



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

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



УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ ТВЭЛА С ПЕРЕМЕННЫМ ОБЪЕМНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ ПРИ ГРАНИЧНОМ УСЛОВИИ ПЕРВОГО РОДА

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. Основной целью статьи является моделирование термонапряжений твэла с переменным объемным тепловыделением при граничном условии первого рода. При этом учитывается координатная зависимость тепловыделения. Решение получено с применением методов дифференцирования. Полученный результат может полезен для определения термонапряжённого состояния твэлов. Что открывает возможность снижения температурных напряжений в твэле с координатной зависимостью объемного тепловыделения.

Ключевые слова: Температурное поле, твэл, цилиндр, объёмное тепловыделение, граничные условия первого рода, функция Эри, граница области, тензор.

MODELING OF THERMAL STRESSES OF A FUEL ELEMENT WITH VARIABLE VOLUMETRIC HEAT RELEASE UNDER A BOUNDARY CONDITION OF THE FIRST KIND

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. The main purpose of the article is to simulate thermal stresses of a fuel element with variable volumetric heat release under a boundary condition of the first kind. At the same time, the coordinate dependence of heat release 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. This opens up the possibility of reducing temperature stresses in fuel rods with a coordinate dependence of volumetric heat release.

Keywords: Temperature field, fuel element, cylinder, volumetric heat dissipation, boundary conditions of the first kind, Erie function, boundary of the region, tensor.

Внутренние напряжения (температурные, остаточные, в окрестности структурных дефектов) оказывают существенное влияние на теплофизические, упругие и прочностные характеристики материала. Так, например, прочность и надёжность ядерных реакторов определяется уровнем и характером распределения внутренних напряжений. 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 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 тепловыделения. Что приводит к изменению термонапряжённого состояния твэла.

Целью работы является моделирование термонапряжений твэла с переменным объёмным тепловыделением при граничном условии первого рода.

Данная работа является продолжением предыдущей работы автора [18]. В ней рассмотрим длинный сплошной цилиндр, объёмное тепловыделение в котором подчиняется следующей зависимостью

$$q_v = q_v^0 \left(1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (1)$$

где: q_v – объёмное тепловыделение вдоль оси цилиндра,

r – произвольный радиус цилиндра,

R – внешний радиус цилиндра.

Для определения компонент тензора термонапряжений в состоянии плоской деформации воспользуемся бигармоническим уравнением для функции термонапряжений F (функция Эри)

$$\Delta \Delta F = \frac{\alpha E q_v}{\lambda(1-\nu)} \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности,

α - коэффициент линейного расширения,

E - модуль Юнга,

ν - коэффициент Пуассона.

С учётом (1) выражение (2) примет вид

$$\Delta \Delta F = \frac{\alpha E}{\lambda(1-\nu)} q_v^0 \left(1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (3)$$

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

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

Решение уравнения (5) ищем в виде

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

Искомая функция напряжений F находится из решения уравнений

$$\begin{cases} C_1 + C_2 R^2 + C_3 R^4 + C_4 R^6 = 0 \\ 2C_2 R + 4C_3 R^3 + 6C_4 R^5 = 0 \\ 24C_3 + 360C_4 r^2 = \frac{\alpha E}{\lambda(1-\nu)} q_v^0 \left(1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы (6) даёт значения констант

$$\begin{cases} C_1 = \frac{17\alpha E}{360\lambda(1-\nu)} R^4 \\ C_2 = -\frac{11\alpha E}{120\lambda(1-\nu)} R^2 \\ C_3 = \frac{\alpha E}{24\lambda(1-\nu)} \\ C_4 = \frac{\alpha E}{360\lambda(1-\nu)R^2} \end{cases} \quad (7)$$

Окончательно функция напряжений принимает вид

$$F = \frac{\alpha E R^4}{360\lambda(1-\nu)} \left(17 - 33 \frac{r^2}{R^2} + 15 \frac{r^4}{R^4} + \frac{r^6}{R^6} \right) \quad (8)$$

Температурные напряжения при известной функции F определяются весьма просто

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} = \frac{\alpha E R^2}{60\lambda(1-\nu)} \left(\frac{r^4}{R^4} + 10 \frac{r^2}{R^2} - 11 \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} = \frac{\alpha E R^2}{60\lambda(1-\nu)} \left(5 \frac{r^4}{R^4} + 30 \frac{r^2}{R^2} - 11 \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{zrz} = \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E R^2}{60\lambda(1-\nu)} \left(6 \frac{r^4}{R^4} + 40 \frac{r^2}{R^2} - 22 \right) \quad (11)$$

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

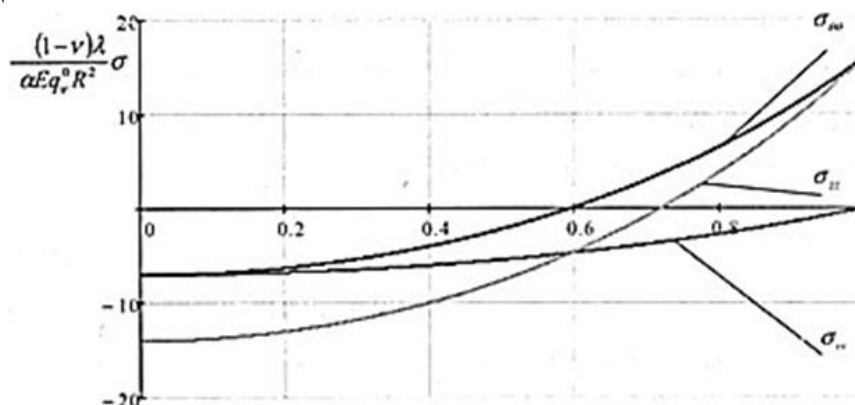


Рисунок 1 - Компоненты тензора термонапряжений в безразмерном виде.

Таким образом, в статье была решена задача об определении напряжённого состояния твэла с переменным объемным тепловыделением при граничном условии первого рода. Таким образом, на простом примере показана возможность снижения температурных напряжений в

твэле с координатной зависимостью объемного тепловыделения. Это открывает перспективу управления термонапряженным состоянием путем направленного изменения объемного тепловыделения.

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 UO₂ 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 UO₂ 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 UO₂ 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. – pp. 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. p. 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. p. 012012.
4. Kanareykin, A. I. Simulation of a fuel element made of plutonium dioxide // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Т. 1045. № 1. p.12070.
5. Kramerov A. Ya., Shevelev Ya. — 2nd ed., revised and supplemented — Moscow: Energoatomizdat, 1984. p. 736
6. Newman C., Hansen G., Gaston D. Three-dimensional coupled simulation of thermomechanics, heat, and oxygen diffusion in UO₂ nuclear fuel rods // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 392. – № 1. – p. 6-15.
7. Simonova O.S., Loginov V.S. One-dimensional non-stationary model of a heat-generating system from an arbitrary number of fuel rods and inactive elements. 2014. № 5–3. pp. 503–506.
8. Dunaytsev A.A., Solonin V.I. Mass Transfer Processes in Bundles of Finned Rods. 2016. № 1. pp. 125–134.
9. Ramirez J. C., Stan M., Cristea P. Simulations of heat and oxygendiffusion in UO₂ 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 UO₂ nuclear fuel elements // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 394, № 2. – pp. 182-189.
11. Semenovich O.V. Modeling of thermophysical processes in heat-releasing assemblies and active zones of water-cooled nuclear reactors / O.V. Semenovich // Theses of reports and messages. XIV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. May 23–26, 2016: in 3

- vols. – Minsk: A.V. Luikov ITMO of the National Academy of Sciences of Belarus, 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. – pp. 1-8.
 13. Vlasov N.M., Fedik I.I. Heat-Releasing Elements of Nuclear Rocket Engines. Moscow, TsNII atominform Publ., 2001. - 208 p.14.
 14. Petukhov, B.S., Genin, A.G., Kovalev, S.A. Теплообмен в ядерных энергетических установках [Heat transfer in nuclear power plants]. - Moscow: Atomizdat, 1974. - p.408
 15. Ivanov, V. V. Distribution of temperature in the elliptic section body with an internal heat source. Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute: Journal / – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 1964. – Т. 125. – p. 67
 16. Kanareykin A. I. Распределение температурного поля в твэле с эллиптическим поперечным сечением [Distribution of the temperature field in the fuel rod with an elliptical cross-section]. - 2016. – pp. 230 – 231.
 17. Kanareykin A. 2023. Simplified dynamic model of a nuclear reactor. E3S Web of Conferences 402: 05025.
 18. Kanareykin A. I. Определение температурного поля твэла с переменным объемным тепловыделением при граничном условии первого рода [Determination of the temperature field of the fuel rod with variable volumetric heat release under the boundary condition of the first kind]. Т. 9. - № 8 (46). - pp. 137-142.
-