

Ю. В. РОМАШОВ, Э. В. ПОВОЛОЦКИЙ

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОЛОЧЕК СТЕРЖНЕВЫХ ТВЭЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

Выполнен анализ существующих распространенных подходов к обоснованию работоспособности оболочек твэлов с учетом ползучести, основанных на рассмотрении деформирования сегментов оболочки внутренним и наружным давлениями и разностью температуры по толщине стенки. Показано, что расчетная схема, учитывающая действие на оболочку только внутреннего и наружного давлений и перепада температуры по толщине не может давать надежных оценок работоспособности твэлов с учетом ползучести.

Ключевые слова: твэл, оболочка, расчетная схема, напряженно-деформированное состояние, ползучесть.

Ю. В. РОМАШОВ, Е. В. ПОВОЛОЦЬКИЙ

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОБОЛОНОК СТРИЖНЕВИХ ТВЕЛІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ З УРАХУВАННЯМ ПОВЗУЧОСТІ

Виконано аналіз існуючих поширених підходів щодо обґрунтування працездатності оболонок твєлів з урахуванням повзучості, заснованих на розгляді деформування сегментів оболонки внутрішнім і зовнішнім тисками і різницею температури по товщині стінки. Показано, що розрахункова схема, яка враховує дію на оболонку тільки внутрішнього і зовнішнього тисків і перепаду температури по товщині не може давати надійних оцінок працездатності твєлів з урахуванням повзучості.

Ключові слова: твєл, оболонка, розрахункова схема, напружено-деформований стан, повзучість.

YU. ROMASHOV, E. POVOLOTSKY

ANALYSIS OF THE APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF THE WORKING CAPACITY OF THE SHELLS OF FUEL ELEMENTS OF NUCLEAR POWER REACTORS TAKING INTO CONSIDERATION THE CREEPAGE

The creepage is one of the factors that considerably limit the working capacity of the shells of fuel elements of nuclear reactors. At the present time, to study a mechanical behavior of the shell of fuel elements it is subdivided into axial segments and consideration is given to the strain of each axial segment caused by internal and external pressures taking into consideration the temperature difference of outer and inner surfaces. Based on the damageability concept we suggested the mathematical formulation of the problem on the creepage of the axial segment of the shell of fuel element taking into consideration the action of internal and external pressures on it and the temperature difference of outer and inner surfaces that is given in the form of differential equations with boundary and initial conditions and the microscopic defect formation condition. The problem formulated in this manner was solved using the method of semi-descretization with spatial coordinate finite differences and stepwise time integration using the Merson method with the automatic selection of an integration step. It is shown that the formation time of microscopic defect in the shell of fuel element at a prescribed temperature due to the creepage is defined by the internal and external pressure difference module. It is explained by the dependence of the creepage rate and the damageability on the intensity of strains. Since the values of internal and external pressures on fuel element shells are comparable for contemporary nuclear reactors, we can draw a conclusion that a possible flexure of the shells of fuel elements should be taken into consideration in the heat carrier flow to substantiate the resource taking into consideration the creepage.

Key words: fuel element, shell, computation scheme, creepage, damageability, resource, elastically-deformed state, the method of semi-descretization, and the approximated solution.

Введение

Ползучесть является одним из факторов, существенно ограничивающих работоспособность оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов) ядерных реакторов. В настоящее время проводятся интенсивные исследования ползучести оболочек твэлов самых разнообразных конструкций [1, 2], однако общепризнанных подходов к оценке работоспособности оболочек твэлов сегодня не существует. Таким образом, тема данной работы, в которой выполнен анализ подходов к оценке работоспособности оболочек твэлов с учетом ползучести, является актуальной в научном отношении и представляет огромный теоретический и практический интерес для современной мировой атомной энергетики и энергетического машиностроения.

Цель работы

Основой для оценки работоспособности оболочек твэлов является математическое моделирование их деформирования и разрушения, которое осуществляется в рамках некоторых априори принимаемых допущений. Целью данной работы является анализ общепринятых в настоящее время основных априори принимаемых допущений, принимаемых в существующих подходах к оценке работоспособности оболочек твэлов с учетом ползучести.

Основные положения распространенных в настоящее время подходов

Моделирование механического поведения оболочек твэлов выполняют обычно с помощью

© Ю. В. Ромашов, Э. В. Поволоцкий, 2018

универсального коммерческого программного обеспечения, например ANSYS [3], а также различных специализированных расчетных кодов, как, например FEMAXI [4]. При этом постоянно совершенствуют модели механического поведения материалов и конструкций, а также методы численного решения задач теории ползучести для оценки работоспособности и показателей долговечности оболочек твэлов [5–8].

Схематизация механического поведения оболочки твэла предопределяет достоверность оценки работоспособности оболочки твэла с учетом ползучести. В настоящее время при изучении механического поведения оболочки твэла ее разделяют на аксиальные сегменты и рассматривают деформирование каждого из таких аксиальных сегментов внутренним и наружным давлениями p_a и p_b с учетом разности температур T_a и T_b внутренней и наружной поверхностей (рис. 1). Выбор такой схематизации обусловлен тем, что в современных конструкциях твэлов $L \gg b$ (рис. 1). Условия эксплуатации твэлов характеризуются следующими неравенствами:

$$T_a \geq T_b, \quad p_b \geq p_a. \quad (1)$$

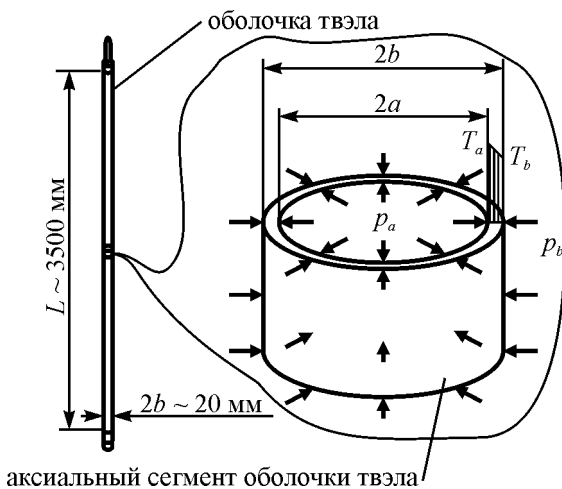


Рис. 1 – Типичная схематизация оболочки твэла

Давление p_a обусловлено действием газа, заполняемого в оболочку, и осколков деления; давление p_b обусловлено действием на оболочку движущегося теплоносителя. Величины T_a и T_b определяются тепловыделением в топливе вследствие ядерной реакции деления и теплообменом в зазоре между топливом и оболочкой, а также между оболочкой и теплоносителем.

Модель механического поведения аксиального сегмента оболочки твэла с учетом ползучести

Вследствие осевой симметрии состояние аксиального сегмента оболочки твэла зависит только

от радиальной координаты r , $a \leq r \leq b$; при этом напряженно-деформированное состояние определяется радиальным перемещением u , радиальным σ_r и окружным σ_θ напряжениями. В сечении r со временем t вследствие ползучести накапливаются радиальная c_r и окружная c_θ необратимые деформации, повреждаемость в материале, которую характеризуем скалярным параметром ω как, например, в работе [8]. Тогда напряженно-деформированное состояние сегмента оболочки твэла определяется величинами p_a , p_b , T_a , T_b (рис. 1), характеризующими интенсивности внешних воздействующих факторов, а также текущими деформациями ползучести:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{E}\sigma_r + \frac{\nu}{E}\sigma_\theta + \frac{du}{dr} &= \alpha(T - T_0) + c_r - \frac{\nu}{E}\sigma_z, \\ \frac{\nu}{E}\sigma_r - \frac{1}{E}\sigma_\theta + \frac{u}{r} &= \alpha(T)(T - T_0) + c_\theta - \frac{\nu}{E}\sigma_z, \\ \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0, \quad \sigma_z = p_a \frac{a^2}{b^2 - a^2} - p_b \frac{b^2}{b^2 - a^2}, \\ \sigma_r|_{r=r_a} &= -p_a, \quad \sigma_r|_{r=r_b} = -p_b, \end{aligned} \quad (2)$$

где E , ν и α – модуль упругости, коэффициенты Пуассона и теплового расширения материала; $T = T_b + (T_b - T_a) \frac{\ln(r/b)}{\ln(a/b)}$ – поле температуры в стенке оболочки; T_0 – температура оболочки в естественно-ненагруженном состоянии. Формулировка вида (2) отвечает наиболее общему случаю, когда характеристики материала E , ν и α зависят от температуры.

Скорости ползучести и повреждаемости оболочки твэла при заданной температуре определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_r}{\partial t} &= \frac{3}{2} B e^{-\frac{\sigma_i^{n-1}}{(1-\omega)^n}} \left(\frac{2}{3} \sigma_r + \frac{1}{3} \sigma_\theta - \frac{1}{3} \sigma_z \right), \\ \frac{\partial c_\theta}{\partial t} &= \frac{3}{2} B e^{-\frac{\sigma_i^{n-1}}{(1-\omega)^n}} \left(\frac{2}{3} \sigma_\theta + \frac{1}{3} \sigma_r - \frac{1}{3} \sigma_z \right), \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} &= A e^{-\frac{\sigma_i^k}{(1-\omega)^k}}, \end{aligned}$$

$$c_r|_{t=0} = 0, \quad c_\theta|_{t=0} = 0, \quad \omega|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

где B , n и A , k – параметры закона ползучести материала оболочки твэла, определяемые по данным о ползучести и длительной прочности.

Время t^* образования макроскопического дефекта в оболочке твэла определяется условием вида:

$$\omega|_{t=t^*} = 1. \quad (4)$$

Интегрирование по времени при решении задачи (2), (3) осуществляется до выполнения условия (4).

Анализ механического поведения оболочки твэла с учетом ползучести

Численное решение задачи (2), (3) вплоть до выполнения условия (4) выполним при помощи метода полу-дискретизации [9] с конечными разностями по координате r и интегрированием по времени t обыкновенных дифференциальных уравнений для узловых значений неизвестных.

Применяя конечные разности для аппроксимации производных $\partial/\partial r$, из уравнений и граничных условий (2) получаем соотношение

$$\mathbf{A}_N^{(1)} \cdot \mathbf{u}_N^{(1)} = \mathbf{f}_N^{(1)} + \mathbf{A}_N^{(2)} \cdot \mathbf{u}_N^{(2)}, \quad (5)$$

где $\mathbf{A}_N^{(1)}$, $\mathbf{A}_N^{(2)}$ и $\mathbf{f}_N^{(1)}$ – квадратная, прямоугольная матрицы и вектор, отвечающие разностной аппроксимации краевой задачи (2); $\mathbf{u}_N^{(1)}$ и $\mathbf{u}_N^{(2)}$ – векторы узловых значений u , σ_r , σ_θ и c_r , c_θ , ω . Получение матриц $\mathbf{A}_N^{(1)}$, $\mathbf{A}_N^{(2)}$ и вектора $\mathbf{f}_N^{(1)}$ не содержит каких-либо трудностей.

Уравнения (3) рассматриваем в узлах сетки и получаем обыкновенные дифференциальные уравнения с начальными условиями относительно узловых значений c_r , c_θ и ω :

$$\partial \mathbf{u}_N^{(2)} / \partial t = \mathbf{f}_N^{(2)}(\mathbf{u}_N^{(2)}; \mathbf{u}_N^{(1)}), \quad \mathbf{u}_N^{(2)}|_{t=0} = \mathbf{0}, \quad (6)$$

где выражение $\mathbf{f}_N^{(2)}(\mathbf{u}_N^{(2)}; \mathbf{u}_N^{(1)})$ отвечает правым частям уравнений (3) в узлах сетки и его получение не содержит каких-либо трудностей.

Используя соотношение (5), получаем:

$$\mathbf{u}_N^{(1)} = (\mathbf{A}_N^{(1)})^{-1} \cdot (\mathbf{f}_N^{(1)} + \mathbf{A}_N^{(2)} \cdot \mathbf{u}_N^{(2)}). \quad (7)$$

Подставив соотношение (7) в уравнение (6), получаем в результате задачу Коши канонического вида, которую далее решаем при помощи метода Мерсона с автоматическим выбором шага интегрирования, как в работе [8].

Результаты анализа механического поведения оболочки твэла с учетом ползучести

Рассмотрим решение задачи (2), (3) для следующих исходных данных, отвечающих твэлам энергетического ядерного реактора ВВЭР-1000:

$$a = 3,855 \text{ мм}, \quad b = 4,55 \text{ мм}, \quad E = 77 \text{ ГПа}, \quad \nu = 0,36,$$

$$\alpha = 6,33 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}, \quad T_0 = 293 \text{ К}, \quad T_a = T_b = 623 \text{ К},$$

$$k = n = 10,80, \quad A = 3,3585 \cdot 10^{-30} \text{ МПа}^{-k} / \text{час},$$

$$B = 8,0602 \cdot 10^{-31} \text{ МПа}^{-n} / \text{час}.$$

Результаты расчетов показывают, что при заданной температуре время t^* образования макроскопического дефекта в оболочке твэла вследствие ползучести определяется модулем разности давлений p_a и p_b (рис. 2).

Обсуждение результатов

То обстоятельство, что время образования макроскопического дефекта в оболочке твэла определяется модулем разности внутреннего и наружного давлений, объясняется зависимостью скорости ползучести и повреждаемости от интенсивности напряжений, которая приближается к нулю при одинаковых внутреннем и наружном давлениях. В современных ядерных реакторах с водой под давлением в качестве теплоносителя и замедлителя значения внутреннего и наружного давлений на оболочки твэлов сопоставимы, так что внешние воздействующие факторы не могут быть сведены только лишь к внутреннему и к наружному давлению. Поэтому при обосновании ресурса оболочек твэлов ядерных реакторов с водой под давлением с учетом повреждений вследствие ползучести следует учитывать также возможный изгиб оболочек твэлов в потоке движущегося водного теплоносителя. В то же время для ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем схематизация внешних воздействующих факторов оболочки твэла в виде наружного и внутреннего давления может оказаться достаточно точной для обоснования работоспособности оболочек с учетом ползучести. Действительно, в таких реакторах наружное давление жидкометаллического теплоносителя пренебрежимо мало по сравнению с давлением внутри оболочки, что приводит к значительным интенсивностям напряжений, и, как следствие, внутреннее давление может приводить к значительным скоростям деформаций ползучести и повреждаемости в конструкционном материале оболочки твэла.

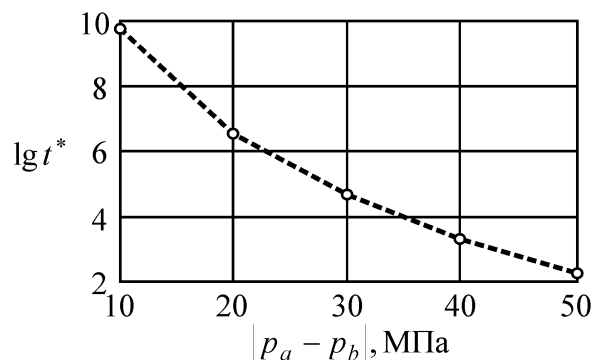


Рис. 2 – Влияние разности давлений на время образования макроскопического дефекта в оболочке твэла вследствие ползучести

Выводы

Выполнен анализ основных априори принимаемых допущений в распространенных подходах к оценке работоспособности оболочек твэлов ядерных реакторов с учетом ползучести и повре-

ждаемости. Показано, что расчетная схема, учитывающая действие на оболочку только внутреннего и наружного давлений и перепада температуры по толщине стенки не может давать надежных оценок работоспособности твэлов с учетом ползучести для ядерных реакторов с водой под давлением в качестве теплоносителя и замедлителя, когда внутренне давление на оболочку сопоставимо с наружным давлением. Такую расчетную схему следует рекомендовать для обоснования работоспособности оболочек твэлов ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, когда внутренне давление на оболочку твэла оказывается намного больше наружного давления на нее. В дальнейших исследованиях с использованием предложенной схематизации внешних воздействующих факторов предполагается рассмотреть работоспособность оболочек твэлов ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Кроме этого, для обоснования работоспособности оболочек твэлов ядерных реакторов с водой под давлением в дальнейшем предлагается кроме внутреннего и наружного давлений учитывать также изгиб оболочки в потоке водного теплоносителя, который может приводить к значительным напряжениям из-за большой длины оболочек.

Список литературы

1. Campello D., Tardif N., Moula M., Baietto M. C., Coret M., Desquines J. Identification of the steady-state creep behavior of Zircaloy-4 claddings under simulated Loss-Of-Coolant Accident conditions based on a coupled experimental/numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*. 2017. Vol. 115–116. pp. 267–278.
2. Montgomery R., Tomé C., Liu W., Alankar A., Subramanian G., Stanek C. Use of multiscale zirconium alloy deformation models in nuclear fuel behavior analysis. *Journal of Computational Physics*. 2017. Vol. 328. pp. 278–300.
3. Lee Y., Lee J. I., NO H. C. Mechanical analysis of surface-coated zircaloy cladding. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017. Vol. 49, Issue 5. pp. 1031–1043.
4. Okawa T., Tatewaki I., Ishizu T., Endo H., Tsuboi Y., Saitou H. Fuel behavior analysis code FEMAXI-FBR development and validation for core disruptive accident. *Progress in Nuclear Energy*. 2015. Vol. 82. pp. 80–85.
5. Yefimov A. V., Romashov Yu. V. Problem of evaluation for structural materials operability in elements of nuclear power

- plants equipments. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. No. 108(2). pp. 29–35.
6. Jelwan J., Chowdhury M., Pearce G. Design for creep: A critical examination of some methods. *Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 27. pp. 350–372.
7. Ромашов Ю. В., Поволоцкий Э. В. Применение метода конечных разностей для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии оболочки стержневого твэла. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 9(1231). С. 82–85. Бібліогр.: 9 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.13.
8. Morachkovskii O. K., Romashov Yu. V. Solving initial-boundary-value creep problems. *International Applied Mechanics*. 2009. Vol. 45, No. 10. P. 1061–1070.
9. Fletcher C. A. J. *Computational techniques for fluid dynamics 1 Fundamental and General Techniques*. Springer Verlag. Berlin. Heidelberg, 1988, 1991. 404 p.

References (transliterated)

1. Campello, D., Tardif, N., Moula, M., Baietto, M. C., Coret, M. and Desquines, J. (2017), "Identification of the steady-state creep behavior of Zircaloy-4 claddings under simulated Loss-Of-Coolant Accident conditions based on a coupled experimental/numerical approach", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 115–116, pp. 267–278.
2. Montgomery, R., Tomé, C., Liu, W., Alankar, A., Subramanian, G. and Stanek, C. (2017), "Use of multiscale zirconium alloy deformation models in nuclear fuel behavior analysis", *Journal of Computational Physics*, Vol. 328, pp. 278–300.
3. Lee, Yu., Lee, J. I., and NO, H. C. (2017), "Mechanical analysis of surface-coated zircaloy cladding", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 49, Issue 5, pp. 1031–1043.
4. Okawa, T., Tatewaki, I., Ishizu, T., Endo, H., Tsuboi, Y. and Saitou H. (2015), "Fuel behavior analysis code FEMAXI-FBR development and validation for core disruptive accident", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 82, pp. 80–85.
5. Yefimov, A. V. and Romashov, Yu. V. (2017), "Problem of evaluation for structural materials operability in elements of nuclear power plants equipments", *Problems of Atomic Science and Technology*, 108(2), pp. 29–35.
6. Jelwan, J., Chowdhury, M. and Pearce, G. (2013), "Design for creep: A critical examination of some methods", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 27, pp. 350–372.
7. Romashov, Yu. and Povolotskii, E. (2017), "Using the Method of Finite Differences to Solve the Rod Fuel Element Shell Stress-Strain Behavior Problem", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 82–85, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.13.
8. Morachkovskii, O. K. and Romashov, Yu. V. (2009), "Solving initial-boundary-value creep problems", *International Applied Mechanics*, Vol. 45, No. 10, pp. 1061–1070.
9. Fletcher, C. A. J. (1988, 1991), *Computational techniques for fluid dynamics 1 Fundamental and General Techniques*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Поступила (received) 01.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ромашов Юрій Володимирович (Ромашов Юрий Владимирович, Romashov Yury) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри парогенераторобудування, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, професор кафедри прикладної математики; м Харків, Україна; e-mail: yu.v.romashov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8376-3510>.

Поволоцький Елії Вікторович (Поволоцкий Элий Викторович, Elii Povolotskii) – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри парогенераторобудування; м Харків, Україна; e-mail: povolotsky91@gmail.com.