

P13-2013-3

Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

**НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
ВО ВРЕМЯ ФИЗИЧЕСКОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ПУСКОВ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА
ИБР-2 (ИБР-2М)**

Направлено в труды межведомственного XXIII семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом» (Нейтроника-2012), Обнинск, 30 октября – 2 ноября 2012 г.

Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.

P13-2013-3

Нейтронно-физические расчеты во время физического и энергетического пусков модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М)

Приводятся основные результаты нейтронно-физических расчетов ИБР-2М, необходимых для проведения физического и энергетического пусков реактора. Особое внимание уделялось расчетам по оценке состояния реактора и ядерной безопасности на стадии набора критической загрузки и выхода в критическое состояние, а также оценке эффективности органов системы управления и защиты и модулятора реактивности. Большое значение имели расчетные оценки состояния реактора при выходе на номинальный уровень мощности. Дается сравнение расчетных данных с экспериментальными.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Pepelyshev Yu. N., Rogov A. D.

P13-2013-3

Neutron-Physical Calculations at the IBR-2M Reactor during Physical and Energetic Reactor Startup

The paper presents key results of neutron-physical calculations at the IBR-2M reactor necessary for physical and energetic reactor startup. A special focus was given to measurements of reactor condition and nuclear safety during the critical mass and critical level stages as well as assessment of the effectiveness of reactor control rods and reactivity modulator. Calculated assessment of reactor condition while achieving the nominal plate capacity was particularly important. The paper also provides a comparison of calculated versus experimentally measured data.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

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. Физический пуск совершенно нового реактора ИБР-2М проводился с 10 декабря 2010 г. по 10 июня 2011 г. Энергетический пуск проводился с 5 июля по 28 октября 2011 г. [1–3].

В работе приводятся основные результаты нейтронно-физических расчетов ИБР-2М, необходимых для проведения физического и энергетического пусков реактора. Особое внимание уделялось расчетам по оценке состояния реактора и ядерной безопасности на стадии набора критической загрузки и выхода в критическое состояние, а также оценке эффективности органов системы управления и защиты (СУЗ) и модулятора реактивности. Большое значение имели расчетные оценки состояния реактора при выходе на номинальный уровень мощности. Дается сравнение расчетных данных с экспериментальными.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА ИБР-2М

Реактор ИБР-2М проектной мощности 2 МВт отличается от ИБР-2 прежде всего меньшей по размеру активной зоной и отсутствием центрального канала. Емкость активной зоны ИБР-2М составляет 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 с циркуляцией натрия по петлям системы охлаждения реактора с помощью электромагнитных насосов. Для информации на рис. 1 дана схема реактора. 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

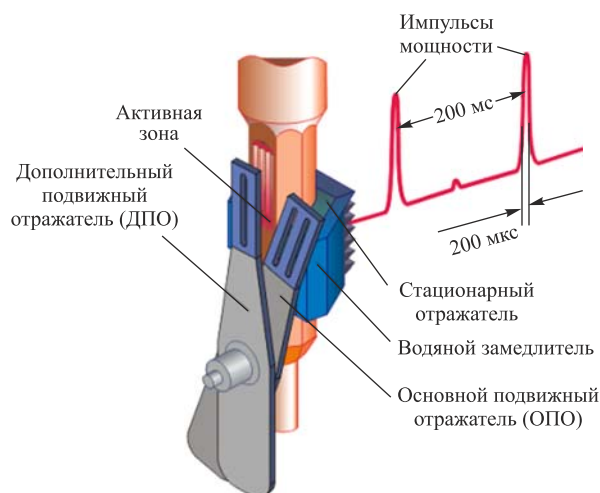


Рис. 1. Схема реактора ИБР-2М с иллюстрацией принципа его работы

300 об./мин (ДПО). Ротор ОПО представляет собой лопасть с тремя «зубьями», выполненными из никелевого сплава, а ДПО — лопасть с двумя «зубьями» также из никелевого сплава.

Уровень реактивности ИБР-2М регулируется органами СУЗ — перемещаемыми вольфрамовыми блоками в матрице стационарных стальных отражателей: компенсирующие органы (КО) — 2 шт., блоки аварийной защиты — 2 шт., блок ручного (промежуточного) регулятора и орган автоматического регулятора.

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

- установлены два блока аварийной защиты высокой эффективности;
- обеспечен независимый от срабатывания аварийной защиты автоматический вывод КО при сбросе мощности.

2. РАСЧЕТЫ ПРИ ЗАГРУЗКЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ И ВЫХОД НА КРИТИЧНОСТЬ ИБР-2М

Расчетная модель ИБР-2М представлена на рис. 2. На поперечном разрезе реактора дана конечная конфигурация активной зоны (АЗ) с 64 ТВС.

Изотопный состав топлива для разных периодов проектирования реактора приведен в табл. 1. В последней строке указаны реальный усредненный

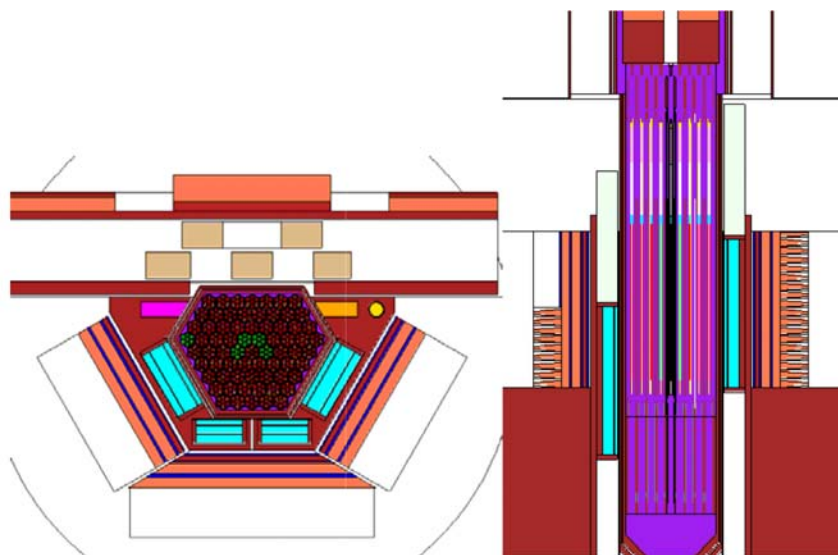


Рис. 2. Поперечный и вертикальный разрезы расчетной модели АЗ реактора ИБР-2М

состав, размеры и вес топлива, загруженного в активную зону. В табл. 2 и 3 представлены измеренные и рассчитанные эффективности органов СУЗ и модулятора реактивности.

Таблица 1. Изотопный состав плутония в активной зоне ИБР-2М (% масс.)

Источник данных	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Проект	0,036	95,72	4,02	0,176	0,035
НИКИЭТ	0,081	95,00	4,10	0,38	0,139
ОИЯИ	0,20	95,61	4,01	0,17	0,022

Таблица 2. Эффективность органов СУЗ, $\Delta K_{эф} \cdot 10^2$

Наименование органа СУЗ	Эксперимент	Расчет
КО1	$2,01 \pm 0,08$	$2,31 \pm 0,03$
КО2	$2,18 \pm 0,08$	$2,41 \pm 0,03$
АЗ1	$1,04 \pm 0,04$	$1,17 \pm 0,03$
АЗ2	$1,05 \pm 0,04$	$1,25 \pm 0,03$

Таблица 3. Эффективность модулятора реактивности, $\Delta K_{эф} \cdot 10^2$

Наименование модулятора реактивности	Эксперимент	Расчет
ОПО	$2,30 \pm 0,04$	$2,045 \pm 0,005$
ДПО	$0,65 \pm 0,04$	$0,863 \pm 0,003$
ОПО-ДПО	$3,0 \pm 0,05$	$2,875 \pm 0,006$

На рис. 3 и 4 представлены экспериментальная и расчетная зависимости обратного умножения (ОУ) от числа загруженных в активную зону ТВС (M) для трех пусковых каналов. Экстраполированное число ТВС равно 63 (эксперимент) и 61 (расчетное значение).

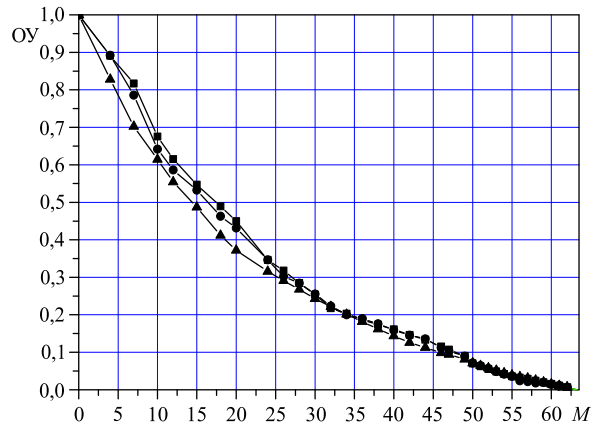


Рис. 3. Экспериментальная зависимость ОУ от числа загруженных в АЗ ТВС (M) для трех пусковых каналов (\blacktriangle , \bullet , \blacksquare). Экстраполированное число ТВС равно 63

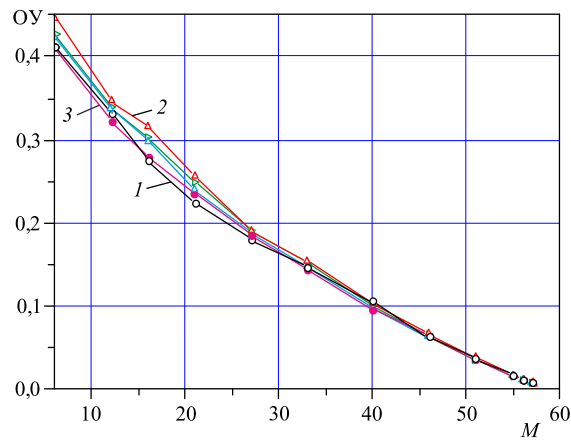


Рис. 4. Расчетная зависимость ОУ от числа загруженных ТВС (M). Имитация контроля умножения в процессе загрузки с помощью штатных пусковых камер деления (1–3). Экстраполированное число ТВС равно 61

С учетом всех конструктивных особенностей АЗ реактора и ее ближайшего окружения реальный запас реактивности в процессе загрузки АЗ ИБР-2М составил 1,27% $K_{эф}$, расчетный — 2,40% $K_{эф}$ [1]. Таким образом,

расчет по MCNP-4C дает завышение $K_{эф}$ на 1,13 %, что велико и в целом оставляет 1–2 ТВС. Для проверки погрешности расчетных оценок $K_{эф}$, связанных с библиотеками ядерных данных, были проведены тестовые расчеты критических экспериментов с компактными АЗ, выполнявшиеся в рамках программ разработки ядерного оружия в США и в России. Был проведен расчетный анализ некоторых из этих экспериментов (выбирались сборки с плутонием без замедлителя). Расчеты проводились с помощью программы MCNP [6]. Все данные по критическим сборкам взяты из международного справочника по критическим экспериментам [5]. В тестовых расчетах использовались следующие сборки:

Таблица 4. Ядерные концентрации сборки «Jezebel»

Элемент	Плотность ядер, 10^{24} см^{-3}
Ga	$1,3752 \cdot 10^{-3}$
^{239}Pu	$3,7047 \cdot 10^{-2}$
^{240}Pu	$1,7512 \cdot 10^{-3}$
^{241}Pu	$1,1674 \cdot 10^{-4}$

1) «голая» критическая сборка «Jezebel» (PU-MET-FAST-001) с плутониевым топливом 98,98 вес. % обогащения и 1,02 % галлия (см. табл. 4). Критическая масса составляет $17,02 \pm 0,1$ кг сплава с плотностью $15,61 \text{ г/см}^3$. Критический радиус равен 6,3849 см;

2) «голая» критическая сборка ВНИИЭФ (PU-MET-FAST-022) с плутониевым топливом (см. табл. 5). Критическая масса составляет 18,787 кг

Таблица 5. Ядерные концентрации сборки ВНИИЭФ (10^{24} см^{-3})

Слой №	^{239}Pu	^{240}Pu	Ga	Fe	C	Ni
1	$3,6826 \cdot 10^{-2}$	$6,7320 \cdot 10^{-4}$	$2,2000 \cdot 10^{-3}$	$1,4714 \cdot 10^{-4}$	$3,0406 \cdot 10^{-4}$	$1,5722 \cdot 10^{-3}$
2	$3,6579 \cdot 10^{-2}$	$6,6875 \cdot 10^{-4}$	$2,2114 \cdot 10^{-3}$	$1,2992 \cdot 10^{-4}$	$3,0205 \cdot 10^{-4}$	$1,9330 \cdot 10^{-3}$
3	$3,6512 \cdot 10^{-2}$	$6,6739 \cdot 10^{-4}$	$2,1940 \cdot 10^{-3}$	$1,2966 \cdot 10^{-4}$	$2,2608 \cdot 10^{-4}$	$2,3056 \cdot 10^{-3}$
4	$3,6576 \cdot 10^{-2}$	$6,6878 \cdot 10^{-4}$	$2,2115 \cdot 10^{-3}$	$1,4617 \cdot 10^{-4}$	$3,0206 \cdot 10^{-4}$	$1,8631 \cdot 10^{-3}$
5	$3,6471 \cdot 10^{-2}$	$6,6665 \cdot 10^{-4}$	$2,1656 \cdot 10^{-3}$	$1,4571 \cdot 10^{-4}$	$3,0110 \cdot 10^{-4}$	$1,9715 \cdot 10^{-3}$
6	$3,6728 \cdot 10^{-2}$	$6,7147 \cdot 10^{-4}$	$2,2074 \cdot 10^{-3}$	$1,4676 \cdot 10^{-4}$	$3,0328 \cdot 10^{-4}$	$1,6492 \cdot 10^{-3}$

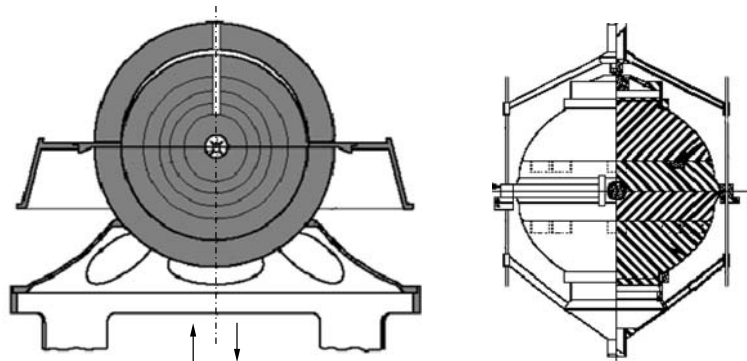


Рис. 5. Вид в разрезе плутониевыхборок «Jezebel» (слева) и ВНИИЭФ (справа)

Таблица 6. Ядерные концентрации активной зоны сборки PU-MET-FAST-005

Элемент	Плотность ядер, см ⁻³
Ga	$1,353 \cdot 10^{-3}$
²³⁹ Pu	$3,729 \cdot 10^{-2}$
²⁴⁰ Pu	$1,927 \cdot 10^{-3}$
²⁴¹ Pu	$1,363 \cdot 10^{-4}$

сплава, критический радиус — 6,67 см. Для примера видборок «Jezebel» и ВНИИЭФ приведен на рис. 5;

3) плутониевая сборка с вольфрамовым отражателем PU-MET-FAST-005 (см. табл. 6). Критическая масса составляет 8,477 кг сплава. Критический радиус — 5,04 см.

В расчетах использовались ядерные данные, представленные в наиболее распространенных пяти библиотеках. Результаты тестовых расчетов вышеуказанныхборок и реактора ИБР-2М приведены в табл. 7–9.

Таблица 7. Результаты тестовых расчетов плутониевой сборки с вольфрамовым отражателем PU-MET-FAST-005

Параметр	Эксперимент	ENDF/B-VI	JENDL-3.3	BROND-2	CENDL-2	JEF-2.2
$K_{эф}$	$1,000 \pm 0,002$	$0,9974 \pm 0,0001$	$0,9969 \pm 0,0001$	$0,9957 \pm 0,0002$	$1,0020 \pm 0,0002$	$0,9952 \pm 0,0002$
$F(^{239}\text{Pu})/F(^{235}\text{U})$	$1,448 \pm 0,029$	1,425	1,438	1,410	1,439	1,426
Деление	—	0,31610	0,31660	0,31800	0,31870	0,31697
Захват	—	0,01080	0,01256	0,01610	0,01269	0,01548
($n, 2n$)	—	0,00113	0,00078	0,00104	0,00060	0,00072
Утечка	—	0,67430	0,67160	0,66680	0,66910	0,66820

Таблица 8. Результаты тестовых расчетов плутониевой сборки с вольфрамовым отражателем PU-MET-FAST-005

Параметр	Эксперимент	ENDF/B-VI	JENDL-3.3_W	JENDL-3.3_W+Pu
$K_{эф}$	$1,000 \pm 0,0021$	$1,0080 \pm 0,0001$	$1,0027 \pm 0,0001$	$1,0011 \pm 0,0001$
$F(^{239}\text{Pu})/F(^{235}\text{U})$	—	1,3820	1,3849	1,3833
Деление	—	0,32310	0,32120	0,32140
Захват	—	0,05011	0,04808	0,03596
($n, 2n$)	—	0,00226	0,00216	0,00203
Утечка	—	0,62916	0,63290	0,63990

В рамках вышеприведенных тестовых расчетов был выявлен ряд причин отклонений расчетных значений $K_{эф}$ ИБР-2М от значений, полученных при загрузке АЗ во время физического пуска. К основным причинам относятся

Таблица 9. Результаты тестовых расчетов реактора ИБР-2М

Параметр	Эксперимент	ENDF/B-VII	ENDF/B-VI+ JENDL-3.3_W	JENDL-3.3_W+Pu
$K_{эф}$	$1,0127 \pm 0,0021$	$1,0250 \pm ,0001$	$1,023 \pm 0,0001$	$1,024 \pm 0,0001$
Деление	—	0,335	0,334	0,335
Захват	—	0,293	0,293	0,294
$(n, 2n)$	—	0,0008	0,0009	0,0009
Утечка	—	0,372	0,373	0,370

необходимость точного учета массы топливной загрузки и учет эффектов расширения АЗ при ее изотермическом нагреве после залива натриевого теплоносителя в контур охлаждения. К второстепенным причинам — различия в модельной и реальной конструкциях блоков СУЗ. Константная база расчетной модели слабо влияет на точность расчетов.

Оценка параметров кинетики реактора [4]. Для оценки параметров кинетики реактора был проведен расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни нейтронов деления. Расчет основывался на двумерной групповой программе переноса нейтронов с системой многогрупповых ядерных констант. Результаты расчета и эксперимента показали их хорошее совпадение:

- эффективная доля запаздывающих нейтронов:
 $\beta_{эф}$ (расчет) = $0,002160 \pm 0,00007$,
 $\beta_{эф}$ (эксперимент) = $0,002165 \pm 0,00007$;
- время жизни мгновенных нейтронов:
 τ (расчет) = $6,5 \cdot 10^{-8}$ с,
 τ (эксперимент) = $6,5 \cdot 10^{-8}$ с.

3. РАСЧЕТЫ ПРИ ВЫХОДЕ НА НОМИНАЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ. ЭНЕРГОПУСК ИБР-2М

Основное внимание в расчетах в процессе энергопуска ИБР-2М уделялось энерговыделению в АЗ и ближайшем ее окружении, особенно в блоках регулирования, стационарных и подвижных отражателях. Эффекты энерговыделения определяют температурные деформации конструктивных и топливных элементов АЗ и блоков регулирования, и что особенно важно — блоков аварийной защиты реактора. На рис. 6 и 7 даны расчетные поля энерговыделения в АЗ и в стационарных отражателях ИБР-2М.

Конечной целью пуска ИБР-2М является получение максимально возможного потока тепловых нейтронов с поверхности замедлителей, окружа-

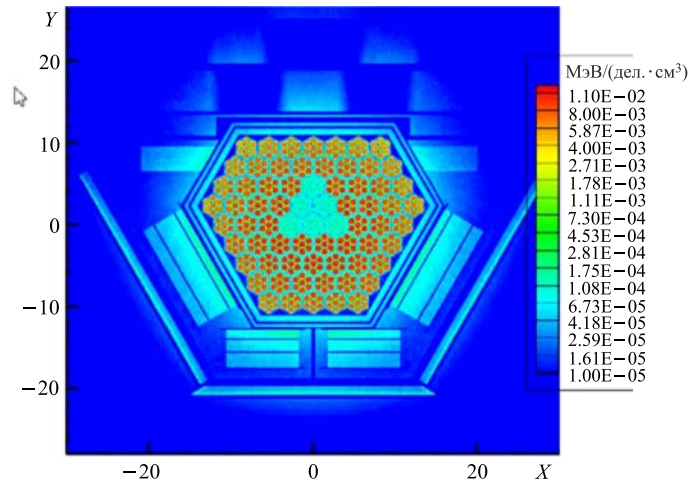


Рис. 6. Расчетное поле энерговыделения в АЗ ИБР-2М и в стационарных отражателях

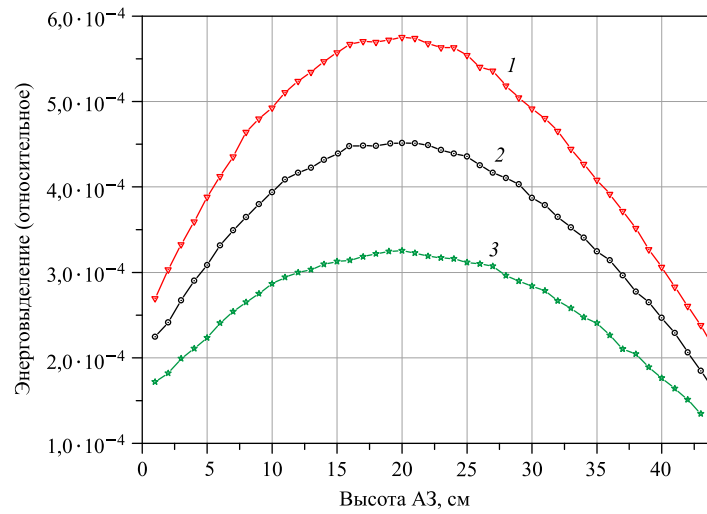


Рис. 7. Расчетная неравномерность энерговыделения по высоте АЗ ИБР-2М: 1 — максимальное энерговыделение; 2 — среднее; 3 — минимальное

ющих АЗ. Напомним, что ИБР-2М — источник нейтронов. С этой целью проводились различные оптимизационные расчеты выхода нейтронов, результаты одного из которых представлены на рис. 8.

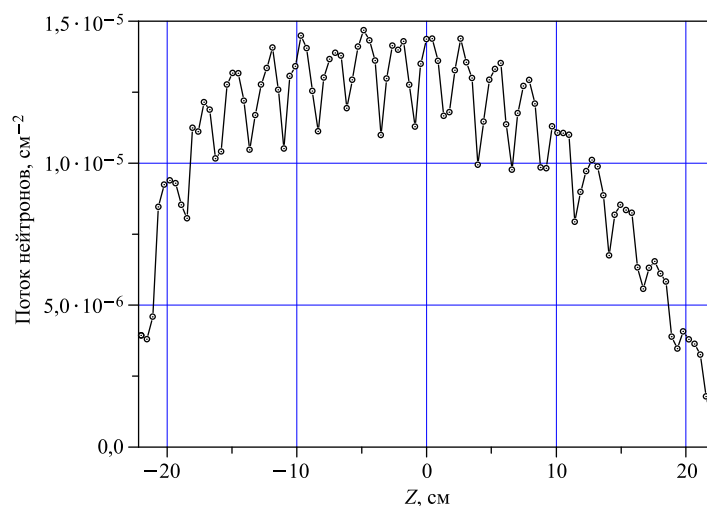


Рис. 8. Распределение потока тепловых нейтронов в расчете на 1 нейтрон деления по высоте гребенчатого замедлителя (Z) со стороны горизонтальных нейтронных пучков 4, 5, 6

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы был выявлен ряд причин отклонений расчетных значений реактивности установки ИБР-2М от значений, полученных во время физического пуска. К основным причинам относится иная масса топливной загрузки по сравнению с декларированным ранее значением. К второстепенным причинам — различия в модельной и реальной конструкциях блоков СУЗ. Оставшееся расхождение может быть связано с отличиями расчетной модели от реальной конструкции и/или с используемой в расчетах константной базой и проведением предварительных расчетов без учета эффектов изотермического нагрева конструкции во время физического пуска. Выявление этих причин требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В.Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ P13-2012-41. 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. *Ананьев В.Д. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ P13-2012-42. Дубна, 2012; [http://www1.jinr.ru/Preprints/2012/042\(P13-2012-42\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2012/042(P13-2012-42).pdf)

3. Драгунов Ю. Г. и др. Модернизация импульсного исследовательского реактора ИБР-2 // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 1. С. 29–34.
4. Мехтиева Р. Н. и др. Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов в реакторе ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ P13-2010-89. Дубна, 2010; [http://www1.jinr.ru/Preprints/2010/089\(P13-2010-89\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2010/089(P13-2010-89).pdf)
5. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC/(95)03/, September 2000 Edition.
6. MCNP — A General Monte Carlo N -Particle Transport Code, Version 4B / Ed. J. F. Briesmeister. Los Alamos National Laboratory report LA-12625-M, Version 4B. March 1997.

Получено 23 января 2013 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 24.04.2013.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,95. Тираж 245 экз. Заказ № 57971.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/