

МЕТОД РАСЧЁТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРА ПРИ АППРОКСИМАЦИИ СКОРОСТЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КВАДРАТИЧНЫМИ ФУНКЦИЯМИ РАДИУСА

С.М. Ганина*, Л.М. Забудько, Е.Е. Мариненко*, В.И. Фоломеев***

* АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

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

** АО «Прорыв»,

107140, г. Москва, Малая Красносельская ул., д. 2/8, к. 7

Р

Предложен метод решения задачи напряжённо-деформированного состояния цилиндра в двумерной rz -постановке, основанный на аппроксимации скоростей изменения радиальных напряжений и перемещений квадратичными функциями в пределах слоя по радиусу. Используемая дискретная аппроксимация позволяет упростить формальные вычисления при получении результирующих систем уравнений, сократить время расчёта при сохранении высокой точности вычисления параметров. На примере аналитического теста, а также на примере расчета напряженно-деформированного состояния экспериментального твэла со смешанным уран-плутониевым нитридным топливом реактора БН-600 показано, что точность решения системы уравнений с использованием квадратичной аппроксимации даже при малом количестве точек (< 50) по радиусу не хуже чем решение системы с использованием линейной аппроксимации при существенно большем количестве (> 200) точек по радиусу. Предложенные модель и метод расчёта НДС цилиндра могут быть использованы в программах расчёта НДС твэлов с различными видами топлива быстрого реактора для увеличения точности при существенном сокращении времени расчёта, что важно при проведении многочисленных параметрических исследований, а также при использовании инженерных кодов в составе интегральных кодов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, аппроксимация, система дифференциальных уравнений, алгоритм решения, аналитический тест, твэл, смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, быстрый реактор, код ДРАКОН.

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> .

© С.М. Ганина, Л.М. Забудько, Е.Е. Мариненко, В.И. Фоломеев, 2023

ВВЕДЕНИЕ

В основу расчета напряжённо-деформированного состояния (НДС) твэла быстрого реактора положена математическая модель [1]. Рассматривается радиальное сечение сплошного цилиндрического сердечника в условиях плоской деформации – достаточная удаленность от торцов и, соответственно, малые осевые градиенты температуры и нейтронного потока. Расчетная схема представляет собой сечение, состоящее из тонких коаксиальных слоев (рис. 1). В пределах каждого слоя, в силу его тонкости, полагаются равномерными температура, распухание, ползучесть и физико-механические свойства материала. Предполагается осесимметричное нагружение в главных осях цилиндрических координат.

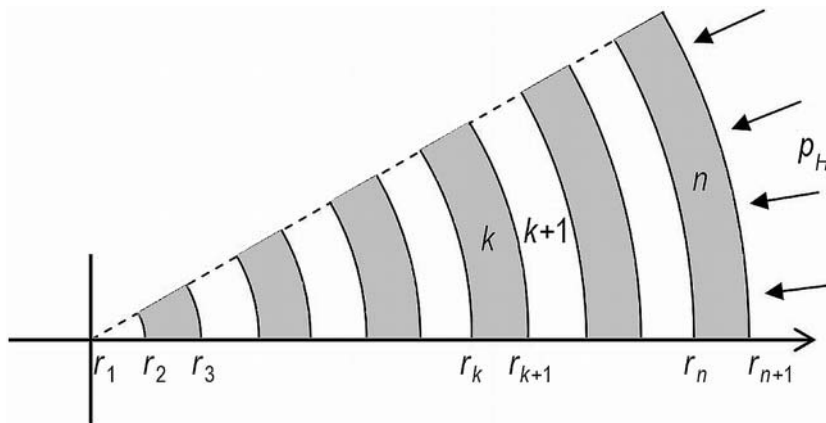


Рис. 1. Расчётная схема. Часть радиального сечения с разбивкой на слои

В пределах каждого слоя сплошного цилиндрического сердечника полагаются квадратичными функциями радиуса скорости изменения радиальных напряжений и перемещений:

$$s'_{rk} = a_k r^2 + b_k r + g_k \tag{1}$$

$$U'_{rk} = c_k r^2 + d_k r + e_k \tag{2}$$

где $k = 1, \dots, n$; $r_k \leq r \leq r_{k+1}$; $a_k, b_k, g_k, c_k, d_k, e_k$ – константы, подлежащие определению.

Уравнения состояния отдельного слоя в главных осях цилиндрической системы координат для k -го слоя

$$\epsilon'_{rk} = c_{rrk} \sigma'_{rk} + c_{r\theta k} \sigma'_{\theta k} + c_{rxk} \sigma'_{xk} + \epsilon'_{rk}{}^{cr} + \epsilon'_{vk}/3, \quad (x, r, \theta), \tag{3}$$

где $c_{rrk}, c_{r\theta k}$ – «упругие» коэффициенты: $c_{rrk} = 1/E(T_k)$, $c_{r\theta k} = -\mu_k/E(T_k)$, (x, r, θ) ; $\mu(T_k)$ – коэффициент Пуассона; $E(T_k)$ – модуль упругости; T_k – температура k -го слоя.

Из уравнения состояния для компонента ϵ'_{xk} , учитывая, что он не зависит от r , получаем выражение для σ'_{xk}

$$\sigma'_{xk} = [\epsilon'_{xk} - c_{rxk} \sigma'_{rk} - c_{xqk} \sigma'_{qk} - \psi_{xk}] / c_{xxk}, \tag{4}$$

где $\psi_{xk} = \epsilon'_{xk}{}^{cr} + \epsilon'_{vk}/3$.

Компоненты скорости деформации ползучести в рамках теории течения имеют вид

$$\epsilon'_{rk}{}^{cr} = \frac{2\sigma_{rk} - \sigma_{\theta k} - \sigma_{xk}}{2\sigma_i} \xi_{ik}{}^{cr}, \quad (x, r, \theta); \tag{5}$$

$$\xi_{ik}^{cr} = B(T_k) \cdot \sigma_{ik}^v, \quad (6)$$

где $B(T_k)$, v_k – эмпирические параметры; $\varepsilon'_{vk} = 3\alpha_k T'_k + S'_k$ – скорость изотропной деформации; S'_k – скорость локального радиационного распухания материала в слое; $3\alpha_k T'_k$ – скорость объёмного температурного расширения слоя.

В главных осях цилиндрической системы координат справедливы следующие соотношения между скоростями деформаций и радиальных перемещений:

$$\varepsilon'_{rk} = \frac{dU'_{rk}}{dr}; \quad \varepsilon'_{\theta k} = \frac{U'_{rk}}{r}; \quad \frac{d\varepsilon'_{\theta k}}{dr} = 0. \quad (7)$$

Уравнение равновесия элемента объема k -го слоя

$$\frac{d\sigma'_{rk}}{dr} + \frac{\sigma'_{rk} - \sigma'_{\theta k}}{r} = 0, \quad k = 1, \dots, n \quad (\sigma'_{r1}(0) = \sigma'_{\theta 1}(0) \text{ в точке } r = 0). \quad (8)$$

Интегральное осевое равновесие радиального сечения

$$\sum_{k=1}^n \int_{r_k}^{r_{k+1}} r \cdot \sigma'_{\theta k}(r) dr + g_0 = 0, \quad (9)$$

где $g_0 = 0,5 \cdot (p_H' \cdot r_{n+1}^2 - p_B' \cdot r_1^2)$.

Из условия совместности скоростей напряжений и деформаций между расчетными слоями можно записать условия сшивки слоёв:

$$\begin{cases} \sigma'_{rk}(r_{k+1}) = \sigma'_{rk+1}(r_{k+1}), \\ U'_{rk}(r_{k+1}) = U'_{rk+1}(r_{k+1}), \end{cases} \quad k = 1, \dots, n-1; \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma'_{rk}(r_{k+1})}{\partial r} = \frac{\partial \sigma'_{rk+1}(r_{k+1})}{\partial r} \\ \frac{\partial U'_{rk}(r_{k+1})}{\partial r} = \frac{\partial U'_{rk+1}(r_{k+1})}{\partial r}, \end{cases} \quad k = 1, \dots, n-1. \quad (11)$$

В таблицу 1 сведены формулы для граничных условий в случае использования квадратичных зависимостей скорости изменения радиальных напряжений и перемещений от радиуса для сплошного цилиндра и для цилиндра с центральным отверстием.

Таблица 1

Граничные условия для цилиндра

Без центрального отверстия ($r_1 = 0$)	С центральным отверстием ($r_1 \neq 0$)	
При $r = r_1$		
$U'_{r=0}(0) = 0,$ $\partial \sigma'_{r=0}(0) / \partial r = 0$	$\sigma'_{r1}(r_1) = -p'_{\text{int}}$	(12)
При $r = r_{n+1}$		
$\sigma'_{rn}(r_{n+1}) = -p'_H$	$\sigma'_{r(n+1)}(r_{n+1}) = -p'_H$	(13)
Из условия (12) при $r = r_1$		
$e_1 = 0,$ $b_1 = 0$	Дополнительное уравнение: $a_1 r_1^2 + b_1 r_1 + g_1 = -p'_{\text{int}},$ e_1, b_1 – искомые величины	(14)
Из условия (13) при $r = r_{n+1}$		
$a_n r_{n+1}^2 + b_n r_{n+1} + g_n = -p'_H$	$a_n r_{n+1}^2 + b_n r_{n+1} + g_n = -p'_H$	(15)

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ КИНЕТИКУ НДС В РАСПУХАЮЩЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЕРДЕЧНИКЕ

Из условий сшивки слоёв и с учётом граничных условий получим универсальные формулы для коэффициентов e_j, d_j, g_j, b_j ($j = 1, \dots, n$).

Путём преобразований и подстановок в итоге получим систему уравнений, которые полностью определяют при заданных начальных условиях кинетику параметров НДС.

Для определения неизвестных констант $a_k, c_k, g_1, \varepsilon'_x, d_1$ ($k = 1, \dots, n$) в каждый момент времени имеем $2n + 3$ линейных алгебраических уравнений для определения НДС в сплошном сердечнике.

Для определения неизвестных констант $a_k, c_k, g_1, \varepsilon'_x, d_1, b_1, e_1$ ($k = 1, \dots, n$) в каждый момент времени имеем $2n + 5$ линейных алгебраических уравнений для определения НДС в сердечнике с центральным отверстием.

Представим систему уравнений в матричном виде

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{p}, \tag{16}$$

где

$$\mathbf{x}^T = [c_1, \dots, c_n, a_1, \dots, a_n, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5],$$

$$\mathbf{p}^T = [p_{c_1}, \dots, p_{c_n}, p_{a_1}, \dots, p_{a_n}, p_{x_1}, p_{x_2}, p_{x_3}, p_{x_4}, p_{x_5}].$$

Набор $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ соответствует набору $[g_1, \varepsilon'_x, d_1, b_1, e_1]$.

Матрица \mathbf{A} размером $(2n + m) \times (2n + m)$ ($m = 5$ при расчёте НДС цилиндра с центральным отверстием и $m = 3$ для сплошного цилиндра) состоит из блоков H_1, H_2, H_4, H_5 размером $n \times n$ (над главной диагональю в блоках стоят нули); H_3, H_6 размером $n \times m$; H_7, H_8 размером $m \times n$; блока H_9 размером $m \times m$.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & H_3 \\ H_4 & H_5 & H_6 \\ H_7 & H_8 & H_9 \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Представим значения коэффициентов c_i системы уравнений (16) в виде

$$\mathbf{c} = H_1^{-1} \mathbf{p}_c - H_1^{-1} H_2 \mathbf{a} - H_1^{-1} H_3 \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix}. \tag{18}$$

Исключая \mathbf{c} из оставшихся уравнений системы, получим систему уравнений

$$\begin{aligned} (H_5 - H_4 H_1^{-1} H_2) \mathbf{a} + (H_6 - H_4 H_1^{-1} H_3) \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix} &= \mathbf{p}_a - H_4 H_1^{-1} \mathbf{p}_c, \\ (H_8 - H_7 H_1^{-1} H_2) \mathbf{a} + (H_9 - H_7 H_1^{-1} H_3) \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_5 \end{pmatrix} &= \mathbf{p}_x - H_7 H_1^{-1} \mathbf{p}_c. \end{aligned} \tag{19}$$

В случае сердечника с центральным отверстием H_7 - не нулевая. Систему (19) можно привести к виду

$$\mathbf{a} = -(H_5^*)^{-1} H_6^* \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix} + (H_5^*)^{-1} \mathbf{p}_a^* = (H_5^*)^{-1} (\mathbf{p}_a^* - H_6^* \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix}),$$

$$H_8^* \mathbf{a} + H_9^* \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix} = \mathbf{p}_x^* - H_7 H_1^{-1} \mathbf{p}_c. \quad (20)$$

Далее решаем систему

$$(H_9^* - H_8^* (H_5^*)^{-1} H_6^*) \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_m \end{pmatrix} = \mathbf{p}_x^* - H_7 H_1^{-1} \mathbf{p}_c - H_8^* (H_5^*)^{-1} \mathbf{p}_a^*, \quad (21)$$

где

- $H_9^* = H_9 - H_7 H_1^{-1} H_3$ – матрица с ненулевыми элементами выше главной диагонали;
- $H_8^* = H_8 - H_7 H_1^{-1} H_2$;
- $H_5^* = H_5 - H_4 H_1^{-1} H_2$ – прямоугольная матрица;
- $H_6^* = H_6 - H_4^{-1} H_3$;
- $\mathbf{p}_a^* = \mathbf{p}_a - H_4 H_1^{-1} \mathbf{p}_c$ – вектор правой части.

В случае расчёта НДС сплошного цилиндра система уравнений (21) примет вид

$$(H_9 - H_8 (H_5^*)^{-1} H_6^*) \begin{pmatrix} g_1 \\ \varepsilon_x^t \\ d_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{g_1} \\ p_{\varepsilon_x} \\ p_{d_1} \end{pmatrix} - H_8 (H_5^*)^{-1} \mathbf{p}_a^*. \quad (22)$$

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА

Выполнен расчёт аналитического теста «Упругий толстостенный цилиндр под давлением в неоднородном температурном поле» [2]. Проведено сравнение полученных результатов с результатами аналогичных расчётов с использованием линейных функций аппроксимации скоростей изменения радиальных напряжений и перемещений, выполненными с использованием ПС ДРАКОН-М 2.0 [3].

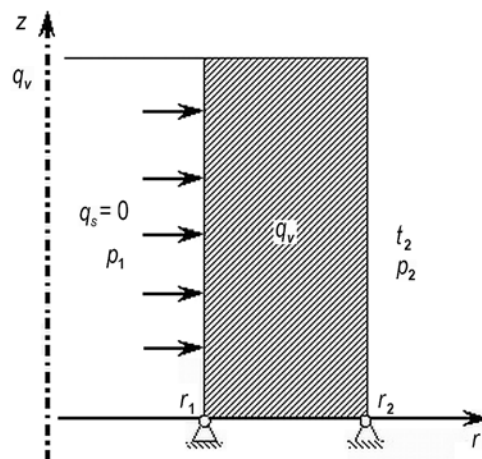


Рис. 2. Схема тестового расчёта. Геометрия: $r_1 = 0,5$ мм, $r_2 = 4$ мм. Термомеханические характеристики материала: $E = 2 \cdot 10^4$ кг/мм²; $\mu = 0,3$; $\lambda = 1 \cdot 10^{-3}$ Вт/(мм·К); $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ 1/К. Нагрузка: $p_1 = 1$ кг/мм²; $p_2 = 0$ (давление на внешней поверхности цилиндра); $q_t = 1$ Вт/мм; $t_2 = 100^\circ\text{C}$

ПС ДРАКОН-М 2.0 предназначено для численного моделирования температурно- и напряжённо-деформированного состояния твэлов реакторов на быстрых нейтронах с нитридным топливом и жидкометаллическим теплоносителем в квазистационарных режимах работы. Проведена верификация кода на основе сравнения с точными аналитическими решениями и экспериментальными данными, полученными при облучении штатных твэлов с нитридом урана реактора БР-10, экспериментальных твэлов со смешанным уран-плутониевым нитридным топливом в реакторе БОР-60 (эксперимент BORA-BORA), а также экспериментальных твэлов со смешанным уран-плутониевым нитридом, облученных в составе экспериментальных тепловыделяющих сборок в реакторе БН-600 [4 – 6]. В 2020 г. завершена аттестация и получен аттестационный паспорт программы для ЭВМ ДРАКОН-М 2.0 – №509 от 14 декабря 2020 г., ФБУ «НТЦ ЯРБ».

Геометрия расчетной схемы и граничные условия показаны на рис. 2.

Результаты численного и аналитического расчетов представлены на рис. 3 – 5. Расчёты выполнены с количеством интервалов по радиусу $N = 25$.

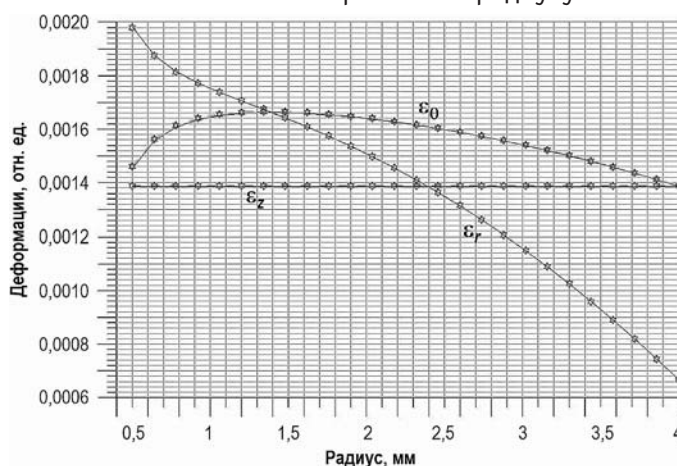


Рис. 3. Результаты численного («точки») и аналитического (сплошная линия) расчетов деформаций: ϵ_r – радиальная составляющая; ϵ_θ – окружная составляющая; ϵ_z – осевая составляющая

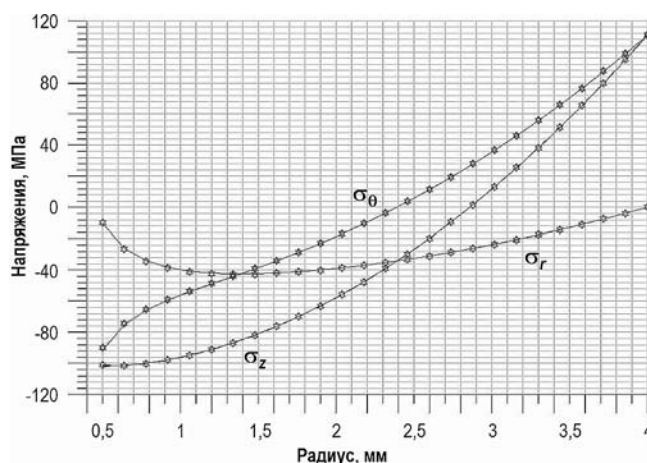


Рис. 4. Результаты численного («точки») и аналитического (сплошные линии) расчетов напряжений: σ_r – радиальная составляющая; σ_θ – окружная составляющая; σ_z – осевая составляющая

На рисунке 5 показано изменение относительной погрешности расчета смещения по радиусу коаксиальных слоёв при разном количестве точек по радиусу цилиндра

при использовании квадратичной и линейной аппроксимаций.

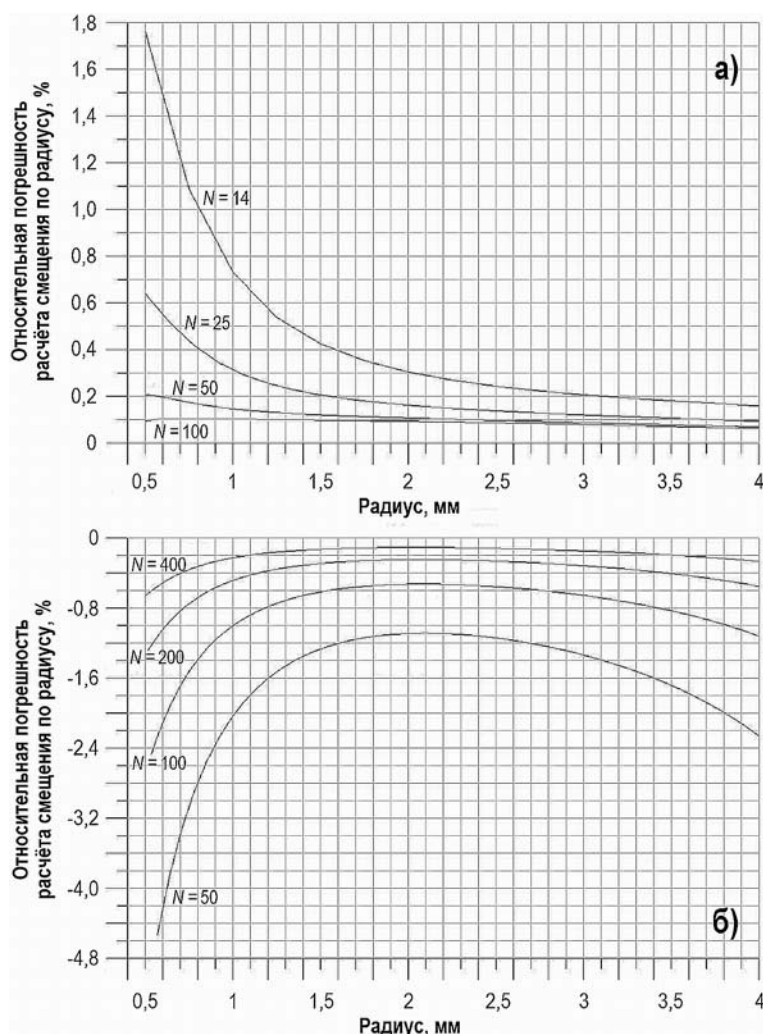


Рис. 5. Изменение относительной погрешности определения смещения по радиусу коаксиальных слоёв в зависимости от количества расчетных слоев при использовании квадратичной (а) и линейной (б) аппроксимации

РАСЧЕТ НДС ЦИЛИНДРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППРОКСИМАЦИИ СКОРОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КВАДРАТИЧНЫМИ ФУНКЦИЯМИ РАДИУСА НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТВЭЛА БЫСТРОГО РЕАКТОРА

В настоящее время код ДРАКОН – М 2.0, наряду с кодами КОРАТ и БЕРКУТ, активно используется для расчетного обоснования работоспособности экспериментальных твэлов реактора БН-600 со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, а также в рамках разработки технических проектов нитридных твэлов разрабатываемых быстрых реакторов БРЕСТ-ОД -300 со свинцовым теплоносителем и БН-1200 с натриевым теплоносителем [6, 7].

На рисунках 6, 7 представлены результаты расчётов НДС твэла КЭТВС-3 с топливом $UPuN$, выполненных с постоянным шагом по времени с использованием двух вариантов аппроксимации перемещения и окружного напряжения в пределах слоя по радиусу цилиндра: линейной с $N_f = 100$ и $N_c = 25$ и квадратичной с $N_f = 7$ и $N_c = 5$

(N_f – количество расчётных слоёв по радиусу топлива; N_c – количество расчётных слоёв по радиусу оболочки). Комбинированная экспериментальная тепловыделяющая сборка КЭТВС-3 содержит твэлы с оболочкой из стали ЭП823-Ш, четыре твэла со смешанным нитридным топливом, остальные с оксидным урановым топливом. КЭТВС-3 облучена в реакторе БН-600 до максимальных выгорания 4.5% т.а., повреждающей дозы 53 сна [5, 7].

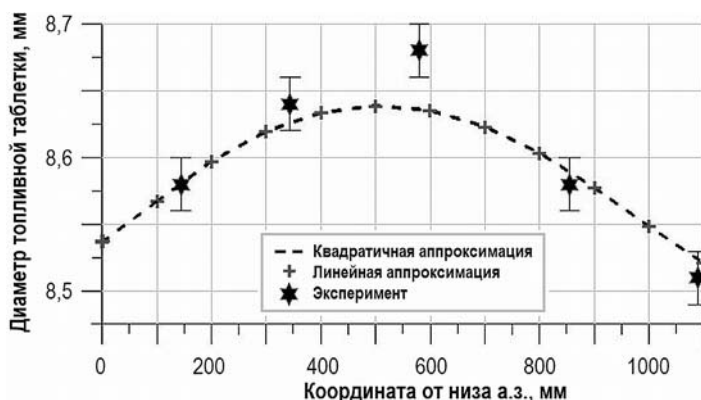


Рис. 6. Результаты расчёта и экспериментальные значения диаметра топливных таблеток твэла КЭТВС-3 БН-600

На рисунке 6 показана величина диаметра топливных таблеток на конец кампании, на рис. 7 – изменение окружного напряжения оболочки в центральном сечении твэла КЭТВС-3 в течение кампании.

Для данного варианта (при прочих равных условиях и большом объёме текущей печати в выходные файлы) время расчёта с использованием квадратичной аппроксимации приблизительно в 2,5 раза меньше, чем время расчёта с использованием линейной аппроксимации.

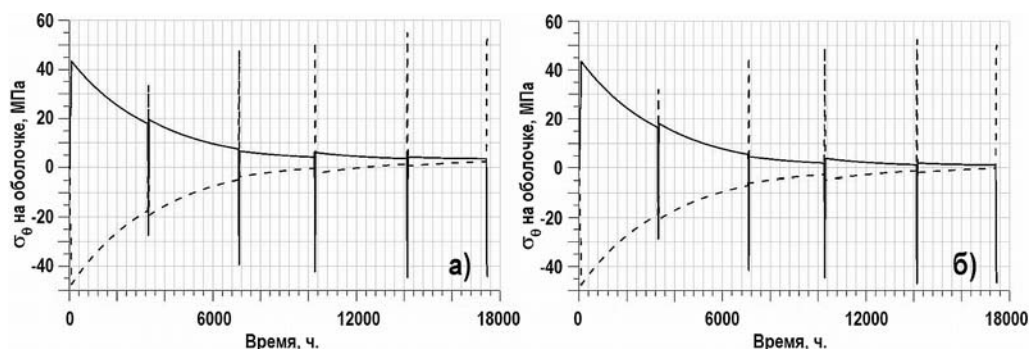


Рис. 7. Расчёты изменения окружного напряжения оболочки (центральное сечение) твэла КЭТВС-3 в течение кампании: а) – линейная аппроксимация; б) – квадратичная аппроксимация (сплошная линия – внешняя поверхность; штриховая – внутренняя поверхность)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере аналитического теста, а также на примере расчета напряженно-деформированного состояния экспериментального твэла со смешанным уран-плутониевым нитридным топливом реактора БН-600 можно видеть, что точность решения системы уравнений с использованием квадратичной аппроксимации даже при малом количестве точек (< 50) по радиусу не хуже, чем при решении системы с использованием линейной аппроксимации при существенно большем количестве (> 200) точек по радиусу.

Предложенные модель и метод расчёта НДС цилиндра могут быть использованы в программах расчёта НДС твэлов с различными видами топлива быстрого реакто-

ра таких, как БЕРКУТ, GERMINAL, BISON [8 – 10] для увеличения точности при существенном сокращении времени расчёта, что важно при проведении многочисленных параметрических исследований, а также при использовании инженерных кодов в составе интегральных кодов.

Литература

1. Лихачёв Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975. – 277 с.
2. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Том 2. Более сложные вопросы теории и задачи. – М.: Наука, 1965. – 480 с.
3. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of Calculation Modelling of Nitride Fuel Performance: DRAGON Code. / Труды IAEA-CN245-63, FR17, June 2017, Yekaterinburg, Russia. Электронный ресурс: <https://conferences.iaea.org/event/126/contributions/3642/> (дата доступа 25.07.2022).
4. Rogozkin B.D., Stepennova N.M., Fedorov Yu.Ye., Shishkov M.G., Kryukov F.N., Kuzmin S.V., Nikitin O.N., Belyaeva A.V., Zabudko L.M. Results of Irradiation of ($U_{0.55}Pu_{0.45}$)N and ($U_{0.4}Pu_{0.6}$)N Fuels in BOR-60 up to ~ 12 at % Burn-up. // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 440. – Iss. 1-3. – PP 445-456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.04.033>.
5. Грачев А.Ф., Жеребцов А.А., Забудько Л.М. и др. Результаты исследования твэлов типа БРЕСТ со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученных в БОР-60 и БН-600. // Атомная энергия. – 2018. Т. 125. – Вып. 5. – С. 278-284.
6. 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.
7. Zabudko L.M., Grachev A.F., Zherebtsov A.A. et al. 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>.
8. Болдырев А.В., Задорожный А.В., Озрин В.Д., Тарасов В.И., Долинский И.О., Чернов С.Ю. Валидация кода БЕРКУТ на результатах послереакторных исследований твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученных в БН-600. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127. – Вып. 6. – С. 322-327.
9. Lainet M., Michel B., Dumas J-C., Samuelsson K., Pelletier M. Current status and progression of GERMINAL fuel performance code for SFR oxide fuel pins. / Труды IAEA-CN245-222, FR17, June 2017, Yekaterinburg, Russia. Электронный ресурс: <https://conferences.iaea.org/event/126/contributions/3697/> (дата доступа 25.07.2022).
10. Matthews C., Galloway J., Unal C., Novascone S., Williamson R. BISON for Metallic Fuels Modeling. / Труды IAEA-CN245-366, FR17, June 2017, Yekaterinburg, Russia. Электронный ресурс: <https://conferences.iaea.org/event/126/contributions/3512/> (дата доступа 25.07.2022).

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

Авторы

Ганина Светлана Михайловна, старший научный сотрудник

E-mail: smgan@ipre.ru

Забудько Людмила Михайловна, научный руководитель

E-mail: zlm@proryv2020.ru

Мариненко Евгений Егорович, старший научный сотрудник

E-mail: emarinenko@ipre.ru

Фоломеев Владимир Иванович, ведущий научный сотрудник

E-mail: folomeev@ipre.ru

A METHOD TO CALCULATE THE STRESS-STRAIN STATE OF A CYLINDER USING QUADRATIC RADIUS FUNCTIONS FOR APPROXIMATION OF STRESS AND DISPLACEMENT RATES

Ganina S.M. *, Zabudko L.M. **, Marinenko E.E. *, Folomeev V.I. *

* IPPE JSC

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

** Proryv JSC

2/8 Bld. 7 Malaya Krasnoselskaya Str, 107140 Moscow, Russia

ABSTRACT

An analytical test and the stress-strain state calculation for an experimental fuel pin of the BN-600 reactor with mixed uranium-plutonium nitride fuel show that the accuracy of solving a system of equations based on quadratic approximation with a small number of radial points (< 50) is no worse than that for a system of equations using linear approximation with a much larger number of radial points (> 200).

A method is proposed for solving the problem of the stress-strain state (SSS) of a cylinder in a two-dimensional RZ geometry based on approximating radial stress and displacement variation rates by quadratic functions within the radial layer. The discrete approximation used makes it possible to simplify formal calculations when obtaining the resulting systems of equations, and to reduce the calculation time while maintaining high accuracy of the parameter calculation.

The cylinder SSS calculation model and method proposed can be used in codes designed to calculate the SSS for the fast reactor fuel pins with different types of fuel for increasing accuracy with much less calculation time spent. This is important for many parametric studies, as well as when using engineering codes as part of integral codes.

Key words: stress-strain state, approximation, system of differential equations, solution algorithm, analytical test, fuel pin, fast reactor, mixed uranium-plutonium nitride fuel, DRAKON code.

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).

REFERENCES

1. Likhachyov Yu.I., Pupko V.Ya. *Strength of Reactor Fuel Elements*. Moscow. Atomizdat Publ., 1975. 277 p. (in Russian).
2. Timoshenko S.P. *Strength of Materials. Part II. Advanced Theory and Problems*. Moscow. Nauka Publ., 1965. 480 p. (in Russian).
3. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of Calculation Modelling of Nitride Fuel Performance: DRAKON Code. / *Proc. of the IAEA-CN245-63, FR17*. June 2017, Yekaterinburg, Russia. Available at: <https://conferences.iaea.org/event/126/contributions/3642/> (accessed Jul. 25, 2022).
4. Rogozkin B.D., Stepenova N.M., Fedorov Yu.Ye., Shishkov M.G., Kryukov F.N., Kuzmin S.V., Nikitin O.N., Belyaeva A.V., Zabudko L.M. Results of Irradiation of ($U_{0.55}Pu_{0.45}$)N and ($U_{0.4}Pu_{0.6}$)N Fuels in BOR-60 up to ~ 12 at % Burn-up. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, v. 440, iss. 1-3, pp. 445-456; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.04.033>.
5. Grachev A.F., Zherebtsov A.A., Zabudko L.M., Zvir E.A., Kryukov F.N., Nikitin O.N., Skupov M.V., Ivanov Yu.A., Porollo S.I. Results of Investigations of BREST-Type Reactor Fuel Rods with Mixed Uranium-Plutonium Nitride Fuel, Irradiated in BOR-60 and BN-600. *Atomic Energy*. 2019, v. 125, pp. 314-321; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00487-4>.

6. Adamov E.O., Grachev A.F., Zabudko L.M., Lachkanov E.V., Mochalov Yu.S., Belyaeva 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, v. 131, pp. 268-273; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00877-1>.
7. 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, v. 384, 111430; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111430>.
8. Boldyrev A.V., Zadorozhnyi A.V., Ozrin V.D., Tarasov V.I., Dolinskii I.O., Chernov S.Yu. Berkut Code Validation on Post-Reactor Studies of Irradiated Bn-600 Fuel Rods with Mixed Uranium-Plutonium Nitride Fuel. *Atomic Energy*. 2020, v. 127, pp. 356-361; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00636-0>.
9. Lainet M., Michel B., Dumas J-C., Samuelsson K., Pelletier M. Current status and progression of GERMINAL fuel performance code for SFR oxide fuel pins. *Proc. of the IAEA-CN245-222, FR17*. June 2017, Yekaterinburg, Russia. Available at: <https://conferences.iaea.org/event/126/contributions/3697/> (accessed Jul. 25, 2022).
10. Matthews C., Galloway J., Unal C., Novascone S., Williamson R. BISON for Metallic Fuels Modeling. *Proc. of the IAEA-CN245-366, FR17*. June 2017, Yekaterinburg, Russia. Available at: <https://conferences.iaea.org/event/126/contributions/3512/> (accessed Jul. 25, 2022).

Authors

Ganina Svetlana Mikhailovna, Senior Researcher

E-mail: smgan@ippe.ru

Zabudko Lyudmila Mikhailovna, Scientific Supervisor

E-mail: zlm@proryv2020.ru

Marinenko Evgeny Egorovich, Senior Researcher

E-mail: emarinenko@ippe.ru

Folomeev Vladimir Ivanovich, Leading Researcher

E-mail: folomeev@ippe.ru