

P3-2025-36

М. М. Подлесный¹, Е. П. Шабалин¹, А. А. Хассан¹

ДИНАМИЧЕСКИЙ ИЗГИБ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В РЕАКТОРАХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТИПА

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

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Динамический изгиб тепловыделяющих элементов
в реакторах пульсирующего типа

Показан и оценен эффект динамического изгиба, характерный для пульсирующих реакторов вследствие наличия периодических импульсов мощности и неравномерного нейтронного потока в активной зоне реактора. Построена модель теплопередачи в одиночном твэле, и рассмотрено нестационарное уравнение теплопроводности в изотропном приближении. Полученная функция распределения температуры по времени топливных таблеток и оболочки, которая задается в качестве входного параметра с коэффициентом, соответствующим градиенту энерговыделения, используется в математической модели твэла для расчета динамического поперечного изгиба оболочки. Обсуждаются результаты оценки динамического изгиба твэлов проектируемого реактора «Нептун».

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

Dynamic Bending of Fuel Rods in Pulsed Reactors

The work demonstrates and evaluates the dynamic bending effect which is typical for pulsed reactors due to the presence of periodic power pulses and non-uniform neutron flux in the reactor core. A model of heat transfer in a single fuel element is developed, and the non-stationary heat conductivity equation is considered in the isotropic approximation. The obtained function of the temperature distribution over time of fuel pellets and cladding, which is specified as an input parameter with a coefficient corresponding to the energy release gradient, is used in the mathematical model of the fuel element to calculate the dynamic bending of the cladding. The results of the assessment of the dynamic bending of fuel elements of the designed NEPTUNE reactor are discussed.

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

ВВЕДЕНИЕ

Пульсирующие реакторы, или «импульсные реакторы периодического действия», работают в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ уже более 60 лет: ИБР, ИБР + микротрон, ИБР-30 с инжектором, ИБР-2, ИБР-2М [1–3]. Сейчас идет проектирование будущего реактора «Нептун» с ядерным топливом на основе нептуния [4]. В реакторах этого типа цепная реакция деления развивается в периодически повторяющихся коротких импульсах с низким уровнем фоновой мощности. По этому признаку пульсирующие реакторы занимают промежуточное положение между реакторами постоянного действия и самогасящимися импульсными реакторами. Однако динамику процессов в пульсирующих реакторах нельзя назвать «промежуточной»: сочетая в себе черты «родственников», она имеет свои коренные особенности, еще недостаточно хорошо изученные.

Пульсирующие реакторы проявляют свойства, характерные для дискретных систем, так как уровень фона между импульсами весьма мал (10^{-4} – 10^{-5} от пикового значения в импульсе). Обычно применяемый в анализе динамических свойств таких реакторов подход с усреднением выделяемой энергии по времени не позволяет обнаружить быстротекающие процессы с характерными временами, меньше тепловой постоянной охлаждения реактора. В процессе работы над концептуальным проектом «Нептун» был обнаружен феномен динамического изгиба — особенность динамики пульсирующих реакторов, не проявляющая себя в реакторах другого типа, но играющая значительную роль в оценке устойчивой работы пульсирующих реакторов. Описывается подход к расчету данного эффекта для одной из концепций реактора «Нептун».

1. РАСЧЕТ ГРАДИЕНТОВ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ РЕАКТОРА «НЕПТУН»

Для исследовательских реакторов характерны компактные активные зоны и сравнительно толстые топливные стержни. Вследствие неравномерности нейтронного потока в активной зоне реактора имеется заметный градиент температуры в сердечнике твэла и его стальной оболочке в радиальном направлении к центру активной зоны. Следствием градиента температуры является изгиб таблеток и оболочки.

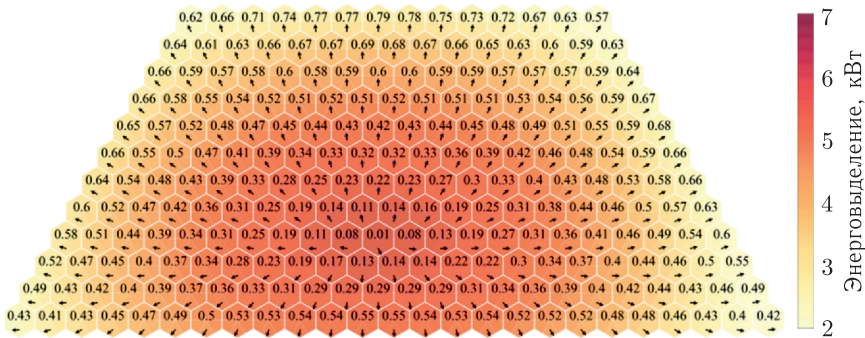


Рис. 1. Энерговыведение в твэлах для одной из концепций активных зон реактора «Нептун». Стрелками показано направление градиента энерговыведения, значения градиента энерговыведения указаны в кВт, цвет отражает энерговыведение в каждом твэле в 6 секторах

Для исследования феномена изгиба тепловыделяющих элементов выбрана одна из концепций топлива реактора «Нептун», рассмотренных в работе [5], а именно нитрид нептуния с заменой его в периферийном ряду около водяного замедлителя на смешанное топливо $NpN + UN$ с объемной долей урана 0,4 (40%-го обогащения). Для этого варианта проведен расчет энерговыведения с использованием программного обеспечения MCNP и SERPENT. Каждый твэл был поделен на 6 секторов по азимуту (60° на сектор) и на 40 частей по высоте. На рис. 1 показано распределение энерговыведения по твэлам в верхней половине активной зоны. По полученным значениям рассчитан градиент энерговыведения в каждом твэле (на рис. 1 показан стрелкой в сторону убывания удельного энерговыведения).

2. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ТВЭЛЕ

Температурное поле рассчитывалось как трехмерная задача теплопроводности. Граничные условия, которые рассматриваются в такой задаче, позволяют представить пространственное распределение температуры в виде $\alpha(z, \varphi)T(t, r)$, где $T(t, r)$ является решением одномерного уравнения теплопроводности, умноженным на коэффициент $\alpha(z, \varphi)$, пропорциональный энерговыведению в секторе. Решение в данном виде с требуемой точностью совпадает с численным решением трехмерной задачи, при этом расчет одномерной задачи выполняется на два порядка быстрее.

Временное распределение температурного поля в твэле для одномерного случая подразумевает его однородность по высоте и изотропность. В качестве оценки энерговыведения в импульсе было выбрано гауссово приближение, соответствующее нагреву сердечника за импульс на 10 К. Рассмотрено одномерное уравнение теплопроводности по радиусу в цилин-

рических координатах:

$$\frac{\partial T(t, r)}{\partial t} - a\Delta T(t, r) = f(t, r), \quad (1)$$

где $\Delta T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$, $f(t, r)$ — гауссова функция нагрева сердечника с $\sigma = 200$ мкс.

Диаметр таблеток взят $2R = 17,0$ мм, без отверстия по центру, толщина оболочки $d = r_2 - r_1 = 0,45$ мм. Поскольку объемная теплоемкость и температуропроводность натриевой прослойки между таблетками и оболочкой намного меньше оболочки, в данной задаче ей можно пренебречь. Температура рассматривается относительно температуры теплоносителя.

Граничные условия для рассматриваемой задачи:

1) условие изотропности пространства: $\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0;$

2) поток тепла на границе сердечника и оболочки одинаков:
 $\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=r_1} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=r_1};$

3) поток тепла на границе оболочки и жидкого натрия:
 $\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=r_2} = \alpha T_2(r_2).$

Задача решается в следующих приближениях:

- теплопроводности сердечника и оболочки равны: $\lambda_1 = \lambda_2 = 15$ Вт/(м × К);
- температуропроводности таблеток и оболочки равны: $a_1 = a_2 = 4,2 \times 10^{-6}$ м²/с;
- коэффициент теплоотдачи к Na: $\alpha = 5$ Вт/(см² · К).

Начальное условие: температура внутри сердечника и оболочки равна нулю (относительно температуры теплоносителя) — $T(r) = 0$, $0 < r < r_2$.

Для заданных условий было проведено численное моделирование уравнения теплопроводности явным методом. Временной шаг взят равным $2 \cdot 10^{-5}$ с, пространственный шаг — 0,02 мм. Результаты исследования приведены ниже. В первом расчете рассматривается случай единичного импульса, во втором — случай последовательных импульсов с частотой 10 Гц.

На рис. 2 показана зависимость усредненной по объему температуры оболочки твэла от времени после одиночного импульса с нагревом топлива на 10 °С. Максимум температуры оболочки $T_{\max} = 3,37$ °С достигается через $t_{\max} = 0,045$ с. Полученный результат был воспроизведен с помощью теплофизического модуля программного обеспечения ANSYS для дальнейшего исследования деформаций оболочки.

На рис. 3 показана полученная зависимость температуры оболочки твэла от времени при последовательных импульсах с частотой 10 Гц.

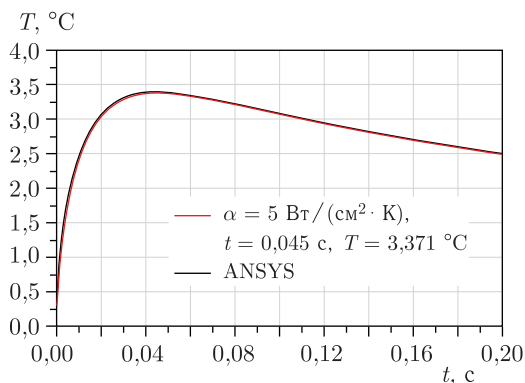


Рис. 2. Зависимость усредненной по объему температуры оболочки твэла от времени после единичного импульса

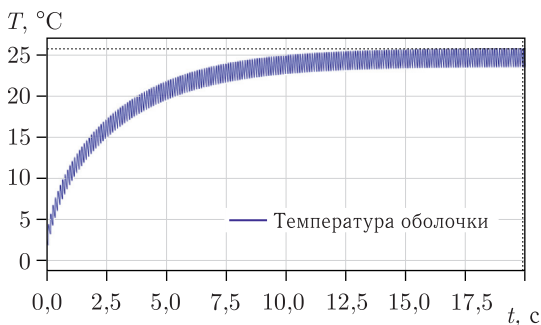


Рис. 3. Зависимость температуры оболочки твэла от времени при последовательных импульсах с частотой 10 Гц

При дальнейшем изучении деформации оболочки твэла ее температура $T(t)$ задается в виде табличных значений.

Полученные расчеты температурного поля с учетом градиента энерговыделения показывают величину максимального градиента температур по оболочке самого «напряженного» твэла $\sim 2 \text{ К}$.

3. ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТВЭЛА

Для численного решения задачи о термоупругой деформации оболочки твэла в программном пакете ANSYS был выбран один из возможных вариантов конструкции твэла (рис. 4). Твэл состоит из стальной оболочки, внутри которой расположен топливный сердечник высотой 440 мм. Сердечник выполнен в виде цилиндрических таблеток с высотой, меньшей их диаметра, 15,7 мм. Сверху и снизу столба таблеток находятся торцевые никелевые отражатели. Высота каждого отражателя 150 мм. Оболочка

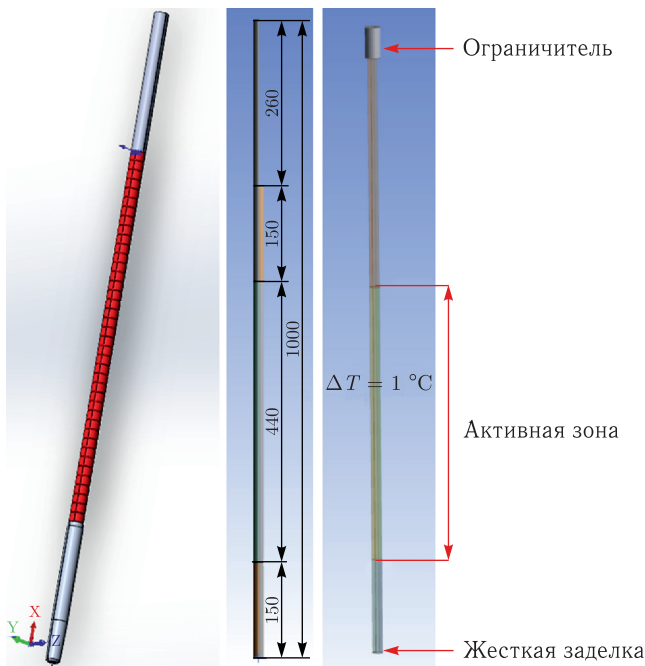


Рис. 4. Одна из концепций твэла реактора «Нептун». Слева: физическая модель твэла в Solidworks; справа: модель теплофизического расчета в ANSYS

твэла выполнена из стали марки ЧС68-ИД, диаметр оболочки равен 17 мм, толщина стенки составляет 0,45 мм. В верхней части твэла предусмотрен компенсационный объем, предназначенный для накопления газообразных продуктов деления. Внутри компенсационного объема размещена пружина, обеспечивающая прижатие таблеток друг к другу и уменьшение высоты кратковременного подскока верхних таблеток в результате теплового удара в импульсе мощности (этот эффект в данном исследовании не учитывался).

Точный теплофизический расчет поведения твэла — трудоемкая задача. Необходимо описать взаимодействие топливных таблеток между собой и с оболочкой твэла, учесть влияние прижимной пружины. Для упрощения расчета было предложено использовать модель оболочки с «присоединенной массой». Расчетная модель представляет собой цилиндрическую оболочку, соответствующую оболочке твэла, разделенную на несколько частей. Эта оболочка обладает всеми теплофизическими свойствами стали марки ЧС68-ИД, кроме плотности материала. Плотность для каждой части оболочки задается как отношение суммарной массы данного элемента твэла к объему этой части оболочки. Модель была выбрана исходя из условия, что таблетки не добавляют жесткости в случае деформации оболочки,

однако их смещение определяется деформацией оболочки. Это условие будет подробнее рассмотрено ниже.

Сектор, соответствующий топливной части твэла, разделен на 240 частей (6 по углу и 40 по высоте). Этим частям задается температурная зависимость от времени (см. рис. 3) с коэффициентами $\alpha(z, \varphi)$, пропорциональными энерговыделению в этих частях. Температура остальных секторов постоянна во времени (равна температуре теплоносителя). В разд. 5 будут рассматриваться поперечные деформации оболочки для различных способов заделки концевиков твэла.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК С ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА

В качестве критерия отсутствия радиального давления таблеток на оболочку выбран способ упаковки таблеток, когда они плотно прижаты торцами друг к другу к другу пружиной, при этом не давят на оболочку. Это возможно, если максимальный угол деформации цельного топливного стержня вследствие его неравномерного нагрева не превышает максимально возможное угловое отклонение одной таблетки (рис. 5). Это условие вполне реально, так как края таблеток практически всегда не острые.

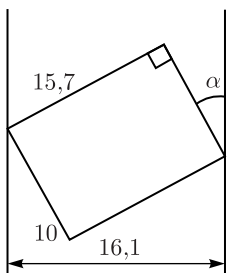


Рис. 5. Максимально возможное угловое отклонение таблетки в твэле

Была решена геометрическая задача на нахождение α — наибольшего возможного угла отклонения таблетки от нормали внутри оболочки. Искомый угол составил $2,369^\circ$. Результаты теплофизического расчета цельного топливного столба показали максимальный угол отклонения цельного сердечника $\beta = 0,192^\circ$. Так как максимальный угол отклонения одной таблетки α больше угла β , то столб таблеток не давит на оболочку твэла в начале кампании (допускается смещение таблеток относительно друг друга). Однако ввиду наличия зазора не все таблетки будут смещаться вслед за оболочкой.

К концу топливной кампании, когда таблетки распухают от выгорания ~ 4 об. % на 0,3 мм по диаметру, исчезает зазор между таблетками и оболочкой твэла. В таком случае смещение таблеток определяется смещением оболочки, однако появится давление таблеток на оболочку.

Тем не менее модель твэла — оболочка с «присоединенной массой», описанная выше, выглядит адекватной, а переход к ней — обоснованным.

5. РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА

Проведено исследование поведения описанной выше упрощенной модели твэла в случае полученного ранее распределения температур (см. рис. 3) с учетом градиента энерговыделения по азимуту (см. рис. 1) и высоте,

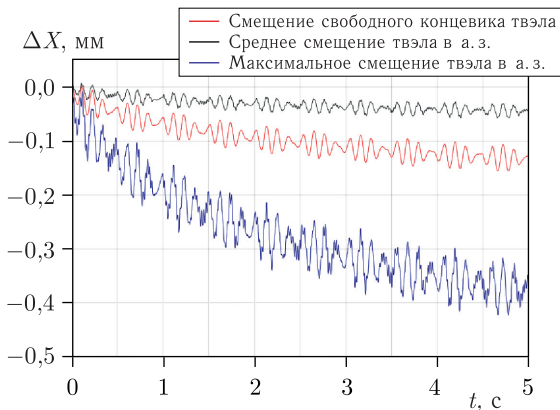


Рис. 6. Поперечная деформация твэла в случае свободного концевика

полученного методом Монте-Карло с помощью нейтронно-физических расчетов. Предполагается отсутствие взаимодействия оболочки с соседними твэлами. Рассмотрены три случая закрепления концевиков твэла. Во всех случаях один конец жестко закреплен. В первом случае второй концевик свободен, полученный результат представлен на рис. 6. Синей линией показано поперечное отклонение свободного концевика, красной и черной — максимальное и усредненное по топливной части смещение оболочки твэла. Свободный концевик смещается в сторону более холодной части, т. е. в сторону периферии активной зоны (а.з.) реактора. Величина смещения концевика составляет порядка 0,4–0,5 мм, смещение оболочки по активной зоне в среднем достигает $\sim 0,05$ мм. Наблюдаются биения, обусловленные собственными частотами (первая и третья моды колебаний 8 и 43 Гц соответственно) и частотой внешней возмущающей силы (импульсы мощности реактора — 10 Гц). Такое поведение оболочки твэлов в пульсирующих реакторах принято называть «динамическим изгибом».

Во втором случае у второго концевика ограничено поперечное смещение, допустимо только аксиальное удлинение. Трения в заделке нет. Полученный результат представлен на рис. 7. Красной и черной линиями показаны максимальное и усредненное по топливной части поперечное смещение оболочки твэла. Свободный концевик смещается в сторону центра активной зоны. Величина максимального смещения оболочки твэла по активной зоне составляет порядка 0,04–0,05 мм, средняя величина достигает $\sim 0,03$ мм. Наблюдаемые биения соответствуют второй (29 Гц) и четвертой (88 Гц) модам колебаний.

Эти способы заделки концевиков являются «пределными» случаями. Эти варианты наиболее легки для аналитического описания, так как поведение оболочки твэлов подчиняется уравнению вынужденных колебаний с постоянными собственными модами колебаний (четными или нечетными). В реальности вследствие наличия трения между концевиком и

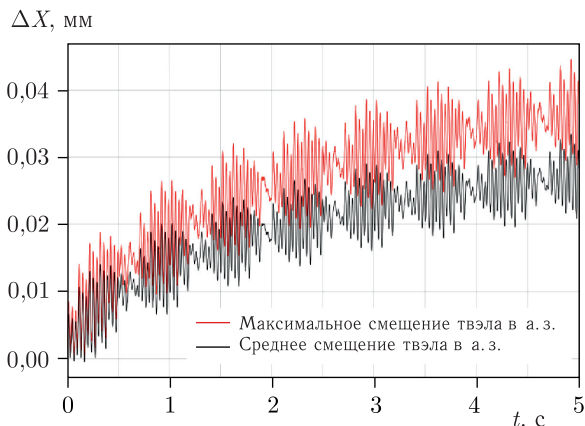


Рис. 7. Поперечная деформация твэла в случае полного ограничения поперечного смещения концевика

заделкой возможно заклинивание концевика. Для аксиального расширения необходимо оставлять зазор, который допускает частичное поперечное смещение второго концевика. Этот случай был рассмотрен при наличии зазора 0,41 мм. Полученный результат представлен на рис. 8. Рассмотрены два случая: при отсутствии трения в заделке (сплошная линия) и при коэффициенте трения $\mu = 0,18$ (пунктирная линия). Синей линией показано поперечное отклонение свободного концевика, красной и черной — максимальное и усредненное по топливной части смещение оболочки твэла. В начале колебаний свободный концевик смещается в сторону периферии активной зоны, пока «свободный» конец твэла не достигнет

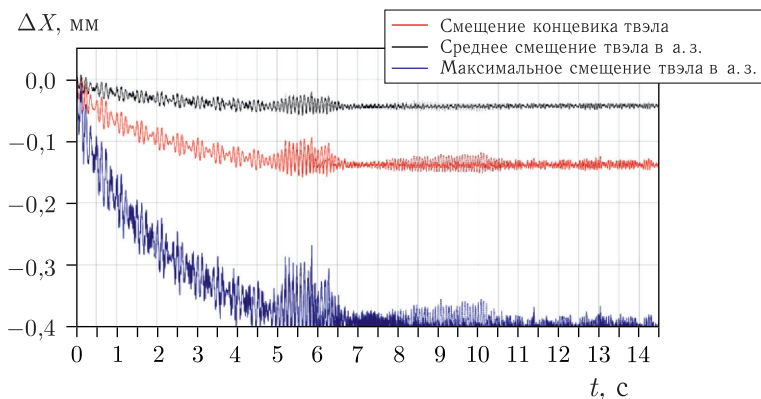


Рис. 8. Поперечная деформация твэла в случае частичного ограничения поперечного смещения концевика (0,4 мм)

ограничителя (поведение оболочки соответствует первому рассмотренному случаю). Далее наблюдается сложное поведение оболочки твэла, обусловленное дополнительными модами колебаний и сдвигом их фаз. При больших отклонениях свободный конец прижимается к ограничителю, что приближает дальнейшее поведение оболочки ко второму рассмотренному случаю.

Описанная в этом разделе модель поведения твэла является простой и служит для грубой оценки поведения твэлов в реакторе. Деформация твэлов поддается аналитическому расчету [6] и может быть реализована в расчетных кодах динамики импульсных пульсирующих реакторов. Для более точной оценки необходимо рассматривать конкретную модель твэла, его закрепления, учитывать взаимодействие с теплоносителем, а также вычислять точную форму изгиба и ее изменение со временем.

6. ОБСУЖДЕНИЕ МОДЕЛИ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПЛАНЕ ВЛИЯНИЯ НА ДИНАМИКУ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА

Топливный сердечник состоит из отдельных топливных таблеток, поджатых пружиной. Между таблетками и оболочкой есть зазор, составляющий 0,15 мм по радиусу, который дает возможность таблеткам смещаться относительно друг друга (без учета распухания таблеток). Здесь представлены результаты расчета деформации оболочки твэла в приближении «присоединенной массы». Такое приближение точно соответствует случаю сцепления таблеток топлива с оболочкой, что реализуется к концу топливной кампании, когда таблетки распухают от выгорания ~ 4 об. % на 0,3 мм по диаметру. При меньшем выгорании не все таблетки будут смещаться вслед за оболочкой. В результате возникают два фактора, которые могут изменить динамику реактора: 1) эффективная приведенная масса твэла сможет снижаться, флуктуировать, что повышает частоту собственных колебаний оболочки; 2) нагрев таблеток за импульс в несколько раз выше, чем нагрев оболочки.

Если первый фактор поддается математическому анализу, то по поводу второго последствия неочевидны. Среднее поперечное смещение оболочки порядка 1–3 сотых долей миллиметра, а зазор между оболочкой и таблетками — на порядок больше в начале кампании. Каково будет поперечное смещение таблеток внутри оболочки при одновременном воздействии колебаний оболочки и их импульсной деформации от более высоких градиентов температуры? Как изменится транзитная реактивность динамического изгиба оболочки в сравнении со случаем жесткого сцепления? В пользу повышенной реактивности в случае свободы радиального смещения таблеток может быть тот фактор, что таблетки, получая высокую скорость смещения при столкновении с оболочкой, сохраняют ее более 0,1 с, в то время как оболочка уже меняет знак скорости за это время.

Последние соображения могут быть проверены на физических моделях твэлов [7], а возможность точного математического моделирования динамического изгиба твэла при свободных таблетках сердечника пока представляется маловероятной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены принципиально важные для построения модели динамики пульсирующих реакторов факторы, влияющие на деформацию твэлов пульсирующего реактора. Полученные оценки амплитуды поперечных смещений твэлов под воздействием периодических колебаний температуры — порядка сотых долей миллиметра — на первый взгляд кажутся чересчур малыми, чтобы существенно влиять на динамику реактора. Однако ввиду высокой чувствительности мощности пульсирующего реактора к введенной реактивности (на один-два порядка выше, чем в стационарных реакторах [1–4]), а также вследствие специфических свойств их динамики [8] эффектом динамического изгиба твэлов нельзя пренебрегать. Продолжением работ по созданию модели динамики пульсирующего реактора являются расчетные оценки влияния динамического изгиба на реактивность, уточнение оценок величины изгиба из-за влияния сердечника и выгорания ядерного топлива, осуществление ряда экспериментальных работ [7], что в конечном итоге предоставит необходимые данные для построения верифицированной математической модели динамики пульсирующего реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохин Г. Е., Блохинцев Д. И., Блюмкина Ю. А., Бондаренко И. И., Дерягин Б. Н., Займовский А. С., Зиновьев В. П., Казачковский О. Д., Ким Хен Бон, Краснояров Н. В., Лейпунский А. И., Малых В. А., Назаров П. М., Николаев С. К., Стависский Ю. Я., Украинцев Ф. И., Франк И. М., Шапиро Ф. Л., Язвицкий Ю. С. Импульсный реактор на быстрых нейтронах // АЭ. 1961. Т. 10, вып. 5. С. 437–446.
2. Ананьев В. Д., Блохинцев Д. И., Булкин Ю. М. и др. ИБР-2 — импульсный реактор периодического действия для нейтронных исследований // ПТЭ. 1977. Вып. 5. С. 17–35.
3. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
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. Шабалин Е. П., Хассан А. А., Рзянин М. В., Подлесный М. М. Способ снижения уровня колебаний мощности в импульсном реакторе «Нептун» // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 3(235). С. 283–296.

6. *Перепёлкин Е. Е., Верхоглядов А. Е., Кушницир И. В., Клименко М. В.* Собственные частоты и собственные функции составного стержня // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 2(253). С. 175–185.
7. *Хмельницкий Д. В., Попов И. С., Андреев С. А., Луценко А. В., Захаров В. В., Силаев В. А., Жиряков А. С., Белоногов М. Н., Волков И. А., Шуклин Н. А., Шабалин Е. П., Верхоглядов А. Е., Булавин М. В., Рзянин М. В.* Обоснование постановки экспериментов по исследованию динамического изгиба твэла пульсирующего реактора НЕПТУН // ВАНТ. ФЯР. 2024. Вып. 3. С. 87–97.
8. *Шабалин Е. П.* Три особенности динамики пульсирующего реактора // АЭ. 2022. Т. 33, вып. 2. С. 76–81.

Получено 7 июля 2025 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 22.07.2025.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,80. Тираж 105 экз. Заказ № 61144.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/