

P13-2025-19

А. Е. Верхоглядов *, И. В. Кушнир

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ПОПЕРЕЧНОГО
ИЗГИБА **ТВС** В РЕАКТОРЕ **ИБР-2**

Направлено в журнал «Инженерная физика»

* E-mail: verhoglyadov_al@mail.ru

Численные расчеты поперечного изгиба ТВС в реакторе ИБР-2

Изучается явление изгиба тепловыделяющих сборок (ТВС) под действием неравномерного распределения температуры в активной зоне импульсного реактора периодического действия. Проведены численные расчеты поперечной деформации ТВС ИБР-2 в полной геометрии с учетом потока теплоносителя. Найден форма изгиба, смещение топливных таблеток и временная зависимость деформации при импульсном энерговыделении. Поскольку изгиб ТВС меняет реактивность и оказывает негативное влияние на динамику реактора, предложен возможный способ уменьшения величины изгиба с помощью профилирования потока теплоносителя. Результаты могут быть использованы при проектировании нового источника нейтронов.

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

Numerical Calculations of Fuel Assemblies Bending in the IBR-2 Reactor

The work is dedicated to study of bending of fuel assemblies (FA) under the non-uniform temperature distribution in the core of a periodic pulsed reactor. Numerical calculations of the transverse deformation of the IBR-2 fuel assembly in full geometry were carried out taking into account the coolant flow. The shape of the bend, the displacement of fuel pellets and the time dependence of deformation after pulsed energy release were found. Since the bending of the FA changes the reactivity and has a negative effect on the reactor dynamics, a possible method for reducing the bending value is proposed using coolant flow profiling. The results can be used in the design of a new neutron source.

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

ВВЕДЕНИЕ

Импульсные реакторы периодического действия — это исследовательские высокопоточные источники нейтронов, производящие короткие мощные импульсы нейтронов с частотой несколько герц. Принцип их действия основан на использовании механического модулятора реактивности, который несколько раз в секунду выводит активную зону реактора в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам. Действующий в настоящее время реактор ИБР-2 в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) имеет среднюю мощность 2 МВт и плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей порядка $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Импульсный режим работы приводит к особенностям динамики, не характерным для динамики стационарных реакторов. В частности, нестационарные термоупругие деформации активной зоны после импульса вносят добавочную реактивность к моменту следующего импульса, что порождает обратную связь. Поскольку обратная связь может приводить к неустойчивой динамике, требуются детальное изучение соответствующих физических процессов и поиск возможных решений проблемы. Механизм обратной связи представляется следующим образом. При работе реактора имеется неравномерность энерговыделения в направлении от центра к периферии активной зоны, что приводит к неравномерному нагреву стенок тепловыводящих сборок (ТВС). Способ закрепления ТВС в активной зоне таков, что термоупругие деформации (изгибы) приводят к смещению топлива к центру зоны [1]. Это увеличивает коэффициент размножения.

Тепловыделяющая сборка реактора ИБР-2 — достаточно сложная конструкция для проведения точных аналитических расчетов температур и деформаций. Поток теплоносителя внутри ТВС также имеет сложную конфигурацию и оказывает значительное влияние на процесс теплопередачи. Поэтому теоретические оценки должны быть сопоставлены с данными численных расчетов в полной геометрии. В этой работе проводятся расчеты температур и деформаций ТВС методом конечных элементов с учетом достаточно точной геометрии конструкции, градиента энерговыделения и потока теплоносителя.

В первом разделе описываются параметры и условия расчетов, общие для всех задач, решаемых в работе. Во втором разделе изучается вопрос о способе вычисления смещения топлива при изгибе ТВС. Показано, что на полной мощности реактора достаточно рассчитать температуру и деформацию только стенки ТВС. В третьем разделе вычисляется временная зависимость деформации ТВС после импульса мощности 1 МДж. Показано,

что временная и координатная части решения слабо связаны, т.е. процесс изгиба ТВС можно считать квазистатическим. В четвертом разделе описан один из способов аналитического расчета деформации ТВС, проводится сравнение с численным расчетом. Далее, в пятом разделе предлагается изменить конструкцию ТВС с целью выравнивания температуры. Расчеты показывают, что профилирование потока внутри ТВС позволяет заметно снизить амплитуду изгиба.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Тепловыделяющая сборка реактора ИБР-2 представляет собой стальную трубу длиной 1245 мм, толщиной стенки 0,4 мм и сечением в форме шестигранника (рис. 1). На концах ТВС имеются цанговые лепестки, предназначенные для вертикального закрепления ТВС в активной зоне и обеспечения дистанции ~ 1 мм между соседними сборками. Внутри ТВС установлены семь тепловыделяющих элементов (твэлов) и шесть вытеснителей. Твэлы приварены верхними концами к опорной решетке. Нижние концы твэлов свободны. На внешней поверхности твэла навита дистанцирующая проволока толщиной 0,4 мм. Твэл состоит из круглой стальной трубки диаметром 8,6 мм и толщиной стенки 0,45 мм, заваренной с обоих концов (рис. 2). Внутри твэла расположен столб топливных таблеток высотой 444 мм, металлические втулки и газовая полость с поджимающей пружиной. Теплоноситель в виде жидкого натрия подается снизу и протекает как внутри ТВС, так и снаружи.

Тепловая энергия выделяется в топливных таблетках, причем имеется неравномерность энерговыделения как по высоте твэлов (рис. 3), так и

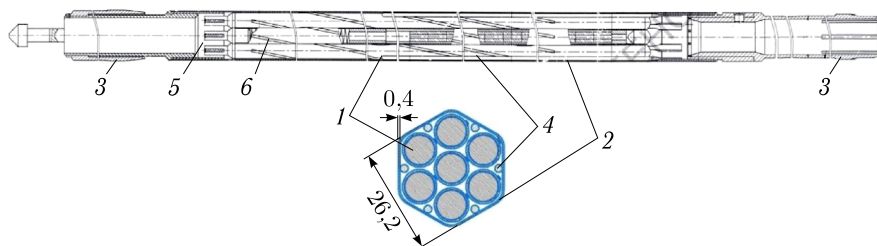


Рис. 1. Эскиз ТВС в продольном (сверху) и поперечном (снизу) разрезе: 1 — твэл; 2 — стенка ТВС; 3 — цанговые лепестки; 4 — вытеснитель; 5 — опорная решетка; 6 — дистанцирующая проволока

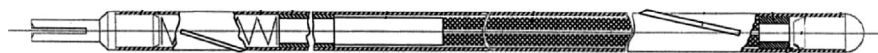


Рис. 2. Эскиз твэла в продольном разрезе

между отдельными твэлами внутри ТВС. Неравномерное распределение температуры приводит к деформации отдельных элементов конструкции. Задача состоит в нахождении поперечного смещения топливных таблеток относительно недеформированного состояния. В зависимости от вида энерговыделения — стационарного или импульсного — решается задача либо стационарной, либо нестационарной деформации. Решение находится в два этапа: сначала вычисляется распределение температуры по всему объему ТВС, а затем по известной температуре вычисляется деформация всех элементов ТВС. Такое последовательное решение задач теплогидравлики и термоупругости продиктовано сложностью численных расчетов и ограничениями вычислительной мощности. Задача термоупругости решается только для стальных элементов конструкции, поскольку жесткость натрия, гелия и столба таблеток пренебрежимо мала.

Расчеты проводятся методом конечных элементов. Расчетная модель (рис. 4) учитывает основные элементы и размеры ТВС. Столб топливных таблеток представлен в виде однородного цилиндра, расположенного симметрично по центру твэла. Зазор между топливом и стенкой твэла

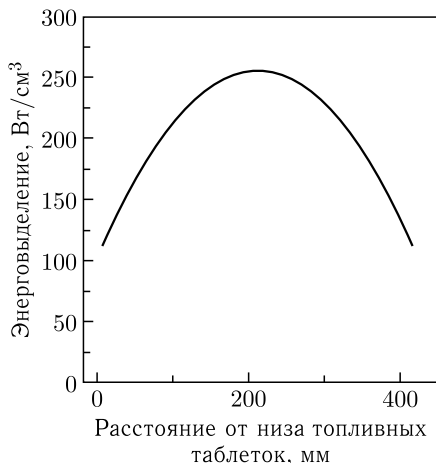


Рис. 3. Распределение энерговыделения вдоль оси центрального твэла при стационарном энерговыделении

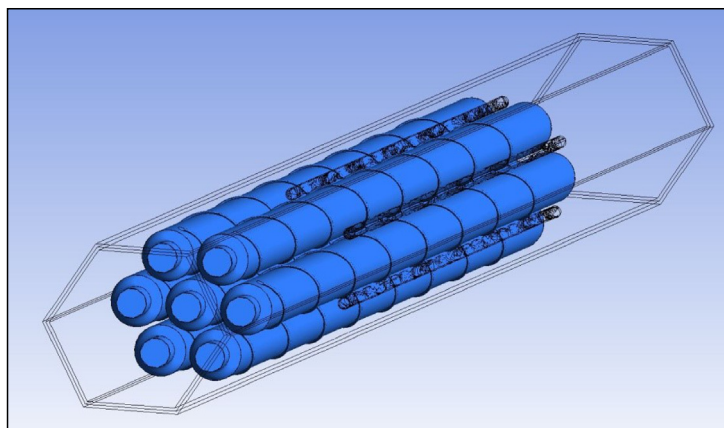


Рис. 4. Геометрия расчетной модели МКЭ

заполнен гелием. Пространство между твэлами и стенкой ТВС, а также слой 0,5 мм снаружи ТВС заполнены жидким натрием.

Граничные условия для задачи теплогидравлики состоят в задании скорости и температуры натрия на входе в ТВС (нижняя поверхность расчетной области), а также температуры или теплового потока на границе между соседними ТВС (боковая поверхность расчетной области). Начальным условием для задачи теплогидравлики является равенство температур всех элементов расчету температуре натрия на входе в ТВС. Граничные условия для задачи термоупругости состоят в жестком закреплении верхних торцов твэлов относительно ближайших элементов стенки ТВС и закреплении концов ТВС. Нижний конец ТВС имеет шарнирное закрепление, верхний — шарнирное закрепление с возможностью перемещения вдоль оси. Вращение вокруг оси ТВС исключено. Начальные условия для задачи термоупругости состоят в отсутствии деформации при равенстве температуры всех элементов температуре натрия на входе в ТВС.

Параметры расчета соответствуют штатным условиям работы реактора ИБР-2 на средней мощности 2 МВт при расходе натрия через активную зону $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ [2]:

- материал стальных элементов ТВС — плотность 7854 кг/м^3 , теплоемкость $538 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, теплопроводность $18,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, модуль Юнга 200 ГПа , коэффициент Пуассона $0,3$, температурный коэффициент линейного расширения $17,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$;
- материал топлива твэлов — плотность 10330 кг/м^3 , теплоемкость $322 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, теплопроводность $4,04 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$;
- гелий — плотность $0,178 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $5193 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, теплопроводность $0,32 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$;
- натрий — плотность 876 кг/м^3 , теплоемкость $1305 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, теплопроводность $76,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, вязкость $3,96 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$;
- скорость потока натрия на входе внутри ТВС — $0,695 \text{ м/с}$;
- скорость потока натрия на входе снаружи ТВС — $0,435 \text{ м/с}$;
- температура натрия на входе — 566 К .

2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТВС

Для изучения вопроса о перемещениях топлива внутри ТВС был проведен расчет статической деформации металлических элементов модели в случае одинакового энерговыделения в твэлах. Теплогидравлический расчет проводился в полной геометрии ТВС, а в расчете деформаций были исключены все неметаллические элементы, а также вытеснители и дистанцирующая проволока. Это сделано для намеренного увеличения зазоров и проверки возможных перемещений твэлов. Тепловой поток на боковой границе расчетной области полагался равным нулю. Как видно из рис. 5, 6, периферийные твэлы смещаются к стенке ТВС вплоть до полного прилегания в нижней части топливного столба. При этом в сечении оболочки твэла остается ненулевой изгибающий момент. Центральный твэл не испытывает заметных смещений вследствие симметрии задачи.

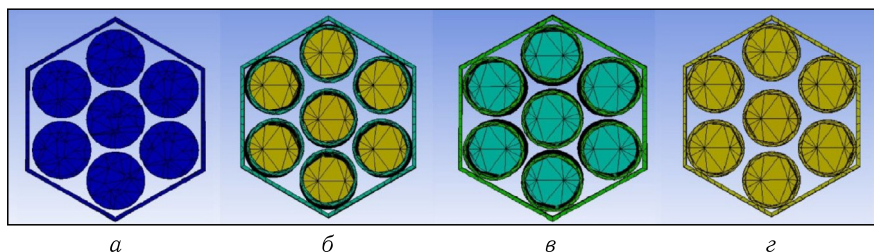


Рис. 5. Поперечные деформации твэлов на разной высоте от низа ТВС: а) верхние концы твэлов (1125 мм); б) верхняя часть столба таблеток (732 мм); в) середина столба таблеток (574 мм); г) нижняя часть столба таблеток (328 мм)

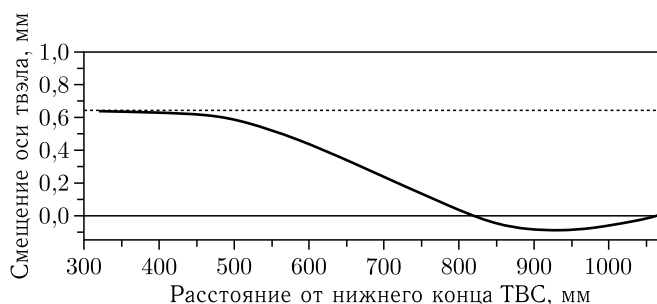


Рис. 6. График поперечной деформации для периферийного твэла без дистанцирующей проволоки. Пунктирная линия — максимальная свобода перемещения (зазор)

Можно сделать вывод о том, что вследствие малых зазоров и наличия постоянного градиента температур внутри ТВС основная часть твэлов плотно связана со стенкой ТВС и перемещается с ней как одно целое.

Далее были проведены аналогичные расчеты с разным энерговыделением по твэлам (рис. 7), что соответствует максимальному градиенту

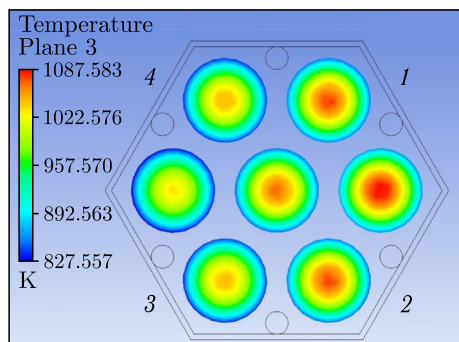


Рис. 7. Распределение температуры в сечении твэлов при наличии градиента энерговыделения в активной зоне

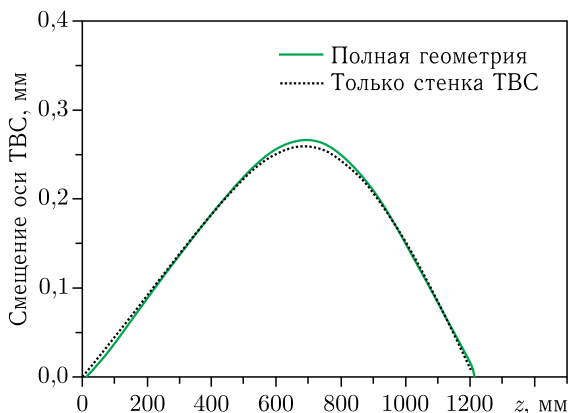


Рис. 8. Поперечная статическая деформация ТВС. Сравнение способов расчета

энерговыведения в активной зоне — 18 % между соседними ТВС. Тепловой поток на боковой границе расчетной области полагался равным нулю.

Поперечная деформация стенки ТВС была найдена двумя способами: только с учетом стенки ТВС и с учетом всех металлических элементов ТВС. Как видно из рис. 8, результаты практически не различаются.

Это означает, что при исследовании поперечных изгибов ТВС и их влияния на динамику реактора достаточно рассчитать температуру и деформацию только стенки ТВС.

3. РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТВС

Для изучения вопроса о реакции поперечного смещения топливных таблеток на единичный импульс мощности был проведен расчет нестационарной деформации ТВС. Теплогидравлический расчет проводился в полной геометрии ТВС, а в расчете деформаций учитывалась только стенка ТВС. Импульс энерговыведения в топливных таблетках соответствовал энергии импульса реактора 1 МДж (средний нагрев топлива на 45 К). Градиент энерговыведения по твэлам и граничные условия соответствовали предыдущему расчету (см. рис. 7). Полученное решение в виде зависимости поперечного смещения стенки ТВС от координаты вдоль оси и времени $y(z, t)$ показано на рис. 9, 10.

Видно, что форма изгиба ТВС (положение максимума на рис. 10) в первые доли секунды после импульса несколько отличается от формы изгиба в последующие моменты времени. Тем не менее с достаточной точностью процесс нестационарного изгиба можно считать квазистатическим, что обусловлено высокой скоростью потока натрия внутри ТВС и быстрым (по сравнению с охлаждением твэлов) переносом тепла вдоль

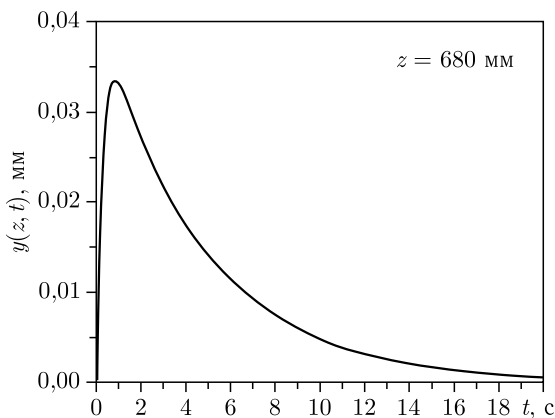


Рис. 9. Временная зависимость поперечного смещения ТВС ($z = 680$ мм)

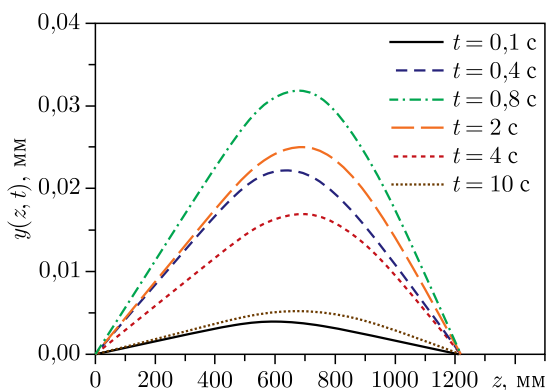


Рис. 10. Координатная зависимость поперечного смещения ТВС

ТВС. Математически это означает возможность представления решения нестационарной задачи в факторизованном виде:

$$y(z, t) = A(z)B(t),$$

что значительно упрощает дальнейшие расчеты.

4. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИЗГИБА ТВС

Для упрощения расчетов и качественного понимания процессов можно найти форму изгиба ТВС аналитическим способом. Для этого достаточно знать перепад температур на боковых сторонах $\theta(z)$, поперечный размер ТВС d и ее длину L . Уравнение стационарной поперечной деформации

в данном случае имеет вид [3]

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(EJ \frac{d^2 y(z)}{dz^2} + EJ \frac{\alpha_T \theta(z)}{d} \right) = 0, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга; J — геометрический момент инерции; $y(z)$ — поперечное смещение оси ТВС; α_T — температурный коэффициент линейного расширения. В случае однородного стержня ($E, J = \text{const}$) уравнение (1) упрощается:

$$y'''' + \gamma \theta'' = 0,$$

где $\gamma = \alpha_T/d$, штрих означает производную по координате. Граничные условия при шарнирном закреплении ($y(0) = y(L) = y(0)'' = y(L)'' = 0$) приводят к решению в следующем виде:

$$\begin{aligned} y(z) &= \sum_k a_k y_k(z), \\ y_k(z) &= \frac{2}{L} \sin \left(\frac{\pi k z}{L} \right), \\ a_k &= -\frac{\tau_k \gamma L^4}{(\pi k)^4}, \\ \tau_k &= \int_0^L \theta''(z) y_k(z) dz. \end{aligned}$$

Функция $\theta(z)$ была получена из теплогидравлического расчета через разность средних температур боковых граней ТВС $T_{\text{hot}}(z)$ и $T_{\text{cold}}(z)$ (рис. 11). Температура горячей стороны ТВС $T_{\text{hot}}(z)$ — это средняя температура стенки ТВС граней 1 и 2 в сечении z (см. рис. 7). Температура холодной стороны ТВС $T_{\text{cold}}(z)$ — это средняя температура стенки ТВС граней 3 и 4 соответственно. Поскольку смысл функции $\theta(z)$ в уравнении (1) заключается в разности температур на крайних точках сечения

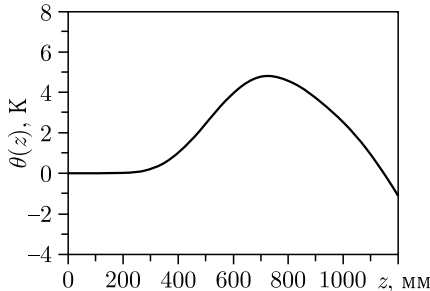


Рис. 11. Перепад температур на боковых сторонах ТВС

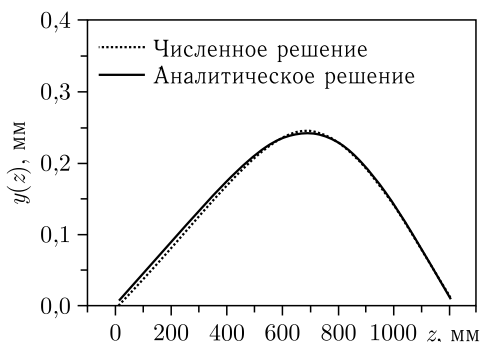


Рис. 12. Результаты численного и аналитического решения для формы изгиба ТВС

ТВС, то для корректного расчета вводится поправочный коэффициент $K = 1,626$, который учитывает процедуру усреднения температуры по граням. Таким образом,

$$\theta(z) = K(T_{\text{hot}}(z) - T_{\text{cold}}(z)).$$

Полученное аналитическое решение с использованием первых четырех собственных функций $y_k(z)$ представлено на рис. 12.

Видно, что изгиб ТВС может быть вычислен аналитически с высокой точностью. Для этого достаточно результатов теплогидравлического расчета, а именно усредненной разности температур на боковых гранях ТВС.

5. РАСЧЕТЫ ДЕФОРМАЦИИ ТВС С ИЗМЕНЕННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ

Для изучения вопроса о выравнивании температуры боковых граней ТВС были проведены два расчета статической деформации с измененной геометрией. Со стороны «горячих» граней 1 и 2 были удалены два вытеснителя (рис. 13). Для более корректного решения этой задачи требовалось изменить граничные условия в расчете теплогидравлики. Поскольку энерговыделение в соседних ТВС может различаться на 18%, то вместо нулевого теплового потока на боковых границах расчетной области была задана фиксированная температура, распределение которой имитирует соседние ТВС с аналогичной конструкцией, но с разным энерговыделением.

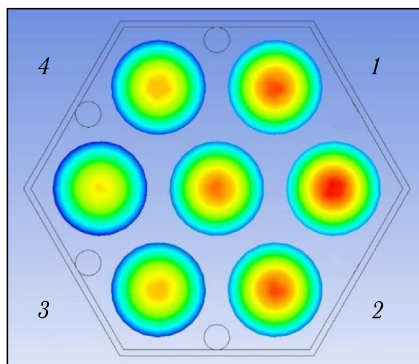


Рис. 13. Измененная геометрия ТВС

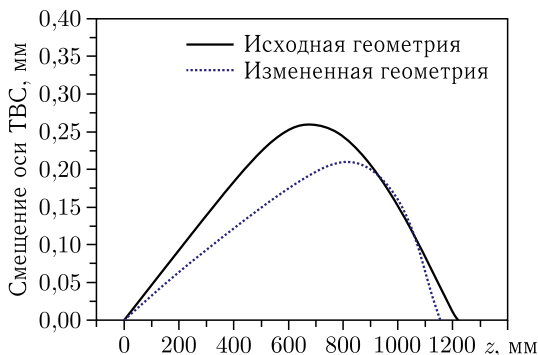


Рис. 14. Поперечная статическая деформация ТВС при разной конструкции вытеснителей

Остальные условия соответствовали предыдущему расчету статической деформации (см. рис. 7, 8).

В результате перераспределения потока натрия в сечении ТВС средние температуры боковых граней становятся ближе друг к другу, а изгиб уменьшается (рис. 14).

Видно, что выбор конструкции ТВС позволяет корректировать величину изгиба. Для точного решения задачи теплогидравлики в данном случае требуется задание полной геометрии активной зоны, поскольку влияние соседних ТВС на распределение температуры оказывается существенным. Физический смысл профилирования потока натрия внутри ТВС состоит в уменьшении градиента температур внутри ТВС и его увеличении снаружи ТВС. Общее распределение температуры по активной зоне при этом не меняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальное изучение поперечного изгиба ТВС ИБР-2 с использованием численных расчетов в полной геометрии привело к следующим результатам:

- обнаружен тесный механический контакт твэлов со стенкой ТВС, что дает основание для упрощенного расчета поперечного смещения топливных таблеток;
- получена временная зависимость амплитуды изгиба после одиночного импульса мощности;
- получена форма изгиба ТВС после одиночного импульса мощности (показано, что она слабо зависит от временной части решения);
- форма изгиба получена аналитическим методом по известному распределению температуры;
- показана возможность уменьшения изгиба путем профилирования потока натрия внутри ТВС.

Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего изучения динамики пульсирующих реакторов и проектирования нового источника нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шабалин Е. П.* Три особенности динамики пульсирующего реактора // АЭ. 2022. Т. 133, вып. 2. С. 76–81.
2. *Kirillov P. L.* Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: Tutorial for Students of Specialty “Nuclear Power Plants”. Obninsk, 2006.
3. *Верхоглядов А. Е.* Уравнение плоских вынужденных поперечных колебаний стержня под действием температуры. Численно-аналитическое решение // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 657–668.

Получено 29 апреля 2025 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 26.05.2025.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,84. Тираж 110 экз. Заказ № 61108.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/