

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

Ю. Н. Пепельшев^{а,1}, А. В. Виноградов^а, А. Д. Рогов^{а,2}, Д. Сумхуу^{а,б}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

Импульсный реактор ИБР-4 при мощности 4 МВт и частоте повторения импульсов 10 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 на принципах преемственности положительных решений, используемых на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М. Активная зона ИБР-4 обеспечивает ядерную безопасность реактора и минимизирует низкочастотные колебания энергии импульсов. Компоновка ИБР-4 сформирована на основе базовой компоновки активной зоны с добавлением бериллиевых отражателей и небольших по объему водяных замедлителей. Реактор ИБР-4 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 замедлителя, — на уровне $3,0 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Таким образом, ИБР-4 является мощным импульсным источником тепловых нейтронов.

The IBR-4 pulsed reactor with a power of 4 MW and a pulse repetition frequency of 10 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 IBR-4 design is based on the MBIR reactor based on the principles of continuity of positive solutions used in the IBR-2 and IBR-2M reactors. The IBR-4 core ensures the nuclear safety of the reactor and minimizes low-frequency fluctuations in pulse energy. The IBR-4 design is based on the basic design of the core with the addition of beryllium reflectors and small volume water moderators. The IBR-4 reactor 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 region close to the surface of the moderator — $3.0 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Therefore, IBR-4 is a powerful pulsed source of thermal neutrons.

PACS: 28.50.Ft

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,

¹E-mail: pepel@nf.jinr.ru

²E-mail: rogov_ad@mail.ru

для которой в работе [1] показана принципиальная возможность реализации референтных технических решений, применяемых в современном реакторостроении [2]. 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, во-первых, успешного использования положительных технических решений, применяемых на реакторах МБИР, БОР-60, БН-600, БН-1200, а во-вторых, в базовой компоновке успешного решения вопросов безопасности источника и снижения низкочастотных колебаний мощности, присутствующих импульсным реакторам периодического действия. При этом уровень мощности ИБР-4 определен равным 4 МВт. При такой мощности плотность потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей базового варианта ИБР-4 составила $\sim 1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что только в 2–3 раза выше потоков на ИБР-2М. Принято считать, что в современных импульсных источниках нейтронов средняя плотность потока тепловых нейтронов должна быть не менее $1,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [3, 4]. Поэтому для ИБР-4 были проведены оптимизационные исследования, направленные на повышение нейтронных потоков. Результаты показали, что такая задача для ИБР-4 может быть успешно решена. В работе представлены основные результаты этих исследований.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИБР-2М И БАЗОВОЙ КОМПОНОВКИ ИБР-4

Базовая компоновка ИБР-4 — это конструкция активной зоны (а.з.), в которой максимально полно использованы положительные технические решения, принятые в современном реакторостроении, которые обеспечивают требуемые параметры ядерной безопасности [1, 2]. В целом конструкция ИБР-4 разработана на принципах преемственности хорошо зарекомендовавших себя решений, апробированных в процессе эксплуатации ИБР-2 и ИБР-2М, с привлечением ряда инновационных подходов, примененных в проектах МБИР и БН-1200. Поэтому между ИБР-2М и ИБР-4 есть существенные сходства, но есть и существенные различия. Кратко рассмотрим основные сходства и различия.

Принцип генерации импульсов нейтронов в реакторах ИБР-2М и ИБР-4 один и тот же. Вращающийся вблизи а.з. модулятор реактивности ПО-3 создает импульсы реактивности. В результате реакторы ИБР-2М с частотой 5 с^{-1} и ИБР-4 с частотой 10 с^{-1} на короткое время (примерно 450 мкс) становятся надкритическими на мгновенных нейтронах, оставаясь глубокоподкритическими основную часть периода. Вследствие этого реакторы генерируют импульсы мощности длительностью ~ 200 мкс. Средняя мощность ИБР-2М составляет 2 МВт, ИБР-4 — 4 МВт, пиковая мощность — на уровне 1800–2000 МВт. Важно, что в обоих реакторах в качестве модулятора реактивности (МР) используется одна и та же конструкция с двумя гетерогенными вращающимися лопастями, выполняющими роль подвижных отражателей нейтронов. Такая система модуляции реактивности действует на реакторе ИБР-2М. Существенное сходство ИБР-2М и ИБР-4 состоит еще и в том, что в ИБР-4 для загрузки а.з. принят твэл ИБР-2М. Расчеты показали, что колебательные свойства реактора с таким твэлом из набора применяемых в реакторах на быстрых нейтронах наилучшие (исключение после более детальных исследований может составить

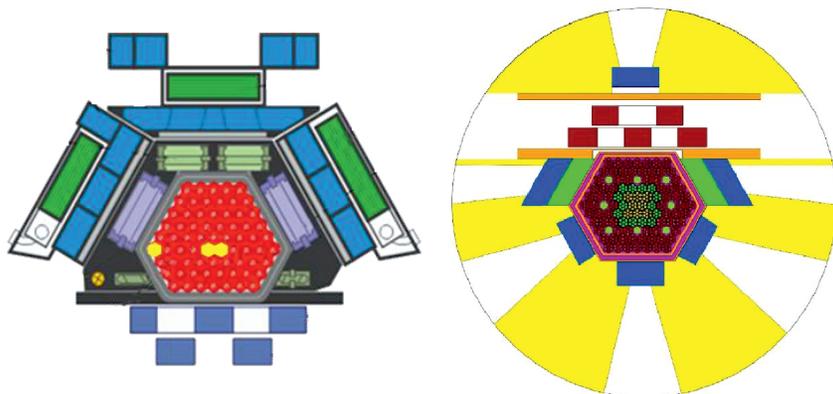


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Вид активной зоны в горизонтальном сечении реакторов ИБР-2М (слева) и ИБР-4 с бериллиевыми отражателями (справа, желтые)

твэл реактора МБИР). Активная зона обоих реакторов охлаждается жидким натрием. На этом основные сходства реакторов заканчиваются. Принципиальные схемы а.з. ИБР-2М и ИБР-4 показаны на рис. 1.

При общем сходстве ИБР-2М и ИБР-4 между ними есть и существенные различия. Во-первых, в отличие от ИБР-2М, в а.з. ИБР-4 сделаны значительные конструктивные изменения, направленные в основном на ослабление низкочастотных колебаний энергии импульсов и повышение нейтронных потоков на поверхности замедлителя. Подробное описание этих изменений дано в работе [2]. Отметим только, что а.з. ИБР-4 сконструирована с элементами выравнивания энерговыделения по ее объему. Различие состоит также в том, что а.з. ИБР-2М окружена водяными замедлителями, а зона ИБР-4 — еще и массивом бериллиевых блоков. Третье принципиальное различие в том, что водяные замедлители ИБР-4 максимально близко приближены к корпусу реактора, часть органов регулирования введена в а.з. В целом конструктивные изменения а.з. ИБР-4 позволили в 2–3 раза повысить плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей и одновременно раза в два уменьшить проявления низкочастотных колебаний мощности. При этом необходимо отметить, что по современным требованиям ядерной безопасности реакторов на быстрых нейтронах в ИБР-4 используется другая система охлаждения а.з. Для этой цели в ИБР-4 был

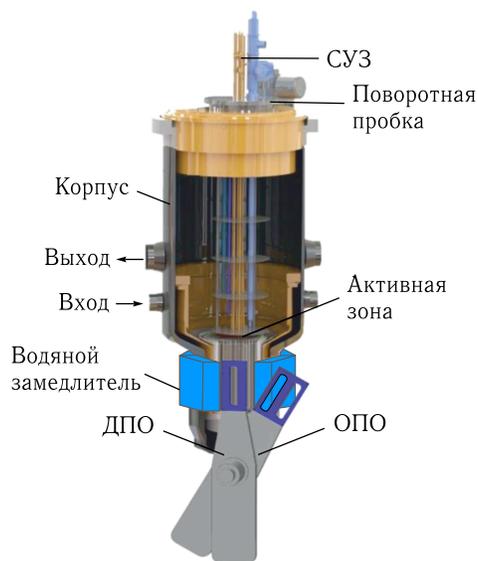


Рис. 2. Корпус ИБР-4 с примыкающими к нему лопастями основного (ОПО) и дополнительного (ДПО) подвижных отражателей модулятора реактивности ПО-3

использован корпус исследовательского реактора МБИР. Корпус ИБР-4 с примыкающими к одной из его граней лопастями подвижных отражателей модулятора реактивности ПО-3 — основного отражателя (ОПО) и дополнительного (ДПО) — показан на рис. 2.

В результате указанных выше конструктивных изменений а. з. базовая компоновка а. з. ИБР-4 представлена в следующем виде: 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. В ИБР-4 введены 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. Для выравнивания энерговыделения в центр а. з. вставлены 13 ТВС с вольфрамовыми вставками в твэлах. Всего в а. з. находятся 102 ТВС, из них 86 ТВС с диоксидом плутония, 8 стержней СУЗ с обогащенным $^{10}\text{В}$ 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 патрубки показан на рис. 3.

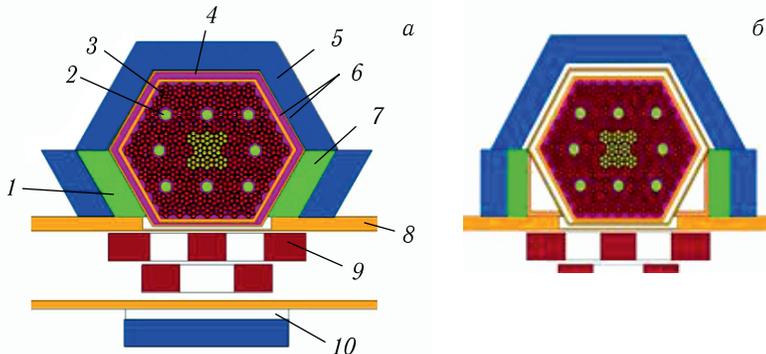


Рис. 3. Поперечный разрез а. з. базовой компоновки ИБР-4 с органами СУЗ и имитаторами: слева — конструкция корпуса, аналогичная корпусу МБИР, с протеканием натрия сверху вниз вдоль корпуса; справа — другой вариант корпуса с протеканием натрия в специально выделенных патрубках, обеспечивается дополнительный страховочный корпус. 1 — КО1; 2 — органы СУЗ $\text{В}_4\text{С}$ (80% $^{10}\text{В}$); 3 — ТВС; 4 — слой жидкого натрия; 5 — плоский водяной замедлитель; 6 — двойной корпус; 7 — КО2; 8 — корпус модулятора реактивности; 9 — модулятор реактивности; 10 — слой $\text{В}_4\text{С}$

Водяные замедлители просматриваются горизонтальными нейтронными каналами радиального типа. Между а. з. и замедлителями установлена прослойка гадолиния толщиной 1 мм. Изначально в ИБР-4 приняты следующие исходные данные:

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

Кратко прокомментируем выбор исходных данных. Выбор топлива для нового источника ЛНФ ОИЯИ был рассмотрен в 2017 г. при проработке возможных путей модернизации ИБР-2М без изменения номинальной мощности, равной 2 МВт [5]. Было показано, что наилучший вид топлива для реактора типа ИБР-2 как источника нейтронов есть диоксид плутония. В той же работе отмечено, что повышение плотности потока тепловых нейтронов в пучках ИБР-2 теоретически возможно до $\sim 2,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, но только путем полной переделки всей конструкции реактора с заменой оксидного топлива на нитридное, с уменьшением объема а. з. и изменением системы вывода пучков с радиальной на тангенциальную. Техническая реализация таких требований для ИБР-2М является проблемой.

Выбор средней мощности — более сложный вопрос, во многом он решается на основе опыта работы с импульсными реакторами. Первое, что нужно отметить, — это то, что колебания энергии импульсов в низкочастотной области спектра ($\sim 0,1 \text{ Гц}$) в реакторах ИБР-2 и ИБР-2М существенно растут с увеличением мощности и энерговыработки [6–9]. В 1990-х гг. была построена модель динамики импульсных реакторов периодического действия [10], с помощью которой было показано, что при мощности $\sim 4 \text{ МВт}$ реактор ИБР-2 теряет устойчивость. Отметим, что мощность 4 МВт есть проектная номинальная мощность реактора. Позднее этот предел был подтвержден и для ИБР-2М. Отсюда, а также по ряду других причин номинальная мощность ИБР-2 и ИБР-2М из соображений безопасности была выбрана равной 2 МВт. Таким образом, для реакторов типа ИБР-2 увеличение плотности потока нейтронов на замедлителе путем повышения мощности на 2 МВт идет в ущерб

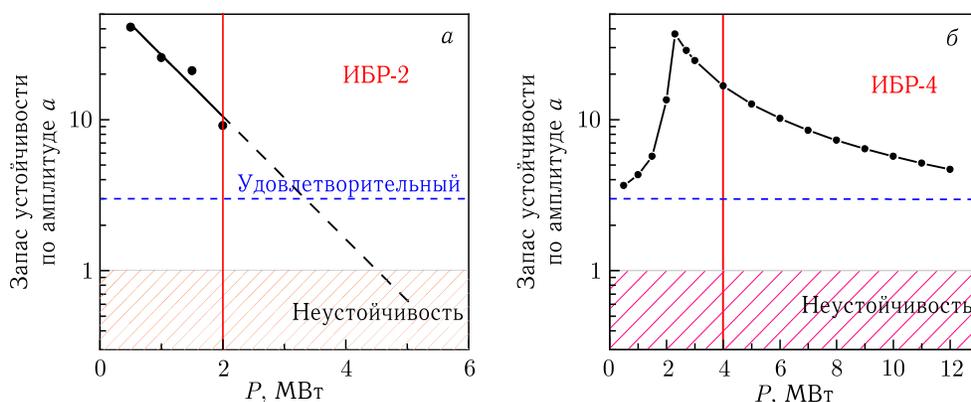


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Зависимость запаса устойчивости ИБР-2М и ИБР-4 по амплитуде низкочастотных колебаний энергии импульсов от мощности реактора: а) ИБР-2М со свежим топливом, приведена линейная экстраполяция; б) ИБР-4 при энерговыработке 1830 МВт·сут. Красной вертикальной линией показан уровень номинальной мощности, штриховой синей — допустимый уровень устойчивости, принятый для сложных технических систем. Запас ниже единицы — реактор полностью теряет устойчивость

безопасности, что недопустимо. В процессе проработки ИБР-4 были получены данные по способам уменьшения колебательной нестабильности реактора. В первую очередь путем выравнивания энерговыделения по объему а. з. и переходу на частоту повторения импульсов 10 с^{-1} [11]. В результате расчетную мощность ИБР-4 повысили до 5 МВт [2]. Следующие исследования показали, что добавление к базовой компоновке ИБР-4 бериллиевых отражателей существенно увеличивает потоки тепловых нейтронов как на выведенных нейтронных пучках, так и на поверхности замедлителей. Это обстоятельство позволило без ущерба потребительских свойств источника уменьшить мощность до 4 МВт. Также был учтен тот факт, что модулятор реактивности ПО-3 рассчитан на максимальную мощность 4 МВт, т. е. может быть использован на ИБР-4 без переделок. В качестве иллюстрации действия вышесказанных решений на рис. 4 приведены зависимости запаса устойчивости по амплитуде низкочастотных колебаний энергии импульсов от мощности ИБР-2М и ИБР-4. Запас устойчивости получен по частотному критерию Найквиста в рамках модели динамики импульсных реакторов следующим образом: для ИБР-2М — напрямую, при экспериментально определенных параметрах быстрой МОС, для ИБР-4 — с пересчетом экспериментальных параметров МОС ИБР-2М на частоту повторения импульсов 10 с^{-1} .

Таблица 1. Средние плотности потока нейтронов на поверхности водяных замедлителей $\Phi_{2\pi}$ для выведенных нейтронных пучков в базовой компоновке ИБР-4 при мощности 4 МВт и выигрыш в потоках относительно ИБР-2М

Параметр	Плоский H ₂ O-замедлитель	Гребенчатый H ₂ O-замедлитель	$\Phi_{\text{ИБР-4}}/\Phi_{\text{ИБР-2М}}$
$\Phi_{2\pi}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (средняя по H ₂ O-замедлителю)	$6,9 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	1,1–2,0
$\Phi_{2\pi}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (максимальная по H ₂ O-замедлителю)	$8,0 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	1,3–2,3

В табл. 1 приведены плотности потока нейтронов на поверхности водяных замедлителей $\Phi_{2\pi}$ для выведенных нейтронных пучков в базовой компоновке ИБР-4 (только водяные замедлители без отражателей). Смысл обозначения $\Phi_{2\pi}$ приведен в следующем разделе.

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 [12], включают в компоновку замедлителей специально выделенные отражатели нейтронов (см. рис. 2).

Габариты водяного замедлителя составляли $5 \times 6 \times 10$ см при оптимальной толщине 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 точ-

ках: непосредственно в центре поверхности водяного замедлителя, вторая точка — на расстоянии 30 см от поверхности по линии нейтронного пучка и третья — на расстоянии 10 м от поверхности замедлителя. Для наглядности потоки рассматривались только для одного нейтронного пучка (рис. 5). Плотности потока нейтронов на поверхности замедлителя, оцениваемые на достаточно большом расстоянии от а. з., рассчитывались следующим образом. Вся поверхность замедлителя просматривалась прямоугольным коллиматором 20 × 40 см из железа длиной 5 м и толщиной стенки 0,5 м. Коллиматор играл роль тепловой защиты от излучения а. з. и защиты от влияния соседних нейтронных пучков.

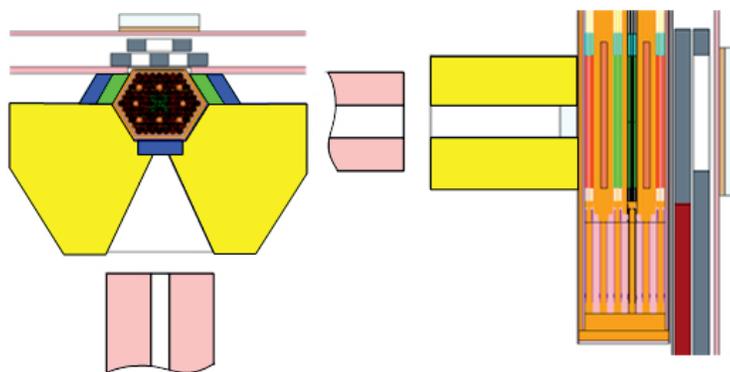


Рис. 5. Расчетная модель ИБР-4 с отражателями нейтронов и пучковым коллиматором для одного нейтронного пучка

Плотности потока нейтронов $\Phi_{2\pi}$ рассчитывались на удалении 10 м от а. з. по оси пучка Φ_{sample} и пересчитывались для оценки потока на поверхности замедлителя по следующей формуле:

$$\Phi_{2\pi} = 2\pi f(\Omega) \frac{L^2}{S} \Phi_{\text{sample}},$$

где S — площадь поперечного сечения нейтронного пучка, «видимая» образцом, расположенным на расстоянии L от центра S ; $f(\Omega)$ — векторный поток на единицу телесного угла в направлении пучка нейтронов под углом Ω (Ω — единичный вектор). Обе плотности потока, $f(\Omega)$ и $\Phi_{2\pi}$, усреднены по площади S . Отношение S/L^2 определяет телесный угол, при котором точечный образец (детектор) может «видеть» доступную часть поверхности замедлителя в направлении Ω . Центральная точка поверхности замедлителя S выбрана по нормали к оси пучка. Вышеприведенная формула есть основа для расчетов методом Монте-Карло. Обозначение $\Phi_{2\pi}$ показывает, что для удаленных пользователей «работают» только нейтроны, вылетающие с поверхности замедлителя в 2π -область. Наличие коллиматора снижает плотность потока $\Phi_{2\pi}$ 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 плотность потока 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 также показано на рис. 6. Толщина Ве-отражателя для получения максимального потока нейтронов с поверхности водяного замедлителя составляет 40 см (в тексте обозначена как оптимальная толщина), выше — начинает превалировать уже поглощение нейтронов и потоки стабилизируются. Средние значения плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей с Ве-отражателем оптимальной толщины, а также плотности потока $\Phi_{2\pi}$ приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, выигрыш в потоках на выведенных нейтронных пучках ИБР-4 относительно ИБР-2М равен 20 ($1,2 \cdot 10^{14} / 6,0 \cdot 10^{12}$). При такой малой мощности (4 МВт) выигрыш в потоках видится значительным. Поэтому процесс генерации

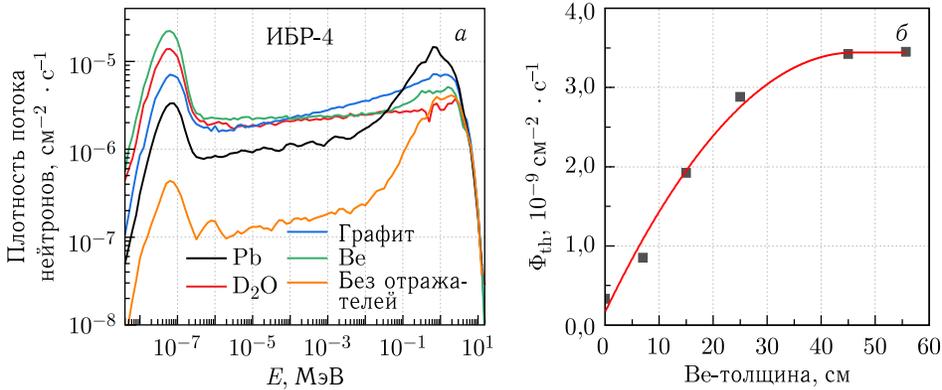


Рис. 6. Распределение по энергии средней плотности потока нейтронов на один нейтрон деления на расстоянии 30 см от поверхности водяного замедлителя для разных типов отражателей: бериллия, тяжелой воды, графита и свинца (а) и плотность потока тепловых нейтронов на расстоянии 10 м от поверхности водяного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

Таблица 2. Средние плотности потока тепловых нейтронов непосредственно на поверхности замедлителя (Φ_{th}^1) и на поверхности замедлителя для выведенных нейтронных пучков ($\Phi_{2\pi}$) в ИБР-4 с Ве-отражателями оптимальной толщины (40 см). $\Delta k_{эф}/k_{эф}$, τ — эффективность Ве-отражателя и время жизни нейтронов в а.з. соответственно, мощность 4 МВт. Выигрыш в потоках относительно ИБР-2М на выведенных нейтронных пучках равен 20 ($1,2 \cdot 10^{14} / 6,0 \cdot 10^{12}$)

Параметр	Ве	Без Ве
$\Delta k_{эф}/k_{эф}$, %	+10,3	0
τ , нс	142	66
Φ_{th}^1 , $см^{-2} \cdot с^{-1}$ (на поверхности водяного замедлителя)	$3,1 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{13}$
$\Phi_{2\pi}$, $см^{-2} \cdot с^{-1}$ (на поверхности водяного замедлителя для выведенных нейтронных пучков)	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{13}$

тепловых нейтронов в ИБР-4 был рассмотрен более подробно, цель — определить, как и где формируются области высокой плотности тепловых нейтронов. Здесь и в дальнейшем тепловые нейтроны рассматриваются в диапазоне энергии от ~ 0 до 0,5 эВ. Для наглядности рассмотрена геометрия одного пучка (геометрия ИБР-4 на рис. 5).

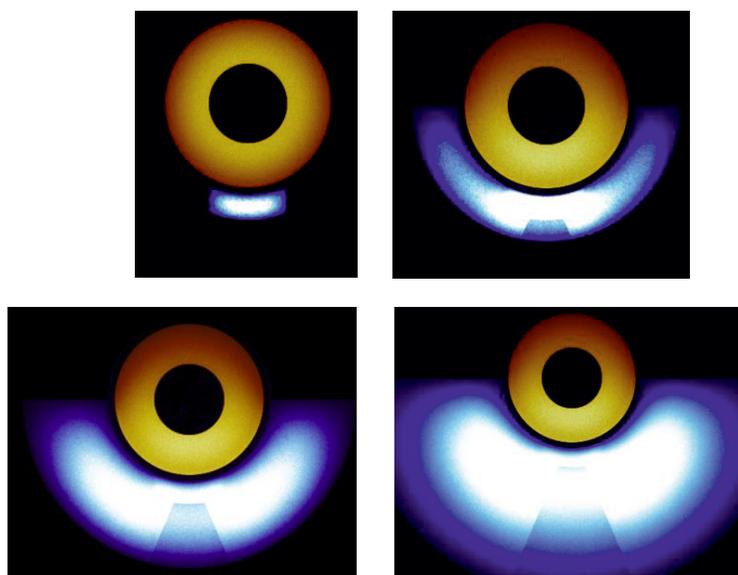


Рис. 7. Пространственное распределение плотности тепловых нейтронов вблизи а.з. ИБР-4 при мощности 4 МВт в геометрии с одним нейтронным пучком при толщине бериллиевого отражателя 0, 10, 20 и 40 см. Видно существенное усиление светимости ИБР-4 как источника тепловых нейтронов с повышением толщины отражателя

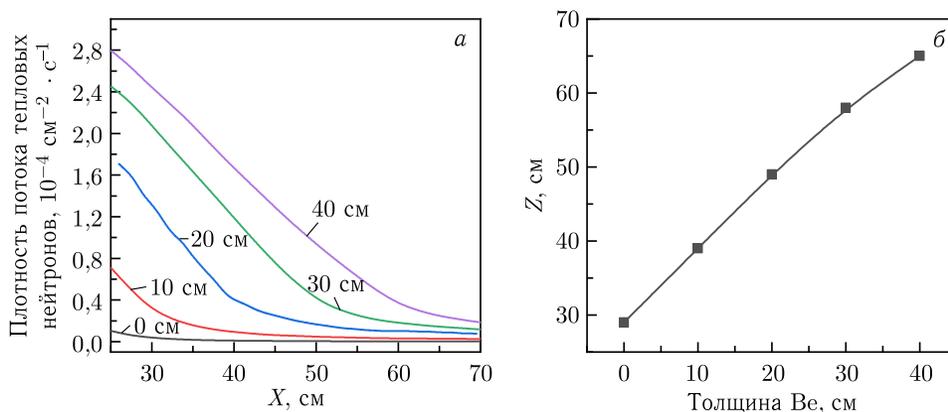


Рис. 8. а) Распределение плотности потока тепловых нейтронов по длине нейтронного канала от поверхности водяного замедлителя в зависимости от толщины отражателя из бериллия для одного нейтрона в а.з. б) Граница основной «светящейся» области по оси пучка от поверхности замедлителя

На рис. 7 видны области формирования тепловых нейтронов при изменении толщины Ве-отражателей от нуля до оптимальной величины, равной 40 см. Также видно, что с увеличением толщины отражателя плотность тепловых нейтронов (другими словами, светимость) постепенно растет и занимает не только объем водяного замедлителя, но и пространство перед ним. Это во многом объясняет высокий рост потоков тепловых нейтронов как вблизи, так и на значительном расстоянии от замедлителя. Такие данные позволяют более правильно оптимизировать нейтронные пучки. Наиболее «светящуюся» область вблизи замедлителя в направлении оси нейтронного пучка функционально можно выделить как область облучения образцов. На рис. 8 приведены кривые распределения плотности потока тепловых нейтронов по оси нейтронного канала в зависимости от толщины отражателя из бериллия. Там же приведена зависимость размера области облучения в направлении оси пучка от толщины отражателя.

Высокие плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя, находящегося в окружении Ве-отражателей ИБР-4 (см. табл. 2), могут быть следствием существенного уширения длительности вспышки тепловых нейтронов за счет времени замедления и диффузии быстрых нейтронов на бериллии. Были проведены следующие расчеты. На водяной замедлитель воздействует дельта-импульс быстрых нейтронов со спектром нейтронов в а. з. ИБР-4. Рассматривается временное распределение тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя при наличии или отсутствии бериллия. Результаты приведены на рис. 9 и 10. Без бериллия (красная линия (1) на рис. 10) показано временное распределение тепловых нейтронов, генерируемых в процессах термализации быстрых нейтронов и диффузии тепловых нейтронов только в среде водяного замедлителя, другие распределения на рисунке — те же процессы, но с участием бериллиевых отражателей. Видно, что для воды время термализации сопоставимо с 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 це-

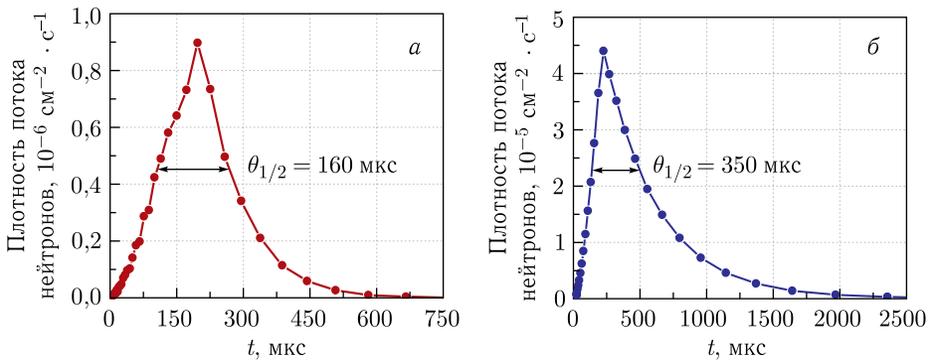


Рис. 9. Распределение по времени плотности потока тепловых нейтронов на один нейтрон деления на поверхности водяного замедлителя ИБР-4 при толщине бериллиевого отражателя 0 см (без отражателя) (а) и 20 см (б). Указана ширина импульса на полувысоте. В момент времени нуль на замедлитель воздействует дельта-импульс быстрых нейтронов со спектром в а. з. ИБР-4

лом для максимально возможной толщины бериллиевого отражателя, равной 40 см, полуширина вспышки составляет 1300 мкс. Интересно отметить, как видно из рис. 10, 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 $3,1 \times 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹, т. е. в ~ 30 раз.

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 $\Phi_{2\pi}$, т. е. вспышку тех нейтронов, которые экспериментатор может «видеть» на удаленной базе от поверхности водяных замедлителей, непосредственно зарегистрировать практически невозможно (или очень сложно), но можно рассчитать.

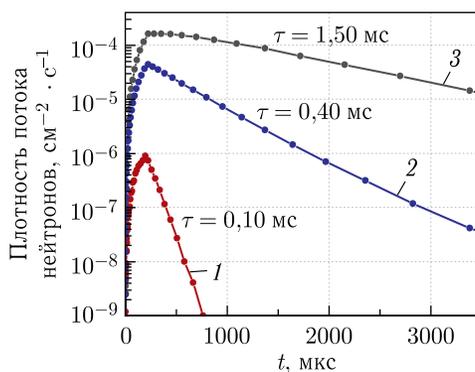


Рис. 10. Распределение по времени плотности потока тепловых нейтронов на один нейтрон деления на поверхности водяного замедлителя ИБР-4 при некоторых значениях толщины бериллиевого отражателя: красная линия (1) — толщина 0 см (без отражателя); синяя (2) — 20 см; черная (3) — 40 см. Приведены значения временной константы τ спада нейтронного потока

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 36,0 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, особенно в оценке плотности потока нейтронов на замедлителе. Расчетная модель уплощенной конструкции ИБР-4 показана на рис. 11 (без коллиматора).

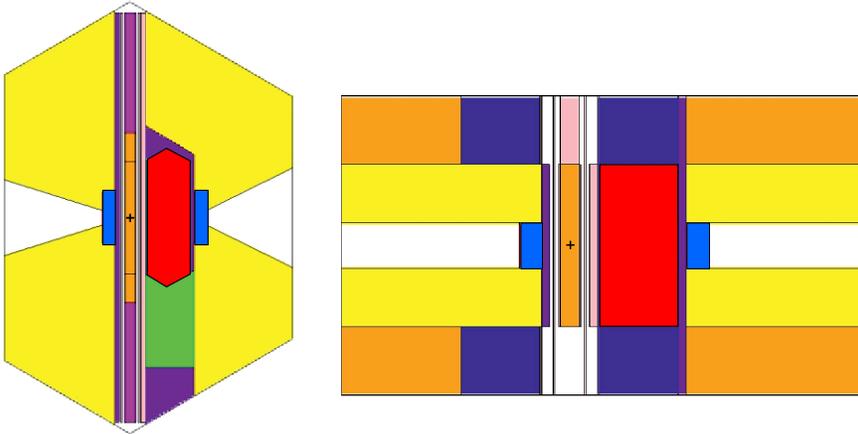


Рис. 11. Расчетная модель ИБР-4 с бериллиевыми отражателями с уплощенной а. з. В центре виден модулятор реактивности. Коллиматор не показан

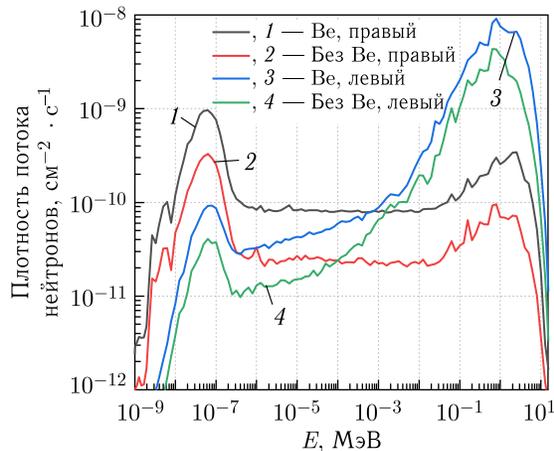


Рис. 12. Распределение средней плотности потока нейтронов на один нейтрон деления по энергии в а. з. ИБР-4 на расстоянии 10 м от поверхности водяных замедлителей, расположенных слева и справа от уплощенной а. з.

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. 12.

Основные данные по потокам нейтронов в ИБР-4 с уплощенной а. з. приведены в табл. 3. Плотность 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 плотности потока в базовой 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 дополнительно ослабления колебательной неустойчивости. В любом случае выигрыш по потокам

Таблица 3. Средние плотности потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей в ИБР-4 с уплощенной а.з. с Ве-отражателями. $\Delta k_{эф}/k_{эф}$, τ — эффективная 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
$\Delta k_{эф}/k_{эф}$, %	+7,3	0
Глубина модуляции для модулятора из Ве $\Delta k_{эф}/k_{эф}$, %	11	—
Глубина модуляции для модулятора из Ni $\Delta k_{эф}/k_{эф}$, %	4	—
τ , нс	277	48
$\Phi_{пр}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$8,0 \cdot 10^{12}$
$\Phi_{лев}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{12}$
$\Phi_{2\pi}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, правый (для выведенных пучков)	$6,1 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{12}$
$\Phi_{2\pi}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, левый (для выведенных пучков)	$2,9 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{12}$

нейтронов на выведенных нейтронных пучках относительно ИБР-2М составляет 10 (правая сторона на рис. 11) и 5 (левая сторона).

Преимущество уплощенной а.з. с точки зрения увеличения числа нейтронных пучков требует отдельного рассмотрения. В первом приближении число пучков в исходной компоновке ИБР-4 равно 6–8 при трех спектрометрах на пучок. В уплощенной конструкции реактора число пучков может быть увеличено до 10, т. е. до 30 спектрометров.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Конструкция ИБР-4 построена на принципах преемственности хорошо зарекомендовавших себя при эксплуатации ИБР-2 и ИБР-2М решений, но с использованием новых подходов, принятых в современных проектах реакторов на быстрых нейтронах, например в проектах МБИР и БН-1200. Активная зона ИБР-4 обеспечивает ядерную безопасность реактора и минимизирует низкочастотные колебания энергии импульсов. С точки зрения безопасности и получения максимальных потоков тепловых нейтронов компоновка а.з. ИБР-4 представляется оптимальной. В целом ИБР-4 как импульсный источник тепловых нейтронов есть базовая компоновка а.з. плюс бериллиевые отражатели и небольшие по объему водяные замедлители. Такая конструкция реактора позволяет получить при сравнительно небольшой мощности (4 МВт) максимально высокие плотности потока тепловых нейтронов на выведенных нейтронных пучках на уровне $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а в области, близкой к поверхности водяного замедлителя (в области набора флюенса на образцах), — $3,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Таким образом, выигрыш в потоках относительно ИБР-2М для выведенных пучков составляет 20, а для облучательной области пучка вблизи замедлителя — около 50.

Расчеты позволяют также выбрать уплощенную конструкцию а.з. Дело в том, что согласно данным табл. 3 плотность потока тепловых нейтронов в ИБР-4 с уплощенной а.з., равная $6,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, дает несколько меньший выигрыш, равный 10, по сравнению с основной а.з. но число выведенных пучков по предварительным расчетам может быть увеличено до 10 при трех спектрометрах на пучок. Здесь нужно

отметить, что приведенные данные по нейтронным пучкам получены на основе предварительных исследований. Оптимизация по расположению и по потокам нейтронов в пучках ИБР-4 есть предмет дальнейших исследований.

Дополнительно в приложении даны некоторые результаты тестовых расчетов, выполненных для обоснования достоверности расчетных параметров ИБР-4. В данной

Таблица 4. Некоторые нейтронно-физические характеристики реакторов ИБР-2М, ИБР-3 и ИБР-4 при средней мощности 2 МВт: Φ_{th}^1 , $\Phi_{2\pi}$ — полная плотность потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей и средняя плотность потока для выведенных нейтронных пучков соответственно, τ — время жизни нейтронов в а. з. и выигрыш в плотности потока тепловых нейтронов относительно ИБР-2М

Параметр	ИБР-2М	ИБР-3	ИБР-4
τ , нс	65	9	140
Длительность импульса мощности по быстрым нейтронам на половине высоты	200	—	200
Длительность импульса мощности по тепловым нейтронам на половине высоты	390	—	~ 1300
Φ_{th}^1 , $см^{-2} \cdot с^{-1}$ (на поверхности H_2O -замедлителя)	$0,6 \cdot 10^{13}$	$2,0 \cdot 10^{13}$	$15,5 \cdot 10^{13}$
Выигрыш в Φ_{th}^1 относительно ИБР-2М	1	~ 3	~ 25
$\Phi_{2\pi}$, $см^{-2} \cdot с^{-1}$	$0,6 \cdot 10^{13}$	$0,56 \cdot 10^{13}$	$6,0 \cdot 10^{13}$
Выигрыш в $\Phi_{2\pi}$ относительно ИБР-2М	1	~ 1	10

Примечание. Тире — нет данных.

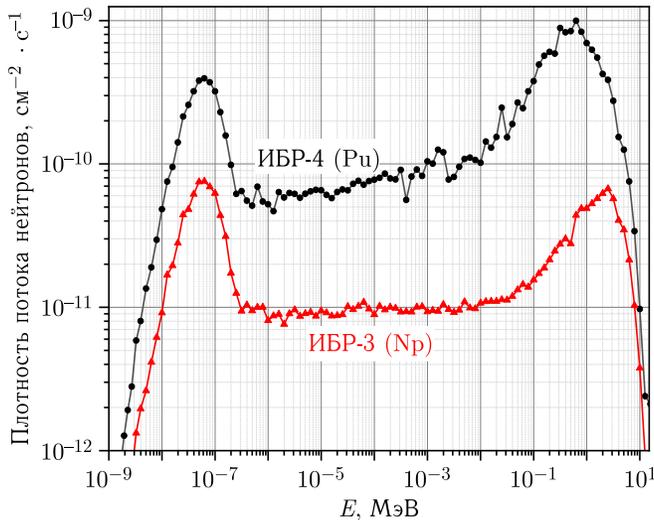


Рис. 13. Распределение по энергии средней по поверхности замедлителя плотности потока нейтронов на один нейтрон деления на расстоянии 10 м от поверхности водяного замедлителя ИБР-3 и ИБР-4. Видно преимущество ИБР-4

работе тестовые расчеты являются важным расчетным этапом проекта ИБР-4, поскольку всегда существуют некоторые сомнения в расчетах новых сложных систем, таких как импульсные реакторы с малыми а.з. с термализацией нейтронов в среде разнотипных замедлителей. Тестовые расчеты позволили провести сравнение параметров ИБР-4, ИБР-3 и ИБР-2М и получить достаточно надежную экспертную оценку нейтронно-физическим характеристикам ИБР-4. Для примера в табл. 4 приведены некоторые нейтронно-физические характеристики действующего реактора ИБР-2М и расчетные характеристики ИБР-4 и ИБР-3 («Нептун») при мощности 2 МВт. На рис. 13 для сравнения показаны также распределения по энергии средней по поверхности замедлителя плотности потока нейтронов на один нейтрон деления на расстоянии 10 м от поверхности водяного замедлителя ИБР-3 и ИБР-4.

Таким образом, реактор ИБР-4 является мощным импульсным источником тепловых нейтронов для исследований на выведенных нейтронных пучках с потоками, в 20 раз превышающими потоки в ИБР-2М, в то же время — мощным облучателем с более высокой (в 50 раз) скоростью набора флюенса.

В планах дальнейшей проработки проекта ИБР-4 намечена оптимизация временных характеристик реактора как импульсной системы и оптимизация нейтронных пучков.

Приложение ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Тестовые расчеты необходимы для сравнительной оценки основных нейтронно-физических характеристик ИБР-4. В тестовых расчетах и 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.

П.1. Тест № 1. Расчеты по реактору ИБР-3 («Нептун»). Реактор ИБР-3 (другое название — «Нептун») есть проект источника нейтронов взамен ИБР-2М [13].

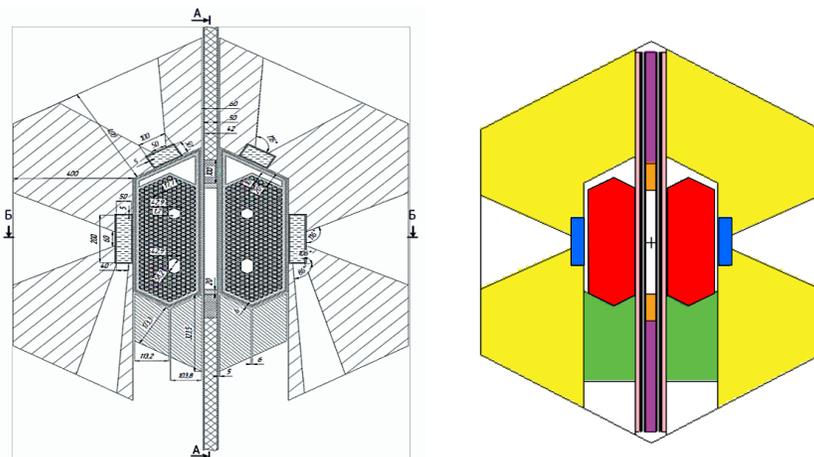


Рис. П.1. Горизонтальное сечение ИБР-3 по центру а.з. (слева) и расчетная модель ИБР-3 без коллиматора (справа)

Отличительная особенность ИБР-3 (от ИБР-2 и ИБР-2М) состоит в использовании в качестве топлива вместо плутония порогового элемента нептуния. При этом в ИБР-3 модуляция реактивности выполняется с помощью вращающегося диска с положительным 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 [13]. Геометрия ИБР-3 по горизонтальному сечению а. з. и расчетная модель ИБР-3 приведены на рис. П.1.

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. П.2. Основные расчетные нейтронно-физические параметры ИБР-3 приведены в табл. П.1.

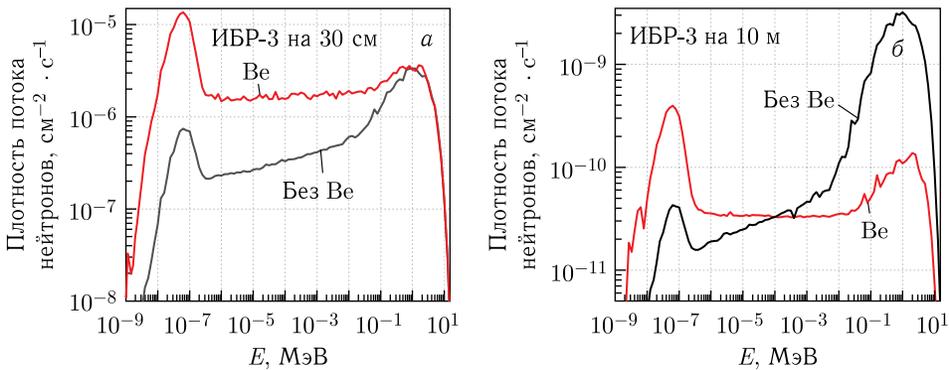


Рис. П.2. Распределение по энергии средней плотности потока нейтронов на один нейтрон деления на расстоянии 30 см (а) и 10 м от поверхности водяного замедлителя (б) ИБР-3 при наличии и отсутствии Be-отражателя

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

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

П.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. Расчетные данные будут сопоставлены с экспери-

ментальными. Расчет проводился для замедлителя, просматриваемого нейтронами пучками № 2 и 3. Геометрия замедлителей показана на рис. П.3. Все стенки замедлителя изготовлены из алюминия, между корпусом 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 20×40 см. Основные данные по потокам нейтронов на замедлителе для пучков № 2 и 3 приведены в табл. П.2.

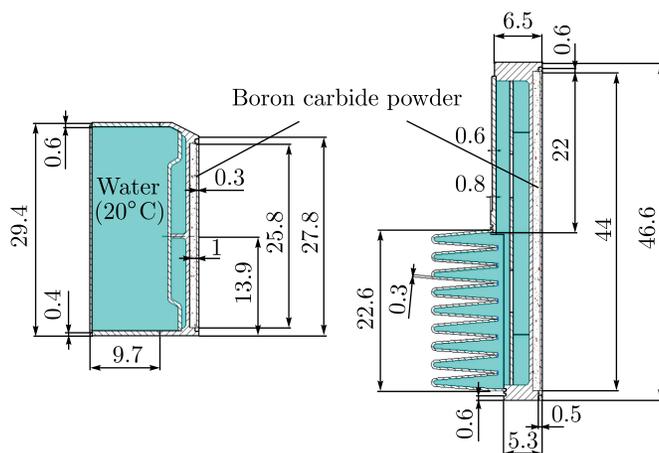


Рис. П.3. Водяной замедлитель со стороны нейтронных пучков №2 и 3 реактора ИБР-2М, прослойка карбида бора 1 см, все стенки — алюминий

Таблица П.2. Средние плотности потока 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
$\Phi_{\text{th}}^1, (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/\text{нейтрон деления}$ (на расстоянии 10 м от поверхности H_2O -замедлителя)	$4,1 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
$\Phi_{2\text{п}}, (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/\text{нейтрон деления}$ (на поверхности H_2O -замедлителя)	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
$\Phi_{2\text{п}}, \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (на поверхности H_2O -замедлителя для 2 МВт)	$5,96 \cdot 10^{12}$	$5,1 \cdot 10^{12}$

П.3. Тест № 3. Задача на адекватность программной среды для расчета реакторов на быстрых нейтронах с малой активной зоной и 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 результаты 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 а. з. из PuO_2 $\varphi[\text{с}^{-1}/\text{МВт}] = 0,96 \cdot 10^{17}$ и для а. з. из NpN $\varphi[\text{с}^{-1}/\text{МВт}] = 0,90 \cdot 10^{17}$. Для радиусов критических шаров из PuO_2 9,6 см и из 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 PuO_2 и 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. П.4.

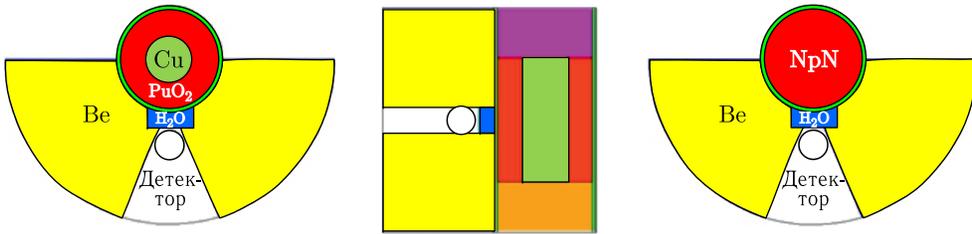


Рис. П.4. Геометрия тестовой задачи с постоянной площадью а. з. из PuO_2 и NpN

Таблица П.3. Эффективный коэффициент размножения $k_{эф}$, объем а. з., а также средние плотности потока тепловых нейтронов по объему шарового детектора для зоны из PuO_2 и NpN на один нейтрон деления (Φ_{th}^1) и на 1 МВт мощности (Φ_{th}^2) при расчетах MCNP и SERPENT

Параметр	PuO_2	NpN
$k_{эф}, \%$	$1,064 \pm 0,004$	$1,065 \pm 0,004$
Объем а. з., л	$39,5 = 31,1 + 8,84$ (медь)	39,5
$\Phi_{th}^1, (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/\text{нейтрон деления}$ (средняя по объему шара-детектора)	$(2,44 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$	
Источник нейтронов деления $\varphi, \text{с}^{-1}/\text{МВт}$	$0,96 \cdot 10^{17}$	$0,90 \cdot 10^{17}$
$\Phi_{th}^2, (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/\text{МВт}$ (средняя по объему шара-детектора)	$(2,30 \pm 0,03) \cdot 10^{13}$	$(2,20 \pm 0,03) \cdot 10^{13}$

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 NpN-топлива, затем для PuO₂-топлива. Указанная процедура последовательно выполняется для MCNP и SERPENT. На поверхности водяного замедлителя ставится

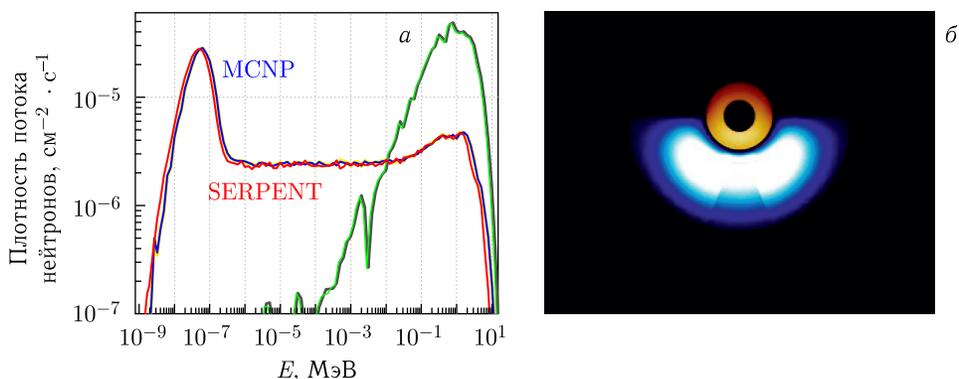


Рис. П.5. а) Спектры нейтронов в а.з. из PuO₂ и в шаровом детекторе, нормированные на один нейтрон деления, полученные с помощью программ, подобных MCNP и SERPENT. Видно практически полное совпадение. б) Визуализация плотности потока тепловых нейтронов для а.з. из PuO₂ в программе SERPENT. Видна светящаяся область генерации тепловых нейтронов

Таблица П.4. Некоторые нейтронно-физические характеристики реакторов ИБР-2М, ИБР-3 и ИБР-4: φ — источник нейтронов деления, Φ_{th}^1 , $\Phi_{2\pi}$ — средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности водяных замедлителей и плотность потока для удаленных пользователей, τ — 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
τ , нс	65	9(10)		140	48
Мощность, МВт	2	15	4		
Φ_{th}^1 , см ⁻² · с ⁻¹ (на поверхности H ₂ O-замедлителя)	0,6 · 10 ¹³	15,0 · 10 ¹³ (12,0 · 10 ¹³)	1,2 · 10 ¹³	31 · 10 ¹³	11 · 10 ¹³
$\Phi_{2\pi}$, см ⁻² · с ⁻¹ (на замедлителе для удаленных пользователей)	0,6 · 10 ¹³	4,2 · 10 ¹³	1,2 · 10 ¹³	12 · 10 ¹³	6,1 · 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 [13] должна быть намного меньше указанной в таблице.

шаровой детектор, полностью перекрывающий раструб Ве-отражателя (см. рис. П.4). Рассматриваются плотности потока быстрых нейтронов в а. з. и средние по объему шара-детектора плотности потока тепловых нейтронов. Результаты расчетов представлены в табл. П.3. В табл. П.4 и П.5 представлены сравнительные характеристики реакторов ИБР-2М, ИБР-3 и ИБР-4.

На рис. П.5 для примера приведены спектры нейтронов в а. з. из PuO_2 и в шаровом детекторе, полученные с помощью программ, подобных MCNP и SERPENT. Видно полное совпадение.

Таблица П.5. Сравнительные характеристики реакторов ИБР-2М, ИБР-3 и ИБР-4

Параметр	Значение		
	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 × 31	~ 23,4
Максимальное выгорание топлива, %	9	—	9
Высота а. з., см	44,4	36,0	44,4
Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$
Импульсная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{и}}$	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$
Модулятор реактивности	ПО-3	—	ПО-3
Плотность потока тепловых нейтронов $\Phi_{2\pi}$, см ⁻² · с ⁻¹	$0,5 \cdot 10^{13}$	$4,2 \cdot 10^{13}$	$12 \cdot 10^{13}$
Выигрыш относительно ИБР-2М	1,0	7	20
Устойчивость к автоколебаниям энергии импульсов	Слабая	Данных нет	Высокая

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пепельшев Ю. Н., Виноградов А. В., Рогов А. Д., Сидоркин С. Ф.* Концепция импульсного реактора периодического действия ИБР-4 // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 1(233). С. 98–112.
2. *Пепельшев Ю. Н., Виноградов А. В., Рогов А. Д., Сумхуу Д.* Предварительные расчеты по импульсному реактору ИБР-4. Базовая компоновка // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 4(255). С. 887–901.
3. *Аксенов В. Л., Балагуров А. М.* Дифракция нейтронов на импульсных источниках // УФН. 2016. Т. 186, № 3. С. 293–320.
4. *Аксенов В. Л., Рзянин М. В., Шабалин Е. П.* Исследовательские реакторы ОИЯИ: Взгляд в будущее // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52, вып. 6. С. 1349–1376.
5. *Ананьев В. Д., Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Расчеты по оптимизации реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2017-43. Дубна, 2017.
6. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Динамика колебательной неустойчивости реактора ИБР-2М. Анализ шумов. Препринт ОИЯИ Р13-2021-29. Дубна, 2021.

7. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Rogov A. D.* On the Limits of Oscillatory Instability of Pulsed Reactors of Periodic Operation // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84, No. 8. P. 1445–1458.
8. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Вибрации и колебательная неустойчивость импульсного реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2022-44. Дубна, 2022.
9. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* On the Cyclic Change in the Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor // *Nucl. Engin. Technol.* 2023. V. 55, No. 5. P. 1665–1670.
10. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Модель импульсного реактора периодического действия ИБР-2 для исследования переходных процессов. Препринт ОИЯИ Р13-99-127. Дубна, 1999.
11. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* Dynamics of the IBR-2M Reactor at a Power Pulse Repetition Frequency of 10 Hz // *Nucl. Engin. Technol.* 2023. V. 55, No. 9. P. 3326–3333.
12. 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).
13. Расчетные исследования технических решений реакторной установки с импульсным реактором периодического действия с топливом на основе нептуния ИБР3-От-5775: Отчет о науч.-исслед. работе. 2024. Шифр 1-00.05-05-06.10-1957К. Номер темы 23.097-054.

Получено 10 июня 2024 г.