

P3-2025-7

А. Е. Верхоглядов, В. Н. Верхоглядова,
Я. А. Вдовин, И. В. Кушнир

РАСЧЕТ РЕАКТИВНОСТИ
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА С УЧЕТОМ
ТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ТОПЛИВА

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

Расчет реактивности пульсирующего реактора
с учетом термоупругих деформаций топлива

Изучается изменение реактивности импульсного реактора периодического действия ИБР-2 вследствие температурного расширения топлива, вызванного одиночным импульсом мощности. В принятой модели температура находится решением системы двумерных нестационарных уравнений теплопроводности. Деформация топливных таблеток вычисляется в 3D-геометрии методом конечных элементов. Нейтронно-физические расчеты проводились методом Монте-Карло в полной геометрии реактора. Показано, что реактивность реактора имеет сложную зависимость от времени. Полученные результаты будут использованы для точных расчетов динамики импульсного реактора.

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

Calculation of the Reactivity of a Pulsating Reactor Taking
into Account the Thermoelastic Deformation of the Fuel

The paper studies the change of the reactivity of the pulsed reactor IBR-2 due to the thermal expansion of the fuel caused by a single power pulse. In the accepted model, the temperature is found by solving a system of two-dimensional nonstationary heat equations. The deformation of fuel pellets is calculated in 3D geometry using the finite element method. Critical calculations were performed using the Monte Carlo method in the full geometry of the reactor. It is shown that the reactivity of the reactor has a complex dependence on time. The obtained results will be used for accurate calculations of the dynamics of a pulsed reactor.

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

ВВЕДЕНИЕ

За время длительной эксплуатации (с 1980-х гг. по настоящее время) импульсных реакторов периодического действия (пульсирующих реакторов) ИБР-2 и ИБР-2М была обнаружена одна особенность в работе этих уникальных установок. Реактор демонстрирует колебания энергии импульсов, не поддающиеся управлению органами регулирования [1, 2]. Природа колебательной неустойчивости пока не изучена полностью. В настоящее время выделяют три основных фактора, влияющих на неустойчивость: аксиальное расширение столба топливных таблеток, изгиб тепловыделяющих сборок (ТВС) и поперечные деформации тепловыделяющих элементов (ТВЭлов). Процесс удлинения топливных таблеток в ТВЭлах под действием температуры и его влияние на динамику реактора уже изучались ранее [3–5]. В предыдущих работах с целью упрощения столб таблеток в ТВэле рассматривался как сплошной однородный цилиндр с равномерным распределением температуры по радиусу. Эти допущения могут приводить к неточностям в расчете реактивности, особенно в первые 1–2 секунды после импульса мощности. На современном этапе изучения неустойчивой работы реактора ИБР-2М возникла задача получения зависимости изменения реактивности от времени с учетом точной конструкции ТВЭла и распределения температуры во времени и в пространстве.

В данной работе изучается температурный эффект реактивности установки ИБР-2М после одиночного импульса мощности. Сначала по известным данным были рассчитаны температуры элементов ТВЭла, характерные для работы реактора на постоянной мощности. Далее, для получения пространственно-временного распределения температуры в топливной таблетке после импульса решалась система нестационарных уравнений теплопроводности. С использованием полученного распределения температуры вычислялась деформация таблетки в осевом направлении. Применялись метод конечных элементов (МКЭ) и анализ уравнений термоупругости. По найденной деформации, а также с использованием результатов критических расчетов методом Монте-Карло была построена искомая зависимость изменения реактивности от времени. Несмотря на то, что расчеты распределения температуры были выполнены в одномерной геометрии, результаты легко могут быть обобщены на трехмерный случай. Показано, что для дальнейших расчетов мощностной обратной связи с учетом распределения энерговыделения вдоль оси ТВЭлов достаточно знать лишь температуру в центральной части ТВЭлов.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТКАХ

Для определения теплофизических параметров материалов твэла необходимо знать их средние температуры при работе реактора. С использованием известных данных по плотности, теплопроводности и теплоемкости материалов активной зоны ИБР-2М [6, 7], а также по температуре теплоносителя на входе и выходе активной зоны для средней мощности 2 МВт были найдены средние температуры топливных таблеток, гелиевого подслоя и стальной оболочки твэла путем решения стационарного уравнения теплопроводности.

Распределение температуры $T(r, t)$ в топливной таблетке после одиночного импульса мощности вычислялось интегрированием по радиусу r и времени t системы нестационарных уравнений теплопроводности:

$$\begin{cases} \dot{T}_1(r, t) = a_1 \Delta_r T_1(r, t), \\ \dot{T}_2(r, t) = a_2 \Delta_r T_2(r, t), \\ \dot{T}_3(r, t) = a_3 \Delta_r T_3(r, t), \\ \dot{T}_4(r, t) = a_4 \Delta_r T_4(r, t), \end{cases} \quad (1)$$

где

$a_1 = a_3 = a_{\text{He}} = 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ — температуропроводность гелия;

$a_2 = a_{\text{PuO}_2} = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — температуропроводность топлива;

$a_4 = a_{\text{steel}} = 4,324 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — температуропроводность оболочки твэла.

Функции $T_i(r, t)$ — температура в соответствующих областях твэла ($i = 1, 2, 3, 4$):

$$T(r, t) = \begin{cases} T_1(r, t), & 0 \leq r \leq r_1, \\ T_2(r, t), & r_1 < r \leq r_2, \\ T_3(r, t), & r_2 < r \leq r_3, \\ T_4(r, t), & r_3 < r \leq r_4, \end{cases}$$

где

$r_1 = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ — радиус центрального отверстия;

$r_2 = 3,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — радиус топливной таблетки;

$r_3 = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — внутренний радиус оболочки твэла;

$r_4 = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ — внешний радиус оболочки твэла.

Граничные условия для функций $T_i(r, t)$ возникают из требований непрерывности функции температуры:

$$T_1(r_1) = T_2(r_1), \quad T_2(r_2) = T_3(r_2), \quad T_3(r_3) = T_4(r_3),$$

из условия равенства на границах тепловых потоков:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=r_1} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=r_1}, \quad \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=r_2} = \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=r_2},$$

$$\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=r_3} = \lambda_4 \left. \frac{\partial T_4}{\partial r} \right|_{r=r_3},$$

из требований симметрии задачи $\left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$ и постоянного коэффициента

теплоотдачи на внешней границе $\lambda_4 \left. \frac{\partial T_4}{\partial r} \right|_{r=r_4} = -\alpha T_4|_{r=r_4}$.

Значения использованных выше констант:

$\lambda_1 = \lambda_3 = 0,25$ Вт/(м·К) — теплопроводность гелия;

$\lambda_2 = 4,4$ Вт/(м·К) — теплопроводность топлива;

$\lambda_4 = 18,25$ Вт/(м·К) — теплопроводность стали;

$\alpha = 1,87 \cdot 10^5$ Вт/(м·К) — коэффициент теплоотдачи к жидкому теплоносителю (натрию).

Геометрические размеры r_i , а также параметры материалов (a_i , α и λ_i) считаются постоянными во времени и не зависят от температуры. Их значения взяты для температур, соответствующих работе реактора на мощности 2 МВт.

При импульсе мощности возникает равномерный нагрев топлива на температуру T_0 : $T_2(r, t = 0) = T_0$. Температура остальных элементов в начальный момент времени полагается равной нулю: $T_1(r, t = 0) = T_3(r, t = 0) = T_4(r, t = 0) = 0$.

Система уравнений (1) интегрировалась численно явным методом, временной шаг $\Delta t = 5 \cdot 10^{-9}$ с, пространственный шаг $\Delta r = 4 \cdot 10^{-5}$ м. Также получено аналитическое решение:

$$T(r, t) = T_0 \sum_{k=1}^{\infty} C_k A_k(r) e^{-\omega_k^2 t}, \quad (2)$$

$$A_k(r) = \sum_{i=1}^4 \left[c_{i0} J_0 \left(\frac{\omega_k r}{\sqrt{a_i}} \right) + c_{i1} N_0 \left(\frac{\omega_k r}{\sqrt{a_i}} \right) \right],$$

где $J_0(x)$ и $N_0(x)$ — функции Бесселя первого и второго рода соответственно, а коэффициенты C_k , c_{ij} , a_i и ω_k зависят только от геометрических размеров и свойств материалов. Из (2) видно, что от положения таблетки в топливном столбе (координаты вдоль оси твэла) зависит только параметр T_0 — нагрев таблетки за импульс. Это означает, что общий вид (форма) распределения температуры в таблетках $T(r, t)$ определяется лишь геометрией и параметрами материалов (рис. 1).

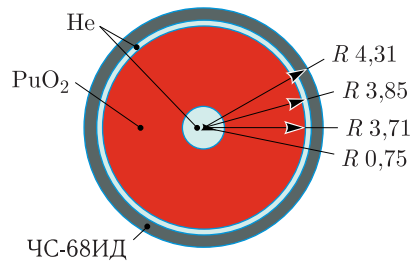


Рис. 1. Эскиз геометрии твэла

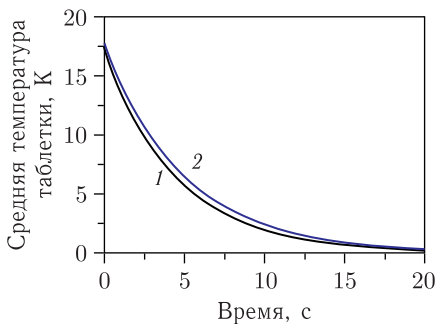


Рис. 2. Средняя температура в топливной таблетке в зависимости от времени при $T_0 = 18$ К: аналитический (1) и численный (2) расчет

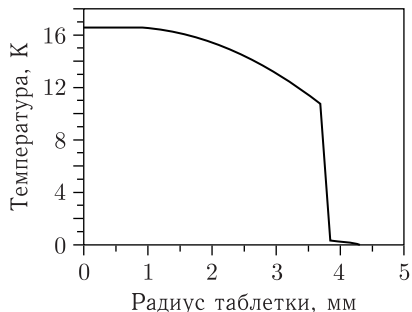


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу таблетки через 2 с после импульса при $T_0 = 18$ К

Средняя температура таблетки рассчитана в интервале от 0 до 20 с после одиночного импульса (рис. 2). Также вычислено распределение температуры $T(r, t)$ внутри таблетки (рис. 3).

ДЕФОРМАЦИЯ ТОПЛИВНОЙ ТАБЛЕТКИ

Анализ уравнений термоупругости для задачи квазистатической деформации сплошного цилиндра при неравномерном нагреве [8] показал, что и постановка математической задачи, и решение уравнений для реальной геометрии топливной таблетки представляют довольно трудоемкий процесс. В связи с этим расчеты максимального увеличения высоты топливной таблетки проводились численно методом конечных элементов (рис. 4).

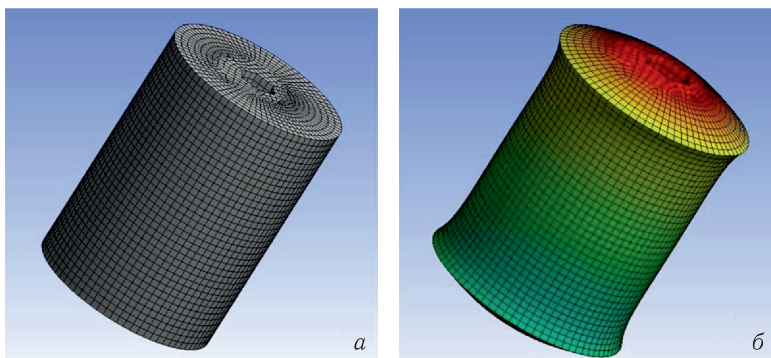


Рис. 4. 3D-модель топливной таблетки в программе МКЭ (а) и визуализация деформированного состояния (б). Для наглядности деформация увеличена

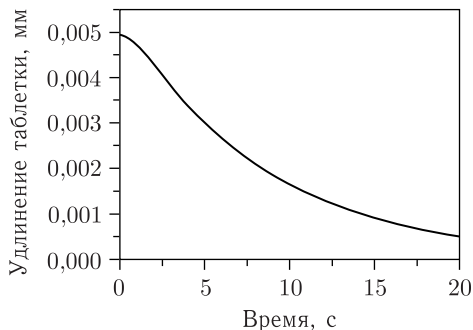


Рис. 5. Удлинение топливной таблетки в зависимости от времени после одиночного импульса 1 МДж

По известному распределению температуры $T(r, t)$ был рассчитан максимальный размер таблетки в осевом направлении в разные моменты времени t в пересчете на энергию импульса 1 МДж (рис. 5).

ИЗМЕНЕНИЕ РЕАКТИВНОСТИ

Уравнения термоупругости [8], теплопроводности (1) и их решения (2) линейны по температуре. Из этого следует, что для вычисления удлинения столба таблеток нет необходимости рассчитывать распределение температуры вдоль оси твэла, достаточно знать лишь среднее по высоте значение начальной температуры T_0 . Усреднение по температуре происходит в результате суммирования деформаций отдельных таблеток. Это справедливо при постоянной температуре теплоносителя и коэффициенте теплоотдачи. Поскольку в активной зоне существует градиент энерговыделения, каждый твэл имеет свое значение T_0 и, соответственно, удлиняется пропорционально этому значению.

Изменение коэффициента размножения Δk_{eff} вычислялось методом Монте-Карло в полной геометрии активной зоны ИБР-2М (рис. 6). Сначала были найдены коэффициент размножения k_0 и энерговыделение в каждой ТВС и соответствующее удлинение топливного столба при импульсе мощности 1 МДж. После этого геометрия расчета была изменена: твэлы были удлинены на основании предыдущего расчета. Повторный расчет коэффициента размножения дал значение k_1 для дефор-

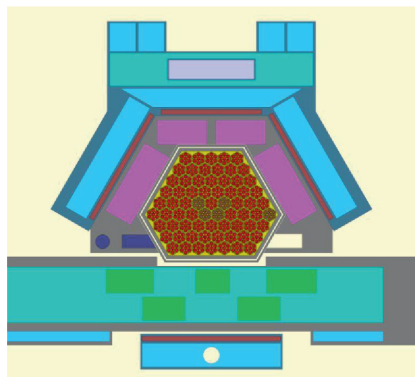


Рис. 6. Расчетная геометрия активной зоны реактора ИБР-2М

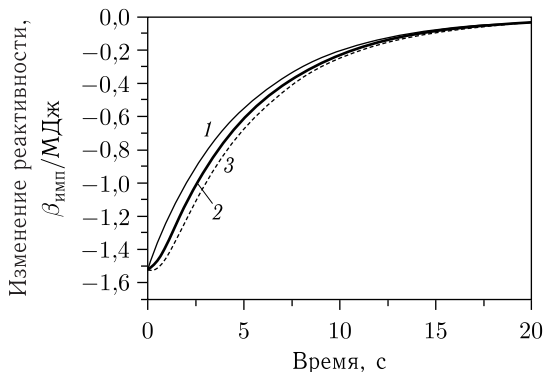


Рис. 7. Изменение реактивности после одиночного импульса вследствие увеличения высоты топливного столба, вычисленное по максимальной температуре топлива (1), по средней температуре топлива (3) и с учетом термоупругой деформации топлива (2), в зависимости от времени. $\beta_{\text{имп}} = 1,54 \cdot 10^{-4}$

мированного состояния твэлов. С использованием полученного в расчетах эффекта $\Delta k_{\text{эф}} = k_1 - k_0$ найдено изменение реактивности во времени после одиночного импульса (рис. 7). Статистическая ошибка в расчетах методом Монте-Карло составила 4%.

На рис. 7, кроме графика реактивности, рассчитанной с учетом деформации таблеток, приведены графики, построенные в предположении, что изменение высоты топливного столба прямо пропорционально его температуре. Видно, что расчет ни по максимальной температуре топлива, ни по средней температуре топлива не совпадает с точным расчетом, учитывающим деформацию таблеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования динамики импульсных реакторов на быстрых нейтронах и изучения физических причин неустойчивой работы реактора. Дальнейшие усилия по исследованию мощностной обратной связи реактора ИБР-2М должны быть направлены на расчеты температуры в полной геометрии ТВС с учетом потока натрия и распределения энерговыделения вдоль активной зоны. Также требуется уточнение параметров материалов и их зависимости от температуры и степени выгорания топлива. Дополнительные нейтронно-физические расчеты методом Монте-Карло позволят уточнить эффект реактивности с учетом деформации отдельных таблеток.

Благодарности. Авторы выражают благодарность докторам физико-математических наук Е. П. Шабалину и Е. Е. Перепелкину за консультации при создании этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шабалин Е. П.* О колебаниях мощности и пределе устойчивости импульсного реактора // АЭ. 1986. Т. 61, № 6. С. 401.
2. *Шабалин Е. П.* Три особенности динамики пульсирующего реактора // АЭ. 2022. Т. 133, № 2. С. 76–81.
3. *Шабалин Е. П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
4. *Шабалин Е. П., Рзянин М. В.* Динамика импульсов мощности в исследовательском реакторе с нептуниевым ядерным топливом // АЭ. 2018. Т. 124, № 4. С. 193–197.
5. *Шабалин Е. П., Рзянин М. В.* Анализ динамики импульса мощности реактора «Нептун»: сравнение моделей расчета. Препринт ОИЯИ РЗ-2020-13. Дубна, 2020.
6. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering / Ed. P. L. Kirilov. IzdAT, 2007.
7. *Головнин И. С.* Свойства диоксида плутония как ядерного топлива // АЭ. 2000. Т. 89, № 2. С. 117–128.
8. *Боли Б. А., Уэйнер Д.* Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964.

Получено 14 февраля 2025 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 06.03.2025.

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

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,54. Тираж 105 экз. Заказ № 61069.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/