

О СПОСОБАХ УСТРАНЕНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

А. Е. Верхоглядов^а, В. Н. Верхоглядова^{а, 1}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Изучается явление поперечного изгиба стержневых топливных элементов активной зоны под действием температуры, которое играет важную роль в динамике импульсного реактора периодического действия. Аналитический расчет термоупругой деформации показал, что положительная обратная связь напрямую связана со способом закрепления топливных элементов. Продемонстрирована возможность закрепления, исключающая положительный эффект реактивности, предложены пути технического решения проблемы.

The paper investigates the phenomenon of transverse bending of rod fuel elements of the active zone under the influence of temperature, which plays an important role in the dynamics of a periodic pulse reactor. Analytical calculation of thermoelastic deformation showed that positive feedback is directly related to the method of fixing the fuel elements. The possibility of fixing, eliminating the positive effect of reactivity, is demonstrated, and ways of technical solution of the problem are proposed.

PACS: 29.25.Dz

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании нового импульсного реактора периодического действия особое внимание уделяется изучению и прогнозированию динамики импульсов. Установлено, что проблема сильной флуктуации энергии импульсов может вызываться термоупругими деформациями элементов активной зоны — твэлов и тепловыделяющих сборок (ТВС) [1, 2]. Если повышение температуры, вызванное энерговыделением топлива, приводит к деформации активной зоны, при которой повышается коэффициент размножения реактора, то говорят о положительном эффекте реактивности обратной связи. Из работ по моделированию динамики реактора [3, 4] известно, что положительная обратная связь является основным источником нестабильной динамики. Отсюда возникает задача выбора такой конструкции активной зоны нового реактора, в которой положительные эффекты реактивности были бы исключены либо сведены к минимуму.

В данной работе рассматривается явление поперечного изгиба стержневых топливных элементов (твэлов или ТВС) под действием температуры, которое играет важную

¹E-mail: zobrlkzak@yandex.ru

роль в формировании обратной связи импульсного реактора. Синхронное поперечное смещение топливных таблеток к центру активной зоны даже на сотые доли миллиметра приводит к увеличению энергии импульса в несколько раз. Исходная причина поперечных деформаций — значительный градиент энерговыделения по объему активной зоны. Это неустранимое явление для исследовательских реакторов такого типа. В процессе теплопередачи от топлива к теплоносителю возникает неравномерный нагрев стенок твэлов и ТВС — негативное явление, в принципе поддающееся коррекции. Для этого предлагается изменить поток теплоносителя внутри ТВС для выравнивания температуры стенок [5], а также применить профилирование потока по активной зоне для выравнивания температуры между соседними ТВС. Изучаются различные варианты конструкции топливных кассет, позволяющие снизить поперечный изгиб.

Кроме того, величина и направление изгиба зависят от способа закрепления элементов. Цель этой работы — продемонстрировать принципиальную возможность создания активной зоны реактора без положительного эффекта реактивности при изгибе твэлов или ТВС, а также указать пути технического воплощения такой конструкции. Для этого сначала решаются три задачи поперечной деформации стержня с разными типами закрепления, в каждом случае находится изменение реактивности при повышении температуры. Затем приводится обсуждение результатов и способов их применения в конструкции реактора.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим упругий однородный стержень длиной $L = 1$ и диаметром d ($d \ll L$). Расположим ось OZ вдоль оси стержня и совместим начало координат с одним из его концов. Пусть $\theta(z)$ — распределение разности температур на боковых сторонах стержня. В таком случае статическая деформация стержня описывается уравнением [5]

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

где E — модуль Юнга материала стержня; J — геометрический момент инерции; $y(z)$ — поперечное смещение оси стержня; α_T — температурный коэффициент линейного расширения. Для наглядности и простоты изложения зададим функцию распределения разности температур $\theta(z)$ в виде

$$\theta(z) = \begin{cases} 1, & z \in \left[\frac{1}{4}; \frac{3}{4} \right], \\ 0, & z \notin \left[\frac{1}{4}; \frac{3}{4} \right]. \end{cases}$$

Это имитирует нагрев стенки твэла или ТВС в области расположения топливных таблеток — от $1/4$ до $3/4$ длины стержня.

Изменение реактивности r , вызванное поперечной деформацией стержня, можно оценить по формуле [6]

$$r = \int_{1/4}^{3/4} y(z) \Phi(z) dz,$$

где $\Phi(z)$ — удельная реактивность, положительная величина по своему физическому смыслу. Точные значения функции $\Phi(z)$ находятся путем расчетов по методу Монте-Карло [7] для каждого реактора индивидуально. Используем в качестве удельной реактивности функцию, характерную для реакторов с формой активной зоны, близкой к цилиндрической (рис. 1):

$$\Phi(z) = A \cos^2 \left[4,3 \left(z - \frac{1}{2} \right) \right],$$

где $A > 0$ — константа. Точное значение коэффициента A в данной работе интереса не представляет, поскольку для нас важен лишь знак реактивности r .

Задача состоит в нахождении знака реактивности r в зависимости от граничных условий для функции $y(z)$. Другими словами, нужно оценить эффект реактивности при разных способах закрепления твэлов или ТВС.

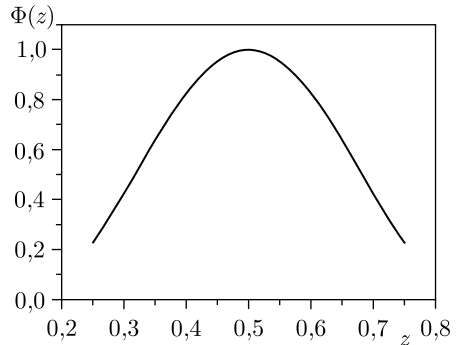


Рис. 1. Удельная реактивность $\Phi(z)$ при $A = 1$

ВАРИАНТ 1. СТЕРЖЕНЬ С УПРУГИМ ЗАКРЕПЛЕНИЕМ НА КОНЦАХ

Рассмотрим стержень с упругим закреплением на обоих концах (рис.2). Этому случаю соответствуют следующие граничные условия [8]:

$$y''(0) = 0, \quad y'''(0) + \beta y(0) = 0, \quad y''(1) = 0, \quad y'''(1) - \beta y(1) = 0.$$

Здесь и далее штрих означает производную по координате z , β — параметр жесткости крепления.

Перепишем уравнение (1) в упрощенном виде, пользуясь свойством однородности стержня ($E, J = \text{const}$):

$$y'''' = -\gamma \theta'', \tag{2}$$

где $\gamma = \alpha_T/d$. Поскольку искомая функция $y(z)$ пропорциональна параметру γ , дальнейшее качественное рассмотрение проведем для $\gamma = 1$. После элементарного интегрирования получаем решение в виде полиномов по z :

$$y(z) = \begin{cases} \frac{z}{4}, & z \in \left[0; \frac{1}{4} \right), \\ -\frac{z^2}{2} + \frac{z}{2} - \frac{1}{32}, & z \in \left[\frac{1}{4}; \frac{3}{4} \right], \\ -\frac{z}{4} + \frac{1}{4}, & z \in \left(\frac{3}{4}; 1 \right]. \end{cases}$$

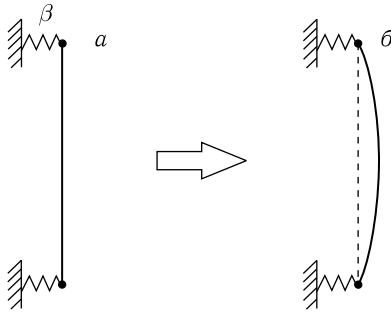


Рис. 2. Расчетная схема для первого варианта: *a* — недеформированное состояние; *б* — направление изгиба

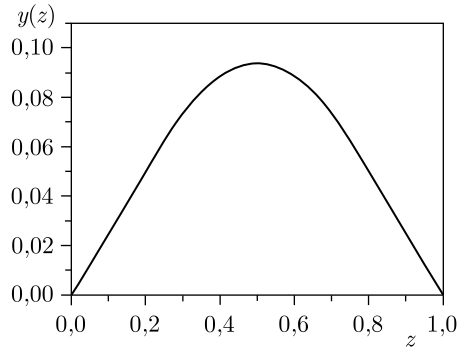


Рис. 3. Поперечная деформация стержня в первом варианте

Параметр жесткости крепления β не входит в решение, поскольку ничто не препятствует изгибу стержня в положительном направлении. На рис. 3 видно, что $y(z)$ строго положительно на всем интервале $z \in \left[\frac{1}{4}; \frac{3}{4}\right]$, а это означает, что эффект реактивности r в этом случае всегда положительный.

ВАРИАНТ 2. СТЕРЖЕНЬ С УПРУГИМ ЗАКРЕПЛЕНИЕМ НА КОНЦАХ И ПОСЕРЕДИНЕ

Рассмотрим стержень с упругим закреплением на обоих концах и в точке $z = 1/2$ (рис. 4).

С учетом симметрии условий задачи относительно точки $z = 1/2$ достаточно найти решение уравнения (2) на интервале $z \in \left[0; \frac{1}{2}\right]$. В этом случае граничные условия следующие:

$$y''(0) = 0, \quad y'''(0) + \beta y(0) = 0, \quad y'\left(\frac{1}{2}\right) = 0, \quad y'''\left(\frac{1}{2}\right) - \xi y\left(\frac{1}{2}\right) = 0.$$

Здесь ξ — параметр жесткости центрального крепления. Для $\gamma = 1$ решение выглядит следующим образом:

$$y(z) = \begin{cases} \frac{12\beta\xi z^3 + (192\beta + 192\xi - \beta\xi)z - 72\xi}{32(24\beta + 24\xi + \beta\xi)}, & z \in \left[0; \frac{1}{4}\right), \\ -\frac{z^2}{2} + \frac{z}{4} - \frac{1}{32} + \frac{12\beta\xi z^3 + (192\beta + 192\xi - \beta\xi)z - 72\xi}{32(24\beta + 24\xi + \beta\xi)}, & z \in \left[\frac{1}{4}; \frac{1}{2}\right]. \end{cases}$$

В этом случае решение зависит от параметров жесткости креплений β, ξ , а форма изгиба стержня определяется соотношением упругости креплений и самого стержня (рис. 5).

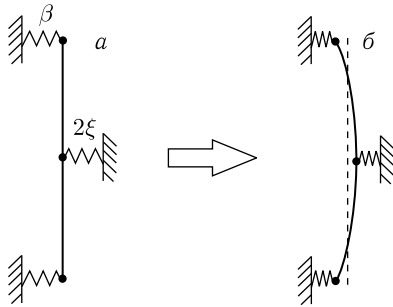


Рис. 4. Расчетная схема для второго варианта: *a* — недеформированное состояние; *б* — направление изгиба

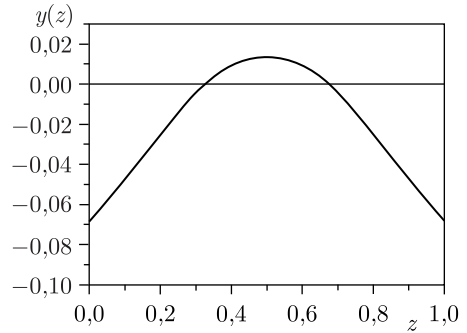


Рис. 5. Поперечная деформация стержня во втором варианте при $\beta = 4$ и $\xi = 20$

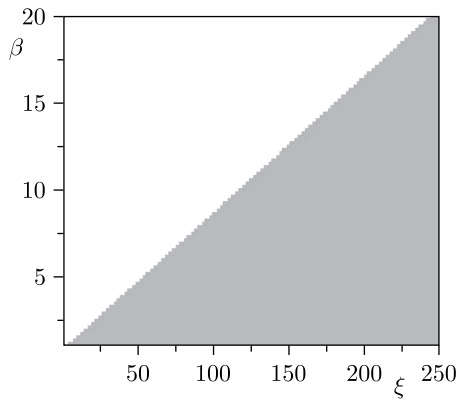


Рис. 6. Диаграмма ξ - β для эффекта реактивности во втором варианте. Серая область соответствует отрицательному эффекту реактивности

Поскольку решение $y(z)$ может принимать и отрицательное, и положительное значения, то знак эффекта реактивности r зависит от параметров β и ξ . На рис. 6 приведена зависимость знака величины $r = r(\beta, \xi)$ от значений параметров. Видно, что существует область параметров β и ξ , при которых эффект реактивности r отрицателен.

ВАРИАНТ 3. СТЕРЖЕНЬ СО СВОБОДНЫМ КОНЦОМ

Рассмотрим стержень с жестким закреплением на нижнем конце и со свободным верхним концом (рис. 7).

Этому случаю соответствуют следующие граничные условия:

$$y(0) = 0, \quad y'(0) = 0, \quad y''(1) = 0, \quad y'''(1) = 0.$$

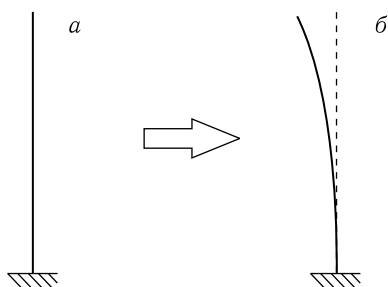


Рис. 7. Расчетная схема для третьего варианта: *a* — недеформированное состояние; *б* — направление изгиба

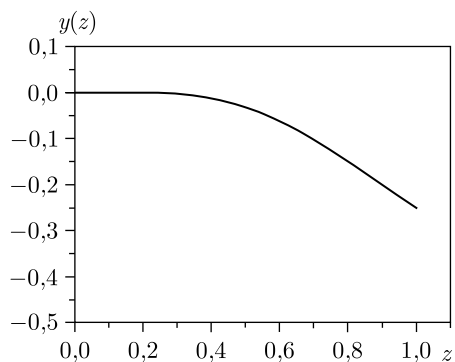


Рис. 8. Поперечная деформация стержня в третьем варианте

Решение уравнения (2) для $\gamma = 1$ можно записать в виде полиномов по z (рис. 8):

$$y(z) = \begin{cases} 0, & z \in \left[0; \frac{1}{4}\right), \\ -\frac{z^2}{2} + \frac{z}{4} - \frac{1}{32}, & z \in \left[\frac{1}{4}; \frac{3}{4}\right], \\ -\frac{z}{2} + \frac{1}{4}, & z \in \left(\frac{3}{4}; 1\right]. \end{cases}$$

В этом случае эффект реактивности r всегда отрицателен.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Три рассмотренных варианта закрепления стержня выбраны неслучайно. Первый вариант соответствует конструкции активной зоны реактора ИБР-2М, в которой ТВС своими концами крепятся на цангах (упругое закрепление). Форма изгиба при таком закреплении вызывает положительную составляющую обратной связи, и этим можно объяснить нестабильность реактора на некоторых режимах работы [2].

Второй вариант показывает, что внесение небольших изменений в общепринятую конструкцию реактора (одиночные твэлы или ТВС с цангами на концах) способно изменить эффект реактивности с положительного на отрицательный. Например, шестигранные ТВС можно изготовить с небольшими упругими выступами на трех гранях в виде дополнительных лепестков, пружинной проволоки и т. п. (рис. 9). Упругость выступов и лепестков цанг на концах должна позволять извлекать отдельные ТВС из активной зоны для перегрузки, а также удовлетворять соотношениям $\xi - \beta$ на диаграмме рис. 6. В этом случае, даже если не удастся достичь отрицательного эффекта реактивности (для этого жесткость выступов должна быть на порядок выше жесткости цанги), положительный эффект реактивности будет значительно снижен.

Третий вариант с наиболее очевидным отрицательным эффектом реактивности также может быть реализован. Достаточно расположить оба упругих закрепления

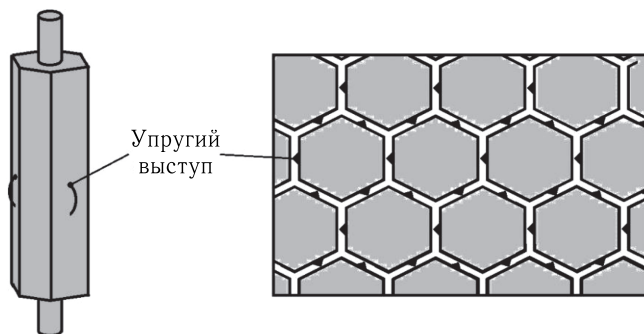


Рис. 9. Пояснение к конструкции ТВС с упругими выступами

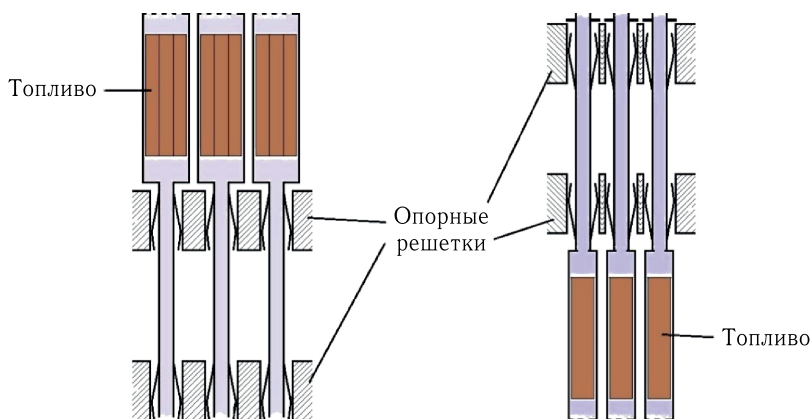


Рис. 10. Пояснение к конструкции кассет со свободным концом

(цанги) с одной стороны от топливных таблеток, удлив нижнюю или верхнюю часть твэла или ТВС (рис. 10). Это позволит сохранить возможность свободного извлечения кассет из активной зоны для перегрузки.

Авторы не ставили своей целью предложение конкретных технических решений указанной проблемы или точный расчет параметров конструкции активной зоны — это предмет отдельной работы инженеров-конструкторов. Однако были указаны причины появления и пути подавления положительной обратной связи, а также направления технического поиска. Показано, что создание импульсного реактора с чисто отрицательным эффектом реактивности при изгибе топливных элементов физически возможно. Идеи, выдвинутые в работе, могут быть проверены путем детального численного моделирования и экспериментов на стенде с модельными твэлами и ТВС [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Простой аналитический расчет термоупругой деформации топливных элементов импульсного реактора периодического действия показал, что возникновение положительной обратной связи напрямую связано со способом закрепления топливных

элементов в активной зоне. Продемонстрирована возможность закрепления, исключая положительный эффект реактивности, и предложены пути технического решения проблемы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании нового источника нейтронов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук Е. П. Шабалину за ценные комментарии при подготовке этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шабалин Е. П.* Три особенности динамики пульсирующего реактора // АЭ. 2022. Т. 133, вып. 2. С. 76–81.
2. *Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.* Динамика реактора ИБР-2М при частоте повторения импульсов мощности 10 Гц. Препринт ОИЯИ Р13-2022-52. Дубна, 2022. 21 с.
3. *Верхоглядов А. Е., Верхоглядова В. Н., Шабалин Е. П.* Математическая модель импульсного реактора периодического действия // АЭ. 2025. Т. 138, вып. 1–2. С. 10–17.
4. *Верхоглядов А. Е., Шабалин Е. П.* Модель динамики реактора ИБР-2 на основе двухкомпонентной мощностной обратной связи. Препринт ОИЯИ Р13-2025-15. Дубна, 2025.
5. *Верхоглядов А. Е., Кушниц И. В.* Численные расчеты поперечного изгиба ТВС в реакторе ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2025-19. Дубна, 2025.
6. *Randles J.* Feedback Due to Elastic Waves and Doppler Coefficient during the Excursions of a Pulsed Fast Reactor // J. Nucl. Energy. Parts A/B. 1966. V. 20.
7. *Вдовин Я. А., Верхоглядов А. Е.* Расчетная модель и статические параметры реактора ИБР-2М // Изв. вузов: Ядерная энергетика. 2025. № 4. С. 199; <https://doi.org/10.26583/пре.2025.4.14>.
8. Вибрации в технике. Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. С. 152.
9. *Верхоглядов А. Е.* Измерения механических свойств твэла импульсного реактора на стенде вибродиагностики. Препринт ОИЯИ Р13-2025-30. Дубна, 2025.

Получено 18 сентября 2025 г.