

P13-2024-7

Ю. Н. Пепельшев¹, А. В. Виноградов¹, А. Д. Рогов¹,
Д. Сумхуу^{1,2}

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ
ПО ИМПУЛЬСНОМУ РЕАКТОРУ **ИБР-4**.
БАЗОВАЯ КОМПОНОВКА

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

Пепельшев Ю. Н. и др.

P13-2024-7

Предварительные расчеты по импульсному реактору ИБР-4.

Базовая компоновка

К концу 2030-х гг. реактор ИБР-2М выведут из эксплуатации. Предложено после вывода реактора не создавать абсолютно новый источник нейтронов, что потребует значительных опытно-конструкторских работ, а использовать положительные технические решения, апробированные на других ядерных установках на быстрых нейтронах, например на ИБР-2, ИБР-2М, МБИР, БОР-60, БН-1200 и др. Это есть концептуальное видение нового источника, названного ИБР-4. Особое внимание в концепции ИБР-4 уделено вопросам устойчивой динамики реактора. Основу составили расчеты по так называемой базовой компоновке ИБР-4, в которой учитывается принципиальная возможность реализации положительных технических решений. В дальнейшем на этой основе будут рассмотрены активная зона ИБР-4 и ее ближайшее окружение — все то, что дает возможность повысить плотность потока тепловых нейтронов на выведенных нейтронных пучках и при этом в полной мере обеспечить надежность и безопасность реактора. Ожидается, что параметры ИБР-4 будут существенно выше параметров ИБР-2М.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2024

Pepelyshev Yu. N. et al.

P13-2024-7

Preliminary Computations for the Pulsed Reactor IBR-4.

Basic Composition

By the end of the thirties, the IBR-2M reactor will be decommissioned. The authors suggested that after the decommissioning of the reactor, they should not create an absolutely new neutron source, which would require significant development work, but use positive technical solutions tested at other fast neutron nuclear facilities, for example, IBR-2, IBR-2M, MBIR, BOR-60, BN-1200 and others. This is a conceptual vision of a new source, called IBR-4. Special attention in IBR-4 was devoted to the issues of stable reactor dynamics. The article is based on calculations for the so-called basic composition of the IBR-4, which considers the fundamental possibility of implementing positive technical solutions. In the next work, based on the basic composition, the IBR-4 core and its immediate environment — all that makes it possible to increase the density of the thermal neutron flux on the extracted neutron beams and at the same time fully ensure the reliability and safety of the reactor — will be considered. It is expected that the parameters of the IBR-4 will be significantly higher than the parameters of the IBR-2M.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

К концу 2030-х гг. реактор ИБР-2М будет выведен из эксплуатации. Сотрудники группы ядерной безопасности Лаборатории нейтронной физики и установки ИБР-2 предложили после вывода реактора из эксплуатации не создавать абсолютно новый источник нейтронов, что потребует значительных опытно-конструкторских работ, а использовать положительные технические решения, апробированные на ИБР-2 и других ядерных установках, например на МБИР, БОР-60, БН-1200 и др. Это концептуальное видение нового источника, название которого определили как ИБР-4 (в порядке поступления: ИБР-3 [1, 2], ИБР-4 [3]), может уточняться при последующей разработке. Особое внимание в концепции ИБР-4 уделено вопросам устойчивой динамики реактора. В предыдущей публикации по концепции ИБР-4 эта задача не выделялась [3]. В данной работе учтены соответствующие экспериментальные данные, полученные на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М. Основу составили результаты расчетов по так называемой базовой компоновке ИБР-4, в которой учитывается принципиальная возможность реализации референтных технических решений, применяемых в современном реакторостроении. По сути базовый вариант ИБР-4 представляет собой развитие установки ИБР-2М, в которой активная зона существенно изменена, но остается в традиционном окружении водяных замедлителей. Такой подход к ИБР-4 сделан исключительно для тестового сравнения параметров этой установки с параметрами ИБР-2М с целью демонстрации концептуальных решений. В дальнейшем на основе базовой компоновки будут представлены активная зона ИБР-4, окружающие ее отражатели, замедлители — все то, что по современным представлениям дает максимально возможные плотности потока тепловых нейтронов на выведенных нейтронных пучках и обеспечивает надежность и безопасность реактора. Ожидается, что параметры ИБР-4 будут существенно улучшены.

1. КОНЦЕПЦИЯ ИБР-4. БАЗОВАЯ КОМПОНОВКА И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

В концепции нового реактора ИБР-4 авторы предлагают использовать конфигурацию реактора МБИР с модулятором реактивности типа ПО-3, который в настоящее время успешно эксплуатируется на ИБР-2М. МБИР — это многофункциональный быстрый исследовательский реактор, сооружаемый в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (Димитровград). Существенное конструктивное отличие предлагаемой концепции от действующих реакторов ИБР-2 и ИБР-2М состоит в перемещении органов системы управления и защиты внутрь активной зоны (а. з.), как это реализовано в исследовательских мощных реакторах БОР-60, МБИР и энергетическом реакторе БН-600. Это позволяет приблизить замедлители к корпусу реактора и увеличить плотность потока тепловых и холодных нейтронов без повышения средней мощности реактора. Предполагается в качестве топлива в ИБР-4 использовать уже опробованный

диоксид плутония, мощность ограничить 5 МВт (это связано с ростом колебаний энергии импульсов с увеличением мощности), органы системы управления и защиты выполнить из карбида бора, обогащенного бором-10. Авторы предлагают повторить корпус реактора МБИР, изменив геометрию а. з., охлаждение проводить жидким натрием. Водяные замедлители в окружении а. з. рассматриваются лишь в базовом варианте а. з.

Базовая компоновка ИБР-4 — это исходная концептуальная конструкция а. з. и ее ближайшего окружения, которая в процессе проработки проекта может меняться, но ее основа сохраняется в любом случае. Некоторые исходные установочные данные для базовой компоновки ИБР-4 состоят в следующем.

• **Топливо — диоксид плутония.** Изотопный состав плутония соответствует топливу в ИБР-2М: ^{238}Pu — 0,2 %, ^{240}Pu — 4,006 %, ^{242}Pu — 0,022 %, ^{239}Pu — 95,602 %, ^{241}Pu — 0,17 % (масс.).

• **Мощность 5 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 МОС на колебания энергии импульсов.

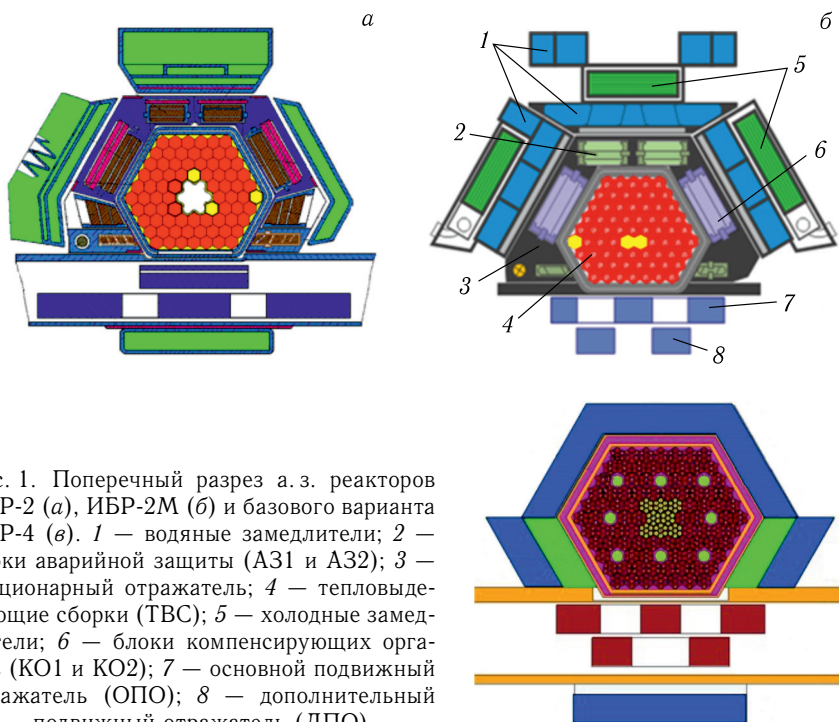


Рис. 1. Поперечный разрез а. з. реакторов ИБР-2 (а), ИБР-2М (б) и базового варианта ИБР-4 (в). 1 — водяные замедлители; 2 — блоки аварийной защиты (АЗ1 и АЗ2); 3 — стационарный отражатель; 4 — тепловыделяющие сборки (ТВС); 5 — холодные замедлители; 6 — блоки компенсирующих органов (КО1 и КО2); 7 — основной подвижный отражатель (ОПО); 8 — дополнительный подвижный отражатель (ДПО)

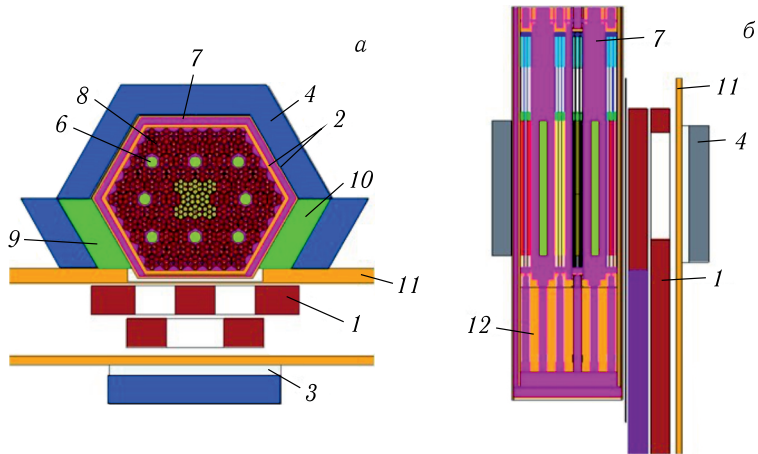


Рис. 2. Расчетная модель ИБР-4: а) поперечный разрез а.з. ИБР-4 с органами СУЗ и имитаторами; б) продольный разрез а.з.: 1 — модулятор реактивности; 2 — двойной корпус; 3 — слой В₄С; 4 — плоский водяной замедлитель; 6 — органы СУЗ В₄С (80% ¹⁰В); 7 — слой жидкого натрия; 8 — ТВС; 9 — КО1; 10 — КО2; 11 — корпус модулятора реактивности; 12 — опорная решетка

Выбор топлива в виде диоксида плутония основывался на следующих его свойствах:

- высокой радиационной стабильности, т. е. сопротивлению изменению формы и объема;
- высокой температуре плавления, что обеспечивает безопасность реактора в переходных режимах;
- отсутствию фазовых переходов в области рабочих температур;
- совместимости с материалом оболочки;
- высокой плотности, что позволяет сократить размер а. з.;
- технологичности производства топливных таблеток со свойством «доспекаемости», т. е. повышении плотности в процессе облучения.

Поперечные разрезы а. з. реакторов ИБР-2, ИБР-2М и базового варианта ИБР-4 для сравнения приведены на рис. 1. Краткое описание базовой компоновки ИБР-4 состоит в сле-

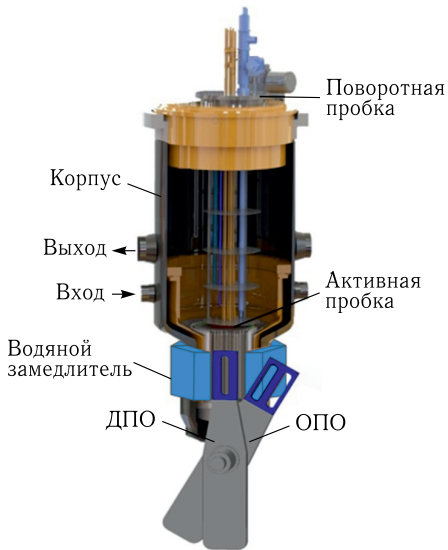


Рис. 3. Корпус ИБР-4 с модулятором реактивности ПО-3

дующем: 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. Ниже а. з. установлены два блока быстрой аварийной защиты, изготовленные из никеля. Быстрая аварийная защита переводит реактор в подкритическое на мгновенных нейтронах состояние за время между вспышками, т. е. менее чем за 20 мс. 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. Модулятор реактивности ПО-3 тесно примыкает к одной из граней корпуса. Водяные замедлители оптимальной толщины с небольшим зазором окружают все грани корпуса. Поверхность замедлителей просматривается горизонтальными нейтронными каналами радиального типа, которые проходят через блоки биологической защиты. Для увеличения длительности топливной кампании использовали радиационно стойкую оболочечную сталь ЭК-164. Расчетная модель базового варианта ИБР-4 приведена на рис. 2. Схематично корпус ИБР-4 с модулятором реактивности ПО-3 показан на рис. 3.

2. УМЕНЬШЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ ИБР-4

В данном разделе рассмотрим ослабление в ИБР-4 низкочастотных колебаний энергии импульсов, присущих реакторам ИБР-2 и ИБР-2М. Что такое колебательная неустойчивость импульсных реакторов периодического действия, подробно изложено во многих работах, например в [4]. На рис. 4 приведен пример колебательной неустойчивости энергии импульсов ИБР-2М.

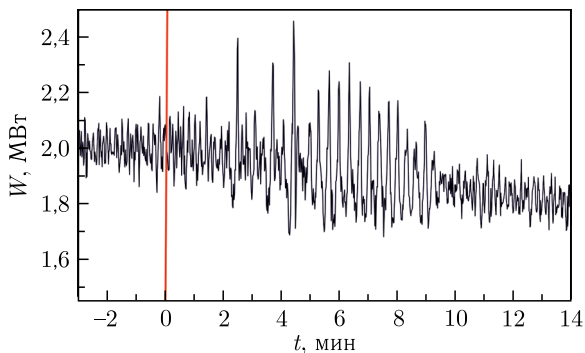


Рис. 4. Появление низкочастотных колебаний в ИБР-2М при штатном снижении средней мощности от 2 до 1,8 МВт в цикле № 9 23-12-2017 г. Красная линия — начало снижения мощности

Для расчетов условий, обеспечивающих стабильную работу ИБР-4 во всех режимах, использовалась модель динамики импульсных реакторов периодического действия как импульсных систем автоматического регулирования (АР) с мощностными обратными связями (МОС). Обратные связи получены экспериментально на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М и адаптированы под режим работы ИБР-4. Модель проверена экспериментально и хорошо себя зарекомендовала на обоих реакторах — ИБР-2 и ИБР-2М [5–8]. Блок-схема модели АР ИБР-4 показана на рис. 5. Основу понимания динамики ИБР-4 и понимания частотных характеристик реактора дают две его характеристики: импульсная и амплитудно-частотная.

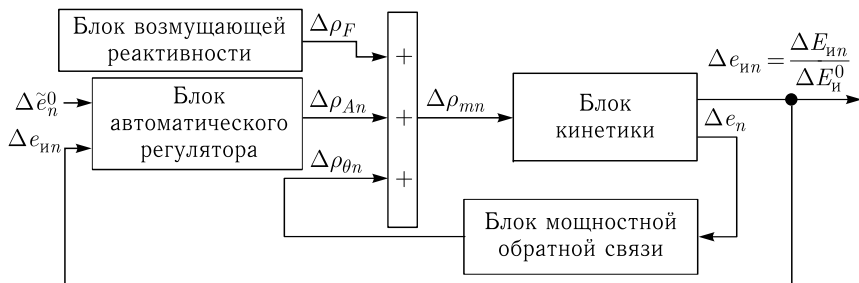


Рис. 5. Блок-схема модели динамики ИБР-4

Импульсная характеристика МОС — изменение реактивности МОС при воздействии единичного импульса мощности для реакторов типа ИБР-2 — может быть описана тремя слагаемыми:

$$w_{rE} = \sum_{j=1}^3 \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \exp\left(-\frac{t}{T_{Tj}}\right) \left[\frac{\beta_{и}}{\text{МДЖ}} \right],$$

где t — время, с; k_{Tj} — коэффициент передачи j -й компоненты МОС; T_{Tj} — постоянная времени действия j -й компоненты МОС. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) есть передаточные функции реактора, в данном случае — амплитуда колебаний энергии импульсов в ответ на гармонические колебания реактивности фиксированной амплитуды. Как показывают исследования, наиболее вероятное действие обратных связей вызвано изгибными деформациями твэлов и кассет в ответ на действие импульса мощности. Схематично действие отдельных компонентов МОС представлено на рис. 6.

Многочисленные данные по ИБР-2 и ИБР-2М указывают на то, что общий критерий устойчивости импульсных реакторов ИБР-2, ИБР-2М, который можно распространить также и на ИБР-4, состоит в следующем: необходимое условие — коэффициент передачи МОС должен быть меньше нуля ($k_T < 0$); достаточное условие — импульсная характеристика МОС, которая в любой момент времени должна быть меньше нуля ($w_{rE}(t) \ll 0$) [4].

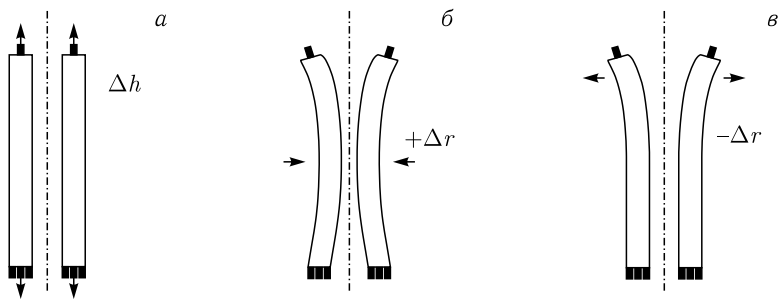


Рис. 6. Схематическое представление действия отдельных компонентов МОС ИБР-2, ИБР-2М и ИБР-4: *а* — аксиальное расширение топлива; *б* — изгиб кассет к центру а. з.; *в* — изгиб кассет к периферии а. з.

Отметим, что МОС импульсных источников нейтронов, в том числе и ИБР-4, существенно зависит от параметров твэлов. Для выбора оптимальных твэлов из числа референтных (проверенных на практике и рекомендуемых для того или иного реактора на быстрых нейтронах) были рассмотрены твэлы для реакторов МБИР, ИБР-2М и БН-1200. Геометрические параметры твэлов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные геометрические параметры твэлов реакторов МБИР, ИБР-2М и БН-1200

Характеристика твэла	МБИР	ИБР-2М	БН-1200
Радиус твэла, мм	3,45	4,3	4,65
Радиус топливной таблетки, мм	2,90	3,7	3,95
Толщина подслоя, мм	0,1	0,15	0,1
Материал подслоя	Гелий (натрий)		
Толщина оболочки, мм	0,40	0,46	0,6
Радиус отверстия топливной таблетки, мм	1,5		
Шаг твэльной решетки, мм	7,4	9,1	9,79
Высота топливного столба, мм	440		
Сфера отработанного производства твэлов	БН-600 БН-800	ИБР-2 ИБР-2М	БН-1200

Расчетные амплитудно-частотные характеристики ИБР-4 для разных твэлов, взятых из табл. 1, приведены на рис. 7 при мощности 5 МВт. В расчетах принималось, что подслоя, т. е. зазор между топливными таблетками и оболочкой твэлов, заполнялся гелием или натрием.

Для ИБР-4 с твэлами ИБР-2М (He-подслой) оценен запас устойчивости в зависимости от коэффициента передачи положительной компоненты МОС и от постоянной времени первого компонента — аксиального расширения топлива. Рассматривались условия работы реактора при мощности 5 МВт в режиме саморегулирования (без АР). Запас устойчивости определяли с помощью частотного критерия Найквиста в рамках модели

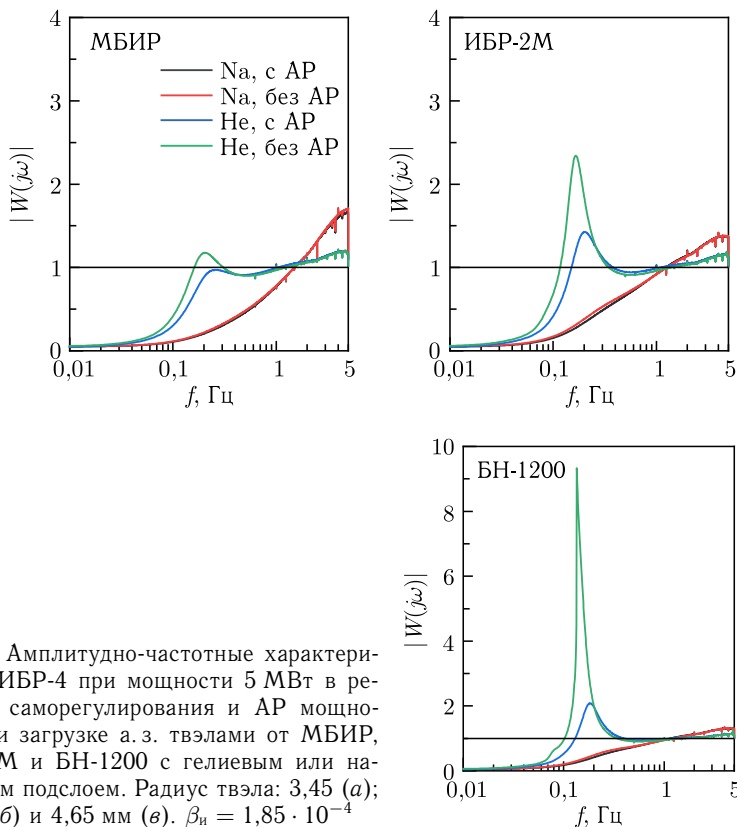


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики ИБР-4 при мощности 5 МВт в режимах саморегулирования и АР мощности при загрузке а.з. твэлами от МБИР, ИБР-2М и БН-1200 с гелиевым или натриевым подслоем. Радиус твэла: 3,45 (а); 4,3 (б) и 4,65 мм (в). $\beta_{и} = 1,85 \cdot 10^{-4}$

динамики с разомкнутым контуром регулирования. Запас устойчивости по амплитуде в зависимости от изменения указанных выше параметров МОС представлен на рис. 8.

Там же красной вертикальной линией отмечен диапазон значений параметров, зарегистрированных в разное время на реакторе ИБР-2М. Видна четкая пороговая зависимость устойчивости ИБР-4 от значений параметров. Главная задача — не допустить срыва устойчивости реактора при случайных колебаниях параметров МОС. Такие колебания, как показывает практика, могут происходить в процессе нормальной работы обоих реакторов: как ИБР-2, так и ИБР-2М (см. рис. 8).

Для оценки эффектов реактивности от сдвига топлива во время действия быстрой МОС ввели понятие «распределенная реактивность». Смысл введенного понятия представлен в последовательности общеизвестных формул: $Q(t)$ — полное энерговыделение в а.з.; $q(r)$ — распределение энерговыделения по радиусу а.з.; $W = dQ/dt$ — мощность; $\rho = \Delta K/K$, $\rho = (dW/dt)/W(t)$ — реактивность; $\rho(r) = (dW(r)/dr)/W(r)$ — распределенная реактивность.

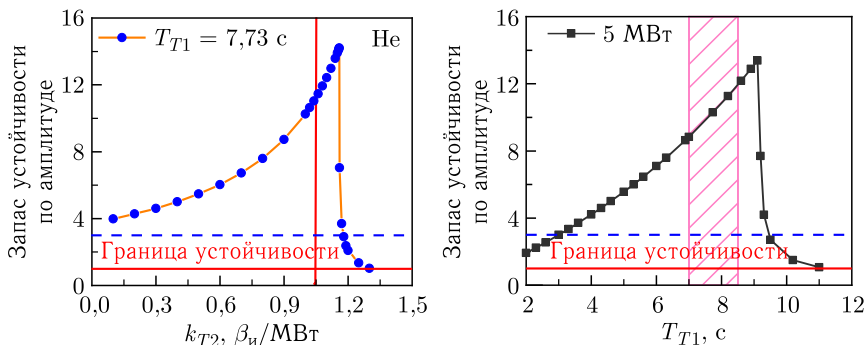


Рис. 8. Запас устойчивости ИБР-4 по амплитуде с твэлами ИБР-2М (He-подслой) в режиме саморегулирования (без АР) при изменении положительного коэффициента передачи МОС k_{T2} (а) и постоянной времени первого компонента МОС T_{T1} (б). Средняя мощность реактора 5 МВт. Красные вертикальные линии — рабочие значения параметров МОС ИБР-2М

Тогда эффект реактивности от сдвига топлива $\Delta\rho(\frac{d\rho(r)}{dr})\cdot\Delta r$, где $\rho(r)$ — распределенная реактивность, $d\rho/dr$ — градиент распределенной реактивности, зависит от формы энерговыделения в а. з. Для уменьшения эффектов реактивности от сдвига топлива, особенно к центру а. з., в ИБР-4 предложено следующее:

- уменьшить $d\rho/dr$, т. е. изменить объем или форму а. з.;
- уменьшить сдвиг твэлов к центру а. з. Δr , т. е. усилить жесткость твэлов.

Из вышеприведенного видно, что конечный результат зависит от распределения энерговыделения по объему а. з. На рис. 9 показано распределение энерговыделения по радиусу а. з. ИБР-4. Распределение по твэлам достаточно сложное, но аппроксимированное распределение по а. з. хорошо подчиняется параболической зависимости. Вычисленная распределенная реактивность ИБР-4 в сравнении с ИБР-2М приведена на рис. 10. Видно, что чувствительность а. з. ИБР-4 к перемещению внутризонных элементов практически не отличается от ИБР-2М. Для уменьшения положительной компоненты МОС необходимо, в первую очередь, уменьшить градиенты распределенной реактивности, что можно сделать путем выравнивания энерговыделения в а. з. Существует и другой способ выравнивания градиентов в а. з., но не энерговыделения, а градиентов температурного распределения. В последнем случае выравнивание температур может быть реализовано путем соответствующего профилирования расхода натриевого теплоносителя через а. з. [9].

В целом, для подавления положительной компоненты МОС на ИБР-4 выполнено следующее:

- 1) уменьшены градиенты энерговыделения по а. з. путем вставки в центральные твэлы 13 кассет в центре а. з. вольфрамовых стержней;

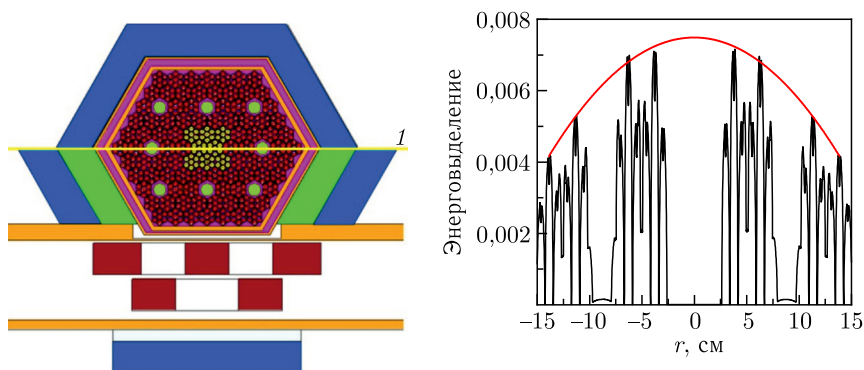


Рис. 9. Распределение энерговыделения по радиусу а. з. ИБР-4 по линии 1

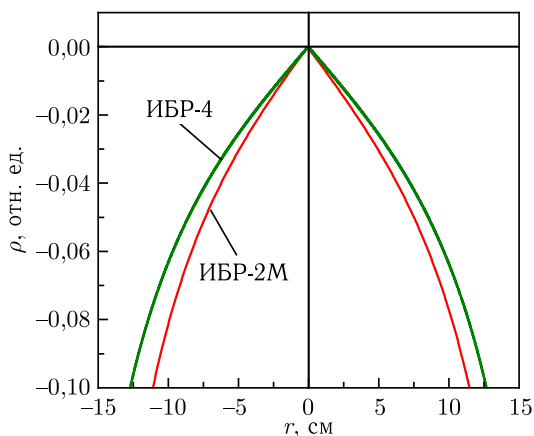


Рис. 10. Аппроксимированная распределенная реактивность в ИБР-2М (красная линия) и в базовой компоновке ИБР-4 (зеленая линия). В среднем градиент распределенной реактивности (или чувствительность) ИБР-4 к смещению топливных кассет только на $\sim 15\%$ меньше, чем в а. з. ИБР-2М

2) усилена жесткость твэлов (нижний конец твэла в кассете помещен в опорную решетку, исключающую радиальное перемещение).

Дополнительно можно усилить жесткость некоторых кассет (если в центр кассеты вместо 7-го твэла ввести вольфрамовый стержень).

На рис. 11 показано распределение энерговыделения с выравниванием по объему а. з. ИБР-4 путем вставки в центр твэлов 13 центральных кассет 6-сантиметровых вольфрамовых стержней.

Вычисленная распределенная реактивность в ИБР-4 с выравниванием и без выравнивания энерговыделения в сравнении с ИБР-2М и ИБР-2 показана на рис. 12.

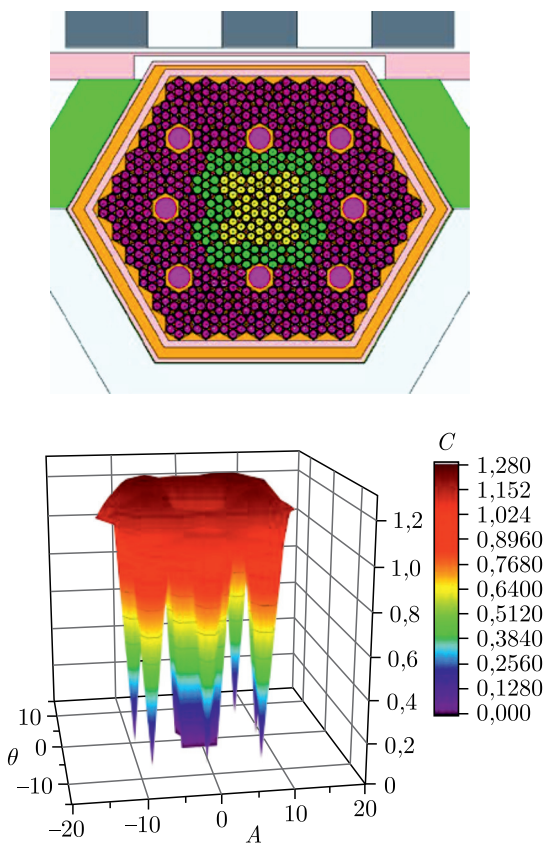


Рис. 11. ИБР-4 с твэлами ИБР-2М и бесчехловыми кассетами: всего 102 ТВС, 86 ТВС с диоксидом плутония, 8 стержней СУЗ с обогащенным бором, 8 ТВС — кассет-имитаторов для компенсации выгорания, 13 ТВС со вставками ВНЖ длиной 6 см в центре каждого твэла

Выравнивание энерговыделения в ИБР-4 уменьшает чувствительность реактора к перемещению внутризонных элементов в 1,8 раза по сравнению с невыравненной а.з. Это существенно уменьшает положительную компоненту МОС. При выравненном энерговыделении реактор ИБР-4 по длительности кампании до потери устойчивости сопоставим с реактором ИБР-2. Как известно, длительность кампании ИБР-2 до появления автоколебаний в 1,8–2,0 раза больше, чем в ИБР-2М. Также отметим, что запас устойчивости ИБР-4 с выравненным энерговыделением становится гораздо больше и шире по диапазону средней мощности реактора. Особенно этот эффект проявляется для твэлов с гелиевым подслоем. На рис. 13 приведены зависимости запаса устойчивости ИБР-4 с выравненным энерговыделением

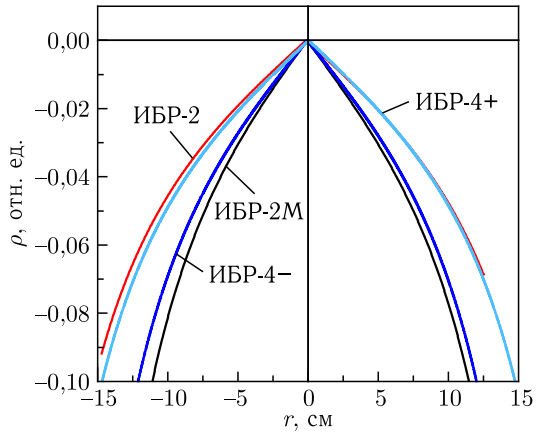


Рис. 12. Аппроксимированная распределенная реактивность в ИБР-2, ИБР-2М и ИБР-4. ИБР-4+ — с выравниванием энерговыделения, ИБР-4- — без выравнивания

в а. з. от мощности реактора при загрузке разными твэлами с гелиевым и натриевым подслоем: МБИР, ИБР-2М и БН-1200.

Красная горизонтальная линия на рис. 13 соответствует уровню запаса, принятому для сложных технических систем. Как показывают результаты анализа, оптимальным твэлом для устранения низкочастотных колебаний в ИБР-4 можно принять твэл ИБР-2 с He-подслоем, т.е. тот, который использовался в ИБР-2 и используется в ИБР-2М. Показательно также, что при мощности выше 2 МВт после срыва устойчивости от 1,8 МВт наблюдается ее достаточно быстрый рост и далее постепенный спад. Иллюстрация понижения устойчивости ИБР-2 в эксперименте при изменении мощности от 1,8 до 2 МВт и повышении расчетной устойчивости при мощности чуть больше 2 МВт с последующим ее спадом приведена на рис. 14. Кратко поясним этот случай. На рис. 14, а приведены измеренные в низкочастотной области (от ~ 0 до 0,26 Гц) относительные колебания

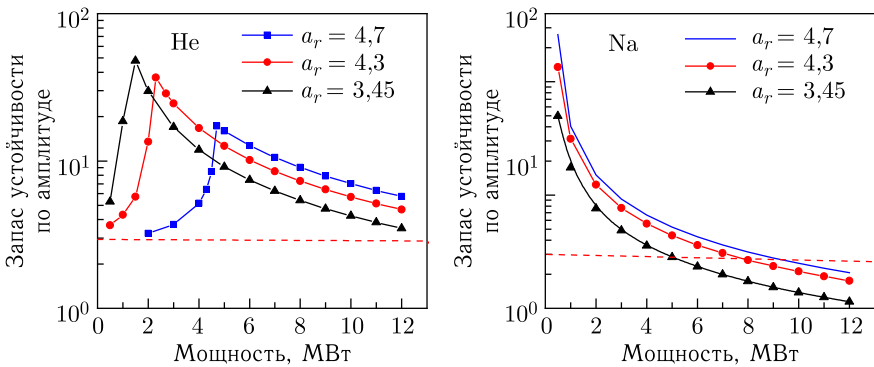


Рис. 13. Запас устойчивости ИБР-4 по амплитуде в режиме саморегулирования для разных твэлов с подслоем He (а) и Na (б) с выравниванием энерговыделения в а. з. в зависимости от мощности реактора; $\beta_{и} = 1,85 \cdot 10^{-4}$

энергии импульсов в зависимости от средней мощности реактора. Обратная величина, представленная на рис. 14, б, по сути показатель низкочастотной устойчивости реактора, а на рис. 14, в показана расчетная зависимость запаса устойчивости ИБР-4, которая практически совпадает

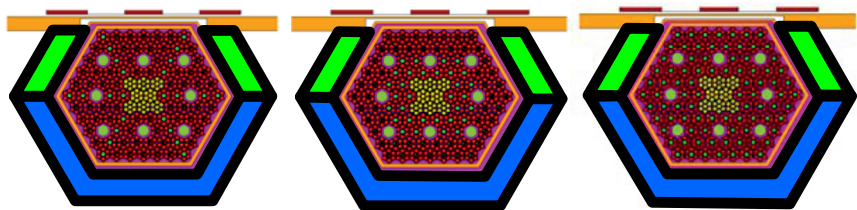
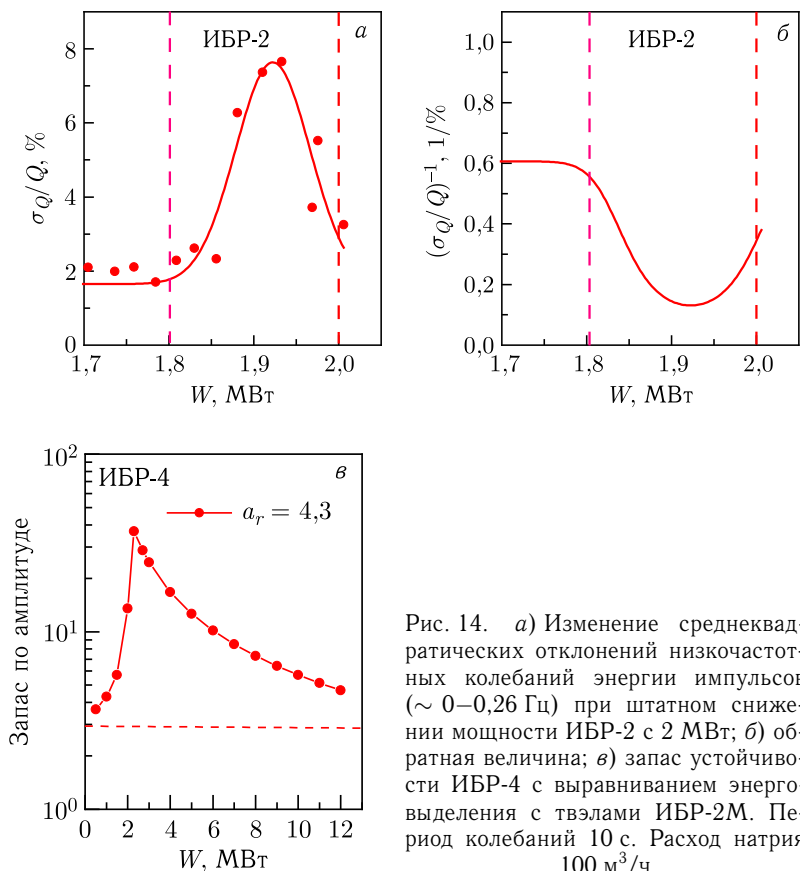


Рис. 15. Способы усиления жесткости некоторых кассет ИБР-4 с целью уменьшения их изгибов к центру а. з. Вольфрамовые стержни введены в центральный твэл

с расчетами по ИБР-2 и в данном случае является как бы продолжением зависимости на рис. 14, б.

Дополнительно для уменьшения положительной компоненты МОС представлены некоторые варианты усиления жесткости твэлов ИБР-4 с целью уменьшения их изгибов к центру а. з. (рис. 15). Жесткость кассет задается введением в центральные твэлы вольфрамовых стержней. Потеря запаса реактивности в вариантах, представленных на рис. 15, составляет от 2,8 до 10 %.

Основные сравнительные характеристики ИБР-4 и ИБР-2М приведены в табл. 2, более подробно параметры ИБР-4 даны в приложении (табл. 1 и 2).

Таблица 2. Сравнительные характеристики базовой компоновки ИБР-4 и реактора ИБР-2М

Параметр	Значение	
	ИБР-4	ИБР-2М
Средняя тепловая мощность, МВт	5	2
Теплоноситель	Натрий	
Расход теплоносителя, м ³ /ч	200–240	100
Частота импульсов, с ⁻¹	10	5
Топливо	PuO ₂	
Масса топлива, кг	111	80
Объем а. з., л	~ 23,4	21,4
Максимальное выгорание топлива, %	9	
Кампания до замены топлива, год	20	—
Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	
Импульсная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{и}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$
Модулятор реактивности	ПО-3	
Глубина модуляции, % $K_{эф}$	2,75	2,65
Плотность потока тепловых нейтронов, 10^{13} см ⁻² ·с ⁻¹	1,75	0,5
Выигрыш относительно ИБР-2М	~ 3,5	1,0

ВЫВОДЫ

- Концепция ИБР-4 на основе максимального использования референтных технических решений позволяет реализовать представленный вариант нейтронного источника при минимальных затратах по сравнению с другими вариантами.

- Колебательная нестабильность ИБР-4 по сравнению с ИБР-2М существенно уменьшена. Соответственно, длительность кампании и безопасность реактора увеличена.

- При мощности 5 МВт плотность потока тепловых нейтронов на поверхности гребенчатых водяных замедлителей составляет $1,76 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, т.е. в 3,5 раза выше, чем на ИБР-2М.

- Дальнейшие исследования направлены на повышение плотности потока нейтронов на выведенных нейтронных пучках.

Благодарности. Авторы выражают большую благодарность всему персоналу, обслуживающему реактор ИБР-2М, и всем сотрудникам группы ядерной безопасности Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗОВОЙ КОМПОНОВКИ ИБР-4

Таблица 1. Некоторые нейтронно-физические параметры базовой компоновки ИБР-4

Характеристика	Значение
Длительность импульса быстрых нейтронов, мкс	200
Фон между импульсами, %	8,5
Мощность в импульсе, МВт	2000
Время жизни нейтронов τ , нс (органы СУЗ вне а.з.)	137
Время жизни нейтронов τ , нс (органы СУЗ в а.з.)	144
Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$	$2,160 \cdot 10^{-3}$
Импульсная доля запаздывающих нейтронов β_n	$1,85 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2. Некоторые параметры ИБР-4

Характеристика	Значение
Полное число ТВС	102
Число блоков СУЗ в а.з.	8
Число кассет-имитаторов для догрузки топлива	8
Запас на выгорание ρ , %	9
Эффективность 8 РО СУЗ в а.з. ($^{10}\text{В}$ 80%) ρ , %	3,20
Эффективность 2 РО СУЗ вне а.з. КО1, КО2 (5 см сплав ВНЖ-95) ρ , %	3,50
Полная эффективность органов СУЗ ρ , %	6,70
Эффективность вставки вольфрамовых стержней длиной 6 см (ВНЖ-95) в 13 центральных ТВС для выравнивания энерговыделения ρ , %	-2
Эффективность замены 8 кассет-имитаторов на топливные кассеты ρ , %	10
Эффективность модулятора реактивности	2,75
Объем а.з. по корпусу, л	23,4
Высота а.з., см	44,4
Лигатурный вес топлива, кг	111
Чистый вес топлива, кг	97,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабалин Е. П., Аксенов В. Л., Комышев Г. Г., Рогов А. Д. Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния // АЭ. 2018. Т. 124, вып. 6. С. 309.
2. Аксенов В. Л., Рязнин М. В., Шабалин Е. П. Исследовательские реакторы ОИЯИ: Взгляд в будущее // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52, вып. 6. С. 1349–1376.
3. 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.
4. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д., Рогов А. Д. О пределах колебательной неустойчивости импульсных реакторов периодического действия // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Физика ядерных реакторов». 2020. Вып. 5. С. 4–18.
5. Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К. Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.
6. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д., Сангаа Д. Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для анализа быстрых переходных процессов // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 3(194). С. 682–686.
7. Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhui D. Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of Power Variation // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 85. P. 488–493.
8. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д. Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности // АЭ. 2017. Т. 122, № 2. С. 63–67.
9. Саркисов А. А., Пучков В. Н. Нейтронно-физические процессы в быстрых реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: Наука, 2011. 168 с.

Получено 28 февраля 2024 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 08.04.2024.

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

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 110 экз. Заказ № 60846.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/