

P13-2024-22

Ю. Н. Пепельшев<sup>1</sup>, А. В. Виноградов<sup>1</sup>, А. Д. Рогов<sup>1</sup>,  
Д. Сумхуу<sup>1,2</sup>

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ  
ПО ИМПУЛЬСНОМУ РЕАКТОРУ **ИБР-4**.  
ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

Предварительные расчеты по импульсному реактору ИБР-4.  
Оптимизация нейтронного потока

Импульсный реактор ИБР-4 при мощности 4 МВт и частоте повторения импульсов  $10 \text{ с}^{-1}$  рассматривается как импульсный источник нейтронов на замену реактору ИБР-2М, который будет выведен из эксплуатации к концу 2030-х гг. Конструкция ИБР-4 построена на базе реактора МБИР с некоторой перекомпоновкой активной зоны (а. з.). А. з. с внесенными изменениями обеспечивает ядерную безопасность реактора и минимизирует низкочастотные колебания энергии импульсов, присущие импульсным реакторам периодического действия. Оптимальная компоновка а. з. ИБР-4 сформирована на основе базовой компоновки с добавлением бериллиевых отражателей и небольших по объему водяных замедлителей. Реактор ИБР-4 при относительно небольшой средней мощности 4 МВт позволяет получить плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя для выведенных нейтронных пучков на уровне  $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а в области, близкой к поверхности, —  $3,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Таким образом, ИБР-4 является мощным импульсным источником тепловых нейтронов.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2024

Preliminary Computations for the Pulsed Reactor IBR-4.  
Optimization of the Neutron Flux

The IBR-4 pulsed reactor with a power of 4 MW and a pulse repetition frequency of  $10 \text{ s}^{-1}$  is considered as a pulsed neutron source to replace the IBR-2M reactor, which will be decommissioned by the end of the thirties. The design of the IBR-4 is based on the MBIR reactor with some rearrangement of the core. The core, with the changes made, ensures the nuclear safety of the reactor and minimizes the low-frequency fluctuations in pulse energy inherent in periodic pulse reactors. The optimal design of the IBR-4 core is based on the basic design with the addition of beryllium reflectors and small volume water moderators. The IBR-4 reactor, with a relatively small average power of 4 MW, makes it possible to obtain thermal neutron flux densities on the surface of the water moderator for the derived neutron beams at the level of  $1.2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , and in the area close to the surface —  $3.0 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Therefore, IBR-4 is a powerful pulsed source of thermal neutrons.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор ИБР-4 рассматривается как импульсный источник нейтронов на замену реактору ИБР-2М, который будет выведен из эксплуатации к концу 2030-х гг. Основу ИБР-4 составляет так называемая базовая компоновка реактора, для которой в работе [1] была показана принципиальная возможность реализации референтных технических решений, применяемых в современном реакторостроении [5]. В базовом варианте ИБР-4 активная зона, как и в ИБР-2М, остается в традиционном окружении водяных замедлителей и рассматривается исключительно для тестового сравнения параметров этой установки с параметрами действующего реактора ИБР-2М. Сравнение показало возможность успешного использования положительных технических решений, применяемых на реакторах на быстрых нейтронах МБИР, БОР-60, БН-600, БН-1200. В данной работе рассматривается дальнейшее улучшение параметров ИБР-4 с целью повышения плотности потока нейтронов на выведенных нейтронных пучках. Принято считать, что в современных источниках нейтронов средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей должна быть на уровне  $1,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [3, 4]. Считается, что такие потоки позволят решить некоторые принципиальные вопросы физики и расширить диапазон физических исследований. Мы не задаемся целью получить такие или еще выше плотности потока нейтронов или обсуждать вышеназванную цифру. В первую очередь решаются вопросы безопасности источника и устраняются ограничения по его колебательной нестабильности, присущей импульсным источникам периодического действия. Поэтому в процессе проработки ИБР-4 средняя мощность реактора с целью безопасности изначально была ограничена 4 МВт, а повышение нейтронных потоков являлось оптимизационной задачей.

### 1. БАЗОВАЯ КОМПОНОВКА ИБР-4

Базовая компоновка ИБР-4 — это конструкция активной зоны (а.з.), которая обеспечивает требуемые параметры ядерной безопасности [1, 5]. Корпус реактора с примыкающим к нему модулятором реактивности ПО-3 приведен на рис. 1. Поперечный разрез а.з. базового варианта ИБР-4 показан на рис. 2. Краткое описание базовой компоновки ИБР-4 состоит в следующем: в центр а.з. помещены 8 кассет-имитаторов, там же симметрично размещены 8 каналов, в которые вставлены блоки ручного и автоматического регулирования мощности. Два вольфрамовых блока — компенсатора выгорания — помещены вне а.з., непосредственно вблизи корпуса реактора. Базовая компоновка ИБР-4 включает в себя также элементы выравнивания энерговыделения по а.з. Это сделано для уменьшения действия положительной компоненты быстрой мощностной обратной связи, вызывающей резонансные явления в колебаниях энергии импульсов мощности. Для выравнивания энерговыделения в центр а.з. вставлены 13 ТВС с вольфрамовыми вставками в твэлах. Всего в а.з. находятся 102 ТВС,

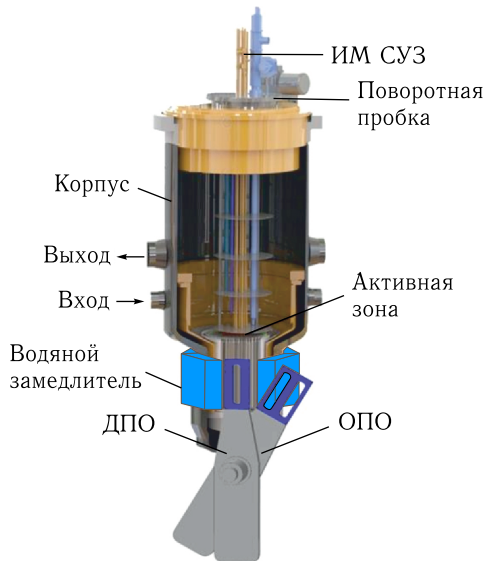


Рис. 1. Корпус ИБР-4 с примыкающим к нему модулятором реактивности ПО-3

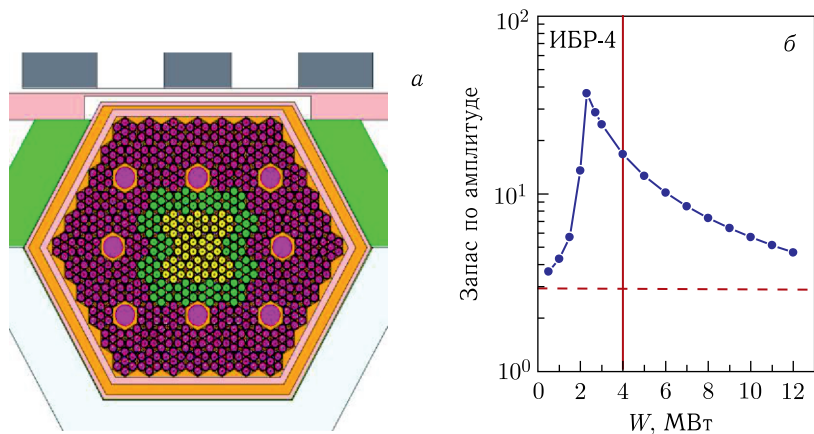


Рис. 2. а) Базовая компоновка ИБР-4 с выравниванием энерговыделения в а.з.: всего 102 ТВС, 86 ТВС с диоксидом плутония, 8 стержней СУЗ с обогащенным бором-10, 8 ТВС — кассет-имитаторов для компенсации выгорания, 13 ТВС со вставками вольфрама длиной 6 см в центре каждого твэла. б) Запас устойчивости ИБР-4 по амплитуде низкочастотных колебаний в зависимости от мощности реактора. Красная горизонтальная прерывистая линия обозначает уровень запаса устойчивости, рекомендуемый для сложных технических систем [4], вертикальная линия — уровень средней мощности ИБР-4

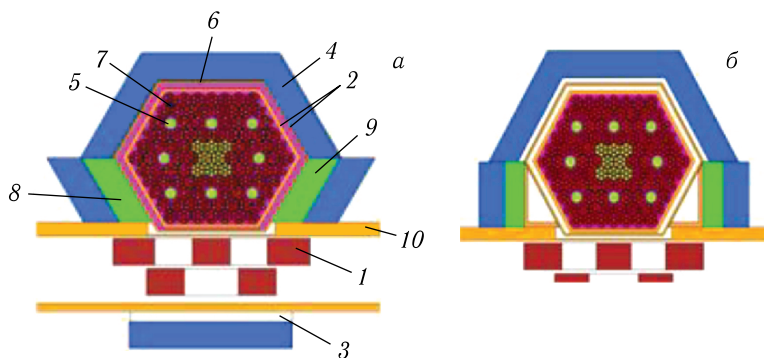


Рис. 3. Поперечный разрез а.з. ИБР-4 с органами СУЗ и имитаторами: а) конструкция корпуса, аналогичная корпусу МБИР, с протеканием натрия сверху вниз вдоль корпуса; б) другой вариант корпуса с протеканием натрия в специально выделенных патрубках, обеспечивается дополнительный страховочный корпус. 1 — модулятор реактивности (МР); 2 — двойной корпус; 3 — слой  $V_4C$ ; 4 — плоский водяной замедлитель; 5 — органы СУЗ  $V_4C$  (80%  $^{10}B$ ); 6 — слой жидкого натрия; 7 — ТВС; 8 — КО1; 9 — КО2; 10 — корпус модулятора реактивности

Таблица 1. Средние плотности потока нейтронов на поверхности водяных замедлителей в базовой компоновке ИБР-4 при мощности 4 МВт и выигрыш в потоках относительно ИБР-2М

Параметр	Плоский $H_2O$ -замедлитель	Гребенчатый $H_2O$ -замедлитель	$\Phi_{ИБР-4}/\Phi_{ИБР-2М}$
$\Phi_{2п}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (средний по $H_2O$ -замедлителю)	$6,9 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	1,1–2,0
$\Phi_{2п}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (максимальный по $H_2O$ -замедлителю)	$8,0 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	1,3–2,3

86 ТВС с диоксидом плутония, 8 стержней СУЗ с обогащенным бором-10 и 8 ТВС-имитаторов для компенсации выгорания. Корпус реактора двойной и выполнен по схеме МБИР с прохождением натриевого теплоносителя сверху вниз вдоль корпуса по всему периметру и далее через а.з. снизу вверх. Другой вариант корпуса с прохождением теплоносителя сверху вниз через специально выделенные входные патрубки приведен на рис. 3. Модулятор реактивности ПО-3, используемый в настоящее время на реакторе ИБР-2М, тесно примыкает к одной из граней корпуса.

Водяные замедлители просматриваются горизонтальными радиального типа нейтронными каналами. Между а.з. и замедлителями установлена прослойка гадолиния толщиной 1 мм. Некоторые исходные установочные данные для базовой компоновки ИБР-4 состоят в следующем:

- **Топливо — диоксид плутония.** Изотопный состав плутония соответствует топливу в ИБР-2М.

• **Мощность 4 МВт.** Ограничение по мощности вызвано ростом низкочастотных и полных колебаний энергии импульсов с увеличением мощности.

• **Частота повторения импульсов  $10 \text{ с}^{-1}$**  — исходя из оптимизации условий для пользователей нейтронных пучков и снижения отрицательного воздействия быстрой мощностной обратной связи (МОС) на колебания энергии импульсов.

В табл. 1 приведены средние плотности  $2\pi$ -эквивалентного потока нейтронов на поверхности водяных замедлителей ИБР-4. Поясним, что здесь и далее плотности  $2\pi$ -эквивалентного потока нейтронов — нейтроны, которые пользователи выведенных нейтронных пучков могут «увидеть» на поверхности замедлителей.

## 2. БАЗОВАЯ КОМПОНОВКА ИБР-4 С ОТРАЖАТЕЛЯМИ НЕЙТРОНОВ

Использование отражателей усиливает потоки нейтронов на поверхности водяных замедлителей. Современные стационарные исследовательские реакторы, а также импульсные источники нейтронов, например общеевропейский источник ESS [7], включают в компоновку замедлителей специально выделенные отражатели нейтронов. На рис. 4 приведен пример ИБР-4 с отражателем.

Габариты водяного замедлителя составляли  $5 \times 6 \times 10$  см при оптимальной толщине замедлителя 5 см. Расчет потоков нейтронов на замедлителе, а также потоков вблизи или на удалении от замедлителя для всех вариантов а. з., рассмотренных в данной работе, проводился по единой методике. Потоки нейтронов рассчитывались в трех точках: непосредственно

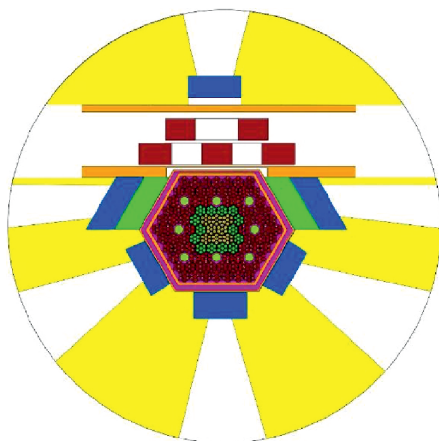


Рис. 4. ИБР-4 с водяными замедлителями (голубой) и с отражателями нейтронов (желтый) в среднем сечении а. з.

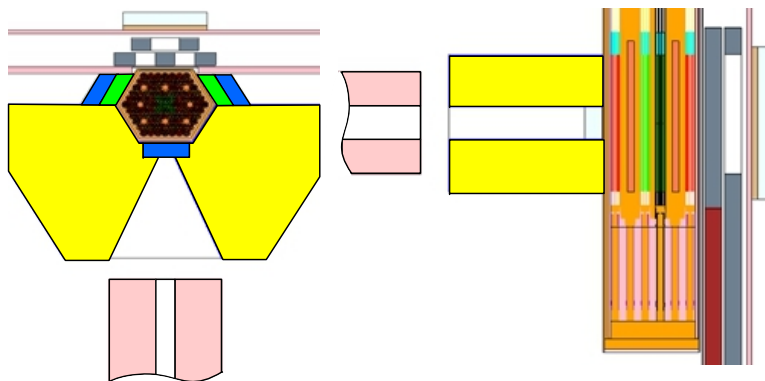


Рис. 5. Расчетная модель ИБР-4 с отражателями нейтронов и пучковым коллиматором для одного нейтронного пучка

в центре поверхности водяного замедлителя, вторая точка — на расстоянии 30 см от поверхности по линии нейтронного пучка и третья точка — на расстоянии 10 м от поверхности замедлителя. Для наглядности потоки рассматривались только для одного нейтронного пучка (рис. 5). Плотности потока нейтронов в так называемом  $2\pi$ -приближении, т. е. нейтроны, которые могут быть «видимы» на поверхности замедлителя на достаточно большом расстоянии от а. з., рассчитывались следующим образом. Вся поверхность замедлителя просматривалась прямоугольным коллиматором длиной 5 м, изготовленным из железа. Коллиматор играл роль тепловой защиты и защиты от влияния соседних нейтронных пучков. Плотности потока нейтронов рассчитывались на удалении 10 м от а. з. по оси пучка  $\Phi_{\text{sample}}$  и пересчитывались для оценки плотности  $2\pi$ -эквивалентного потока на замедлителе  $\Phi_{2\pi} = 2\pi(L^2/S)\Phi_{\text{sample}}$ . Наличие коллиматора снижает плотность  $2\pi$ -эквивалентного потока в 1,6 раза. Поэтому все расчеты проводились только с учетом коллиматора.

Усиление нейтронного потока существенно зависит от материала отражателей. Рассматривались следующие виды отражателей: бериллий, тяжелая вода, графит и свинец. Влияние материала отражателей на потоки нейтронов на расстоянии 30 см от поверхности водяного замедлителя видно на рис. 6.

Расчеты показали, что наилучший для ИБР-4 отражатель — бериллий. Изменение плотности потока тепловых нейтронов на расстоянии 10 м от поверхности водяного замедлителя в зависимости от толщины отражателя из бериллия показано на рис. 6. Оптимальная толщина Be-отражателя для получения максимального потока нейтронов с поверхности водяного замедлителя составляет 40 см. Средние значения плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей с Be-отражателем оптимальной толщины, а также потоки в  $2\pi$ -приближении приведены в табл. 2.

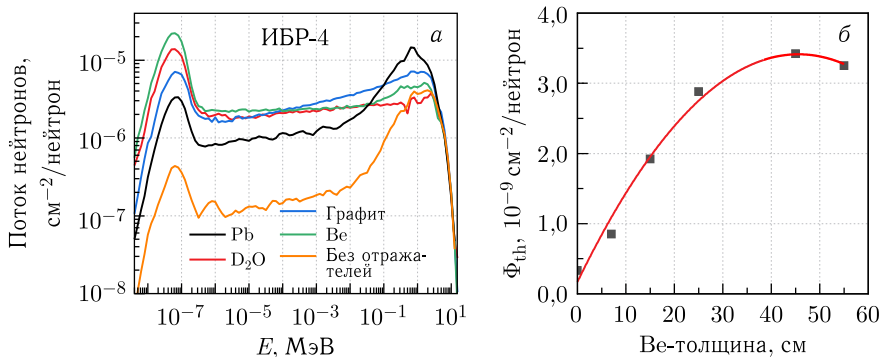


Рис. 6. Распределение по энергии потока нейтронов на один нейтрон деления на расстоянии 30 см от поверхности водяного замедлителя для разных типов отражателей: бериллия, тяжелой воды, графита и свинца (а) и изменение потока тепловых нейтронов на расстоянии 10 м от поверхности водяного замедлителя на один нейтрон деления в зависимости от толщины отражателя из бериллия (б)

Таблица 2. Средние плотности потока тепловых нейтронов ( $\Phi_{th}^1$ ) и плотность  $2\pi$ -эквивалентного потока ( $\Phi_{2\pi}$ ) на поверхности замедлителя в ИБР-4 с Ве-отражателями оптимальной толщины.  $\Delta k_{эф}/k_{эф}$ ,  $\tau$  — эффективность Ве-отражателя и время жизни нейтронов в а.з. соответственно, мощность 4 МВт

Параметр	Ве	Без Ве	$\Phi_{ИБР-4}/\Phi_{ИБР-2М}$
$\Delta k_{эф}/k_{эф}$ , %	+10,3	0	—
$\tau$ , нс	142	66	—
$\Phi_{th}^1$ , см <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup> (на поверхности замедлителя)	$3,1 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	—
$\Phi_{2\pi}$ , см <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	20 $1,2 \cdot 10^{14}/6,0 \cdot 10^{12}$

Такие высокие плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя, находящегося в окружении Ве-отражателей (см. табл. 2), могут быть следствием существенного уширения длительности вспышки тепловых нейтронов за счет времени замедления и диффузии быстрых нейтронов на бериллии. Проведены следующие расчеты. На водяной замедлитель воздействует дельта-импульс быстрых нейтронов со спектром нейтронов в а.з. ИБР-4. Рассматривается временное распределение тепловых нейтронов с энергией в диапазоне  $\sim 0-0,5$  эВ на поверхности водяного замедлителя при наличии или отсутствии бериллия. Результаты приведены на рис. 7 и 8. Без бериллия (красная линия на рис. 7) показано временное распределение тепловых нейтронов, генерируемых в процессах термализации и диффузии только в среде водяного замедлителя, другие распределения на этом рисунке — те же процессы, но с участием бериллиевых отражателей. Видно, что для воды время термализации сопоставимо со



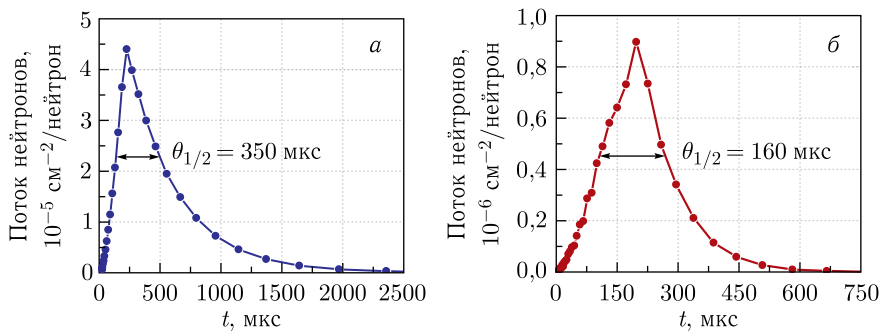


Рис. 7. Распределение во времени потока тепловых нейтронов на один нейтрон деления на поверхности водяного замедлителя ИБР-4 при толщине бериллиевого отражателя 20 см (а) и толщине 0 см без отражателя (б). Цифрами показана ширина импульса на полувысоте. В момент времени ноль на замедлитель воздействует дельта-импульс быстрых нейтронов со спектром в а. з. ИБР-2М

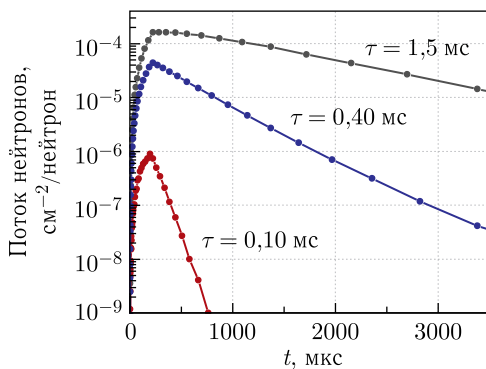


Рис. 8. Распределение во времени потока тепловых нейтронов на один нейтрон деления на поверхности водяного замедлителя ИБР-4 при некоторых значениях толщины бериллиевого отражателя: красная линия — толщина 0 см (без отражателя), синяя — 20 см, черная — 40 см. Цифрами показана временная константа спада нейтронного потока

временем диффузии нейтронов, а длительность вспышки тепловых нейтронов составляет всего 160 мкс. С бериллием длительность вспышки определяется в основном временем диффузии нейтронов в бериллии. В целом для максимально возможной толщины бериллиевого отражателя, равной 40 см, полуширина вспышки составляет 1300 мкс. Интересно отметить, что, как видно из рис. 8, варьированием толщины Ве-отражателя можно менять длительность вспышки тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя от минимального значения 160 мкс до максимального — 1300 мкс. Плотность потока тепловых нейтронов на поверхности водяного

замедлителя при таком изменении длительности вспышки увеличивается от  $1,3 \cdot 10^{13}$  до  $3,1 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , т. е. в 30 раз.

Также отметим, что реальная форма вспышки тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя  $G_{\text{tot}}(t)$  будет определяться вспышкой быстрых нейтронов, генерируемой в а.з. модулятором реактивности  $G_{\text{fast}}(t)$ , и реакцией замедлителей и отражателей на дельта-импульс быстрых нейтронов  $h_{\text{term}}(t)$ . В данном случае функцию  $h_{\text{term}}(t)$  можно назвать импульсной характеристикой замедлителя. Соотношение между указанными вспышками будет выглядеть следующим образом:  $G_{\text{tot}}(t) = G_{\text{fast}}(t) * h_{\text{term}}(t)$ , где \* есть оператор свертки. Эту вспышку  $G_{\text{tot}}(t)$  можно измерить, установив детектор на поверхность водяного замедлителя. Форму вспышки тепловых нейтронов в так называемом  $2\pi$ -представлении, т. е. вспышки тех нейтронов, которые экспериментатор может «видеть» на удаленной базе от поверхности водяных замедлителей, непосредственно зарегистрировать практически невозможно (или очень сложно), но можно рассчитать.

### 3. ИБР-4 С УПЛОЩЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

Рассмотрение уплощенной а.з. ИБР-4 проведено в основном с целью увеличения числа выведенных нейтронных пучков, «просматривающих» водяные замедлители. Активная зона в этом случае удлинена в горизонтальном сечении в 2 раза: с 20 см по грани, примыкающей к замедлителю, до 40 см. В удлиненной геометрии а.з. высота твэлов уменьшается с 44,4 до 36 см, как следствие — увеличивается жесткость твэлов, соответственно, положительная компонента МОС, вызванная изгибами твэлов к центру а.з., уменьшается и реактор становится более стабильным. Таким образом, в уплощенной конструкции а.з. присутствует достаточно много плюсов. Приемлемость уплощенной конструкции а.з. для ее дальнейшего рассмотрения состояла в оценке ее нейтронно-физических характеристик,

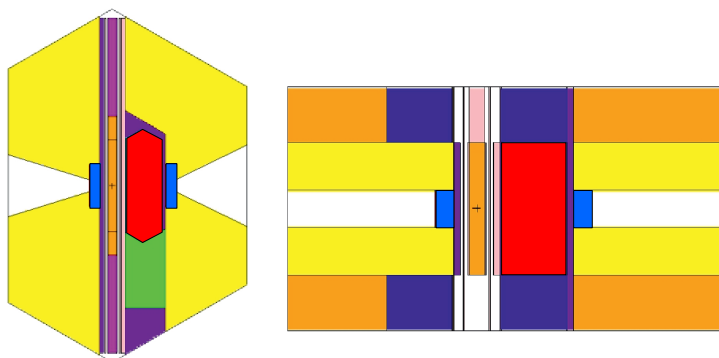


Рис. 9. Расчетная модель ИБР-4 с бериллиевыми отражателями с уплощенной а.з. В центре виден модулятор реактивности, коллиматор не показан

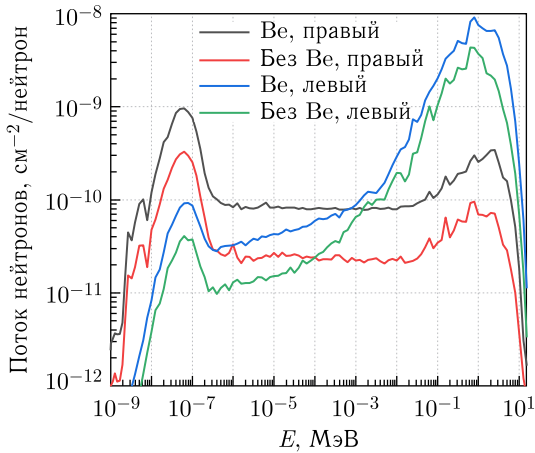


Рис. 10. Распределение потока нейтронов на один нейтрон деления по энергии в а. з. ИБР-4 на расстоянии 10 м от поверхности водяных замедлителей, расположенных слева и справа от уплотненной зоны

Таблица 3. Средние плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей в ИБР-4 с уплотненной а. з. ( $h = 36$  см) с бериллиевыми отражателями.  $\Delta k_{эф}/k_{эф}, \tau$  — эффективность Ве-отражателя и время жизни нейтронов в а. з. соответственно. Приведена глубина модуляции модулятора реактивности из бериллия и никеля, мощность 4 МВт

Параметр	Ве	Без Ве	$\Phi_{ИБР-4}/\Phi_{ИБР-2М}$
$\Delta k_{эф}/k_{эф}, \%$	+7,3	0	—
Глубина модуляции для модулятора из Ве $\Delta k_{эф}/k_{эф}, \%$	11	—	—
Глубина модуляции для модулятора из никеля $\Delta k_{эф}/k_{эф}, \%$	4	—	—
$\tau, \text{нс}$	277 (73)	48	—
$\Phi_{пр}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$8,0 \cdot 10^{12}$	—
$\Phi_{лев}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{12}$	—
$\Phi_{2\pi}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \text{правый}$	$6,1 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{12}$	10 $6,1 \cdot 10^{13}/5,0 \cdot 10^{12}$
$\Phi_{2\pi}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \text{левый}$	$2,9 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{12}$	5 $2,9 \cdot 10^{13}/5,0 \cdot 10^{12}$

особенно в оценке плотности потока нейтронов на замедлителе. Расчетная модель уплотненной конструкции ИБР-4 показана на рис. 9 (без коллиматора).

Распределение по энергии средней по поверхности водяного замедлителя плотности потока нейтронов на один нейтрон деления в уплощенной конструкции а.з. на расстоянии 10 м от поверхности замедлителей, расположенных слева и справа от модулятора реактивности, приведено на рис. 10.

Основные данные по потокам нейтронов в ИБР-4 с уплощенной а.з. приведены в табл. 3. Плотности потока нейтронов, как видно из табл. 3,  $\Phi_{2\pi} = 6,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для уплощенной а.з. меньше потоков в основной компоновке реактора в 1,9 раза. Уплощенную конструкцию а.з., по-видимому, можно рассматривать лишь с точки зрения выгоды от повышения числа выведенных нейтронных пучков и дополнительного ослабления колебательной неустойчивости.

#### 4. ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Тестовые расчеты необходимы для сравнительной оценки основных нейтронно-физических характеристик ИБР-4. Эта задача представляется достаточно важной, поскольку всегда существуют некоторые сомнения в расчетах таких сложных реакторных систем, как ИБР-4, систем с малыми а.з. с термализацией нейтронов в среде разнотипных замедлителей. В тестовых расчетах и в расчетах ИБР-4 использовалась единая программная среда и единый методический подход. Поэтому тестовые расчеты позволяют получить достаточно надежную экспертную оценку нейтронно-физических характеристик ИБР-4.

**4.1. Тест № 1. Расчеты по реактору ИБР-3 («Нептун»).** Реактор ИБР-3 (другое название — «Нептун») есть проект источника нейтронов взамен ИБР-2М [2, 5]. Отличительная особенность ИБР-3 (в отличие от ИБР-2 и ИБР-2М) состоит в использовании в качестве топлива вместо плутония пороговый элемент нептуний. При этом в ИБР-3 модуляция реактивности выполняется с помощью вращающегося диска с положитель-

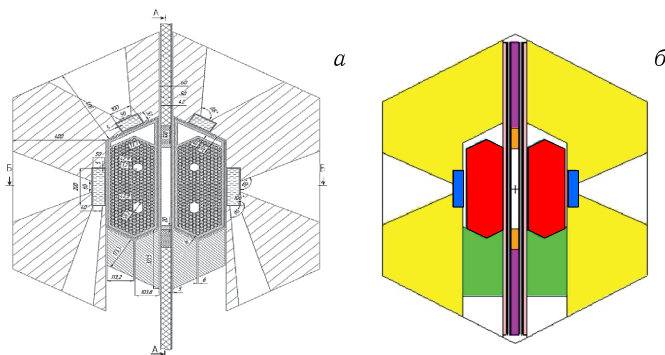


Рис. 11. Горизонтальное сечение ИБР-3 по центру а.з. (а) и расчетная модель ИБР-3 без коллиматора (б)

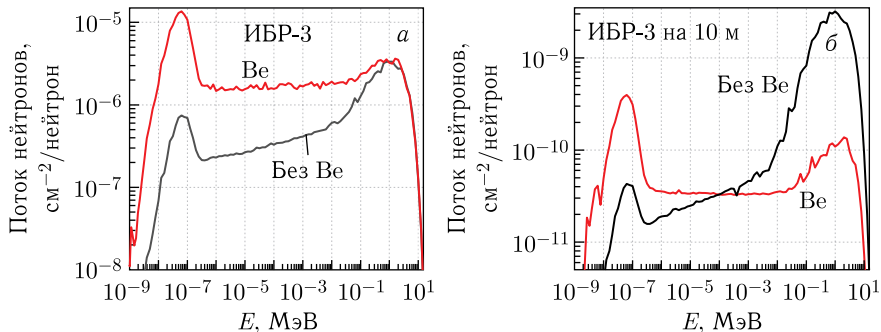


Рис. 12. Распределение по энергии потока нейтронов на один нейтрон деления на расстоянии 30 см (а) и 10 м от поверхности водяного замедлителя (б) ИБР-3 при наличии и отсутствии Be-отражателя

Таблица 4. Средние плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей в ИБР-3 ( $\Phi_{th}^1$ ) и на расстоянии 30 см от замедлителей по оси пучка ( $\Phi_{th}^2$ ) и плотность  $2\pi$ -эквивалентного потока ( $\Phi_{2\pi}$ ) на поверхности замедлителя.  $\Delta k_{эф}/k_{эф}$ ,  $\tau$  — эффективность Be-отражателя и время жизни нейтронов в а. з., мощность 15 МВт. Выигрыш относительно ИБР-2М равен 7

Параметр	Be	Без Be
$\Delta k_{эф}/k_{эф}$ , %	+1,4	0
$\tau$ , нс	9	9
$\Phi_{th}^1$ , $см^{-2} \cdot с^{-1}$ (на поверхности замедлителя)	$1,5 \cdot 10^{14}$	$9,5 \cdot 10^{12}$
$\Phi_{th}^2$ , $см^{-2} \cdot с^{-1}$ (30 см от замедлителя)	$9,7 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$
$\Phi_{2\pi}$ , $см^{-2} \cdot с^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{13}$	$9,3 \cdot 10^{12}$

ным пустотным эффектом. Кратко отметим основные особенности ИБР-3: топливо — нитрид нептуния (NpN), охлаждение — натрий, мощность 15 МВт. Все необходимые данные для расчетов ИБР-3 взяты из работы [6]. Геометрия ИБР-3 по горизонтальному сечению а. з. и расчетная модель ИБР-3 приведены на рис. 11.

Распределение по энергии средней плотности потока нейтронов на один нейтрон деления ИБР-3 на расстоянии 30 см и 10 м от поверхности водяного замедлителя показаны на рис. 12. Основные расчетные нейтронно-физические параметры ИБР-3 приведены в табл. 4.

**4.2. Тест № 2. Плотность потока тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя реактора ИБР-2М.** Расчет плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей ИБР-2М проводился с целью тестовой проверки методики нейтронно-физических расчетов реактора с термализацией нейтронов с помощью водяных замедлителей. Вычисления выполнялись для замедлителя, просматриваемого нейтронными пучками № 2 и 3. Геометрия замедлителей показана на рис. 13. Все стенки замедлителя изготовлены из алюминия, между кор-

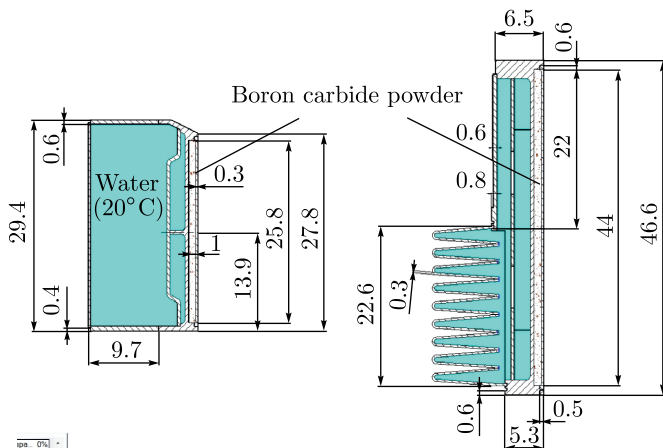


Рис. 13. Водяной замедлитель со стороны нейтронных пучков № 2 и 3, прослойка карбида бора 1 см, все стенки — алюминий

Таблица 5. Средние потоки тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей ИБР-2М со стороны нейтронных пучков № 2 и 3. Нейтронный источник для ИБР-2М равен  $0,96 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}/\text{МВт}$ . Мощность 2 МВт

Параметр	Пучок № 2	Пучок № 3
$\Phi_{\text{th}}^1$ , $\text{см}^{-2}/\text{нейтрон деления}$ (на расстоянии 10 м от поверхности замедлителя)	$4,1 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
$\Phi_{2\pi}$ , $\text{см}^{-2}/\text{нейтрон деления}$ (на поверхности замедлителя)	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
$\Phi_{2\pi}$ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (плотность $2\pi$ -эквивалентного потока на поверхности замедлителя для 2 МВт)	$5,96 \cdot 10^{12}$	$5,1 \cdot 10^{12}$

пусом реактора и замедлителем вставлена прослойка из карбида бора толщиной 1 см. Расчет выполнялся для реальной системы тепловой защиты и первого кольца биологической защиты ИБР-2М, через которую проходит канал нейтроновода  $20 \times 40$  см. Основные данные по потокам нейтронов на замедлителе для пучков № 2 и 3 приведены в табл. 5.

**4.3. Тест № 3. Задача на адекватность программной среды для расчета реакторов на быстрых нейтронах с малой а. з. и с внешними замедлителями нейтронов.** Смысл простой: просчитать критическую систему (реактор) на быстрых нейтронах в окружении разнотипных замедлителей. Расчет провести с помощью программных пакетов, аналогичных MCNP и SERPENT. Главная задача состояла в том, чтобы можно было методически «правильно», т. е. по единым правилам, сопоставить резуль-

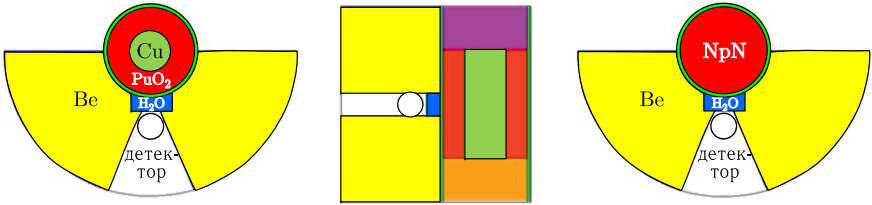


Рис. 14. Геометрия тестовой задачи с постоянной площадью а.з. из  $\text{PuO}_2$  и  $\text{NpN}$

Таблица 6. Эффективный коэффициент размножения  $k_{\text{эф}}$ , объем а.з., а также средние потоки тепловых нейтронов по объему шарового детектора для зоны из  $\text{PuO}_2$  и  $\text{NpN}$  на один нейтрон деления ( $\Phi_{\text{th}}^1$ ) и на 1 МВт мощности ( $\Phi_{\text{th}}^2$ ) при расчетах по MCNP и SERPENT

Параметр	$\text{PuO}_2$	$\text{NpN}$
$k_{\text{эф}}$ , %	$1,064 \pm 0,004$	$1,065 \pm 0,004$
Объем а.з., л	$39,5 = 31,1 + 8,84$ (медь)	39,5
$\Phi_{\text{th}}^1$ , $\text{см}^{-2}/\text{нейтрон деления}$ (средний по объему шара-детектора)	$(2,44 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$	
Источник нейтронов деления $\varphi$ , $\text{с}^{-1}/\text{МВт}$	$0,96 \cdot 10^{17}$	$0,90 \cdot 10^{17}$
$\Phi_{\text{th}}^2$ , $(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/\text{МВт}$ (средний по объему шара-детектора)	$(2,30 \pm 0,03) \cdot 10^{13}$	$(2,20 \pm 0,03) \cdot 10^{13}$

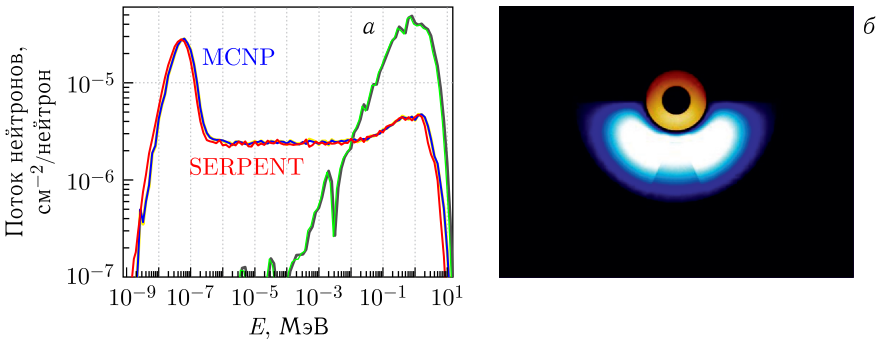


Рис. 15. а) Спектры нейтронов в а.з. из  $\text{PuO}_2$  и в шаровом детекторе, нормированные на один нейтрон деления, полученные с помощью программ MCNP и SERPENT. Видно практически полное совпадение. б) Визуализация плотности потока тепловых нейтронов для а.з. из  $\text{PuO}_2$  в программе SERPENT. Видна светящаяся область генерации тепловых нейтронов

таты расчетов по выходу тепловых нейтронов из замедлителей для а.з. на основе плутония и нептуния, а в данной работе сравнить расчеты по ИБР-3 и ИБР-4, полученные с помощью разных программных пакетов.

Отметим некоторые особенности расчетов а.з. ИБР-3 (нептуний) и ИБР-4 (плутоний). Для понимания постановки задачи сравним плотность потока нейтронов  $\Phi_{гс}$  на поверхности критического шара радиусом  $r$  из диоксида плутония и шара из нитрида нептуния. Для плотности потока нейтронов на поверхности критического шара имеем

$$\Phi [\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] = \varphi [\text{с}^{-1}] / 4\pi r^2,$$

где  $\varphi [\text{с}^{-1}]$  — источник нейтронов деления: для зоны из  $\text{PuO}_2$   $\varphi [\text{с}^{-1}/\text{МВт}] = 0,96 \cdot 10^{17}$  и для  $\text{NpN}$   $\varphi [\text{с}^{-1}/\text{МВт}] = 0,90 \cdot 10^{17}$ . Для радиусов критических шаров из  $\text{PuO}_2$  9,6 см и из  $\text{NpN}$  14,0 см соотношение плотностей потоков нейтронов на поверхности шаров равно  $\Phi(\text{PuO}_2)/\Phi(\text{NpN}) = 2,2$ . Таким образом, принципиально важно отметить, что потоки нейтронов на выведенных нейтронных пучках при одной и той же мощности для плутониевой а.з. будут заметно больше, чем для нептуниевой. Кроме того, видно, что основную роль в оптимизации плотности потока нейтронов играет общая площадь а.з. Значит, из всего множества малых а.з. разного объема и площади, можно выбрать вариант, при котором критические а.з. с  $\text{PuO}_2$  и  $\text{NpN}$  будут иметь равные площади. В этом случае плотности потока нейтронов на поверхности а.з. обоих реакторов при одной и той же мощности должны быть с точностью до источника нейтронов деления  $\varphi [\text{с}^{-1}]$  равны или равны полностью из расчета на один нейтрон деления. Для проверки этого предположения была выбрана схема параллельных расчетов по программам, аналогичным MCNP и SERPENT. Геометрия тестовой задачи, удобной для расчетов с помощью указанных выше пакетов, представлена на рис. 14. Рассматривается цилиндрическая а.з. с Ве-отражателями и водяным замедлителем. В центре а.з. выделена цилиндрическая область, заполненная медью. Варьированием диаметра этой области достигаем критичности на запаздывающих нейтронах сначала для  $\text{NpN}$ -топлива, затем для  $\text{PuO}_2$ -топлива. Указанная процедура последовательно выполняется для MCNP и SERPENT. На поверхности водяного замедлителя ставится шаровой детектор, полностью перекрывающий растроб Ве-отражателя (см. рис. 14). Рассматриваются поток быстрых нейтронов в а.з. и средний по объему шара-детектора поток тепловых нейтронов. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

На рис.15 для примера приведены спектры нейтронов в а.з. из  $\text{PuO}_2$  и в шаровом детекторе, полученные по программам MCNP и SERPENT. Видно полное совпадение.

## 5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Конструкция ИБР-4 построена на базе реактора МБИР с некоторой перекомпоновкой а.з. Такая зона, названная в работе [1] базовой компо-



Таблица 7. Некоторые нейтронно-физические характеристики реакторов ИБР-2М, ИБР-3 и ИБР-4:  $\Phi_{2\pi}$  — средние плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей в  $2\pi$ -эквивалентном приближении,  $\tau$  — время жизни нейтронов в а. з. и выигрыш в потоке относительно ИБР-2М

Параметр	ИБР-2М	ИБР-3	ИБР-4		
			Базовый	Базовый + Ве	Уплотненный + Ве
$\tau$ , нс	65	9(10)		140	48
Мощность, МВт	2	15	4		
$\Phi_{th}^1$ , $см^{-2} \cdot с^{-1}$ (на поверхности $H_2O$ -замедлителя)	$0,6 \cdot 10^{13}$	$15,0 \cdot 10^{13}$ $(12,0 \cdot 10^{13})$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$31 \cdot 10^{13}$	$11 \cdot 10^{13}$
$\Phi_{2\pi}$ , $см^{-2} \cdot с^{-1}$	$0,6 \cdot 10^{13}$	$4,2 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$12 \cdot 10^{13}$	$6,1 \cdot 10^{13}$
Выигрыш относительно ИБР-2М при номинальной мощности реактора	1	7	2	20	10

*Примечание.* В скобках даны результаты расчета НИКИЭТ. Допустимая по условиям безопасности мощность ИБР-3 согласно [5] должна быть намного меньше указанной в таблице.

Таблица 8. Сравнительные характеристики реакторов ИБР-2М, ИБР-3 и ИБР-4

Параметр	ИБР-2М	ИБР-3	ИБР-4
Средняя тепловая мощность, МВт	2	15	4
Теплоноситель	Натрий	Натрий	Натрий
Расход теплоносителя, $м^3/ч$	100	350	200
Частота импульсов, $с^{-1}$	5	10	10
Топливо	$PuO_2$	$NpN$	$PuO_2$
Масса топлива, кг	80	—	111
Объем а. з., л	21,4	2 зоны $\times 31$	$\sim 23,4$
Максимальное выгорание топлива, %	9	—	9
Высота а. з., см	44,4	36,0	44,4
Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$
Импульсная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{и}$	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$
Модулятор реактивности	ПО-3	—	ПО-3
Плотность потока тепловых нейтронов $\Phi_{2\pi}$ , $10^{13} см^{-2} \cdot с^{-1}$	0,5	4,2	12
Выигрыш относительно ИБР-2М	1,0	7	20
Устойчивость к автоколебаниям энергии импульсов	Слабая	Данных нет	Высокая

новой а. з., обеспечивает ядерную безопасность реактора и минимизирует низкочастотные колебания энергии импульсов. Оптимальная компоновка а. з. ИБР-4 с точки зрения получения максимальных плотностей потока тепловых нейтронов на выведенных нейтронных пучках есть базовая компоновка а. з. плюс бериллиевые отражатели и небольшие по объему водяные замедлители. Оптимальная компоновка позволяет получить при сравнительно небольшой мощности (4 МВт) значения плотности потока тепловых нейтронов на выведенных нейтронных пучках в  $2\pi$ -эквивалентном приближении на уровне  $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а в области, близкой к поверхности водяного замедлителя, —  $3,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Таким образом, реактор ИБР-4 является мощным импульсным источником тепловых нейтронов и мощным облучателем, на два порядка превышающим флюенсы тепловых нейтронов ИБР-2М. Основные нейтронно-физические параметры реакторов ИБР-2М, ИБР-3 и ИБР-4 для сравнения приведены в табл. 7 и 8.

Расчеты позволяют выбрать также оптимальную с точки зрения пользователей нейтронных пучков конструкцию а. з. ИБР-4. Дело в том, что при реализации уплощенной а. з. потери тепловых нейтронов в нейтронных пучках, согласно данным табл. 7, уменьшаются всего вдвое: с  $1,2 \cdot 10^{14}$  до  $6,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , но число выведенных нейтронных пучков существенно увеличивается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пепельшев Ю. Н., Виноградов А. В., Rogov A. Д., Сидоркин С. Ф.* Концепция импульсного реактора периодического действия ИБР-4 // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 1(233). С. 98–112.
2. *Шабалин Е. П., Аксенов В. Л., Комышев Г. Г., Rogov A. Д.* Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния // АЭ. 2018. Т. 124, вып. 6. С. 309–313.
3. *Аксенов В. Л., Ананьев В. Д., Комышев Г. Г., Rogov A. Д., Шабалин Е. П.* О пределе нейтронных потоков в импульсных источниках на основе реакции деления // Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14, № 5(210). С. 556–570.
4. *Шабалин Е. П., Верхоглядов А. Е., Булавин М. В., Rogov A. Д., Кулагин Е. Н., Куликов С. А.* Спектр и плотность потока нейтронов в облучательном канале пучка № 3 реактора ИБР-2 // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 2(193). С. 505–516.
5. *Пепельшев Ю. Н., Виноградов А. В., Rogov A. Д., Сумхуу Д.* Предварительные расчеты по импульсному реактору ИБР-4. Базовая компоновка. Препринт ОИЯИ Р13-2024-7. Дубна, 2024.
6. Расчетные исследования технических решений реакторной установки с импульсным реактором периодического действия с топливом на основе нептуния ИБР3-От-5775: Отчет о научно-исследовательской работе. 2024. Шифр: 1-00.05-05-06.10-1957К. Номер темы 23.097-054.
7. European Spallation Source (ESS). Conceptual Design Report. ESS-2012-001; [http://esss.se/documents/CDR\\_Final\\_120206.pdf](http://esss.se/documents/CDR_Final_120206.pdf).

Получено 20 мая 2024 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 02.07.2024.

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

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,22. Тираж 110 экз. Заказ № 60894.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)