

P13-2025-54

М. М. Подлесный¹, Е. П. Шабалин¹,
Я. А. Вдовин¹, И. В. Кушнир¹,
А. Е. Верхоглядов¹

ИЗГИБ ТЕПЛОВЫДЕЛЕЮЩИХ СБОРОК
В РЕАКТОРЕ ИБР-2М И ИХ ВЛИЯНИЕ
НА РЕАКТИВНОСТЬ

Направлено в журнал «Вопросы атомной науки и техники.
Серия: Физика ядерных реакторов»

¹ Объединенный институт ядерных исследований,
141980, Дубна, Россия

Изгиб тепловыделяющих сборок в реакторе ИБР-2М
и их влияние на реактивность

Изучается явление изгиба тепловыделяющих сборок (ТВС) под действием неравномерного распределения температуры в активной зоне импульсного реактора периодического действия. Для реактора ИБР-2М проведен численный расчет поперечных деформаций ТВС и рассчитано их влияние на реактивность и динамику реактора. Показано, что эффект вносит положительную обратную связь по реактивности. Поскольку изгиб оказывает негативное влияние на динамику реактора, в новом источнике нейтронов в случае использования ТВС необходимо принятие мер по ослаблению данного эффекта.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Bending of Fuel Assemblies in the IBR-2M Reactor
Core and Their Influence on Reactivity

The paper studies the phenomenon of fuel assembly (FA) bending under the influence of non-uniform temperature distribution in the core of a periodic pulsed reactor. Numerical calculations of transverse FA deformations are performed for the IBR-2M reactor, and their impact on reactivity and reactor dynamics is calculated. It's shown that the effect introduces positive feedback on reactivity. Since bending has a negative impact on reactor dynamics, measures must be taken to reduce this effect in a new neutron source.

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

ВВЕДЕНИЕ

Импульсная характеристика обратной связи (ИХОС) $\rho(t)$ является удобным инструментом для изучения динамики пульсирующего реактора и его устойчивости. Она может быть получена прямым расчетом мощностных обратных связей от всех теплофизических процессов, происходящих в активной зоне реактора, или путем проведения эксперимента на действующем реакторе с последующей обработкой результатов измерений энергии импульсов [1–3].

Экспериментально полученная ИХОС на пульсирующих реакторах ИБР-2 и ИБР-2М с достаточной точностью описывается суммой трех экспонент с шестью параметрами (три постоянные времени T_i и три коэффициента передачи k_i):

$$\rho_{\text{эксп}}(t) = \sum_{i=1}^3 \frac{k_i}{T_i} \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right). \quad (1)$$

Трехэкспоненциальное представление быстрой связи ИБР-2 (1) есть результат формальной математической обработки экспериментальных данных [1]. При этом нет оснований надеяться, что физическая интерпретация эффектов обратной связи однозначно связана с экспоненциальными зависимостями. Считалось, что первая отрицательная компонента обратной связи, самая медленная, связана с топливной составляющей — аксиальным расширением сердечников твэлов. Остальные две (положительная и отрицательная) — натриевые эффекты реактивности, обусловленные термомеханическими деформациями топливных элементов вследствие неравномерности энерговыделения в активной зоне и, соответственно — неравномерного нагрева и деформации твэлов и стенок ТВС (способ закрепления ТВС таков, что топливо смещается к центру активной зоны) [4]. Однако, на самом деле, это далеко не так, что показал расчет импульсной характеристики обратной связи, сделанный в данной работе. В первую компоненту экспериментальной ИХОС в области больших времен входит также положительная реактивность от поперечного изгиба ТВС, так как и температура стенок ТВС, и охлаждение твэлов через несколько секунд после импульса мощности следуют одному экспоненциальному закону спада. Остальные две (положительная и отрицательная) компоненты дополнительно и только в сумме описывают остальную часть эффектов

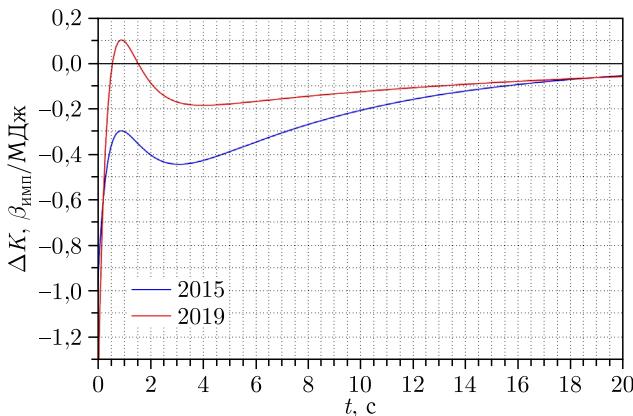


Рис. 1. Импульсная характеристика быстрой мощностной обратной связи реактора ИБР-2М при некоторых значениях энерговыработки (эксперимент)

реактивности, обусловленных изменением температуры после импульса мощности. Нет оснований для однозначного заключения о том, что вторая компонента в уравнении (1) есть эффект изгиба ТВС.

Достаточным условием устойчивости пульсирующих реакторов является нахождение ИХОС в области отрицательных значений реактивности. В процессе энерговыработки происходит изменение быстрой мощностной обратной связи, что приводит к уменьшению запаса устойчивости (рис. 1) [5], и впоследствии требуется снижение уровня мощности. Безусловно, реактор должен удовлетворять важнейшему требованию — устойчивости в режиме саморегулирования. И глубокое понимание процессов в реакторе, включая зависимость ИХОС от текущего состояния, необходимо для прогнозирования его безопасной работы.

Расчет изгиба тепловыделяющих сборок (ТВС) под действием неравномерного распределения температуры в активной зоне импульсного реактора периодического действия является важнейшей задачей с целью определения его влияния на реактивность и дальнейшего изучения способов по уменьшению данного эффекта в будущем источнике нейтронов [6]. Помимо изучения эффекта изгиба было выполнено для реактора ИБР-2М с целью выявления истинных физических причин компонент обратной связи без экспоненциальной интерпретации их временных свойств.

ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ИБР-2М

Распределение мощности в твэлах активной зоны было рассчитано методом Монте-Карло в полной геометрии активной зоны ИБР-2М (рис. 2) с использованием программы SERPENT-2.1.32. Библиотекой оцененных ядерных данных выбраны JEFF-3.2 и JEFF-3.1.1.

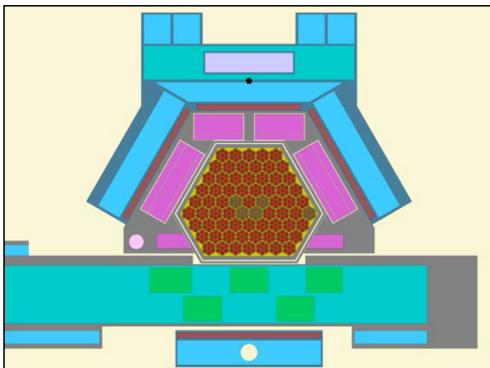


Рис. 2. Расчетная геометрия активной зоны реактора ИБР-2М

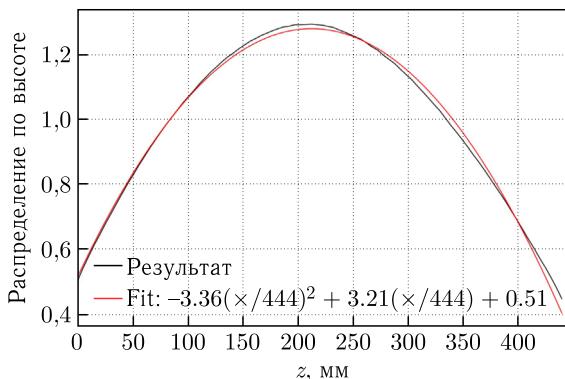


Рис. 3. Распределение энерговыделения по высоте твэла при стационарном энерговыделении

Для примера на рис. 3 показано распределение энерговыделения вдоль оси твэла, усредненное по всей активной зоне. На рис. 4 показано направление разности энерговыделения между твэлами по активной зоне реактора. Значение величины для всех ТВС лежит в диапазоне от 0,1 до 1,1 кВт.

При дальнейшем решении теплогидравлической задачи было выбрано три значения разности энерговыделения (0 кВт, 0,3 кВт; 0,6 кВт; 1,2 кВт).

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ

Геометрия расчетной модели тепловыделяющей сборки реактора ИБР-2М воспроизведена согласно технической документации. Шестигранная тепловыделяющая сборка реактора (рис. 5) состоит из 7 твэлов. Чехол ТВС имеет размер «под ключ» 26,2 мм и шаг твэлов 9,11 мм. Толщина

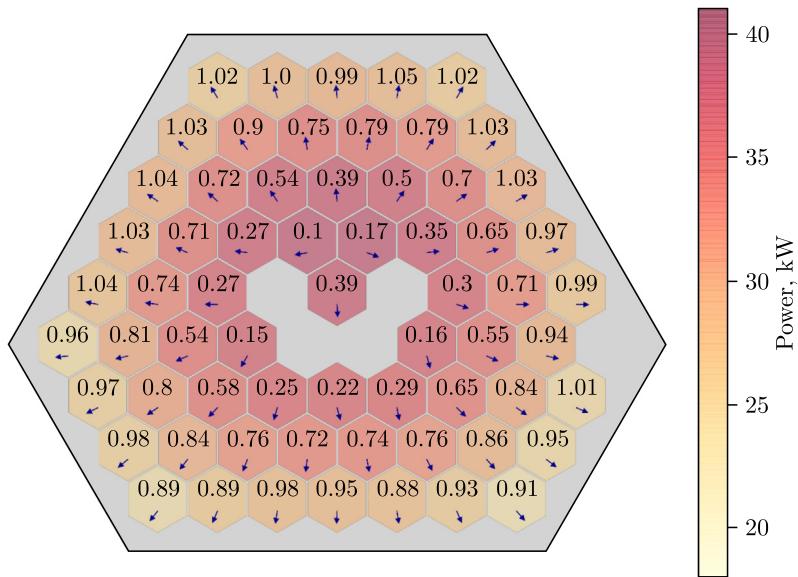


Рис. 4. Перепад энерговыделения в ТВС по активной зоне. Стрелками показано направление перепада, его значение приведено в кВт, цвет отражает энерговыделение в каждом ТВС

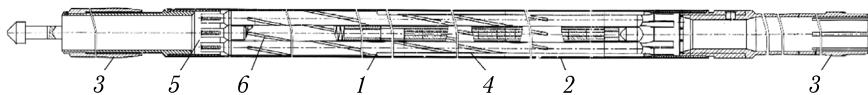


Рис. 5. Эскиз ТВС в продольном разрезе: 1 — твэл; 2 — стенка ТВС; 3 — цанговые лепестки; 4 — вытеснитель; 5 — опорная решетка; 6 — дистанцирующая проволока

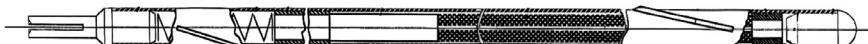


Рис. 6. Эскиз твэла в продольном разрезе

чехла 0,4 мм, выполнен из стали 08Х18Н10Т. С внутренних сторон чехла к нему прилегают 6 вытеснителей натрия диаметром 2 мм. На концах ТВС имеются цанговые лепестки, предназначенные для вертикального закрепления ТВС в активной зоне и обеспечения дистанции ~ 1 мм между соседними сборками (шаг ТВС 27,3 мм).

Тепловыделяющий элемент (рис. 6) представляет собой трубу длиной 778 мм с толщиной стенки 0,46 мм, выполненную из стали ЧС-68ИД. Внутри твэла располагается топливный столб высотой 444 мм, состоящий из 44 таблеток диоксида плутония с обогащением 95,7 % по ^{239}Pu диаметром 7,42 мм. Выше по оси располагается вольфрамовый отражатель — стержень длиной 60 мм из сплава ВНЖ-90. За ним находится вставка длиной 130 мм, на которую опирается прижимная пружина, вместе они

образуют полость верхнего газосборника. В нижней части твэла также находится небольшая полость в виде втулки длиной 8 мм. Все пустоты внутри тепловыделяющего элемента изначально заполнены ${}^4\text{He}$ под давлением $1,35 \cdot 10^5$ Па.

Твэлы приварены верхними концами к опорной решетке. Нижние концы твэлов свободны. На внешней поверхности твэла навита дистанцирующая проволока толщиной 0,4 мм с шагом 90 мм. Теплоноситель в виде жидкого натрия подается снизу и протекает как внутри ТВС, так и снаружи.

РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТВС

Задача деформации элементов ТВС решается методом конечных элементов в два этапа: сначала решается теплогидравлическая задача и вычисляется распределение температуры по всему объему ТВС, а затем по известной температуре решается задача термоупругости и вычисляется деформация стальных элементов конструкции ТВС.

Расчет выполнен для реактора ИБР-2М на свежем топливе при средней мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону $100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В работе [7] показано, что периферийные твэлы смещаются к стенке ТВС вплоть до полного прилегания в нижней части топливного столба, а в сечении оболочки твэла остается ненулевой изгибающий момент. При этом поперечная деформация стенки ТВС обусловлена непосредственно собственным изгибом от перепада температур на стенках, а твэлы и все металлические элементы ТВС вносят незначительный вклад. Это значит, что смещение топлива в твэлах с хорошей точностью описывается деформацией стенки ТВС. Поэтому при дальнейшем рассмотрении теплогидравлический расчет проводился в полной геометрии ТВС, а в расчете деформаций учитывалась только стенка ТВС.

В диапазоне градиентов 0–1,2 кВт была получена линейная связь амплитуды деформации и градиента энерговыделения. Установлено, что на форму и направление изгиба оказывает существенное влияние дистанцирующая проволока. Как результат появляется поперечная градиенту компонента изгиба ТВС (рис. 7). На рис. 8 показана зависимость среднего смещения топлива в ТВС вследствие стационарной деформации стенки от величины градиента энерговыделения. Во всем диапазоне градиентов энерговыделения в ТВС реактора ИБР-2М прослеживается линейная зависимость. Следовательно, стенки ТВС изгибаются под фиксированным углом $40,5^\circ$ по отношению к вектору градиента энерговыделения для всех ТВС.

Для расчета мощностной обратной связи была решена нестационарная теплогидравлическая задача. В рабочем режиме при постоянной мощности 2 МВт и градиенте энерговыделения в ТВС 1,2 кВт был дан единичный импульс мощности 1 МДж, что соответствует среднему нагреву топлива на 45 К. Полученная временная зависимость изменения поперечного

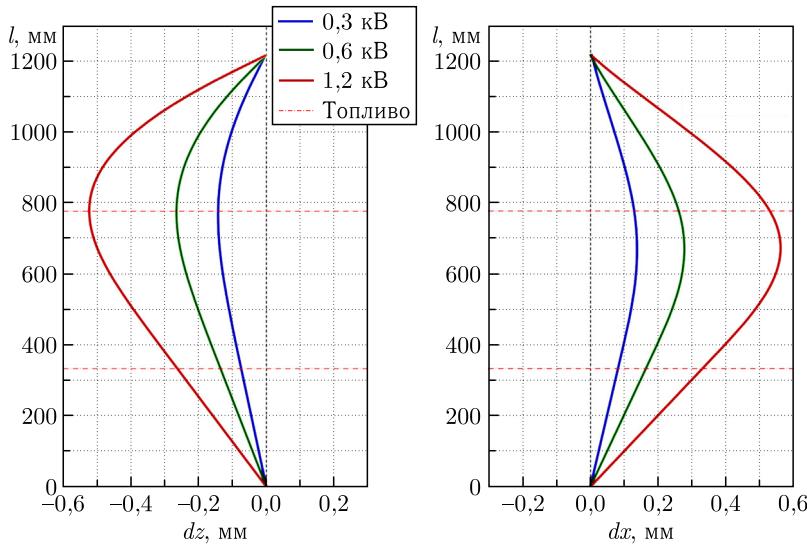


Рис. 7. Стационарная деформация стенки ТВС: dz — направление вектора градиента энерговыделения (от центра к периферии), dx — направление, перпендикулярное вектору градиента энерговыделения

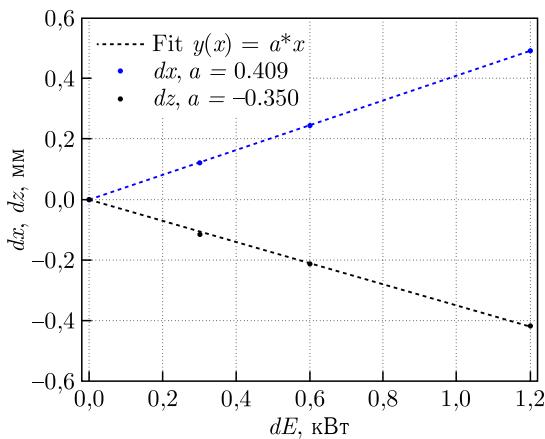


Рис. 8. Зависимость среднего смещения топлива в ТВС от величины градиента энерговыделения: dz — направление вектора градиента энерговыделения (от центра к периферии), dx — направление, перпендикулярное вектору градиента энерговыделения

смещения ТВС в направлении градиента энерговыделения от времени приведена на рис. 9.

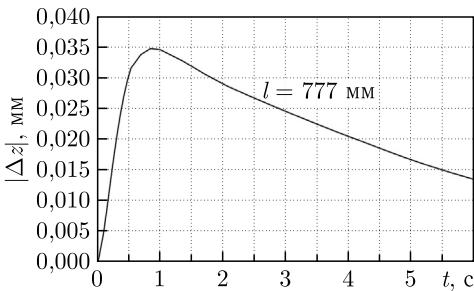


Рис. 9. Зависимость изменения по-перечного смещения ТВС в направлении градиента энерговыделе-ния от времени для координаты $l = 777$ мм при единичном импуль-се мощностью 1 МДж

РАСЧЕТ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Коэффициент передачи для изгиба ТВС был получен с помощью двух расчетов реактивности методом Монте-Карло в полной геометрии активной зоны ИБР-2М: для мощности 1 и 2 МВт. Смещение топлива задавалось под фиксированным углом к вектору градиента энерговыделения $40,5^\circ$ на величину, пропорциональную градиенту (рис. 4). Полученный коэффициент передачи равен $\sim 4 \beta_i/\text{МВт}$.

На рис. 10 показана рассчитанная положительная компонента быстрой МОС. Эффект ТВС, которому приписывается вторая компонента в трех-экспоненциальном представлении, не описывается экспоненциальной зависи-мостью.

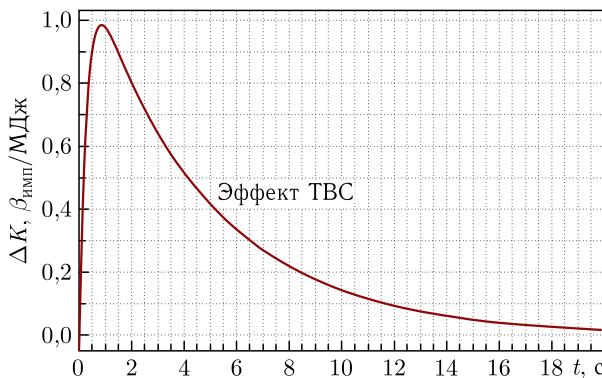


Рис. 10. Изменение реактивности после одиночного импульса 1 МДж вследствие изгиба ТВС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трехэкспоненциальная модель динамики не соответствует реальным физическим процессам в активной зоне реактора. Модель, основанная на прямом расчете нейтронно-физических, теплогидравлических и термоупру-

гих процессов, позволит точнее исследовать динамику действующих пульсирующих реакторов, а также проектировать новые источники нейтронов.

Поскольку изгиб ТВС в ИБР-2М изменяет реактивность и оказывает негативное влияние на динамику реактора, предлагается отказаться от использования тепловыделяющих сборок в будущем источнике нейтронов и перейти на потвэльную компоновку активной зоны. В случае отсутствия такой технологической возможности необходимо применение специальных мер по уменьшению изгиба ТВС (например, с помощью профилирования потока теплоносителя [7]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарченко Е. А., Пепельышев 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.
2. Шабалин Е. П., Анцупов Н. П., Злоказов В. Б., Мельников В. Н., Пепельышев Ю. Н., Попов А. К., Рогов А. Д. Импульсная характеристика обратной связи в ИБР-2 // АЭ. 1991. Т. 70, вып. 5. С. 326–328.
3. Попов А. К. Частотная и импульсная переходная характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-90-203. Дубна, 1990.
4. Пепельышев Ю. Н., Сумхуу Д. Динамика реактора ИБР-2М при частоте повторения импульсов мощности 10 Гц. Препринт ОИЯИ Р13-2022-52. Дубна, 2022.
5. Пепельышев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д., Рогов А. Д. О пределах колебательной неустойчивости импульсных реакторов периодического действия // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2020. Вып. 5. С. 4–18.
6. Шабалин Е. П., Аксёнов В. Л., Комышев Г. Г., Рогов А. Д. Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния // АЭ. 2018. Т. 124, Вып. 6. С. 309–314.
7. Верхоглядов А. Е., Кушнир И. В. Численные расчеты поперечного изгиба ТВС в реакторе ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2025-19. Дубна, 2025.

Получено 7 октября 2025 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 24.10.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,88. Тираж 110 экз. Заказ № 61196.

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

E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/