



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 539.3

## ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТВЭЛА С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

**Канарейкин А.И.**

ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ)», Москва, Россия, (117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23), e-mail: kanareykins@mail.ru

Работа посвящена повышению надёжности конструкции твэлов, которая определяется уровнем и характером распределения внутренних напряжений. Основной целью статьи является моделирование термонапряжений твэла с объемным тепловыделением. При этом учитывается координатная зависимость коэффициента линейного расширения. Решение получено с применением методов дифференцирования. Полученный результат может полезен для определения термонапряжённого состояния твэлов. А также открывает возможность снижения температурных напряжений в твэле с координатной зависимостью коэффициента линейного расширения.

Ключевые слова: Температурное поле, твэл, цилиндр, коэффициент линейного расширения, функция Эри, граница области, тензор.

## THERMALLY STRESSED STATE OF A FUEL ELEMENT WITH A VARIABLE COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION

**Kanareykin A.I.**

SERGO ORDZHONIKIDZE RUSSIAN STATE UNIVERSITY FOR GEOLOGICAL PROSPECTING, Moscow, Russia, (117485, Moscow, st. Miklukho-Maklaya 23), e-mail: kanareykins@mail.ru

The work is devoted to improving the reliability of the fuel element design, which is determined by the level and nature of the internal stress distribution. The main purpose of the article is to simulate thermal stresses of a fuel element with volumetric heat release. The coordinate dependence of the linear expansion coefficient is taken into account. The solution was obtained using differentiation methods. The result obtained can be useful for determining the thermally stressed state of fuel rods. It also opens up the possibility of reducing temperature stresses in fuel rods with a coordinate dependence of the linear expansion coefficient.

Keywords: Temperature field, fuel element, cylinder, coefficient of linear expansion, Erie function, boundary of the region, tensor.

Переменные свойства материала при наличии неоднородного температурного поля вносят дополнительный вклад в изменение термонапряженного состояния. Поэтому возникает необходимость исследования влияния переменных свойств материала на возможность управления прочностными свойствами материала, для обеспечения безопасности эксплуатации изделий новой техники. Их определение в общем случае сводится к решению уравнений математической физики и весьма часто представляет значительные математические трудности [1-6].

При проектировании твэлов используют материалы с переменными свойствами. Их использование даёт возможность улучшить прочностные характеристики и в конечном счёте управлять уровнем и характером распределения напряжений. Среди последних преобладающую роль занимают температурные напряжения. Их появление обусловлено неоднородной температурной деформацией [7-10]. В материалах ядерной техники подобная деформация связана с объёмным тепловыделением за счёт превращения кинетической энергии атомов деления тяжёлых элементов (урана, плутония, тория) в тепловую. При определении термонапряжений объёмное тепловыделение считается постоянной величиной. Её зависимость от различных факторов носит параметрический характер и не влияет на решение задач теплопроводности. Однако в некоторых случаях тепловыделение имеет координатную зависимость [11-17].

Актуальность работы обусловлена тем, что в работе учитывается координатная зависимость коэффициентом линейного расширения. Что приводит к изменению термонапряжённого состояния твэла. При этом прочность и надёжность ядерных реакторов определяется уровнем и характером распределения внутренних напряжений.

Целью работы является моделирование термонапряжений твэла с переменным коэффициентом линейного расширения.

Для этого рассмотрим сплошной длинный цилиндр с объёмным тепловыделением и переменным по радиусу коэффициентом линейного расширения. Для плоской задачи термоупругости компоненты тензора термонапряжений определяют через функцию напряжений (функция Эри), которая находится из решения задачи

$$\Delta \Delta F = -\frac{E}{1-\nu} \Delta(\alpha T) \quad (1)$$

где  $F$  - функция напряжений Эри,

$E$  - модуль Юнга,

$T$  - температурное поле,

$\nu$  - коэффициент Пуассона,

$\alpha$  - переменный коэффициент линейного расширения, который меняется по закону

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 + \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (2)$$

где:  $\alpha_0$  – коэффициент линейного расширения при  $r=0$ ,  $R$  - внешний радиус цилиндра. Функция напряжений  $F$  подчиняется уравнению (полярные координаты)

$$\frac{\partial^4 F}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3 F}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial F}{\partial r} = -\frac{E}{1-\nu} \Delta(\alpha T) \quad (3)$$

При решении уравнения (3) будем учитывать граничные условия на внешнем контуре

$$F = \frac{\partial F}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

С учётом (2) выражение (3) примет вид

$$\frac{\partial^4 F}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3 F}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial F}{\partial r} = -\frac{4\alpha E q_v}{\lambda(1-\nu)} \frac{r^2}{R^2} \quad (5)$$

Решение уравнения (5) ищем в виде чётных степеней

$$F = C_1 + C_2 r^2 + C_3 r^4 + C_4 r^6 \quad (5)$$

Искомая функция напряжений  $F$  находится из решения системы уравнений

$$\begin{cases} C_1 + C_2 R^2 + C_3 R^4 + C_4 R^6 = 0 \\ 2C_2 R + 4C_3 R^3 + 6C_4 R^5 = 0 \\ 64C_3 + 576C_4 r^2 = -\frac{4\alpha E q_v}{\lambda(1-\nu)} \frac{r^2}{R^2} \end{cases} \quad (6)$$

Решение самой системы (6) даёт значения констант

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{\alpha E q_v}{72\lambda(1-\nu)} R^4 \\ C_2 = \frac{11\alpha E q_v}{48\lambda(1-\nu)} R^2 \\ C_3 = 0 \\ C_4 = -\frac{\alpha E q_v}{144\lambda(1-\nu)R^2} \end{cases} \quad (7)$$

Окончательно функция напряжений принимает вид

$$F = \frac{\alpha E q_v R^4}{144\lambda(1-\nu)} \left( 2 - 3 \frac{r^2}{R^2} + \frac{r^6}{R^6} \right) \quad (8)$$

Температурные напряжения при известной функции F определяются весьма просто

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} = \frac{\alpha E q_v R^2}{24\lambda(1-\nu)} \left( \frac{r^4}{R^4} - 1 \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} = \frac{\alpha E q_v R^2}{24\lambda(1-\nu)} \left( 5 \frac{r^4}{R^4} - 1 \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{zzr} = \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E q_v R^2}{12\lambda(1-\nu)} \left( 3 \frac{r^4}{R^4} - 1 \right) \quad (11)$$

Графические зависимости компонент тензора термонапряжений приведены на Рисунке 1 в безразмерном виде.

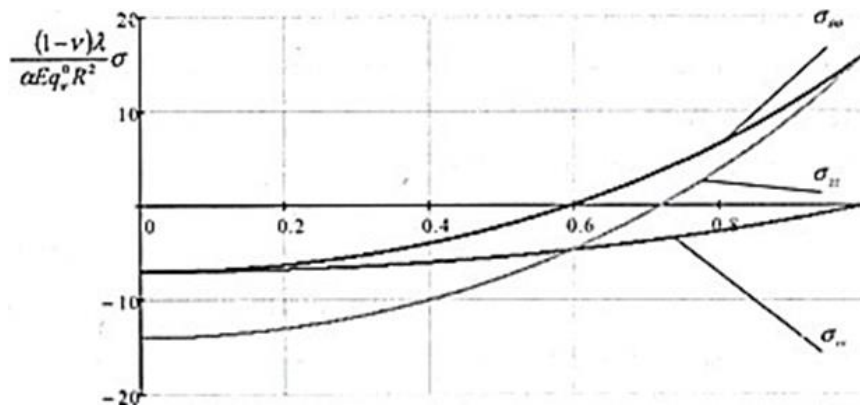


Рисунок 1 - Компоненты тензора термонапряжений в безразмерном виде.

Таким образом, в статье была решена задача об определении напряжённого состояния твэла с коэффициентом линейного расширения. Как следует из полученных выражений, Температурные напряжения подчиняются параболическому закону. Уровень и характер распределения термонапряжений зависят от координатной зависимости коэффициента линейного расширения. Таким образом, показана принципиальная возможность управления

термонапряженным состоянием тепловыделяющего цилиндра путем изменения коэффициента линейного расширения.

### Список литературы

1. Доллежалъ, Н. А. Канальный ядерный энергетический реактор / Н. А. Доллежалъ, И. Я. Емельянов. — М.: Атомиздат, 1980. — 208 с.
2. Kanareykin, A. I. Simulation of a fuel element made of plutonium dioxide // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Т. 1045. № 1. С. 012070.
3. Kanareykin, A. I. Mathematical modeling of the fuel element of a nuclear reactor taking into account the temperature dependence of the thermal conductivity of the fuel element made of uranium oxide // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 4. Сер. "IV International Scientific and Practical Conference "Actual Problems of the Energy Complex: Physical Processes, Mining, Production, Transmission, Processing and Environmental Protection"", 2022. С. 012012.
4. Kolpakov A., Tagantsev A. K., Berlyand L., Kanareykin A. Nonlinear dielectric response of periodic composite materials // Journal of Electroceramics. 2007. Vol. 18. № 1-2. Pp. 129-137.
5. Крамеров, А. Я. Инженерные расчеты ядерных реакторов / А. Я. Крамеров, Я. В. Шевелев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 736 с.
6. Newman C., Hansen G., Gaston D. Three-dimensional coupled simulation of thermomechanics, heat, and oxygen diffusion in UO<sub>2</sub> nuclear fuel rods // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 392. – № 1. – p. 6-15.
7. Симонова О.С., Логинов В.С. Одномерная нестационарная модель тепловыделяющей системы из произвольного числа твэлов и неактивных элементов // Фундаментальные исследования. 2014. № 5–3. С. 503–506.
8. Дунайцев А.А., Солонин В.И. Процессы массообмена в пучках оребренных стержней // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 125–134.
9. Ramirez J. C., Stan M., Cristea P. Simulations of heat and oxygendiffusion in UO<sub>2</sub> nuclear fuel rods // Journal of nuclear materials. – 2006. – Т. 359, № 3. – С. 174-184.
10. Mihaila B. et al. Simulations of coupled heat transport, oxygen diffusion, and thermal expansion in UO<sub>2</sub> nuclear fuel elements // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 394, № 2. – p. 182-189.
11. Семенович, О.В. Моделирование теплофизических процессов в тепловыделяющих сборках и активных зонах водоохлаждаемых ядерных реакторов / О.В. Семенович // Тезисы докладов и сообщений. XIV Минский международный форум по тепло и массообмену. 23–26 мая 2016 г.: в 3-х т. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – Т. 3. – С. 410–404.
12. Kang C. H. et al. 3D finite element analysis of a nuclear fuel rod with gap elements between the pellet and the cladding // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2015. – P. 1-8.
13. Власов, Н.М. Тепловыделяющие элементы ядерных ракетных двигателей / Н.М. Власов, И.И. Федик. - М.: ЦНИИ атоминформ, 2001. - 208с.
14. Петухов, Б.С., Генин, А.Г., Ковалев, С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. - М.: Атомиздат, 1974. - 408 с.

15. Иванов, В. В. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренним источником тепла. Известия Томского политехнического института: журнал / – Томск: Томский политехнический университет, 1964. – Т. 125. – 67 с.
16. Канарейкин, А. И. Распределение температурного поля в твэле с эллиптическим поперечным сечением // Научные труды Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского, серия: естественные науки. - 2016. – С. 230 – 231.
17. Kanareykin A. 2023. Simplified dynamic model of a nuclear reactor. E3S Web of Conferences 402: 05025.
18. Канарейкин, А. И. Определение температурного поля твэла с переменным объемным тепловыделением при граничном условии первого рода // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности, 2024. Т. 9. - № 8 (46). - С. 137-142.

## References

1. Dollezhal N. A., Emelyanov I. Ya. Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 208 p.
2. Kanareykin, A. I. Simulation of a fuel element made of plutonium dioxide // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Т. 1045. № 1. С. 012070.
3. Kanareykin, A. I. Mathematical modeling of the fuel element of a nuclear reactor taking into account the temperature dependence of the thermal conductivity of the fuel element made of uranium oxide // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 4. Сер. "IV International Scientific and Practical Conference "Actual Problems of the Energy Complex: Physical Processes, Mining, Production, Transmission, Processing and Environmental Protection"", 2022. С. 012012.
4. Kolpakov A., Tagantsev A. K., Berlyand L., Kanareykin A. Nonlinear dielectric response of periodic composite materials // Journal of Electroceramics. 2007. Vol. 18. № 1-2. pp. 129-137.
5. Kramerov, A. Ya. Engineering calculations of nuclear reactors / A. Ya. Kramerov, Ya. V. Shevelev. — 2nd ed., reprint. and additional — M.: Energoatomizdat, 1984. — p.736
6. Newman C., Hansen G., Gaston D. Three-dimensional coupled simulation of thermomechanics, heat, and oxygen diffusion in UO<sub>2</sub> nuclear fuel rods // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 392. – № 1. – pp.. 6-15.
7. Simonova O.S., Loginov V.S. One-dimensional nonstationary model of a heat-generating system from an arbitrary number of fuel rods and inactive elements // Fundamental research. 2014. No. 5-3. pp. 503-506.
8. Dunaytsev A.A., Solonin V.I. Mass transfer processes in bundles of finned rods // Problems of mechanical engineering and automation. 2016. No. 1. pp. 125-134.9.
9. Ramirez J. C., Stan M., Cristea P. Simulations of heat and oxygendiffusion in UO<sub>2</sub> nuclear fuel rods // Journal of nuclear materials. – 2006. – Т. 359, № 3. – pp. 174-184.
10. Mihaila B. et al. Simulations of coupled heat transport, oxygen diffusion, and thermal expansion in UO<sub>2</sub> nuclear fuel elements // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 394, № 2. – pp. 182-189.
11. Semenovich, Oh.V. Modeling of thermophysical processes in thermovelevating aggregates and active wawrabh zonach water-cooled wawrabh yadern wawrabh reactor / O.V. Semyonovich / / theses. 23-26 May 2016: in 3-H. - Minsk: ITMO im. A.V. Lirmkova NAN Belarussi, 2016. - Т. 3. - pp. 410–404.

12. Kang C. H. et al. 3D finite element analysis of a nuclear fuel rod with gap elements between the pellet and the cladding // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2015. – P. 1-8.
  13. Vlasov, N.M. Fuel elements of nuclear rocket engines / N.M. Vlasov, I.I. Fedik. - - М.: Tsniiatominform, 2001. - p.208.
  14. Petukhov, B.S., Genin, A.G., Kovalev, S.A. Heat transfer in nuclear power plants. - М.: Atomizdat, 1974. – p.408.
  15. Ivanov, V. V. Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source. Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute: journal / – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 1964. – Vol. 125. – p.67.
  16. Kanarekin, A. I. Distribution of the temperature field in a fuel element with an elliptical cross section // Scientific works of the Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky, series: natural sciences. - 2016. – pp. 230-231.
  17. Kanareykin A. 2023. Simplified dynamic model of a nuclear reactor. E3S Web of Conferences 402: 05025.
  18. Kanarekin, A. I. Determination of the temperature field of a fuel element with variable volumetric heat release under a boundary condition of the first kind // International Journal of Information Technologies and Energy Efficiency, 2024. Vol. 9. - № 8 (46). - pp. 137-142.
-