

УДК: 621.039.534

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.15>

Оригинальная статья / Original paper

Модель осевого нагружения оболочки твэла вследствие трения нитридных топливных таблеток с оболочкой твэла быстрого реактора

В.И. Фоломеев¹, С.М. Ганина¹, А.Г. Исаков¹, Л.М. Забудько², Е.Е. Мариненко¹¹АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

²АО «Прорыв»,

119607 Россия, г. Москва, Раменский бульвар, д. 1

Реферат. Работа является продолжением темы расчетной оценки формоизменения твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом. Интерес к этой теме вызван фактами специфического формоизменения нитридных твэлов – заметным превышением в длине и более высокой эллипсностью оболочки по сравнению с оксидными твэлами. Предполагается, что такие эффекты появляются вследствие локального механического воздействия на оболочку со стороны топливных таблеток. Предлагается рассмотреть модель (модель трения), которая предполагает контактное взаимодействие оболочки и топлива через осевую силу, возникающую из-за трения при случайном смещении топливных таблеток. В силу неопределенности коэффициентов трения в модели присутствует параметр – эффективный коэффициент трения E_{ff} , обеспечивающий линейную связь между осевой силой и силой точечного контактного взаимодействия оболочки и топлива. Параметр подбирается на основе анализа экспериментальных данных по удлинению облученных твэлов. Представлены результаты расчетов твэла по программе ДРАКОН с использованием модели трения на основе послереакторных исследований твэлов типа реактора БРЕСТ-ОД-300 с оболочкой из стали ферритно-мартенситного класса ЭП823-Ш и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученных в составе экспериментальной тепловыделяющей сборки ЭТВС-11 в реакторе БН-600 до максимального выгорания 9% т.ат. и максимальной повреждающей дозы 107,6 сна.

Ключевые слова: смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, заклинивание, трение, твэл, топливная таблетка, послереакторные исследования, удлинение, напряженно-деформированное состояние, модель, верификация, оболочка.

Для цитирования: Фоломеев В.И., Ганина С.М., Исаков А.Г., Забудько Л.М., Мариненко Е.Е. Модель осевого нагружения оболочки твэла вследствие трения нитридных топливных таблеток с оболочкой твэла быстрого реактора. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;3:207–219. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.15>

Введение

Работа является продолжением темы расчетной оценки формоизменения твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП) топливом. Интерес к этой теме вызван фактами специфического формоизменения нитридных твэлов – заметным превышением в длине и более высокой эллипсностью оболочки по сравнению с оксидными твэлами. Предполагается, что такие эффекты появляются вследствие локального механического воздействия на оболочку со стороны топливных таблеток [1 – 6].

В статье [7] представлена модель заклинивания топлива, которая предполагает взаимодействие оболочки и топлива в каждом расчетном слое по высоте активной зоны через осевую силу даже в отсутствие контактного взаимодействия. Осевая сила определяется из условия равновесия радиального сечения оболочки и топлива и обеспечивает соблюдение условия заклинивания (одинаковый прирост осевой деформации). Заклинивание топливных таблеток может быть задано до определенной координаты по высоте активной зоны (а.з.).

Модель заклинивания не учитывает факт возможного механического контакта между топливом и оболочкой из-за случайного несоосного расположения топливных таблеток в самом начале кампании. Схема взаимодействия топлива и оболочки через осевую силу, возникающую из-за трения, с учетом исходного случайного смещения топливных таблеток изложена в работе [8]. Свою модель механического взаимодействия топливного столба и оболочки с учетом несоосного расположения топливных таблеток и результаты моделирования и оценки удлинения тепловыделяющих элементов с $(U, Gd)O_2$ -топливом (твэгов) на начальных этапах эксплуатации топлива ВВЭР представили авторы работы [9].

В настоящей работе представлены модель и алгоритм учета сил трения при взаимодействии таблеток с оболочкой, в которой используется фиксированный вариант расположения таблеток в плоскости. Вариант получен в результате проведения статистических расчетов со случайными комбинациями положения таблеток и соответствует близкой к среднему значению величины осевой силы, действующей на оболочку и топливо в результате трения.

Расчетные исследования проведены с помощью программы ДРАКОН – реализованный в этой программе алгоритм для расчета полей температур и параметров НДС (напряжений и деформаций) стержневых цилиндрических твэлов кратко изложен в работе [7].

Модель случайного распределения таблеток в плоскости с учетом возможных смещений по углу – функция распределения случайной величины в круге единичного радиуса

Моделирование случайного распределения таблеток в плоскости внутри оболочки осуществляется с использованием функции плотности распределения случайной величины в круге единичного радиуса [10].

Рассмотрим следующую задачу из области теории вероятности – в круге единичного радиуса случайным образом выбираются точки. Расстояние до центра каждой точки

будет случайной величиной. Нужно найти функцию распределения этой случайной величины.

Для решения задачи выделим в круге единичного радиуса круг радиусом, равным величине $x < 1$. Тогда вероятность попадания точки в круг пропорциональна площади этого круга и равна отношению площади круга радиуса x к площади круга единичного радиуса:

$$P(X < x) = x^2. \quad (1)$$

По определению [10] интегральной функцией распределения называют функцию $F(x)$, определяющую для каждого значения x вероятность того, что случайная величина X примет значение, меньшее x , т.е.

$$F(x) = P(X < x). \quad (2)$$

Функция плотности распределения является производной от интегральной функции распределения и в нашем случае будет иметь вид

$$f(x) = 2 \cdot x. \quad (3)$$

Тогда математическое ожидание нашей случайной величины

$$M(x) = \int_0^1 x \cdot 2x dx = 2/3. \quad (4)$$

На рисунке 1 изображено симметричное расположение топливной таблетки радиуса r внутри оболочки с внутренним радиусом $(r + \delta)$, δ – ширина исходного радиального зазора между топливом и оболочкой. Таблетка изначально может занять случайное положение внутри оболочки, тогда центр ее будет занимать случайное положение внутри центрального круга радиуса δ .

Из рассмотренного примера следует, что математическое ожидание случайного распределения центров таблетки будет реализовано на окружности радиуса $(2/3 \cdot \delta)$. Тогда край таблетки будет находиться на окружности радиуса $(r + 2/3 \cdot \delta)$ (выделена на рисунке красным цветом), т.е. наиболее вероятным будет расположение таблетки с минимальным зазором $\delta/3$, а не $\delta/2$, как может показаться на первый взгляд.

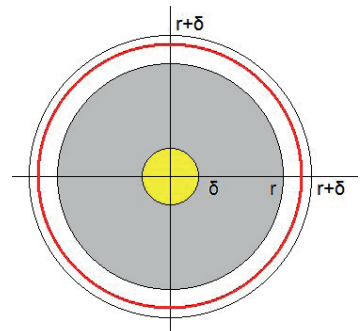


Рис. 1. Расположение топливной таблетки внутри оболочки

Условие осевого равновесия для топливного столба и оболочки с учетом осевой силы от поджатия пружины, веса топлива и сил трения от контакта топлива и оболочки в математической модели НДС ТВЭЛА

Общая постановка задачи расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) ТВЭЛА содержится в работах [11 – 13]. В [13] подробно изложена математическая модель НДС цилиндрического сердечника (сплошного и с центральным отверстием) в двумерной RZ -постановке. Там же предложен метод решения задачи напряженно-деформированного состояния цилиндра, основанный на аппроксимации скоростей изменения радиальных напряжений и перемещений квадратичными функциями в пределах слоя по радиусу.

Учет осевой силы, возникающей из-за трения оболочки и топлива, приведет к изменению условия осевого равновесия для топливного стержня и оболочки [11]. Интегральное условие осевого равновесия радиального сечения топливного стержня будет иметь вид

$$\int_{R_{fuel_in}}^{R_{fuel_out}} \dot{\sigma}_x^*(r) \cdot r dr + g_0^* + \frac{\dot{P}_x}{2\pi} = 0, \quad g_0^* = \dot{P}_{gap} \frac{R_{fuel_out}^2}{2} - \dot{P}_{in} \frac{R_{fuel_in}^2}{2}. \quad (5)$$

Интегральное условие осевого равновесия радиального сечения оболочки:

$$\int_{R_{clad_in}}^{R_{clad_out}} \dot{\sigma}_x(r) \cdot r \cdot dr + g_0 + \frac{\dot{T}_x}{2\pi} = 0, \quad g_0 = \frac{\dot{P}_{out} \cdot R_{clad_out}^2 - \dot{P}_{gap} \cdot R_{clad_in}^2}{2}. \quad (6)$$

Здесь $\dot{\sigma}_x^*$, $\dot{\sigma}_x$ – скорости изменения осевого напряжения топлива и оболочки соответственно; R_{fuel_in} , R_{fuel_out} – внутренний и внешний радиусы внутреннего цилиндра; R_{clad_in} , R_{clad_out} – внутренний и внешний радиусы внешнего цилиндра; $\dot{P}_{in}$, $\dot{P}_{gap}$, $\dot{P}_{out}$ – скорости изменения давления на внутренней стороне внутреннего цилиндра, между цилиндрами и на внешней стороне внешнего цилиндра; $\dot{P}_x$, $\dot{T}_x$ – скорости изменения осевой силы, приложенной к топливному столбу и оболочке ТВЭЛА соответственно.

Модель и алгоритм учета сил трения при взаимодействии таблеток с оболочкой

На рисунке 2 представлена схема возможного смещения таблеток топлива внутри ТВЭЛА. В процессе выгорания топлива несоосно расположенные таблетки, контактируя с оболочкой, перемещаются в осевом и радиальном направлениях относительно нее. Осевые силы трения, возникающие при этом на участках контакта таблеток и оболочки, растягивают оболочку и сжимают топливный столб. Силы трения на торцах таблеток (зависят от силы поджатия пружины, веса и осевых сил трения стоящих выше таблеток) препятствуют восстановлению соосности.

Из уравнений равновесия сил, действующих на боковые поверхности и торцы таблеток, можно построить рекуррентную зависимость для осевых сил, действующих на топливный столб и оболочку, и радиальных сил, действующих на оболочку (сил восстановления соосности) [8].

Введем обозначения: P_{j-1} – осевая сила, приложенная к верхнему торцу таблетки j ; Q_j – поперечная сила проталкивания таблетки; m_j – масса таблетки j ; T_j – сила трения, растягивающая оболочку на уровне таблетки j ; γ – коэффициент трения топливо-оболочка, γ^* – коэффициент трения топливо-топливо; P_0 – сила от пружины и веса таблеток экрана (при наличии), приложенная к верхней границе первой таблетки; T_0 – сила, растягивающая оболочку, зависящая от сжатия пружины с обратным знаком.

До верхнего торца первой таблетки на топливный столб и оболочку действуют осевые силы P_0 и T_0 . Тогда верхняя граница второй таблетки будет нагружена силой

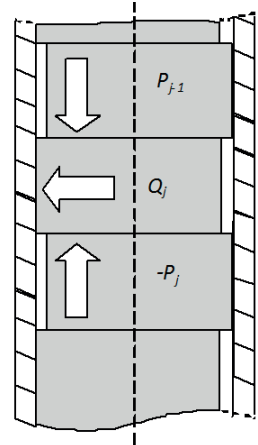


Рис. 2. Суммарные силы P , Q , действующие соответственно на торцы и боковые поверхности таблеток

$$P_1 = P_0 + g \cdot m_1 + \gamma \cdot Q_1. \quad (7)$$

Осевые силы на уровне первой таблетки:

$$\begin{cases} P_{T1} = (P_0 + P_1) / 2 \\ T_1 = T_0 - \gamma \cdot Q_1. \end{cases} \quad (8)$$

Обобщенные рекуррентные формулы для представления осевых сил для j -ой таблетки будут иметь вид

$$\begin{aligned} P_{Tj} &= (P_{j-1} + P_j) / 2 \\ T_j &= T_{j-1} - \gamma \cdot Q_j. \end{aligned} \quad (9)$$

С одной стороны, радиальная сила Q_j равна силе трения от проталкивания j -ой таблетки:

$$Q_{j1} = \gamma^* \cdot (P_j + P_{j-1}). \quad (10)$$

С другой стороны, радиальная сила на уровне j -ой таблетки равна жесткости оболочки χ , умноженной на разницу между положением внешнего радиуса топлива (с учетом случайного смещения) и внутренним радиусом оболочки $\varepsilon_{\theta j}$ ($\varepsilon_{\theta j} = 0$, если $\varepsilon_{\theta j} < 0$).

$$Q_{j2} = \chi \cdot \varepsilon_{\theta j}. \quad (11)$$

При расчетах осевых сил следует выбирать минимальную радиальную силу

$$Q_j = E_{ff} \cdot \min(Q_{j1}, Q_{j2}). \quad (12)$$

В силу неопределенности коэффициентов трения в алгоритме учета осевого взаимодействия оболочки и топлива в выражении для определения радиальной силы используется эффективный коэффициент трения E_{ff} – параметр, обеспечивающий линейную связь между осевой силой и силой локального контактного взаимодействия оболочки и топлива.

Анализ влияния случайного распределения таблеток на силу трения

Твэл в процессе работы подвергается воздействию множества факторов. Точное предсказание удлинения твэлов – задача, невозможная в силу того, что это множество факторов изменчиво. Например, невозможно создать абсолютно одинаковые условия для работы нескольких твэлов; невозможно повторить в реальном эксперименте исходное положение таблеток в твэле относительно оси; изменчивыми оказываются свойства материалов в зависимости от их состава, способа изготовления, условий эксплуатации.

Чтобы получить представление о том, насколько велики могут быть отличия по величине осевой силы при различных комбинациях положения таблеток по высоте а.з., а также определить характеристики, на которые можно опираться при проведении параметрических расчетных исследований осевого взаимодействия топлива и оболочки твэла для определения эффективного коэффициента трения, проведены расчеты с различными комбинациями случайного распределения топливных таблеток.

Основная цель расчетов – получить комбинацию положения таблеток, соответствующую наиболее вероятной осевой силе.

Для проведения расчетных исследований в качестве модельного выбран твэл, близкий твэлам РУ БРЕСТ-ОД-300 по геометрическим размерам, используемым материалам и условиям эксплуатации. Выполнено 1500 расчетов НДС твэла в течение одной микрокампании со случайными комбинациями положения таблеток в плоскости.

На рисунке 3 показаны осевые силы с учетом частоты их попадания в заданный интервал (величина интервала определяется формулой Стерджеса [14]). Распределение

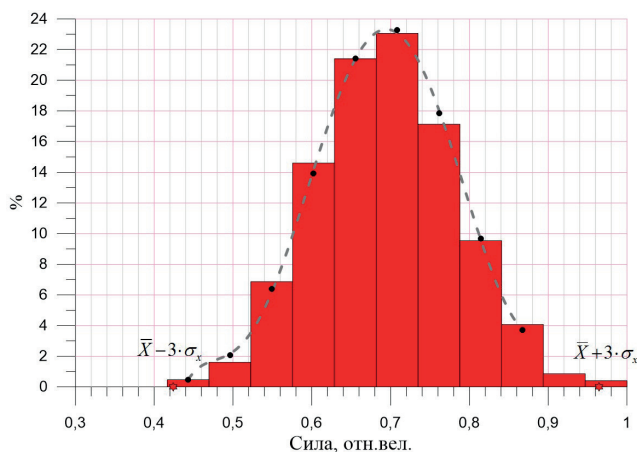


Рис. 3. Осевые силы с учетом вероятности их попадания в заданный интервал: $m = 11$ (количество интервалов по Стерджесу); $\bar{X} = 0,69447$; $\sigma_x = 0,09$ (стандартное отклонение)

осевых сил на момент окончания первой микрокампании подчиняется нормальному закону: для $k = 8$ выполняется условие ($\chi^2 = 7,34$) < ($\chi_{crit}^2 = 15,5$) ($k = m - 3$, m – количество интервалов по Стерджесу).

Интервальной оценкой (с надежностью γ) математического ожидания M нормально распределенного количественного признака X по выборочной средней $\bar{X}$ (точечная оценка математического ожидания) при известном стандартном (среднеквадратичном) отклонении σ генеральной совокупности (объем выборки > 30) служит доверительный интервал [14]

$$\bar{X} - t \cdot (\sigma / \sqrt{N}) < M < \bar{X} + t \cdot (\sigma / \sqrt{N}). \quad (13)$$

Из таблицы значений функции Лапласа для надежности $\gamma = 0,95$ получаем значение $t = 1,96$. Тогда для выборки $N = 1500$ будет $0,65932 < M < 0,72962$.

На рисунке 4 в качестве примера показано положение по высоте активной зоны радиуса топливных таблеток внутри исходного зазора, соответствующее величине осевой силы, близкой к среднему значению.

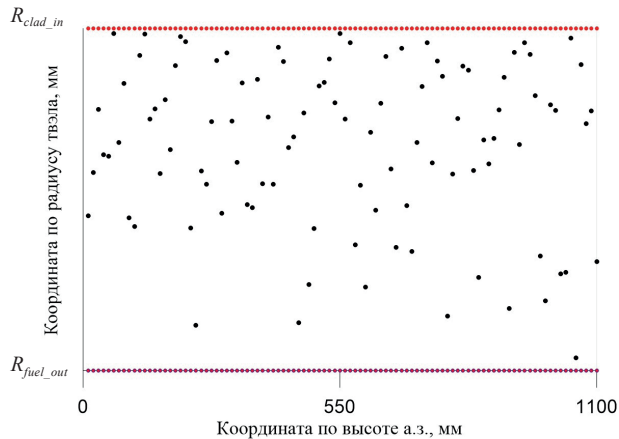


Рис. 4. Распределение топливных таблеток, соответствующее величине осевой силы, близкой к среднему значению

Модель учета эксцентриситета таблеток при решении температурной задачи в осесимметричной постановке

Поскольку в программе ДРАКОН заложено решение системы уравнений, описывающих НДС оболочки и топлива, записанной в координатах R -геометрии (симметричная постановка задачи), появляется необходимость учета эксцентриситета таблеток в задаче расчета температурного поля в осесимметричной постановке.

Нарушение осесимметричного расположения топливных таблеток приводит к хаотичному расположению точек контакта таблеток с оболочкой. Расчетные исследования влияния нарушения осесимметричного расположения топливных таблеток в твэле на максимальную температуру топлива проведены с использованием конечно-элементного кода SIMULIA Abaqus [15]. Получена формула зависимости величины зазора для осесимметричной задачи от минимального зазора при эксцентриситете,

позволяющая получить в обоих вариантах расчета одинаковые значения максимальной температуры топлива. Коррекция величины зазора выполняется только в программе расчета конвективной составляющей проводимости зазора.

Тестирование модели трения по результатам послереакторных исследований твэлов ЭТВС-11 БН-600

Расчеты с учетом взаимодействия оболочки и топлива через силу трения проведены для твэлов типа реактора БРЕСТ-ОД-300 с оболочкой из стали ферритно-мартенситного класса ЭП823-Ш и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом экспериментальной тепловыделяющей сборки ЭТВС-11, облученной в реакторе БН-600 до максимального выгорания топлива 9% т.ат., максимальной повреждающей дозы 107,6 сна [7, 16].

Предполагается, что взаимодействие оболочки и топлива через силу трения происходит при выходе реактора на мощность и сохраняется после в течение времени $\Delta t_{rel} = 500$ ч (время релаксации напряжений – время, в течение которого действует режим трения). Время релаксации принято по результатам расчетов НДС твэла этой же сборки с моделью заклинивания [7]. Подобран такой эффективный коэффициент трения E_{ff} (в предположении эксплуатации твэла при номинальной температуре оболочки), чтобы получить значения удлинений оболочки и топлива, близкие средним по результатам ПРИ ЭТВС-11.

На рисунке 5 показана динамика изменения длины топливного столба и оболочки в течение кампании (рис. 5а), относительное удлинение каждого расчетного сечения (относительно исходной высоты расчетного слоя) (рис. 5б) для расчетов с моделью заклинивания [7] и с моделью трения, предложенной выше.

Расчет с моделью заклинивания выполнен для 50-ти сечений по высоте активной зоны, расчет с моделью трения выполнен для 100 сечений (количество сечений примерно равно количеству таблеток); разбиение на расчетные слои – равномерное.

На рисунке 6 показаны расчетные кривые и результаты ПРИ твэла ЭТВС-11 для диаметров оболочки (рис. 6а) и топливных таблеток (рис. 6б).

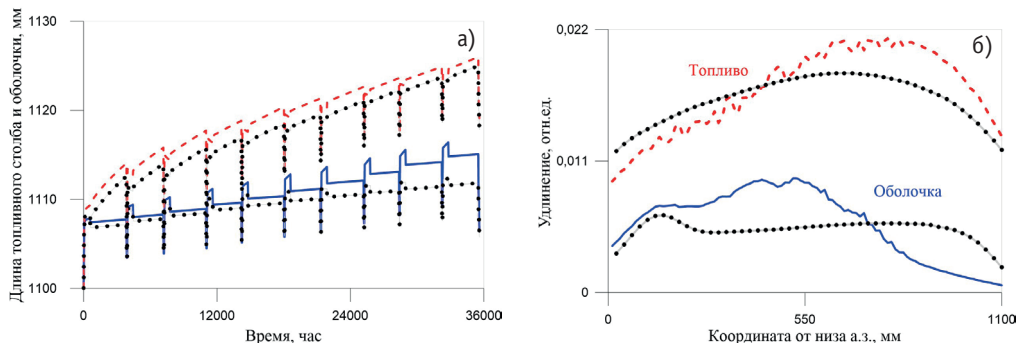


Рис. 5. Динамика изменения длины топливного столба и оболочки в течение кампании (а) и удлинения топливного столба и оболочки в расчетных сечениях на конец кампании (б) при выполнении расчетов с моделями трения и заклинивания: — оболочка; - - - топливо (при использовании модели трения); • — соответствующие кривые при использовании модели заклинивания

Модель осевого нагружения оболочки твэла вследствие трения нитридных топливных таблеток с оболочкой твэла быстрого реактора

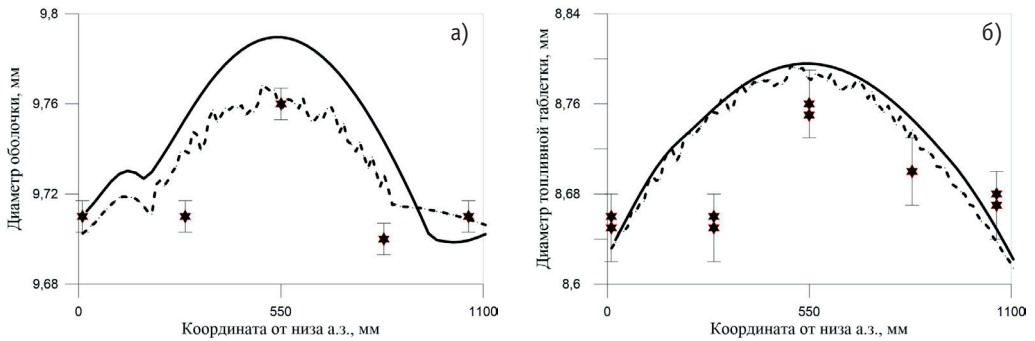


Рис. 6. Расчетные кривые и результаты ПРИ для диаметров оболочки и топливных таблеток (символами обозначены результаты ПРИ): — — — расчет с моделью заклинивания; — — — — расчет с моделью трения

Заключение

В настоящей работе предложена модель (модель трения), которая предполагает контактное взаимодействие оболочки и топливных таблеток через осевую силу, возникающую из-за трения при случайном смещении таблеток. В силу неопределенности коэффициентов трения в модели присутствует параметр — эффективный коэффициент трения E_{ff} , обеспечивающий линейную связь между осевой силой и силой точечного контактного взаимодействия оболочки и топлива. Параметр подбирается на основании анализа экспериментальных данных по удлинению твэлов и данных параметрических расчетных исследований осевого взаимодействия топлива и оболочки твэла с различными комбинациями случайного распределения топливных таблеток.

С помощью программы ДРАКОН проведены расчетные исследования влияния случайного распределения таблеток на силу трения и тестовые расчеты с учетом взаимодействия оболочки и топлива через силу трения для экспериментальной сборки ЭТВС-11 с твэлами типа реактора БРЕСТ-ОД-300 с оболочкой из стали ферритно-мартенситного класса ЭП823-Ш и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом.

Представленные результаты расчетов удлинений оболочки и топливного столба, полученные в расчетах с моделью заклинивания и с моделью трения, близки. Модель с учетом трения имеет выраженный участок по высоте а.з. с максимальным удлинением оболочки. Обе модели показали хорошее согласие в сравнении с результатами измерения диаметра оболочки и топлива.

Представленную модель трения можно использовать для оценки удлинения твэлов, работающих в похожих условиях. Модель позволяет учесть влияние случайного положения таблеток на осевую силу и максимальную температуру топлива.

Если известна зависимость эффективного коэффициента трения от геометрии фаски (угол среза, высота фаски), полученная, например, из эксперимента или в результате расчетов с помощью конечно-элементных кодов, модель позволяет проводить исследование влияния фаски на НДС твэла.

Следует отметить факт значительной зависимости величины эффективного коэффициента E_{ff} от заданных условий эксплуатации твэла, от использованных функциональных зависимостей для описания свойств. При подборе величины эффективного коэффициента E_{ff} следует ориентироваться на результаты ПРИ по удлинению представительного количества твэлов.

Литература

1. Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Глушенков А.Е., Иванов Ю.А., Киреев Г.А., Скупов М.В., Гильмутдинов И.Ф., Гринь П.И., Звир Е.А., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н. Исследования смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в рамках проекта «ПРОРЫВ». *Атомная энергия*. 2017;122(3):156–167. EDN: YJJZIJ. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/687/666> (дата обращения 08.07.2026).
2. Kryukov F.N., Belyaeva A.V., Skupov M.V., Zabudko L.M., Mochalov Yu.S. Results of post-irradiation examinations of mixed nitride pins with gas and liquid metal sub-layers. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;384:111463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111463>
3. Zabudko L.M., Grachev A.F., Zherebtsov A.A., Lachkanov E.V., Mochalov Yu.S., Skupov M.V., Ivanov Yu.A., Kryukov F.N., Zvir E.A. Status on performance study of mixed nitride fuel pins of BREST reactor type. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;384:111430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111430>
4. Kerrisk F., Barner J.O., Petty R.L. Cladding ovalities in advanced liquid-metal fast breeder reactor fuel elements. *Nuclear Technology*. 1976;30(3):361–375. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT76-A31650>
5. Tanaka K., Maeda K., Katsuyama K., Inoue M., Iwai T., Arai Y. Fission gas release and swelling in uranium-plutonium mixed nitride fuels. *J. Nucl. Mater.* 2004;327(2-3):77–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.01.002>
6. Fromont M., Lamontagne J., Asou M., Aubrun I. Behaviour of Uranium-Plutonium Mixed Nitride and Carbide Irradiated in Phenix. Proceedings of GLOBAL-2005, October 9–13, 2005, Tsukuba, Japan, №329.
7. Фоломеев В.И., Ганина С.М., Исаков А.Г., Забудько Л.М., Мариненко Е.Е. Модель осевого взаимодействия нитридной топливной таблетки с оболочкой твэла быстрого реактора вследствие заклинивания. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;4:168–179. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.14>
8. Тутнов А.А., Ульянов А.И. Термомеханика твэлов энергетических реакторов. *Атомная энергия*. 1987;62(5):326–333. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t62-5_1987/p326/ (дата обращения 09.07.2026).
9. Лиханский В. В., Сорокин А. А., Зборовский В. Г., Улыбышев К. Е. Строжук А. В. Моделирование термомеханического поведения твэлов с выгорающим поглотителем на основе оксида гадолиния в коде РТОП-СА. *ВАНТ. Ядерно-реакторные константы*. 2021;4:35–46. EDN: ZIYLAF.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Издание 4-е, доп. Учебное пособие для вузов. М., «Высшая школа», 1972, 217 с.
11. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1975, 278 с.
12. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of Calculation Modelling of Nitride Fuel Performance: DRAGON Code. In Proc. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), (Proc. Int. Conf., Yekaterinburg, 2017), IAEA, Vienna (2018), Paper CN24563. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/085/49085765.pdf?r=1 (дата обращения 09.07.2026).
13. Ганина С. М., Забудько Л. М., Мариненко Е.Е., Фоломеев В. И. Математическая модель и метод расчета напряженно-деформированного состояния твэла быстрого реактора при аппроксимации скоростей изменения радиальных напряжений и перемещений квадратичными функциями радиуса. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2023;1:121–131. EDN: CATPXE. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.10>

14. Солонин С. И. Метод гистограмм. Электронное издание. Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, 2014. EDN: VGSBSF. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/36132/1/solonin_2_2014.pdf (дата обращения 09.07.2026).

15. Официальная электронная документация для ПК ABAQUS 6.13 (лицензия на использование № S100001227). Dassault Systèmes, 2013.

16. Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В., Смирнов В.С., Лопаткин А.В., Лемехов В.В., Моисеев А.В. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии. *Атомная энергия*. 2020;129(4):185–194. EDN: PGQMMY. URL: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3582/4518> (дата обращения 10.07.2026)

Поступила в редакцию 22.04.2026

После доработки 12.07.2026

Принята к опубликованию 10.09.2026

Авторы

Фоломеев Владимир Иванович, ведущий научный сотрудник,

E-mail: folomeev@ippe.ru

Ганина Светлана Михайловна, старший научный сотрудник,

E-mail: smgan@ippe.ru

Исаков Александр Григорьевич, старший научный сотрудник,

E-mail: agisakov@ippe.ru

Забудько Людмила Михайловна, научный руководитель по разработке и обоснованию плотного топлива и конструкционных материалов,

E-mail: zlm@pnproryv.ru

Мариненко Евгений Егорович, старший научный сотрудник,

E-mail: emarinenko@ippe.ru

UDC: 621.039.534

Model of Cladding Axial Loading due to Friction of Nitride Fuel Pellets and Cladding in Fast Reactor

Folomeev V.I.¹, Ganina S.M.¹, Isakov A.G.¹, Zabudko L.M.², Marinenko E.E.¹

¹ IPPE JSC,

1, Bondarenko Sq., 249033, Obninsk, Kaluga reg., Russia

² Proryv JSC,

1 Ramensky Boulevard, 119607 Moscow, Russia

Abstract

The paper is a prolongation of works on estimated deformation assessment of fuel pins with mixed uranium-plutonium nitride. Interest in this topic is caused by the fact of specific deformation behavior of nitride fuel pins such as noticeable elongation and higher ovality as compared with oxide fuel pins. It is believed that such effects are due to the local mechanical interaction of fuel pellets with cladding. The paper proposes the friction model, which assumes fuel-cladding interaction via axial friction force arising due to random displacement of fuel pellets. Due to the uncertainty of friction coefficients the model uses the effective friction coefficient E_{ff} , which provides a linear relationship between the axial force and the contact point interaction force between

the cladding and the fuel. The value of the effective E_{ff} coefficient is significantly dependent on the specified operating conditions of the fuel element and on the functional dependencies used to describe the fuel and cladding materials properties. The parameter value is chosen based on the analysis of a large amount of irradiated fuel pins elongation experimental data. The paper presents the results of fuel pin stress-strain state calculations according to the DRAKON code with the friction model based on results of post-irradiation examination of EFA -11 experimental fuel assembly with fuel pins of the BREST-OD-300 reactor type with the cladding made on EP823-Sh ferrite-martensitic steel and uranium-plutonium nitride. The experimental fuel assembly was irradiated in the BN-600 reactor to maximum burn-up of 9 at% and maximum damage dose of 107,6 dpa.

Keywords: mixed nitride uranium-plutonium fuel, jamming, friction, fuel pin, fuel pellet, post-irradiation examination, elongation, stress-strain state, model, verification, cladding.

For citation: Folomeev V.I., Ganina S.M., Isakov A.G., Zabudko L.M., Marinenko E.E. Model of Cladding Axial Loading due to Friction of Nitride Fuel Pellets and Cladding in Fast Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;3:207–219. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.15> (in Russian).

References

1. Grachev A.F., Zabudko L.M., Glushenkov A.E., Ivanov Y.A., Kireev G.A., Skupov M.V., Gilmutdinov I.F., Grin P.I., Zvir E.A., Kryukov F.N., Nikitin O.N. Investigations of mixed uranium-plutonium nitride fuel in project Breakthrough. *Atomic energy*. 2017;122:185–199. EDN: PSCJLJ. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-02548>
2. Kryukov F.N., Belyaeva A.V., Skupov M.V., Zabudko L.M., Mochalov Yu.S. Results of post-irradiation examinations of mixed nitride pins with gas and liquid metal sub-layers. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;384:111463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111463>
3. Zabudko L.M., Grachev A.F., Zherebtsov A.A., Lachkanov E.V., Mochalov Yu.S., Skupov M.V., Ivanov Yu.A., Kryukov F.N., Zvir E.A. Status on performance study of mixed nitride fuel pins of BREST reactor type. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;384:111430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111430>
4. Kerrisk F., Barner J.O., Petty R.L. Cladding ovalities in advanced liquid-metal fast breeder reactor fuel elements. *Nuclear Technology*. 1976;30(3):361–375. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT76-A31650>
5. Tanaka K., Maeda K., Katsuyama K., Inoue M., Iwai T., Arai Y. Fission gas release and swelling in uranium-plutonium mixed nitride fuels. *J. Nucl. Mater.* 2004;327(2-3):77–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.01.002>
6. Fromont M., Lamontagne J., Asou M., Aubrun I. Behaviour of Uranium-Plutonium Mixed Nitride and Carbide Irradiated in Phenix. Proceedings of GLOBAL-2005, October 9–13, 2005, Tsukuba, Japan, №329.
7. Folomeev V.I., Ganina S.M., Isakov A.G., Zabudko L.M., Marinenko E.E. A Model of the Nitride Fuel Pellet – Cladding Axial Interaction in a Fast Reactor Due to Jamming. *Nuclear Energy and Technology*. 2025;11(1):59–64. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.11.151561>
8. Tutnov A.A., Ul'yanov A.I. Power-reactor fuel-pin thermomechanics. *Atomic energy*. 1987;62(5):377–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01125193>
9. Likhanskiy V.V., Sorokin A.A., Zborovskiy V.G., Ulybyshev K.E., Strozhuik A.V. Simulation of the thermomechanical behavior of (U, Gd)O₂ fuel elements in the RTOP-CA code. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2021;4:35–46. EDN: ZIYLAF (in Russian)

10. Gmurman V.E. Theory of probability and mathematical statistics. 4-th additional edition. Study guide for Universities. Moscow, Higher school Publ., 1972, 217 p. (in Russian).
11. Likhachyov Yu.I., Pupko V.Ya. Strength of Reactor Fuel Elements. Moscow, Atomizdat Publ., 1975, 278 p. (in Russian)
12. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of Calculation Modelling of Nitride Fuel Performance: DRAGON Code. In Proc. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), (Proc. Int. Conf., Yekaterinburg, 2017), IAEA, Vienna (2018), Paper CN24563. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/085/49085765.pdf?r=1 (accessed Jul. 09, 2026).
13. Ganina S.M., Zabudko L.M., Marinenko E.E., Folomeev V.I. A Method to Calculate the Stress-Strain State of a Cylinder Using Quadratic Radius Functions for Approximation of Stress and Displacement Rates. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023;1:121–131. EDN: CATPXE. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.10> (in Russian).
14. Solonin S.I. Histogram method. Electronic edition. Ural Federal University named after first President of Russia B.N.Eltsin. Ekaterinburg, 2014. EDN: VGSBSF. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/36132/1/solonin_2_2014.pdf (accessed Jul. 09, 2026) (in Russian).
15. ABAQUS 6.13 Official electronic documentation (software license No. S100001227). Dassault Systèmes, 2013.
16. Adamov E.O., Kapliencko A.V., Orlov V.V., Smirnov V.S., Lopatkin A.V., Lemekhov V.V., Moiseev A.V. Brest Lead-Cooled Fast Reactor: From Concept to Technological Implementation. *Atomic energy*. 2020;129(4):179–187. EDN: NAKPSO. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00731-w>

Authors

Vladimir I. Folomeev, Leading Researcher,

E-mail: folomeev@ippe.ru

Svetlana M. Ganina, Senior Researcher,

E-mail: smgan@ippe.ru

Alexandr G. Isakov, Senior Researcher,

E-mail: agisakov@ippe.ru

Liudmila M. Zabudko, Scientific Supervisor on the dense fuel and structure materials development,

E-mail: zlm@pnproryv.ru

Evgeny E. Marinenko, Senior Researcher,

E-mail: emarinenko@ippe.ru