



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

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



УДК 536.12

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТВЭЛАХ РАЗНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО РОДА

Канарейкин А.И.

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия (117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23), e-mail: kanareykins@mail.ru

Работа посвящена тепловому расчёту твэлов. В ней производится анализ поведения температурного поля в твэлах разных сечений: сферического, цилиндрического и эллиптического сечений с внутренним источником тепла. При этом граничные условия являются граничными условиями первого рода. Решение приведены в декартовой и полярной системах координат. При сопоставлении результатов, авторами установлено, что перепад температур между центром твэла и поверхностью не зависит от граничных условий, а полностью определяется только внутренним тепловыделением и коэффициентом теплопроводности материала. Данный факт связан с тем, что граничные условия характеризуют лишь абсолютное значение температуры.

Ключевые слова: температурное поле, твэл, теплопроводность, граничные условия первого рода, оператор Лапласа.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF TEMPERATURE FIELDS IN FUEL RODS OF DIFFERENT GEOMETRIC CROSS-SECTIONS UNDER BOUNDARY CONDITIONS OF THE FIRST KIND

Kanareykin A. I.,

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia (117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23), e-mail: kanareykins@mail.ru

The work is devoted to the thermal calculation of fuel rods. It analyzes the behavior of the temperature field in fuel rods of different sections: spherical, cylindrical and elliptical sections with an internal heat source. In this case, the boundary conditions are boundary conditions of the first kind. The solutions are given in Cartesian and polar coordinate systems. When comparing the results, the authors found that the temperature difference between the fuel element center and the surface does not depend on the boundary conditions, but is completely determined only by the internal heat release and the thermal conductivity coefficient of the material. This fact is connected with the fact that the boundary conditions characterize only the absolute value of temperature.

Keywords: temperature field, fuel element, thermal conductivity, boundary conditions of the first kind, Laplace operator.

Сегодня невозможно себе представить современное проектирование и строительство ядерных реакторов без предварительного применения математических моделей. Они применяются для моделирования процессов происходящих в будущем реакторе [1-4]. В целях улучшения охлаждения тепловыделяющих элементов необходимо иметь большую

поверхность теплоотдачи. Увеличение поверхности может быть достигнуто либо оребрением, либо заменой стержней круглого сечения, имеющих минимальную поверхность теплоотвода, стержнями других сечений. Поэтому задача определения температурных полей в твэлах представляет самостоятельный интерес и помимо этого является предварительным этапом расчёта процесса теплопередачи и прогнозирования надёжности их конструкции. Для моделирования процессов активной зоны ядерного реактора существует множество программ [5-14]. Наиболее типичной геометрии твэлов являются шар, цилиндр и эллипс. Среди них особое место занимают твэлы с эллиптическим поперечным сечением. Их особенность состоит в том, что, манипулируя изменением длины полуосей эллипса, удаётся получить точные аналитические решения стационарных задач теплопроводности для весьма широкого диапазона изменения формы: от цилиндра (полуоси эллипса равны) до тонкой пластины (когда одна из полуосей существенно превышает другую).

Вопросам расчета температурных полей в твэлах шарового и цилиндрического сечений хорошо разобрано авторами [15, 16] при наличии внутренних источников тепла, а для случая эллиптического сечения при разных условиях посвящено несколько работ [17-21].

Определение температурного поля твэла сводится к решению стационарного уравнения теплопроводности, который имеет следующий вид [22]

$$\Delta T + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

где: q_v – удельная мощность внутреннего источника, λ – коэффициент теплопроводности.

В случае твэла шаровой формы оператор Лапласа лучше представить в сферической системе координат, который имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (2)$$

при $r=R$ $T=T_r$ решение имеет вид

$$T = T_r + \frac{q_v r_0^2}{6\lambda} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (3)$$

Откуда можно определить температурный перепад между центром шара и его поверхностью

$$T_0 - T_r = \frac{q_v r R^2}{6\lambda} \quad (4)$$

где T_0 – температура в центре шара.

Полученный результат интересен тем, что перепад температур между центром и поверхностью не зависит от граничных условий, а полностью определяется внутренним тепловыделением и коэффициентом теплопроводности материала.

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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (5)$$

при $r=R$ $T=T_r$ решение имеет вид

$$T = T_R + \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (6)$$

Тогда температурный перепад между центром шара и его поверхностью

$$T_0 - T_R = \frac{q_v r R^2}{4\lambda} \quad (7)$$

И в этом случае температурный перепад между центром цилиндра и его поверхностью не зависит от граничных условий.

Для получения формулы, описывающей температурное поле в твэле эллиптического сечения, запишем уравнение Пуассона в эллиптических координатах [23]

$$\frac{1}{c^2 (ch^2 \alpha - \cos^2 \beta)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \beta^2} \right) = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (8)$$

при $\alpha=\alpha_0$ (уравнение поверхности тела) $T=T_c$ решение имеет вид

$$T = T_c + \frac{q_v c^2}{4\lambda} (sh^2 \alpha_0 - sh^2 \alpha) \quad (9)$$

а температурный перепад между центром эллипса и его поверхностью

$$T_0 - T_c = \frac{q_v c^2}{4\lambda} sh^2 \alpha_0 \quad (10)$$

Как видим, в этом случае также перепад температур не зависит от граничных условий.

В случае равенства полуосей эллипса ($a=b=R$) из соотношения (10) получим температурный перепад для твэла с круговым поперечным сечением (7).

Если одна из полуосей существенно превышает другую ($a \gg b$), то соотношение (10) даст следующую зависимость

$$T_0 - T_{II} = \frac{q_v b^2}{2\lambda} \quad (11)$$

что соответствует перепаду температуры между центром тепловыделяющей стенки толщиной $2b$ и её поверхностью. Опять видим, что перепад температур не зависит от граничных условий.

Таким образом, в статье приведен сравнительный анализ распределения температурного поля в твэле с различными случаями поперечного сечения при граничных условиях первого рода. Также приведены частные случаи. Во всех случаях перепад температур между центром твэла и поверхностью не зависит от граничных условий, а полностью определяется

внутренним тепловыделением и коэффициентом теплопроводности материала. Что связано с тем, что граничные условия характеризуют лишь абсолютное значение температуры [24].

Список литературы

1. Доллежалъ Н. А. Канальный ядерный энергетический реактор / Н. А. Доллежалъ, И. Я. Емельянов. — М.: Атомиздат, 1980. — 208 с.
2. Крамеров, А. Я. Инженерные расчеты ядерных реакторов / А. Я. Крамеров, Я. В. Шевелев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 736 с.
3. Бояршинов, М. Г. Численные методы. Прикладная математика и информатика: учебное пособие / М. Г. Бояршинов. — Пермь: Изд-во Пермского ГТУ, 1998.
4. Самарский, А. А. Численные методы математической физики: учебное пособие / А. А. Самарский, А. В. Гулин. — М.: Научный мир, 2000. — 316 с.
5. Алтухов, Д. Е. Расчет нестационарных и переходных нейтронно-физических процессов в реакторе на тепловых нейтронах: учебное пособие / Д. Е. Алтухов, Ф. П. Кошелев, И. В. Шаманин; Томский политехнический университет. — Томск Изд-во ТПУ, 1998. — 126 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. Okunev, V. S. Designing of New Generation of the Nuclear Reactors // AIP Conference Proceedings, 2195, p. 020012.
9. Hales J. D. et al. Asymptotic expansion homogenization for multiscale nuclear fuel analysis // Computational Materials Science. – 2015. – Vol. 99. – P. 290-297.
10. Дунайцев А.А., Солонин В.И. Процессы массообмена в пучках оребренных стержней // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 125–134.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Власов, Н.М. Тепловыделяющие элементы ядерных ракетных двигателей / Н.М. Власов, И.И. Федик. - М.: ЦНИИ атоминформ, 2001. - 208с.

16. Петухов, Б.С., Генин, А.Г., Ковалев, С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. - М.: Атомиздат, 1974. - 408 с.
17. 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.
18. Kanareykin, A. Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source with partial adiabatic isolation // В сборнике: E3S Web of Conferences. Сер. "Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region", UESF 2021" 2021.
19. Канарейкин, А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренним источником тепла при адиабатической изоляции половины поверхности // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. - № 5 - С. 20-25.
20. Канарейкин, А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренними стационарными источниками теплоты при граничных условиях третьего рода // Тепловые процессы в технике. 2021. - Т. 13 - № 5 - С. 226-229 DOI: 10.34759/TPT-2021-13-5-226-229.
21. Канарейкин, А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренним источником тепла при граничных условиях третьего рода // Вестник Калужского университета. 2021. - № 2 (51) - С. 107-109 DOI: 10.54072/18192173_2021_2_107.
22. Канарейкин, А. И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренним источником тепла при граничных условиях первого рода // Вестник Калужского университета. 2020. № 2 (47). С. 74-76.
23. 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.
24. Канарейкин, А. И. Особенность изменения поведения температурного поля в твэлах при переходе от цилиндрического к эллиптическому сечению при граничных условиях первого рода // Научные известия. 2022. № 29. С. 174-177.

References

1. Dollezhal, N. A. Emelyanov, I. Ya. Channel nuclear power reactor / N. A. Dollezhal. — М.: Atomizdat, 1980. — 208 p.
2. Kramerov, A. Ya. Engineering calculations of nuclear reactors / A. Ya. Kramerov, Ya. V. Shevelev. - 2nd ed., revised. and additional — М.: Energoatomizdat, 1984. — 736 p.
3. M. G. Boyarshinov, Numerical Methods. Applied mathematics and informatics: textbook / M. G. Boyarshinov. - Perm: Publishing House of the Perm State Technical University, 1998.
4. Samarskii, A. A. Numerical methods of mathematical physics: textbook / A. A. Samarskii, A. V. Gulin. - М.: Scientific world, 2000. - 316 p.
5. Altukhov, D. E., Koshelev, F. P., Shamanin, I. V. Calculation of non-stationary and transient neutron-physical processes in a thermal neutron reactor: textbook; Tomsk Polytechnic University. - Tomsk TPU Publishing House, 1998. - 126 p.

6. Newman C., Hansen G., Gaston D. Three-dimensional coupled simulations of thermomechanics, heat, and oxygen diffusion in UO₂ nuclear fuel rods // *Journal of Nuclear Materials*. - 2009. - Vol. 392. - No. 1. - P. 6-15.
7. Simonova O.S., Loginov V.S. One-dimensional non-stationary model of a fuel system from an arbitrary number of fuel rods and inactive elements // *Fundamental Research*. 2014. No. 5–3. pp. 503–506.
8. Okunev, V. S. Designing of New Generation of the Nuclear Reactors // *AIP Conference Proceedings*, 2195, p. 020012.
9. Hales J. D. et al. Asymptotic expansion homogenization for multiscale nuclear fuel analysis // *Computational Materials Science*. - 2015. - Vol. 99. – P. 290-297.
10. Dunaytsev A.A., Solonin V.I. Processes of mass transfer in bundles of ribbed rods. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2016. No. 1. P. 125–134.
11. Ramirez J. C., Stan M., Cristea P. Simulations of heat and oxygendiffusion in UO₂ nuclear fuel rods // *Journal of nuclear materials*. - 2006. - T. 359, No. 3. - S. 174-184.
12. 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, No. 2. - P. 182-189.
13. Semenovich, O.V. Modeling of thermophysical processes in fuel assemblies and active zones of water-cooled nuclear reactors / O.V. Semenovich // *Abstracts of reports and communications. XIV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer*. May 23–26, 2016: in 3 volumes. - Minsk: ITMO im. A.V. Lykov National Academy of Sciences of Belarus, 2016. - T. 3. - P. 410-404.
14. 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.
15. Vlasov, N.M. Fuel elements of nuclear rocket engines / N.M. Vlasov, I.I. Fedik. - M.: TsNII atominform, 2001. - 208p.
16. Petukhov, B.S., Genin, A.G., Kovalev, S.A. Heat transfer in nuclear power plants. - M.: Atomizdat, 1974. - 408 p.
17. Ivanov, VV Temperature distribution in an elliptical section body with an internal heat source. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute: journal* / - Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 1964. - T. 125. - 67 p.
18. Kanareykin, A. Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source with partial adiabatic isolation // In the collection: *E3S Web of Conferences*. Ser. "Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region", UESF 2021" 2021.
19. Kanareykin, A.I. Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source with adiabatic insulation of half of the surface // *Forging and Stamping Production. Processing of materials by pressure*. 2021. - No. 5 - S. 20-25.
20. Kanareykin, A.I. Temperature distribution in an elliptical body with internal stationary heat sources under boundary conditions of the third kind // *Thermal processes in engineering*. 2021. - Vol. 13 - No. 5 - P. 226-229 DOI: 10.34759/TPT-2021-13-5-226-229.

21. Kanareikin, A.I. Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source under boundary conditions of the third kind // Bulletin of the Kaluga University. 2021. - No. 2 (51) - P. 107-109 DOI: 10.54072/18192173_2021_2_107.
 22. Kanareikin, AI Temperature distribution in an elliptical body with an internal heat source under boundary conditions of the first kind. Bulletin of the Kaluga University. 2020. No. 2 (47). pp. 74-76.
 23. Kanareikin, AI Distribution of the temperature field in a fuel element with an elliptical cross section. K.E. Tsiolkovsky, series: natural sciences. - 2016. - S. 230 - 231.
 24. Kanareikin, AI Peculiarities of change in the behavior of the temperature field in fuel rods during the transition from a cylindrical to an elliptical section under boundary conditions of the first kind. 2022. No. 29. P. 174-177.
-