температуре 250–350 °С при средней номинальной мощности 2 МВт, прокачиваемый двумя электроиндукционными насосами (насос петли А и насос петли Б).

Для создания нейтронных импульсов используется модулятор реактивности, работавший на реакторе ИБР-2 с 2004 по 2006 г. Модулятор реактивности состоит из основного (ОПО) и дополнительного (ДПО) подвижных отражателей. Ротор ОПО представляет собой лопасть с тремя «зубьями» и противовесом, а ДПО — лопасть с двумя «зубьями». Роторы заключены в герметичный кожух и вращаются в среде гелия. Уровень реактивности ИБР-2М

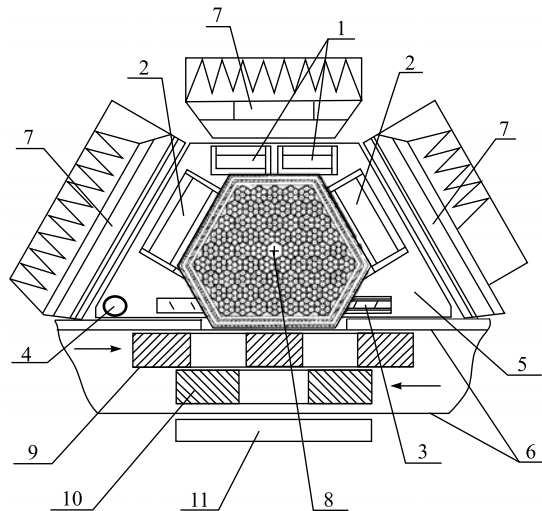


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны (АЗ) реактора ИБР-2М перед загрузкой: 1 — блоки аварийной защиты; 2 — компенсирующие блоки; 3 — блок промежуточного регулятора; 4 — стержень автоматического регулятора; 5 — матрица стационарного отражателя; 6 — кожух подвижного отражателя; 7 — водяные гребенчатые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

регулируется органами СУЗ, представляющими собой вольфрамовые блоки, перемещаемые в матрице стационарных отражателей, выполненных из нержавеющей стали: компенсирующие органы КО — 2 шт., блоки аварийной защиты АЗ — 2 шт., блок ручного (промежуточного) регулятора РР — 1 шт. и орган автоматического регулятора АР (см. рис. 1). Блоки перемещаются в каналах стационарных отражателей с помощью шаговых электродвигателей. В процессе модернизации был проведен ряд конструктивных усовершенствований, призванных улучшить физические характеристики реактора и повысить надежность и безопасность его работы.

2. ИСХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ РЕАКТОРА ПЕРЕД ЗАГРУЗКОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

До начала загрузки активная зона была заполнена кассетами-имитаторами, через активную зону осуществлялась циркуляция натриевого теплоносителя. В центральную ячейку №1 был загружен ^{252}Cf -источник с интенсивностью $8 \cdot 10^6$ нейтр./с (на 01.11.2010 г.). Расположение ячеек активной зоны реактора ИБР-2М представлено на рис. 2. Состояние реактора перед загрузкой соответствовало максимальной реактивности, что обеспечивается следующими действиями:

- аварийная защита и рабочие органы СУЗ находятся в верхнем положении;

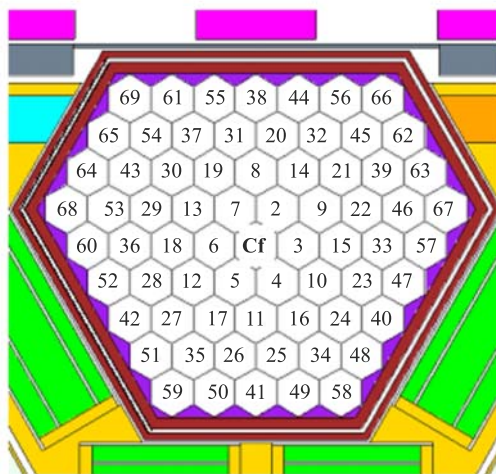


Рис. 2. Расположение ячеек активной зоны реактора ИБР-2М

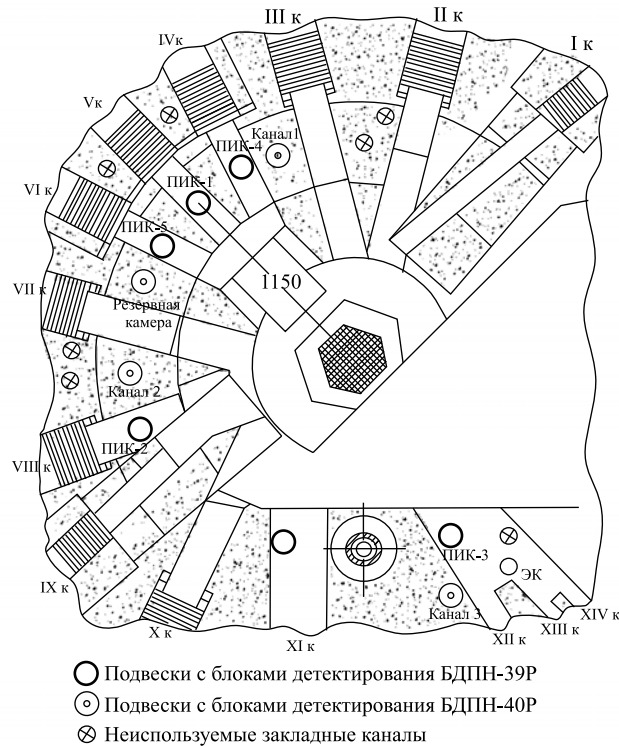


Рис. 3. Схема расположения подвесок СУЗ ИБР-2М и штатных пусковых каналов контроля мощности

- ОПО и ДПО в геометрическом центре активной зоны;
- в работе все водяные замедлители (ВЗ 301, ВЗ 302, ВЗ 303);
- температура натрия на входе в корпус реактора 250 °С, на выходе 240 °С;
- минимальный расход натрия через активную зону около 5 м³/ч.

Процесс размножения нейтронов контролировался с помощью трех камер деления типа КНУ-3, размещенных вне реактора в вертикальных каналах на расстоянии ~ 115 см от центра активной зоны (см. рис. 3).

3. СЦЕНАРИЙ НАБОРА КРИТМАССЫ

Загрузка АЗ топливными кассетами проводилась в два этапа:

- первый этап — загрузка до умножения 50. Проведение измерений для предварительной оценки эффективности органов СУЗ;

- второй — догрузка активной зоны до критического состояния с запасом реактивности, необходимым для вывода реактора на мощность 2 МВт и работе в течение 2–3 лет без догрузки топлива.

Предварительно процесс загрузки моделировался с помощью метода Монте-Карло расчетным путем с оценкой следующих параметров: эффективного коэффициента размножения, источника нейтронов, счета в пусковых камерах деления, обратного умножения — и некоторых других параметров, характеризующих активную зону на отдельных этапах ее загрузки. В качестве расчетных параметров использовались также такие оценки: $Y_{эф} = 1/(1 - K_{эф})$ — умножение нейтронов деления (умножение только по внутреннему источнику без учета пускового), $Y_s = 1/(1 - K_s)$ — умножение нейтронов внешнего (пускового) источника и ценность нейтронов. $K_{эф}$ — эффективный коэффициент размножения, K_s — коэффициент размножения с внешним источником. Ценность нейтронов пускового источника оценивалась в двух вариантах:

$$\varphi_1^* = \frac{\frac{1}{K_{эф}} - 1}{\frac{1}{K_s} - 1},$$

$$\varphi_2^* = Y_s \cdot (1 - K_{эф}).$$

В процессе загрузки АЗ ценность нейтронов в том, что контролируемое через скорость счета в камерах деления размножение нейтронов в АЗ зависит от параметра $\varphi^* \varepsilon$, где ε — эффективность регистрации нейтронов. В обоих вариантах расчета, представленных выше, ценность нейтронов источника возрастала с увеличением числа загруженных ТВС от 0,9 (6 ТВС) до максимального значения 1,1 (40 ТВС) и далее с ростом числа ТВС в АЗ уменьшалась до 0,9 при 60 ТВС. Были проведены также расчеты эффективности аварийной защиты, органов регулирования, подвижных отражателей и оценены эффекты реактивности реактора в различных аварийных ситуациях, например, при сливе натрия из активной зоны.

При загрузке использовался «периферийный» вариант, в котором четыре центральные ячейки (№№ 2, 3, 6, 7, см. рис. 2) остались заполненными кассетами-имитаторами. Замена кассет-имитаторов на топливные кассеты производилась последовательно по одной кассете от центра активной зоны к ее периферии порциями с оценкой текущего состояния АЗ и с периодической оценкой эффективности органов регулирования. Для этой цели использовался метод «обратного умножения». Суть метода состоит в том, что в подкритическом реакторе изменение реактивности при переходе реактора из состояния 1 в состояние 2, например, при загрузке некоторого количества топливных кассет или изменении положения органов регулирования составляет

$$\Delta\rho_{2,1} = \rho_2 - \rho_1 = 1/Y_1 - 1/Y_2 = OY_1 - OY_2 = -\Delta OY,$$

где $Y_1 = N_1/N_0$ и $Y_2 = N_2/N_0$ есть умножение источника, т. е. отношение скорости счета в состоянии 1 и, соответственно, в состоянии 2 к начальной («нулевой») скорости счета N_0 детектора без размножения; OY_1, OY_2 — соответствующие обратные умножения. На этом методе были основаны также и предварительные измерения интегральной и дифференциальной эффективности органов регулирования. Первая загрузка состояла из шести топливных кассет. После загрузки очередной порции топливных кассет производилось измерение скорости счета по всем трем каналам регистрации нейтронов. Данные о счете импульсов с камер пускового диапазона использовались для построения кривых обратного умножения. Каждая последующая порция кассет была равна не более $1/4$ величины, остающейся до экстраполированного критического количества топливных кассет. Экстраполированное значение критической массы M осуществлялось с помощью линейной экстраполяции функции обратного умножения $f(M) = N_0/N$ по двум точкам в точку $N_0/N = 0$, что эквивалентно оценке по формуле $M_{\text{экстр}}^{(i)} = M_{\text{загр}} + \Delta \cdot \frac{1}{\frac{N_{2i}}{N_{1i}} - 1}$, где $M_{\text{загр}}$ — число топливных кассет в зоне; ΔM — количество кассет, загруженных перед последним замером (порция загрузки); N_{2i}, N_{1i} — скорость счета i -го канала в последнем и предыдущем (т. е. до загрузки порции ΔM) соответственно. Количество кассет для следующей загрузки определялось как наименьшее из величин $\frac{1}{4} (M_{\text{экстр}}^{(i)} - M_{\text{загр}})$. Вышеуказанная операция загрузки топливных кассет проводилась до тех пор, пока умножение источника $Y = N/N_0$ не достигло 50 (отметим, что при $K_{\text{эф}} > 0,7$ под «умножением» понимается величина $Y = 1/(1 - K_{\text{эф}})$).

Порядок загрузки топливных кассет на втором этапе загрузки отличался тем, что для обеспечения ядерной безопасности процесс загрузки каждой кассеты осуществлялся при выведенном блоке КО1 с тем, чтобы загрузка кассеты заведомо не могла привести к повышению умножения выше 50.

В процессе набора критмассы реактивность в зависимости от числа топливных кассет оценивалась в единицах ОУ. Более точная оценка реактивности определялась по формуле

$$\rho = \frac{A}{Y} \cdot \frac{\exp(-\lambda_0 t)}{1 - \frac{N_{\text{сп}} + N_{\alpha, n}}{N}}, \quad (1)$$

где Y, N_0, N определены выше, $\lambda_0 = 7,17 \cdot 10^{-4} \text{сут}^{-1}$ — постоянная распада Cf-источника нейтронов; t — время между замерами N_0 и N ; $(N_{\text{сп}} + N_{\alpha, n})$ — скорость счета детекторов при извлеченном Cf-источнике; обусловлена размножением нейтронов спонтанного деления и нейтронов реакции (α, n) на кислороде топлива; A — коэффициент, близкий к единице, предварительно рассчитываемый по методу Монте-Карло. Величина $(N_{\text{сп}} + N_{\alpha, n})$ была оце-

нена расчетным путем и экспериментально (см. следующий раздел). Формула (1) использовалась только на стадии критической загрузки реактора. После достижения критичности и уточнения «нулевого» счета эффекты реактивности, измеряемые в подкритическом состоянии реактора, оценивались по формуле (2) (см. следующий раздел).

4. ИЗМЕРЕНИЕ «НУЛЕВОЙ» СКОРОСТИ СЧЕТА

При отсутствии размножения источник нейтронов ИБР-2М состоит из нейтронов спонтанного деления плутония, нейтронов, образующихся в реакции (α, n) на кислороде-18, входящем в состав оксидного топлива, и пускового источника. Для состава топлива ИБР-2М расчетная интенсивность источника нейтронов для одной кассеты с усредненной по АЗ массой топлива приведена в табл. 1.

Таблица 1. Интенсивность источника нейтронов спонтанного деления и нейтронов от реакции (α, n) для одной кассеты ИБР-2М, нейтр./с

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Полный источник
Нейтроны спонтанного деления	$1,15 \cdot 10^3$	23,64	$4,7 \cdot 10^4$	0,096	$1,22 \cdot 10^3$	$4,94 \cdot 10^4$
Реакция (α, n)	$5,93 \cdot 10^3$	$4,13 \cdot 10^4$	$6,51 \cdot 10^3$	2,5	0,91	$5,37 \cdot 10^4$
Сумма						$1,03 \cdot 10^5$

Для критической загрузки в 64 кассеты суммарная интенсивность внутреннего источника нейтронов в активной зоне составляет $6,59 \cdot 10^6$ нейтр./с. Оценка получена для уточненного изотопного состава топлива (ранее в [1] интенсивность внутреннего источника оценена как $7,1 \cdot 10^6$ нейтр./с). Интенсивность внешнего пускового источника, как уже было отмечено выше, равна $\sim 8 \cdot 10^6$ нейтр./с.

Для моделирования состояния реактора в процессе загрузки скорость «нулевого» счета с пусковых камер деления определялась расчетным путем:

$$N_0 = (1 - B) \cdot C \cdot S \cdot \int \Phi(E, r) \cdot \sigma_f \cdot dE \cdot dr,$$

где C — число ядер урана-235 в камере деления, S — нормировочный коэффициент для нейтронов от постоянного источника, источника нейтронов спонтанного деления и нейтронов от (α, n) -реакции, $B = 0,2$ — коэффициент потерь счета импульсов с амплитудой ниже порога дискриминации α -

частиц в камере. Начальный расчетный нулевой счет (при отсутствии топлива в зоне) — счет только от источника ^{252}Cf — следующий:

$$N_0(1\text{КД}) = 2,17 \text{ дел./с,}$$

$$N_0(2\text{КД}) = 0,22 \text{ дел./с,}$$

$$N_0(3\text{КД}) = 1,11 \text{ счет/с.}$$

Скорость «нулевого» счета исследовалась в зависимости от положения органов регулирования и лопастей ПО, экранирующих пусковые каналы. Счет при промежуточных положениях органов регулирования определялся путем интерполяции «нулевого» счета между измеренными значениями. В процессе загрузки до извлечения внешнего источника «нулевой» счет изменялся за счет распада Cf-источника и роста источника спонтанных нейтронов ($1,03 \cdot 10^5$ нейтр./с на одну ТВС). Фактически, при загрузке активной зоны за период менее двух месяцев распадом источника можно было пренебречь и нулевой счет мог меняться только за счет роста нейтронов спонтанного деления. При загрузке 62 ТВС (01.02.2011 г.) Cf-источник был извлечен и нулевой счет 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. На момент извлечения внешнего источника регистрируемое умножение за счет спонтанных нейтронов превышало на $\sim 70\%$. Первоначальная оценка умножения 45 после извлечения внешнего источника снизилась до 29. С точки зрения ядерной безопасности данная процедура использования нулевого счета в процессе загрузки наиболее предпочтительна.

Извлечение Cf-источника позволило оценить также интенсивность источника нейтронов спонтанного деления $n_{\text{сн}}$ (сюда входят и нейтроны от (α, n) -реакций на кислороде O^{18}):

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

где $n_{\text{Cf}} = 8 \cdot 10^6$ нейтр./с — интенсивность Cf-источника. При загрузке активной зоны, равной 62 ТВС, интенсивность источника нейтронов спонтанного деления оценена равной $n_{\text{сн}} = 5,13 \cdot 10^6$ нейтр./с, а при полной загрузке 64 ТВС — $n_{\text{сн}} = 5,3 \cdot 10^6$ нейтр./с. Таким образом, расчетное значение $n_{\text{сн}}$ на 24% выше измеренного. Указанное различие вызвано различием в ценности и эффективности регистрации нейтронов спонтанного деления и нейтронов внешнего источника.

Таблица 2. Изменение «нулевой» счета и коэффициент нормировки (C) для трех пусковых каналов в процессе загрузки активной зоны ИБР-2М

Обозначение	I канал	II канал	III канал	Число ТВС в АЗ
N_0	1,6517	1,9677	1,6243	$M = 0$; Cf в а.з.
N_0^1	1,0406	1,2829	1,0477	$M = 62$ ТВС
N_0^2	0,8754	1,0625	0,8852	$M = 64$ ТВС
$C1 = N_0^1/N_0^0$	0,630	0,652	0,645	
$C2 = N_0^2/N_0^0$	0,530	0,540	0,545	

В конце загрузки (64 ТВС) нулевой счет после измерений эффективности органов регулирования, проведенных в критическом состоянии реактора (по разгонам с помощью реактиметра), вновь был перенормирован на N_0^2 . Значение N_0^2 оценивалось из выражения

$$\Delta\rho = N_0^2 \left(\frac{1}{N_2} - \frac{1}{N_1} \right), \quad (2)$$

где $\Delta\rho$ — возмущение реактивности, вызванное перемещения КО1 на величину ΔX в критическом состоянии реактора; N_1, N_2 — счет в канале до и после перемещения КО1 на ΔX в подкритическом состоянии, близком к $-10^{-3}K_{эф}$. Отметим, что состояния реактора критическое на малой мощности и подкритическое на умножении ~ 1000 близки. Величина $\Delta\rho$ определялась по реактиметру. Значения нулевого счета и коэффициент нормировки относительно начальных значений до загрузки (при $M = 0$) приведены в табл. 2.

5. ЗАГРУЗКА АЗ ДО УМНОЖЕНИЯ 50

Первый этап набора критической массы до умножения 50 преследовал цель достижения такой подкритической загрузки активной зоны реактора, в которой можно было бы, оставаясь заведомо в подкритическом состоянии, провести оценку эффективности органов регулирования, органов защиты, топливных кассет и т. д., а также уточнить положение физического центра подвижных отражателей. Последовательность загрузки топливных кассет приведена в приложении. Отдельно на рис. 3, а. представлена картограмма АЗ на умножении 50. В процессе загрузки на умножении ~ 12 (49 кассет) и 50 (59 кассет) была выполнена установка подвижных отражателей в физический центр, т. е. в положение, соответствующее максимальной эффективности от-

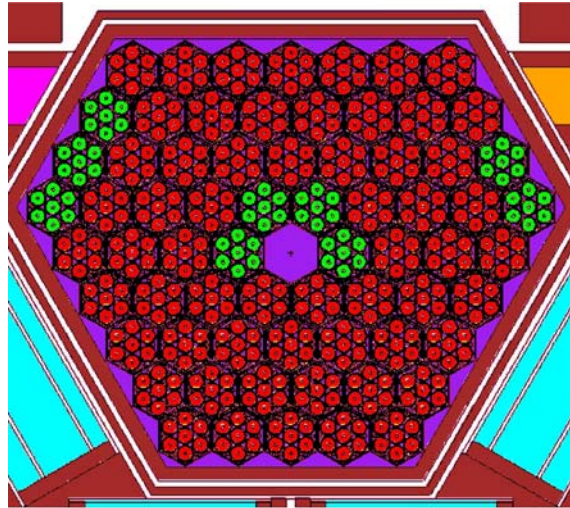


Рис. 4. Картограмма загрузки АЗ модернизированного реактора ИБР-2 на умножении 50

ражателей. На умножении 28 (55 топливных кассет) была проведена предварительная оценка интегральной эффективности КО1, а на 50 (59 ТВС) — всех органов регулирования и аварийной защиты.

6. ДОГРУЗКА АЗ ДО КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ВЫХОД НА КРИТИЧНОСТЬ

Порядок загрузки топливных кассет на втором этапе загрузки, как уже было отмечено выше, отличался тем, что для обеспечения ядерной безопасности процесс загрузки каждой кассеты осуществлялся при выведенном блоке КО1 с тем, чтобы загрузка кассеты заведомо не могла привести к повышению умножения выше 50. Последовательно были загружены ячейки №№ 64, 63, 65, 62, 66, 69, 58, 59. Температура натрия на входе в активную зону и расход натрия через активную зону устанавливались $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,1\text{--}0,2 G_{\text{ном}}$ соответственно. Зависимость обратного умножения от числа загруженных кассет приведена на рис. 5, а значение $K_{\text{эф}}$ — на рис. 6.

Первый выход в критическое состояние осуществлялся при загрузке 63 топливных кассет путем ступенчатого ввода КО1 и затем РР с экстраполяцией кривых обратного умножения в критическое состояние (см. рис. 7). После этого была догружена еще одна кассета. Таким образом, к концу загрузки число ТВС в АЗ составило 64. Картограмма полной загрузки АЗ приведена на рис. 8.

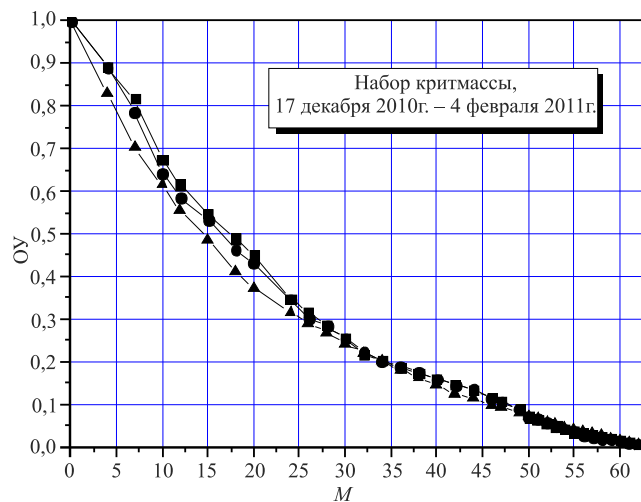


Рис. 5. Зависимость обратного умножения (OY) от числа загруженных в АЗ топливных кассет (M). Экстраполированное число ТВС для всех трех пусковых каналов равно 63

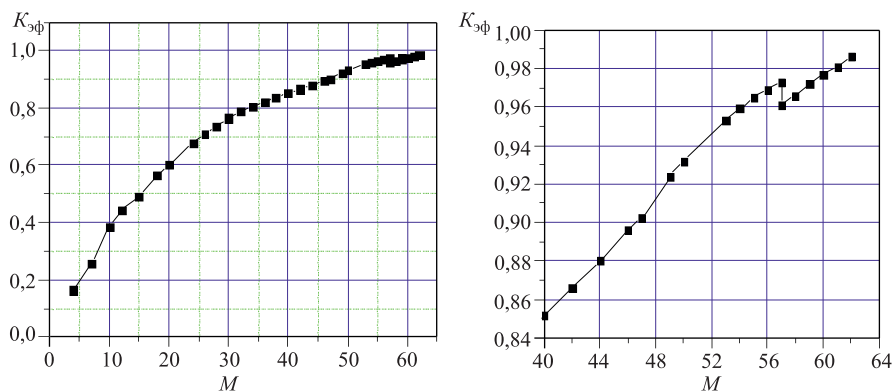


Рис. 6. Зависимость $K_{эф}$ от числа загруженных кассет. Справа изменение $K_{эф}$ в конце загрузки. Все органы регулирования вверх; начиная с 57-й ТВС компенсирующий блок КО1 был опущен в положение КО1, соответствующее 200 мм

Измерение разгонов реактора проводились с помощью реактиметра ЦВР-10 (ФЭИ, Обнинск). В памяти реактиметра были воспроизведены 8-групповые константы запаздывающих нейтронов деления ^{239}Pu , ^{238}Pu и ^{240}Pu быстрыми нейтронами. В качестве детектора использовалась камера КНК-53М, установленная вблизи поверхности замедлителя на 1-м горизонталь-

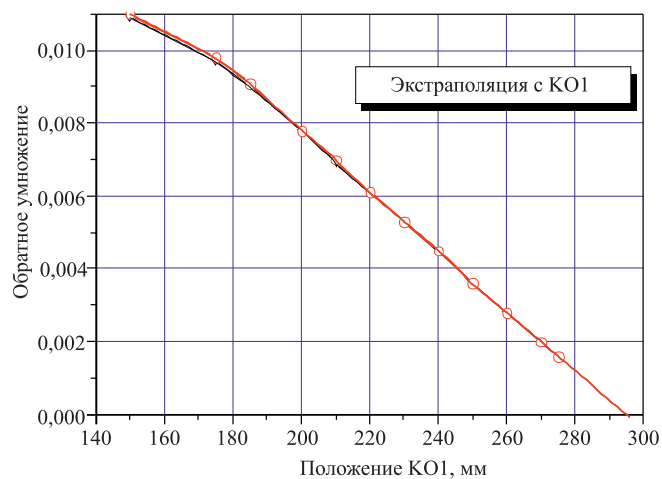


Рис. 7. Первый выход в критическое состояние на запаздывающих нейтронах ИБР-2М с 63 топливными кассетами (4-го февраля 2011 г.) с экстраполяцией на критичность с помощью КО1

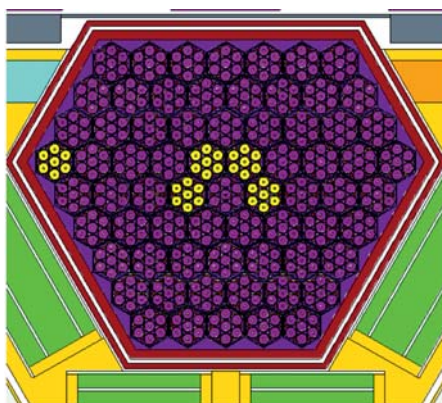


Рис. 8. Картограмма полной загрузки ИБР-2М с 64 ТВС

ном нейтронном пучке. Полная погрешность реактиметра не превышала 4 %. Разгоны реактора осуществлялись выведением блока КО1 из положения, соответствующего критическому состоянию реактора, на расстояние, при котором увеличение реактивности составляло $0,05-0,2\beta_{эф}$. Установившиеся периоды разгонов находились в интервале 30–150 с. На рис. 9 в качестве примера показано изменение мощности и реактивности при быстром введе-

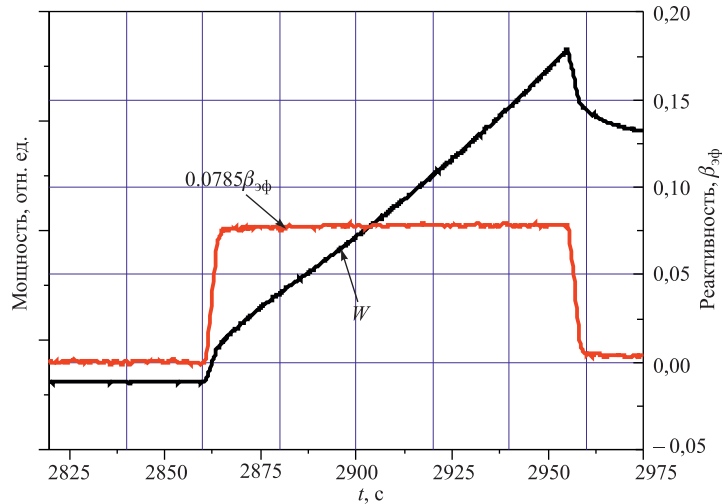


Рис. 9. Изменение мощности (W) и реактивности (ρ) при быстром введении реактивности $0,0785\beta_{эф}$ из критического на запаздывающих нейтронах состояния с помощью РР

нии РР на 1,2 мм из критического на запаздывающих нейтронах состояния, что эквивалентно введению реактивности $0,0785\beta_{эф}$.

7. ВЫВОД РЕАКТОРА НА ИМПУЛЬСНУЮ КРИТИЧНОСТЬ

Первый вывод реактора на импульсную критичность был осуществлен 09.03.2011 г. с 64 ТВС. Расход натрия через активную зону составлял $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Процедура вывода реактора в критическое состояние осуществлялась по обратной скорости счета в импульсе. Регистрировался счет в импульсе N при интервале регистрации вспышки мощности 1 мс (ширина «электронных ворот»). Отметим, что в подкритическом на мгновенных нейтронах состоянии ширина импульса ИБР-2М много больше ширины импульса в критическом равновесном состоянии. Экстраполяция на импульсную критичность велась как по линейной зависимости обратной скорости счета в импульсе N^{-1} , так и по N^{-2} и $N^{-1,2}$. Эти зависимости характеризуют различные модели контроля реактора при подходе к критическому состоянию. Наилучшую экстраполяцию показали зависимости типа $N^{-1,2}$. Подход к критичности проводился с помощью КО1, КО2 и РР. Подъем КО1 и КО2 осуществляли шагами, равными $1/4$ расстояния до ожидаемого положения мгновенной критичности с уточнением на каждом шаге данных экстраполяции. При достижении мгновенной критичности подъем реактивности производили введением РР. Кривая экстраполяции на критичность приведена на рис. 10. Учитывалось, что поло-

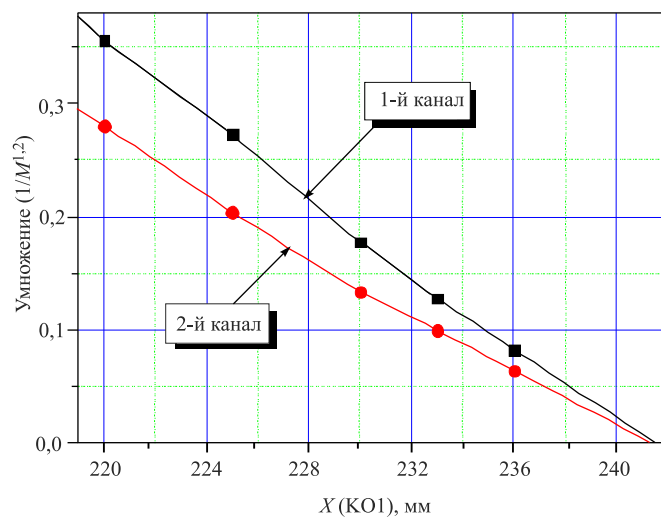


Рис. 10. Первый выход на импульсную критичность модернизированного реактора ИБР-2 с 64 топливными кассетами. По оси абсцисс — положение компенсирующего органа КО1, по оси ординат — обратное умножение в импульсе

жение импульсной критичности выше уровня критичности на запаздывающих нейтронах на величину $\beta_{эф} + \xi_{m0}$, где $\beta = 2,165 \cdot 10^{-3} \Delta k/k$, ξ_{m0} — равновесная импульсная надкритичность.

8. ЗАПАС РЕАКТИВНОСТИ

Загрузка активной зоны в 64 ТВС была принята достаточной из расчета того, что при использовании 65 % оперативного запаса реактивности реактор мог бы работать на мощности 2 МВт в течение 170 сут до догрузки еще

Таблица 3. Характерные этапы загрузки и запас реактивности $\Delta K_{эф}$

Этап загрузки	Дата	Число кассет в зоне	$\Delta K_{эф}$, % $K_{эф}$, эксперимент
Умножение 50	20.10.2010	59	$-2 \pm 0,1$
Критическое состояние на запаздывающих нейтронах	08.02.2011	63	$0,76 \pm 0,1$
Критическое состояние на запаздывающих нейтронах	17.02.2011	64	$1,27 \pm 0,1$
Критическое состояние на запаздывающих нейтронах	13.04.2011	64	$0,94 \pm 0,1$

одной ТВС. В этой оценке было принято значение коэффициента выгорания, равное расчетному, $-0,5 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{МВт}\cdot\text{сут}$, и запас реактивности на мощностную обратную связь $-1,4\beta_{эф}$.

Отметим некоторые характерные моменты состояния реактора в процессе загрузки активной зоны, приведенные в табл. 3.

9. ПРИЧИНЫ РАСХОЖДЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ И РЕАЛЬНОЙ В КРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ИБР-2М

В процессе физического пуска было отмечено расхождение между расчетным эффективным коэффициентом размножения ИБР-2М и измеренным в критическом состоянии реактора. Расчет превышал коэффициент размножения на 1,13 % $K_{эф}$. Для существующих расчетных методик эта величина считается большой, выходящей за пределы статистических погрешностей. Для достижения критичности относительно расчетного состояния нужно было добавить две топливные кассеты на периферию или одну кассету в центр АЗ. С целью выявления причин расхождений между расчетными оценками критической загрузки и измеренной в ЛНФ и НИКИЭТ был проведен независимый анализ. Выявлены следующие причины расхождений:

- отличие средней массы топливной загрузки на ТВЭЛ, использованной в расчетах, от реальной;
- отсутствие в предварительных расчетах учета температурного эффекта после залива натрия в АЗ;
- некоторые отличия в положении органов СУЗ, использованных в расчетах, от реальных данных;
- ряд отличий реальной конструкции от конструкции, указанной в технической документации, например, в части взаимного расположения корпуса, отражателей, водяных замедлителей, а также огрубления в модельной конструкции корпуса, отражателей и замедлителей.

В результате проведенного анализа и коррекции расчетной модели расхождение сократилось до ~ 0 % $K_{эф}$ (НИКИЭТ) и $\sim 0,1$ % $K_{эф}$ (ОИЯИ). Такая точность расчетной оценки критичности вполне достаточна для расчетов эффективности органов регулирования и различных эффектов реактивности ИБР-2М.

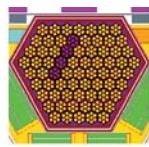
В процессе расчетных исследований отмечено, что константная база элементов топлива и конструкций АЗ практически не влияет на точность расчетов критического состояния реактора и, что важно, гомогенизация топлива по АЗ дает те же самые результаты, что и учет индивидуальной топливной загрузки по отдельным ТВС.

10. ВЫВОДЫ

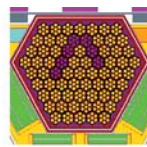
Критическая загрузка реактора ИБР-2М составила 64 ТВС. Указанная загрузка оценена как достаточная для работы реактора на номинальной мощности в течение приблизительно двух лет. Вся процедура загрузки с тщательными промежуточными оценками эффективности органов регулирования и проверкой работы различных реакторных систем заняла менее двух месяцев. Это стало возможным только при высокой организации работ и квалифицированных действиях персонала реактора и пусковой группы. Характерной особенностью загрузки явилось то, что была выявлена причина расхождения в 1,13 % $K_{эф}$ между расчетной и фактической критической загрузкой реактора.

ПРИЛОЖЕНИЕ

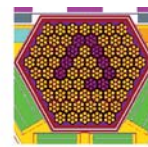
Этапы загрузки активной зоны ИБР-2М топливными кассетами



1) 17.12.2010



2) 21.12.2010



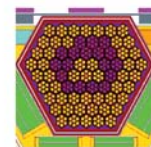
3) 21.12.2010



4) 22.12.2010



5) 22.12.2010



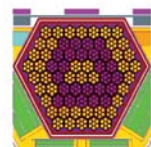
6) 23.12.2010



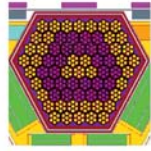
7) 23.12.2010



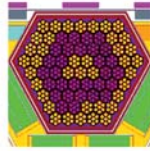
8) 24.12.2010



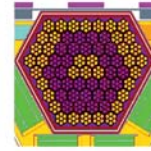
9) 27.12.2010



10) 27.12. 2010



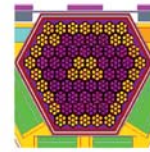
11) 28.12.2010



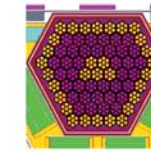
12) 29.12.2010



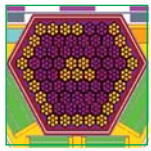
13) 29.12.2010



14) 29.12.2010



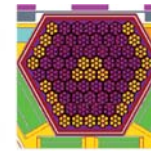
15) 11.01.2011



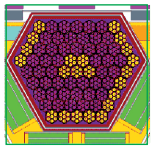
16) 11. 01. 2011



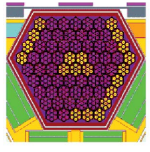
17) 12. 01. 2011



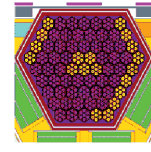
18) 12. 01. 2011



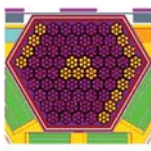
19) 13.01.2011



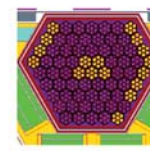
20) 14.01.2011



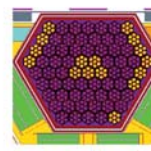
21) 18.01.2011



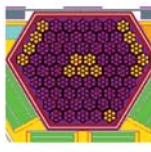
22) 18.01.2011



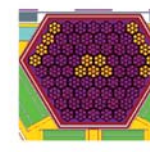
23) 19.01.2011



24) 19.01.2011



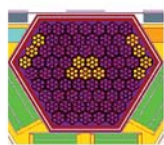
25) 19.01.2011



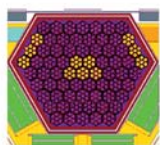
26) 19.01.2011



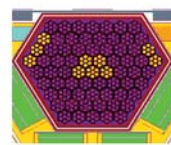
27) 21.01.2011



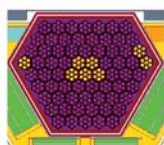
28) 24.01.2011



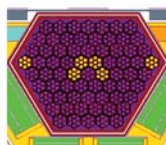
29) 24.01.2011



30) 28.01.2011



31) 31.01.2011



32) 01.02.2011



33) 14.02.2011

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В.Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ Р13-2012-41, Дубна, 2012;
[http://www1.jinr.ru/Preprints/2012/041\(P13-2012-41\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2012/041(P13-2012-41).pdf)
2. *Драгунов Ю.Г. и др.* Модернизация импульсного исследовательского реактора ИБР-2 // АЭ. 2012. Т. 113, № 1. С. 29–34.

Получено 22 апреля 2014 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 10.06.2014.

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

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,54. Тираж 245 экз. Заказ № 58281.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/