

МОДЕЛЬ ОСЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НИТРИДНОЙ ТОПЛИВНОЙ ТАБЛЕТКИ С ОБОЛОЧКОЙ ТВЭЛА БЫСТРОГО РЕАКТОРА ВСЛЕДСТВИЕ ЗАКЛИНИВАНИЯ

Фоломеев В.И.¹, Ганина С.М.¹, Исаков А.Г.¹, Забудько Л.М.², Мариненко Е.Е.¹

¹АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249039, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

²АО «Прорыв»,

107140, г. Москва, пл. Академика Доллежала, д. 1



При проведении послереакторных исследований нитридных твэлов, облученных в составе экспериментальных сборок реактора БН-600, отмечены заметное превышение в длине и более высокая эллипсность оболочки твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом по сравнению с оксидными твэлами. Проведенный анализ позволяет утверждать, что это происходит вследствие локального механического воздействия на оболочку со стороны топливных таблеток. Причиной термомеханического взаимодействия топлива с оболочкой может являться несоосность топливных таблеток, их заклинивание, растрескивание таблеток в результате действия термических напряжений при выходе реактора на мощность и последующее заклинивание крупных топливных фрагментов в оболочке. Предлагается рассмотреть модель заклинивания топлива, которая предполагает взаимодействие оболочки и топлива в каждом расчетном слое по высоте активной зоны через осевую силу. Осевая сила определяется из условия равновесия радиального сечения оболочки и топлива и обеспечивает соблюдение условия заклинивания (одинаковый прирост осевой деформации). Представленные результаты верификации модели заклинивания по результатам ПРИ экспериментальной ЭТВС-11 БН-600 показывают, что модель позволяет воспроизвести величину удлинения оболочки твэлов. Экспериментальная сборка ЭТВС-11 с твэлами типа реактора БРЕСТ-ОД-300 с оболочкой из стали ферритно-мартенситного класса ЭП823-Ш и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом облучена в реакторе БН-600 до максимального выгорания 9% т.а., максимальной повреждающей дозы 107.6 сна.

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

Для цитирования: 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. – С. 168–179. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.14>

ВВЕДЕНИЕ

При проведении послереакторных исследований (ПРИ) нитридных твэлов, облученных в составе комбинированных и полномасштабных экспериментальных сборок реактора БН-600, отмечен факт специфического формоизменения твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП) топливом – заметное превышение в длине и более высокая эллипсность оболочки твэла по сравнению с оксидными твэлами [1–3]. Проведенный анализ и обобщение результатов ПРИ по размерным изменениям твэлов с плотным топливом с учетом зарубежных данных [4–6] позволяют утверждать, что это происходит вследствие локального механического воздействия на оболочку со стороны топливных таблеток. Причиной термомеханического взаимодействия топлива с оболочкой может являться несоосность топливных таблеток, их заклинивание, растрескивание таблеток в результате действия термических напряжений при выходе реактора на мощность и последующее заклинивание крупных топливных фрагментов в оболочке.

Одной из задач математического моделирования термомеханического поведения твэла является предсказание параметров его напряженно-деформированного состояния (НДС), в том числе формоизменения. Для этого должны быть разработаны модели возможного локального взаимодействия оболочки и топлива. Разрабатываемые модели основываются на результатах экспериментов в предположении различных схем взаимодействия топлива и оболочки:

- осевая деформация оболочки между локально заклиненной топливной таблеткой и нижним фиксатором топливного столба [7];
- осевая деформация под действием осевой силы, возникающей из-за трения при случайном смещении топливных таблеток [8].

В данной работе предлагается к рассмотрению модель заклинивания топлива.

ОЦЕНКА УДЛИНЕНИЯ ТВЭЛА ВСЛЕДСТВИЕ ЗАКЛИНИВАНИЯ, ВЫЗВАННОГО СМЕЩЕНИЕМ ТАБЛЕТОК И (ИЛИ) ИХ ПЕРЕКОСОМ

Расчетные исследования проводились с помощью программы ДРАКОН, в которой для расчета полей температур и параметров НДС (напряжений и деформаций) стержневых цилиндрических твэлов реализован следующий подход [9–11]:

- активный участок твэла разбивается на интервалы по высоте (N_z аксиальных сечений), достаточно малые, чтобы можно было пренебречь осевыми градиентами температур и нейтронного потока; каждое из N_z аксиальных сечений твэла рассматривается в условиях плоской деформации;

- в топливном сердечнике и оболочке каждое сечение в радиальном направлении представляется в виде тонких коаксиальных слоев; в пределах каждого слоя в силу его тонкости полагаются равномерными температура, набухание, ползучесть и физико-механические свойства материала;

- в пределах одного временного интервала и для каждого сечения по высоте твэла производится расчет эксплуатационных и нагружающих факторов – температура (топливный

сердечник, зазор, оболочка), распухание материалов, объем газовых продуктов деления (ГПД), вышедших под оболочку на данном участке;

- решается система уравнений, описывающих НДС оболочки и топлива, записанная в координатах R-геометрии (симметричная постановка задачи);
- выполняется интегрирование по высоте активного участка твэла с целью определения суммарного объема ГПД, вышедших под оболочку на данном шаге по времени, а также расчет новых (изменяющихся во времени) значений геометрических характеристик твэла.

При таком подходе решения задачи НДС удлинение твэла в результате возможного локального взаимодействия оболочки и топлива, вызванного смещением таблеток и (или) перекосом, можно оценить с помощью моделирования заклинивания топлива. В работе предполагается следующая постановка задачи:

- заклинивание топливных таблеток может быть задано до определенной координаты по высоте активной зоны (а.з.) (предполагается заклинивание по всей высоте а.з.);
- взаимодействие оболочки и топлива в каждом расчетном слое по высоте а.з. происходит через осевую силу, которая определяет одинаковый для оболочки и топлива прирост осевой деформации за время, в течение которого соблюдается условие заклинивания.

Интегральное условие осевого равновесия радиального сечения оболочки:

$$\int_{R_{clad_in}}^{R_{clad_out}} \dot{\sigma}_z \cdot r \cdot dr + g_0 - \frac{\dot{F}_{ax}}{2\pi} = 0, \quad (1)$$

$$g_0 = \frac{\dot{P}_{out} \cdot R_{clad_out}^2 - \dot{P}_{gap} \cdot R_{clad_in}^2}{2}. \quad (2)$$

Интегральное условие осевого равновесия радиального сечения топливного сердечника:

$$\int_{R_{fuel_in}}^{R_{fuel_out}} \dot{\sigma}_z^* r dr + g_0^* + \frac{\dot{F}_{ax}}{2\pi} = 0, \quad (3)$$

$$g_0^* = \dot{P}_{gap} \frac{R_{fuel_out}^2}{2} - \dot{P}_{in} \frac{R_{fuel_in}^2}{2}. \quad (4)$$

Здесь \dot{F}_{ax} – скорость изменения осевой силы, действующей на оболочку и топливо при условии, что отсутствует контакт между топливом и оболочкой (зазор между топливом и оболочкой не выбран), и скорость осевой деформация оболочки и топлива одинакова; 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, $\dot{\sigma}_z$, $\dot{\sigma}_z^*$ – скорости изменения осевого напряжения оболочки и топлива соответственно.

Программа ДРАКОН решает систему уравнений для поиска параметров НДС (напряжений и деформаций), записанную в скоростях искомых параметров, поэтому интегральные условия равновесия представлены также в скоростях.

Реализованный в программе алгоритм моделирования работы твэла и расчета параметров НДС в этом случае предполагает определение \dot{F}_{ax} из решения системы уравнений для оболочки. $\dot{\epsilon}_x$ – скорость осевой деформации – определяется из решения системы уравнений для топлива. Далее выполняется итерационный процесс до получения сходимости результатов расчета с заданной точностью.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СОВМЕСТНОГО ЗАКЛИНИВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТКИ И ОБОЛОЧКИ В СРАВНЕНИИ С АНАЛИТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЕМ

Для демонстрации правильности реализации алгоритма взаимодействия оболочки и топлива через осевую силу, возникающую при заклинивании топливной таблетки, представлен тестовый расчет НДС двух цилиндров (внутренний – «топливо», внешний – «оболочка») с заклиниванием внутреннего цилиндра («топливо») и сравнение с аналитическим решением, когда осевая сила, действующая на цилиндры, задана в качестве входной величины. Сначала выполняется расчет с моделированием заклинивания внутреннего цилиндра. В результате расчета получаем значение осевой силы F_{ax} , действующей на оболочку и внутренний цилиндр. В следующем расчете (без заклинивания) используется (прикладывается к верхним торцам цилиндров) значение осевой силы F_{ax} , найденной в задаче с заклиниванием. Выполняется сравнение двух численных решений между собой и с аналитическим решением.

Постановка задачи, имеющей аналитическое решение [12, 13]: рассматривается длинный полый толстостенный цилиндр с доньшками в неоднородном поле температур под действием внутреннего и наружного давлений; плоское деформирование, осесимметричное нагружение (рис. 1). Заданная и приложенная к верхнему торцу цилиндра осевая сила F_{ax} оказывает влияние на величину равномерно распределенного по торцу нормального напряжения σ_z .

Геометрия цилиндров:

$R_{fuel_in}=0$ мм; $R_{fuel_out}=4.25$ мм – внутренний и внешний радиусы внутреннего цилиндра;

$R_{clad_in}=4.35$ мм; $R_{clad_out}=4.85$ мм – внутренний и внешний радиусы оболочки.

Давление:

$P_1=0$ кг/мм² – давление внутри внутреннего цилиндра;

$P_2=0$ кг/мм² – давление на внешней поверхности внутреннего цилиндра;

$P_3=10$ кг/мм² – давление на внешней поверхности внешнего цилиндра.

Принято для обоих цилиндров: коэффициент температурного расширения $\alpha=0$ (1/К), модуль Пуассона $\mu=0.3$; модуль упругости $E=260$ ГПа.

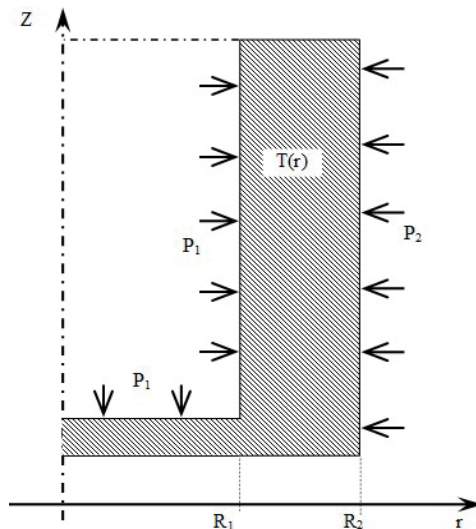


Рис. 1. Расчетная схема

Из решения по программе ДРАКОН задачи с заклиниванием цилиндров, находящихся под действием давления на внешнюю поверхность внешнего цилиндра (оболочки), определяем осевую силу, действующую на верхние торцы цилиндров. В рассматриваемом случае получаем $F_{ax} = 235.94$ кгс. Следующим шагом является решение задачи расчета напряженно-деформированного состояния внутреннего и внешнего цилиндров без учета заклинивания, но с учетом действующей на цилиндры этой осевой силы.

На рисунке 2 сплошной линией представлено аналитическое решение задачи определения НДС цилиндра под давлением с учетом действия осевой силы; символами (точки) показано решение по программе ДРАКОН тестовой задачи в двух постановках (с учетом заклинивания и без заклинивания с учетом действия заданной осевой силы $F_{ax} = 235.94$ кгс). Полученные решения совпадают между собой и с аналитическим решением.

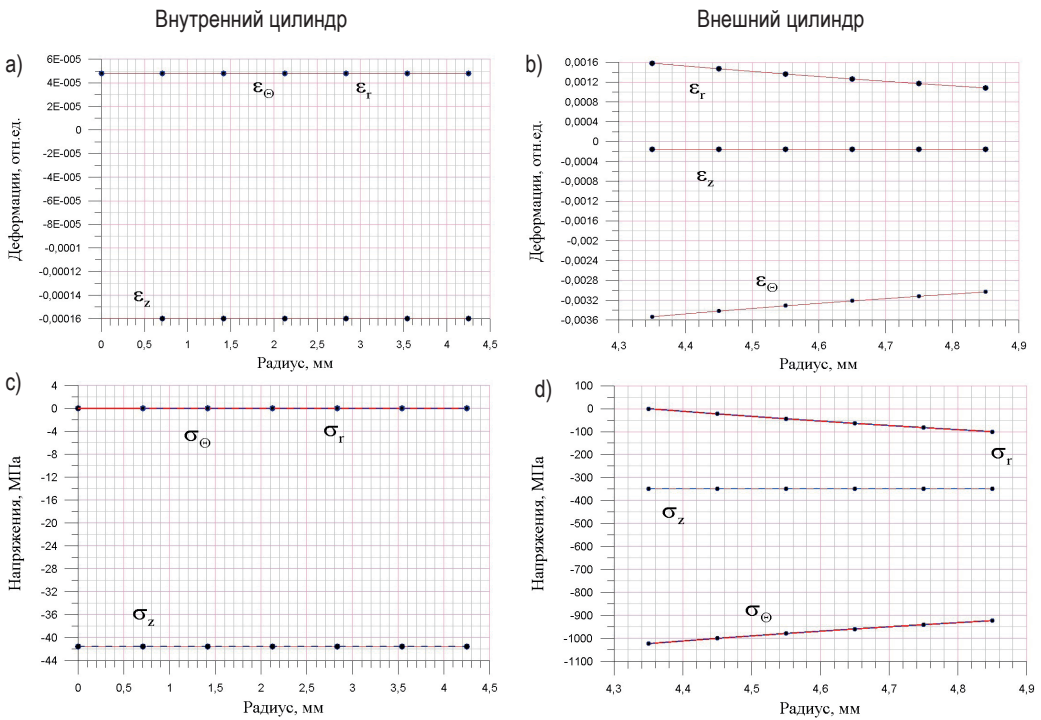


Рис. 2. Результаты расчета тестовой задачи с учетом заклинивания топлива, с учетом действия внешней осевой силы без заклинивания и аналитическое решение: символы (точки) — решение по программе ДРАКОН

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЭТВС-11 БН-600

Экспериментальная сборка ЭТВС-11 с твэлами типа реактора БРЕСТ-ОД-300 с оболочкой из стали ферритно-мартенситного класса ЭП823-Ш и СНУП-топливом облучена в реакторе БН-600 до максимального выгорания 9% т.а., максимальной повреждающей дозы 107.6 сна [14].

Расчеты проведены с учетом взаимодействия топлива и оболочки по высоте активной зоны через осевую силу даже при наличии зазора между топливом и оболочкой (модель заклинивания).

Предполагается, что заклинивание таблеток по всей высоте активной зоны происходит при выходе на мощность и сохраняется после в течение времени Δt_{rel} . На рисунке 3

символами показано удлинение оболочки и топливного столба в конце кампании в зависимости от заданного в расчете Δt_{rel} . Удлинение оболочки в случае сохранения режима заклинивания на всем протяжении микрокампании до разгрузки составило примерно 12 мм, т.е. при использовании предложенной модели заклинивания в зависимости от продолжительности режима заклинивания можно получить удлинение оболочки от 3 до 12 мм. Близки к средним (по результатам ПРИ) значениям удлинения топлива и оболочки результаты расчетов с заданием $\Delta t_{rel} = 500$ ч и $\Delta t_{rel} = 1000$ ч.

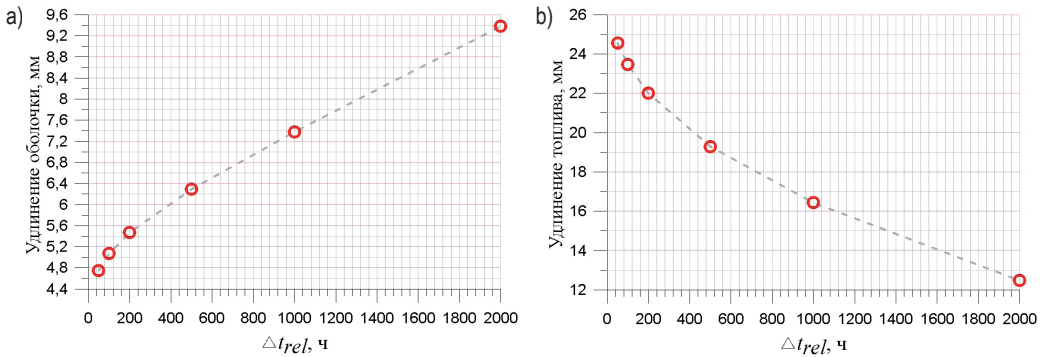


Рис. 3. Удлинение оболочки и топливного столба в зависимости от заданного в расчете Δt_{rel}

На рисунке 4 показана динамика изменения длины топлива и оболочки в течение кампании для варианта задания $\Delta t_{rel} = 500$ ч после выхода на мощность и для расчета с режимом заклинивания, действующего до сброса мощности на перегрузках.

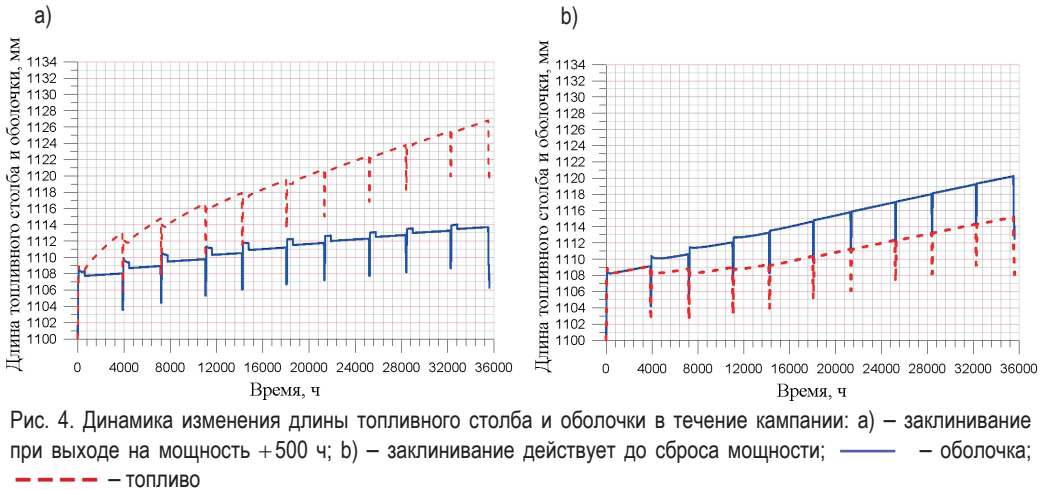


Рис. 4. Динамика изменения длины топливного столба и оболочки в течение кампании: а) – заклинивание при выходе на мощность +500 ч; б) – заклинивание действует до сброса мощности; — — — — топливо; — — — — оболочка;

На рисунке 5 показаны значения окружных напряжений на оболочке (рис. 5а, рис. 5б) и осевых напряжений на оболочке и топливе (рис. 5с, рис. 5д) по высоте а.з. примерно через 500 ч после выхода на мощность перед отменой ($t = 4447.04$ ч) и сразу после отмены режима заклинивания ($t = 4459.08$ ч) для варианта расчета с $\Delta t_{rel} = 500$ ч.

На рисунке 6 показаны расчетные кривые и результаты ПРИ (символы) для диаметров оболочки и топливного столба.

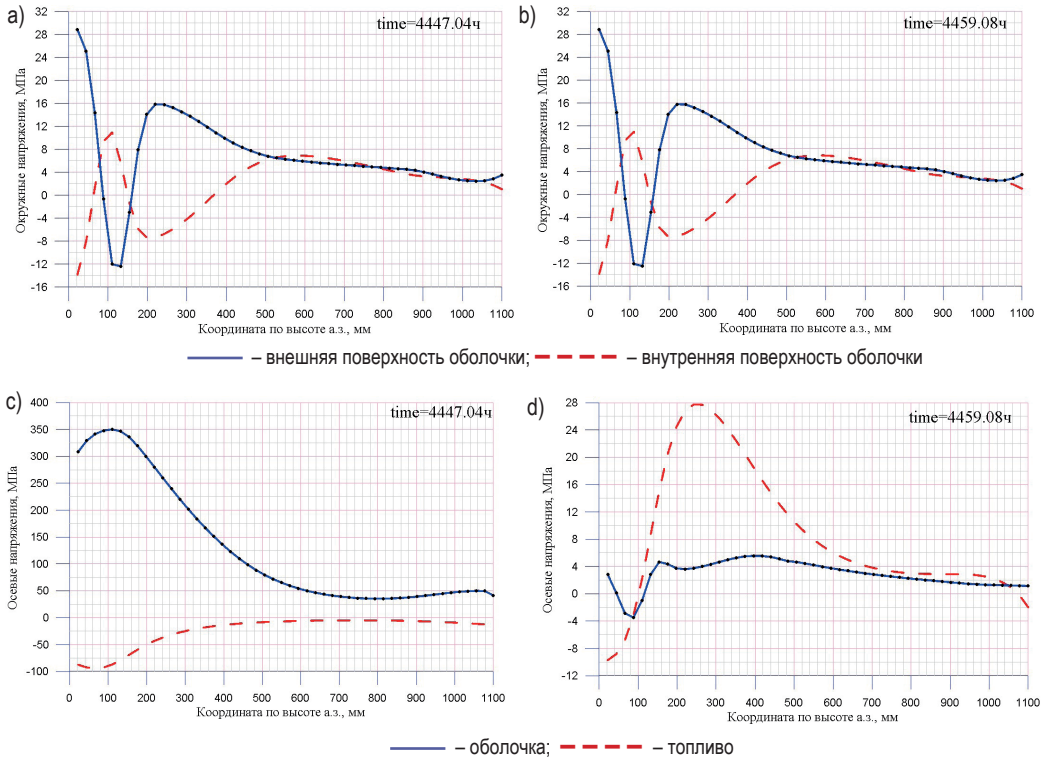


Рис. 5. Значения окружных и осевых напряжений по высоте активной зоны через ~500 ч после выхода на мощность перед отменой и сразу после отмены режима заклинивания

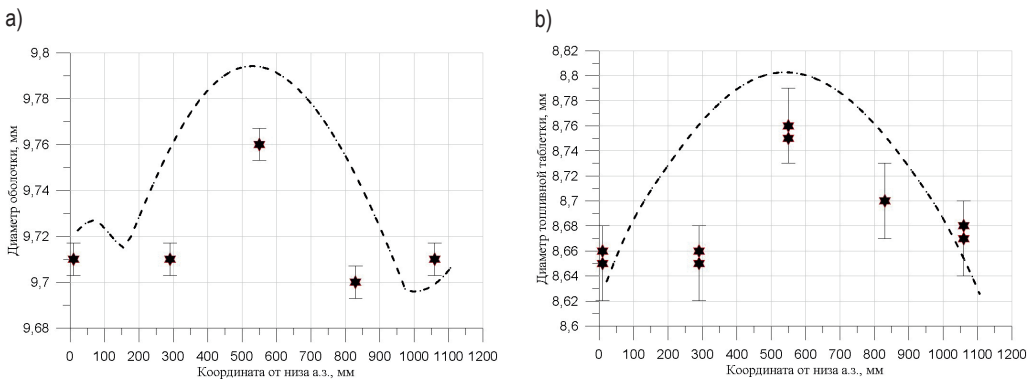


Рис. 6. Расчетные кривые и результаты ПРИ для диаметров оболочки и топливного столба

Для варианта расчета с $\Delta t_{rel}=500$ ч. на рис. 7 показаны максимальное по высоте а.з. значение отношения расчетной величины интенсивности напряжений σ_i к пределу прочности с учетом коэффициента запаса ($R_m^T / 1.5$) в соответствии с критерием статической прочности [9] (рис. 7а); соответствующая ему координата по высоте а.з. (рис. 7б);

$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}$, где σ_θ , σ_z , σ_r — главные напряжения в цилиндрической системе координат.

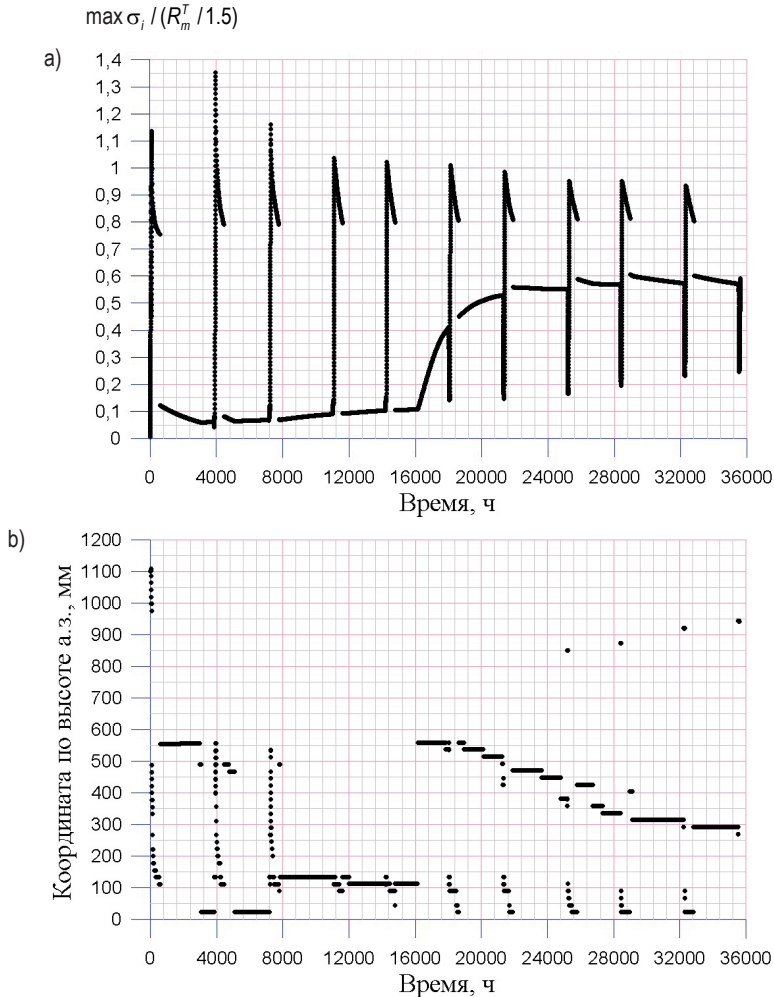


Рис. 7. Максимальное по высоте а.з. значение отношения $\sigma_i / (R_m^T / 1.5)$ во времени и соответствующая ему координата по высоте а.з.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для описания возможного локального взаимодействия плотного нитридного топлива с оболочкой твэла быстрого реактора предложена модель заклинивания топливной таблетки. Модель предполагает взаимодействие оболочки и топлива через осевую силу. Осевая сила определяется из условия равновесия радиального сечения оболочки и топлива и обеспечивает соблюдение условия заклинивания (одинаковый прирост осевой деформации). В представленном варианте модели предполагается заклинивание по всей высоте а.з.

Проведена верификация модели совместного заклинивания топливных таблеток на примере расчета НДС двух цилиндров (внутренний – «топливо», внешний – «оболочка») с заклиниванием внутреннего цилиндра («топлива»).

Представленные результаты верификации модели заклинивания по результатам ПРИ экспериментальной ЭТВС-11 БН-600 показывают, что модель позволяет воспроизвести

величину удлинения оболочки твэлов. При использовании предложенной модели удлинение оболочки может составлять от 3 до 12 мм в зависимости от продолжительности режима заклинивания. Этот диапазон покрывает диапазон разброса экспериментальных данных по удлинению (3.5 мм; 10.8 мм) для восемнадцати исследованных твэлов ЭТВС-11.

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. – Т. 122. – Вып.3. – С. 156–167.
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. – Vol. 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. – Vol. 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. – Vol. 39. – PP. 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. – Vol. 327. – No. 1. – PP. 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, no. 329.
7. Лихачев Ю.И., Попов В.В., Николаев В.А., Хмелевский М.Я., Калинин В.В., Филиппов В.Н. Оценка удлинения оболочки твэла РБМК при циклических изменениях мощности. // Атомная энергия. – 1981. – Т. 51. – Вып. 6. – С. 362–366.
8. Тутнов А.А., Ульянов А.И. Термомеханика твэлов энергетических реакторов. // Атомная энергия. – 1987. – Т. 62. – Вып. 5. – С. 326–333.
9. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975, 278 с.
10. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of Calculation Modelling of Nitride Fuel Performance: DRAKON Code / 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 CN245 63. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/085/49085765.pdf?r=1 (дата доступа 10.06.2024).
11. Ганина С.М., Забудько Л.М., Мариненко Е.Е., Фоломеев В.И. Метод расчета напряженно-деформированного состояния цилиндра при аппроксимации скоростей напряжений и перемещений квадратичными функциями радиуса. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.10>
12. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Том 2. Более сложные вопросы теории и задачи. – М.: Наука, 1965, стр.173, 192.
13. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970, стр. 335–336.
14. Адамов Е.О., Беляева А.В., Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Иванов Ю.А., Крюков Ф.Н., Лачканов Е.В., Мариненко Е.Е., Мочалов Ю.С., Поролло С.И., Скупов М.В. Основные итоги выполнения комплексной

программы расчетно-экспериментального обоснования твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП) топливом реакторов БН-1200 и БРЕСТ. // Атомная энергия. –2021.– Т.131. – Вып.5. – С. 265–270.

Поступила в редакцию 20.06.2024

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, к.т.н.,

E-mail: zlm@prnproryv.ru

Мариненко Евгений Егорович, старший научный сотрудник,

E-mail: emarinenko@ippe.ru

UDC: 621.039.534

A Model of the Nitride Fuel Pellet – Cladding Axial Interaction in a Fast Reactor Due to Jamming

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 Acad. Dollezhal Sq., 107140 Moscow, Russia

Abstract

In the process of a post-irradiation examination of nitride fuel pins irradiated as part of experimental BN-600 reactor assemblies a noticeable elongation and a higher ovality of nitride fuel pins cladding were observed as compared with oxide fuel pins. The analysis results suggest that this takes place due to a local mechanical effect fuel pellets have on the cladding. The potential cause for the fuel-cladding thermomechanical interaction is the fuel pellet misalignment, the pellet jamming and cracking as a result of thermal stresses in conditions of the reactor rise to power, and subsequent jamming of large fuel fragments in the cladding.

The paper presents the fuel jamming model which assumes the fuel-cladding interaction via an axial force in each calculated radial layer. The axial force is determined from the condition of equilibrium in the radial cladding and fuel cross-section and ensures that the jamming condition (the same growth in axial deformation) is complied with. Jamming is assumed along the entire core height in the presented model version.

The presented results of the jamming model verification, based on the BN-600 EFA-11 experimental fuel assembly post-irradiation examination results, show that the model allows simulating the fuel pin cladding elongation. The experimental EFA-11 fuel assembly with fuel pins of the BREST-OD-300 reactor type with the cladding of EP823-Sh ferrite-martensitic steel and nitride uranium-plutonium fuel was irradiated in the BN-600 reactor to the maximum burnup of 9 at.% and the maximum damage dose of 107.6 dpa.

Keywords: mixed nitride uranium-plutonium fuel, jamming, fuel pin, fuel pellet, post-irradiation examination (PIE), elongation, stress-strain state (SSS), model, verification.

For citation: 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. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 168–179. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.14> (in Russian).

References

1. Grachev A.F., Zabudko L.M., Glushenkov A.E., Ivanov Y.A., Kireev G.A., Skupov M.V., Gilmudtinov 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, vol. 122, no. 3, pp. 185–199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0254-8>
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, vol. 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, vol. 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, vol. 39, pp. 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, vol. 327, no. 1, pp. 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. Likhachev Yu.I., Popov V.V., Nikolaev V.A., Khmelevski M.Ya., Kalinin V.V., Filippov V.N. Shell elongation of RBMK fuel element under cyclic power changes. *Atomic energy*, 1981, vol. 51, no. 6, p. 760–766. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01121675>
8. Tutnov A.A., Ylyanov A.I. Power-reactor fuel-pin thermomechanics. *Atomic energy*. 1987, vol. 62, no. 5, pp. 377–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01125193>
9. Likhachev Yu.I., Pupko V.Ya. *Strength of Reactor Fuel Elements*. Moscow, Atomizdat Publ., 1975, 278 p. (in Russian).
10. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of Calculation Modelling of Nitride Fuel Performance: DRAGON Code / *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 IAEA-CN245-063. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/085/49085765.pdf?r=1 (accessed Jun. 10, 2024).
11. 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, no. 1, pp. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.10> (in Russian)
12. Timoshenko S.P. *Strength of Materials. Part II. Advanced Theory and Problems*. Moscow, Nauka Publ., 1965, 480 p. (in Russian).
13. Lurie A.I. *Theory of elasticity*. Moscow, Nauka Publ., 1970, 939 p.
14. Adamov E.O., Grachev A.F., Zabudko L.M., Lachkanov E.V., Mochalov Yu.S., Beljaeva A.V., Kryukov F.N., Ivanov Yu.A., Skupov M.V., Marinenko E.E., Porollo S.I. Key Outcomes of Comprehensive Computational and Experimental Validation of Fuel Rods with Mixed Uranium-Plutonium Nitride Fuel for

the BN-1200 and Brest Reactors. *Atomic energy*. 2022, vol. 131, no. 5, pp. 268–273. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00877-1>

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, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: zlm@pnproryv.ru

Evgeny E. Marinenko, Senior Researcher,

E-mail: emarinenko@ippe.ru