



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

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



УДК 536.12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ 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, (МГРИ), г. Москва, Российская Федерация, (117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23), e-mail: kanareykins@mail.ru

Работа посвящена тепловому расчёту твэлов. Основной целью статьи является определение температурного поля твэла с переменным объёмным тепловыделением при граничном условии первого рода. В ней учитывается координатная зависимость тепловыделения. Также производится анализ поведения температурного поля по его сечению. Решение приведено в декартовой системе координат. Перепад температур между центром твэла и его поверхностью носит параболический характер. Полученный результат может полезен для определения термонапряжённого состояния твэлов.

Ключевые слова: Температурное поле, твэл, цилиндр, объёмное тепловыделение, граничные условия первого рода, оператор Лапласа.

DETERMINATION OF THE TEMPERATURE FIELD 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 the thermal calculation of fuel rods. The main purpose of the article is to determine the temperature field of a fuel element with variable volumetric heat release under a boundary condition of the first kind. It takes into account the coordinate dependence of heat release. The behavior of the temperature field is also analyzed by its cross section. The solution is given in the Cartesian coordinate system. The temperature difference between the center of the fuel element and its surface is parabolic. The result obtained can be useful for determining the thermally stressed state of fuel rods.

Keywords: Temperature field, fuel element, cylinder, volumetric heat dissipation, boundary conditions of the first kind, Laplace operator..

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 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. 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 [7-15].

Актуальность работы обусловлена тем, что в ней учитывается координатная зависимость тепловыделения. Что приводит к изменению термонапряжённого состояния.

Целью работы является определение температурного поля твэла с переменным объёмным тепловыделением при граничном условии первого рода.

Для решения поставленной задачи 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.

Температурное поле твэла находится из решения стационарного уравнения теплопроводности [16]

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

где: λ – коэффициент теплопроводности.

В случае твэла цилиндрической формы оператор Лапласа [17] удобно рассматривать в полярной системе координат

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = - \frac{q_v^0}{\lambda} \left(1 + \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (3)$$

Умножим обе части на r

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = - \frac{q_v^0}{\lambda} \left(r + \frac{r^3}{R^2} \right) \quad (4)$$

Проинтегрируем по r

$$r \frac{\partial T}{\partial r} = - \frac{q_v^0}{\lambda} \left(C_1 + \frac{r^2}{2} + \frac{r^4}{4R^2} \right) \quad (5)$$

Теперь поделим на r

$$\frac{\partial T}{\partial r} = - \frac{q_v^0}{\lambda} \left(\frac{C_1}{r} + \frac{r}{2} + \frac{r^3}{4R^2} \right) \quad (6)$$

В силу неразрывности температурного поля $C_1=0$, тогда

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{q_v^0}{\lambda} \left(\frac{r}{2} + \frac{r^3}{4R^2} \right) \quad (7)$$

Ещё раз проинтегрируем по r

$$T = -\frac{q_v^0}{\lambda} \left(C_2 + \frac{r^2}{2} + \frac{r^4}{4R^2} \right) \quad (8)$$

Для определения константы интегрирования C_2 воспользуемся граничным условием первого рода: при $r=R$ $T=0$, откуда

$$C_2 = -\frac{5}{16} R^2 \quad (9)$$

Соответствующее решение задачи (2) имеет вид

$$T = \frac{q_v^0 R^2}{16\lambda} \left(5 - 4 \frac{r^2}{R^2} - \frac{r^4}{R^4} \right) \quad (10)$$

Согласно соотношению (1) объёмное тепловыделение меняется от q_v^0 ($r=0$) до $2q_v^0$ ($r=R$). Сравним решение (10) для постоянного тепловыделения с минимальным и максимальным значениями

$$T_1 = \frac{q_v^0 R^2}{4\lambda} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{q_v^0 R^2}{2\lambda} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (12)$$

Графические зависимости соотношений (11) и (12) приведены на рис. 1.

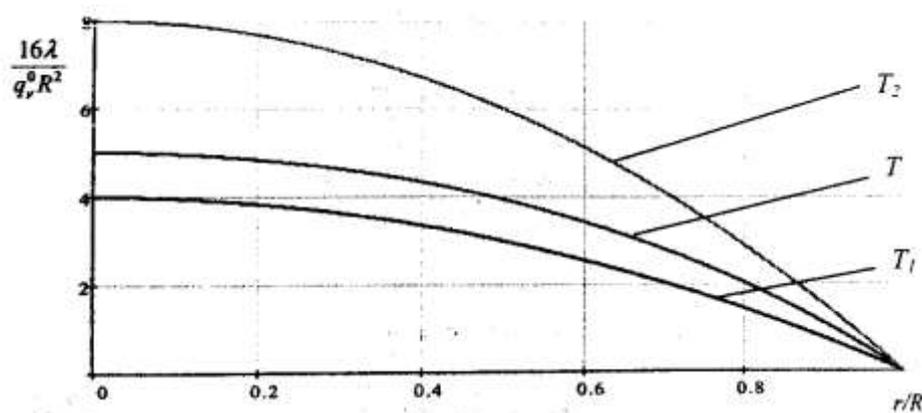


Рисунок 1 - Приведенное значение температуры между центром и границей тепловыделяющего цилиндра с переменным объемным тепловыделением.

Видно, что температурный перепад между центром и границей тепловыделяющего цилиндра для соотношения (10) является промежуточным между соотношениями (11) и (12).

Таким образом, в статье была решена задача об определении температурного поля твэла с переменным объемным тепловыделением при граничном условии первого рода. Также приведены частные случаи. Перепад температур между центром твэла и его поверхностью

носит параболический характер. Полученный результат может полезен для определения термонапряжённого состояния твэлов.

Список литературы

1. Доллежал, Н. А. Канальный ядерный энергетический реактор / Н. А. Доллежал, 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. 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.
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. – 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. Канарейкин, А. И. Применение уравнения Пуассона в теплофизике // Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского. Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2016. - С. 199-200.

References

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. 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.
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. – 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. Канарейкин, А. И. Применение уравнения Пуассона в теплофизике // Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского. Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2016. - С. 199-200.
-