
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.54

**ТОЛЕРАНТНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1200
С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ**

© 2020 А.З. Альхмуд, В.Б. Круглов, Х.А. Танаш

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Основной фактор разрушения твэлов в авариях с потерей теплоносителя связан с пароциркониевой реакцией, протекающей между оболочкой твэла и теплоносителем (водой). Повышение надежности тепловыделяющих элементов можно получить модификацией или заменой топливной оболочки, на материалы не вступающие во взаимодействие с теплоносителем при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях. Повышение надежности и экономических характеристик ЯЭУ возможна при замене диоксида урана на делящиеся композиции с большим содержанием делящихся изотопов и с большей теплопроводностью. Эти два положения образуют концепцию ATF (толерантного топлива). Рассмотрены варианты создания толерантного топлива. Для ядерно-энергетических установок с реакторами ВВЭР рассмотрены варианты модернизации оболочек и делящихся композиций.

Ключевые слова: толерантное топливо, теплопроводность, высокая температура, диоксид урана, цирконий, аварий с потерей теплоносителя связан с пароциркониевой реакцией.

Поступила в редакцию 03.06.2020

После доработки 15.10.2020

Принята к печати 20.10.2020

Введение

Во время аварии в 2011 г. на Фукусиме в Японии взорвался реактор. После этого инцидента возникла концепция толерантного топлива, включающая в себя разработку новых оболочек и самого топлива. В данном исследовании показана разница между урановым диоксидным UO_2 топливом и толерантным топливом, типа уран-циркониевый сплав U-Zr по распределению температуры топлива в активной зоне с изменением теплопроводности, и решена задача в авариях с пароциркониевой реакцией с использованием толерантного топлива [1].

Есть две причины этой аварии:

1. Физическая – в результате реакции циркония с водой выделилось большое количество водорода.
2. Механическая – отключение водяных насосов, ответственных за охлаждение влажного ядерного реактора, произошедшее в результате землетрясения и значительного повышения температуры в активной зоне реактора [2, с.177-183].

Расчет теплопроводности толерантного топлива U-Zr

Поведение ядерного топлива сильно зависит от теплофизических и химических свойств топливного материала и их изменения от температуры и выгорания. Более низкая теплопроводность приводит к большим температурным градиентам на топливной таблетке и высокой температуре в центре. Поэтому оценка теплофизических свойств диоксида урана (UO_2) требуется при проектировании ядерного реактора. Теплопроводность UO_2 рассчитывается по формуле (1) [3]:

$$\lambda_{UO_2}(t) = \frac{100}{7.5408 + 17.692 \times \frac{t+273}{1000} + 3.6142 \times \left(\frac{t+273}{1000}\right)^{5/2}} + \frac{6400}{5/2} \times e^{\frac{-16.35}{\frac{t+273}{1000}}}, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность, Вт/М·К, $T=t+273/1000^\circ\text{C}$.

Корреляция теплопроводности циркония в зависимости от температуры была разработана на основе статистического анализа теплопроводности циркония и измерений температуропроводности с 1951 г. по настоящее время. Рекомендуемое уравнение для теплопроводности циркония в Вт/М·К от 298 до 2000 К выглядит следующим образом (2) [4, 5]:

$$\lambda_{Zr}(t) = 8.8527 + 7.082 \times 10^{-3} \times (t+273) + 2.5329 \times 10^{-6} (t+273)^2 + 2.9918 \times 10^{-3} \times (t+273)^{-1}. \quad (2)$$

Теплопроводность толерантного топлива описывается с использованием следующих уравнений Хассельмана, Maxwell, McCullough и Rayleigh (3)-(7) [6]:

$$\lambda_{\text{хас}}(t) = \lambda_{Zr}(t) \times \frac{2 \left(\frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} - 1 \right) \times \nu + \frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} + 2}{\left(1 - \frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} \right) \times (-\nu) + \frac{\lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t)} + 2} \times (1-P)^{1.5}, \quad (3)$$

где λ – теплопроводность для толерантного топлива, Вт/М·К;

P – объемная доля пористости.

$$\lambda_{\text{Maxwell}}(t) = \lambda_{UO_2}(t) \times \left[1 + \frac{3 \cdot \nu}{\left(\frac{\lambda_{Zr}(t) + 2 \cdot \lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t) - \lambda_{UO_2}(t)} \right) - \nu} \right]. \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{McCullough}}(t) = [\lambda_{UO_2}(t) \times (\nu - P) + (1 - \nu) \times \lambda_{Zr}(t)]. \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{Rayleigh}}(t) = \lambda_{UO_2}(t) \times \left(1 + \frac{3 \times \nu}{\left(\frac{\lambda_{Zr}(t) + 2 \cdot \lambda_{UO_2}(t)}{\lambda_{Zr}(t) - \lambda_{UO_2}(t)} \right) - \nu + 1.596 \left(\frac{\lambda_{Zr}(t) - \lambda_{UO_2}(t)}{3 \lambda_{Zr}(t) - 4 \lambda_{UO_2}(t)} \right)} \right) \times (1-P)^{1.5}. \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{average}}(t) = \frac{\lambda_{\text{хас}}(t) + \lambda_{\text{Maxwell}}(t) + \lambda_{\text{McCullough}}(t) + \lambda_{\text{Rayleigh}}(t)}{4}. \quad (7)$$

Решая эти уравнения в MATHCAD, получаем результаты, показывающие влияние теплопроводности на температуру в активной зоне реактора. При увеличении теплопроводности за счет использования толерантного топлива температура будет снижаться по сравнению с топливом из диоксида урана. На рисунке 1 показана теплопроводность для толерантного топлива и диоксида урана [7, 8].

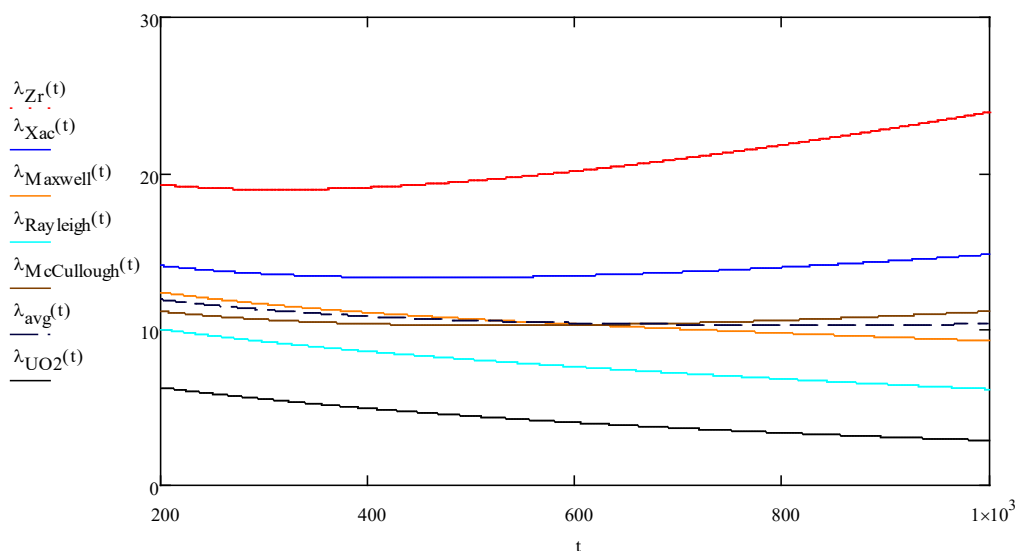


Рисунок 1 – Теплопроводность для толерантного топлива [Thermal conductivity for tolerant fuels]

Теплопроводность для толерантного топлива увеличилась до 9,6 Вт / М·К, а теплопроводность диоксида урана составляет 3 Вт /М·К. Это означает, что если теплопроводность увеличить, температура в реакторах будет снижаться [9, с. 84-88; 10].

Расчет распределение температуры топлива при использовании толерантного топлива U-Zr и диоксида урана UO₂ [10-12]

Примем коэффициент теплопроводности топлива и газового зазора, формула (8):

$$\lambda_{г.з.} = 0,35 \frac{\text{Вт}}{\text{М}\cdot\text{К}}, \lambda_{\text{пор}} = \lambda_{\text{топл}} \frac{1-P_{\text{пор}}}{1+0.5P_{\text{пор}}}, \text{ где } P_{\text{пор}} = 5\% . \quad (8)$$

Термическое сопротивление топлива, центрального отверстия нет, формула (9):

$$R_{\text{топл}} = \frac{d_{\text{топл}}}{4\lambda_{\text{пор}}}, \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}} . \quad (9)$$

Термическое сопротивление контактного слоя, формула (10):

$$R_{\text{кт}} = \frac{\delta_{г.з.}}{\lambda_{г.з.}} = \frac{0,1 \times 10^{-3}}{0,35} = 2,86 \times 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}} . \quad (10)$$

Распределение температуры на поверхности топливной таблетки по высоте активной зоны для максимально напряженного канала, формула (11):

$$T_{\text{топ}}^{\text{пов}} = T_{\text{обmax}}(z) + q_{f\text{max}}(z)(R_{\text{об}} + R_{\text{кт}}) . \quad (11)$$

Распределение температуры в центре топливной таблетки по высоте активной, формула (12):

$$T_{\text{топ}}^{\text{центр}} = T_{\text{тнmax}}(z) + q_{f\text{max}}(R_{\text{об}} + R_{\text{кт}} + R_{\text{топл}}) . \quad (12)$$

На рисунке 2 показано распределение температуры топлива при использовании диоксида урана UO₂ топлива в активной зоне для реакторов ВВЭР-1200.

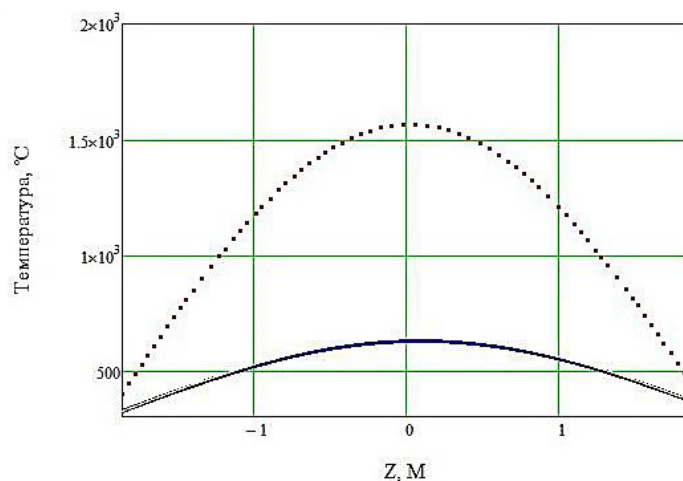


Рисунок 2 – Распределение температуры на поверхности топливной таблетки и температуры в центре топливной таблетки по высоте активной зоне [Distribution of temperature on the fuel pellet surface and temperature in the center of the fuel pellet over the height of the core]

Максимальная температура на поверхности топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{пов}} = 678^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура в центре топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{цен}} = 1590^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 3 показано распределение температуры топлива при использовании толерантного топлива U-Zr в активной зоне для реакторов ВВЭР-1200.

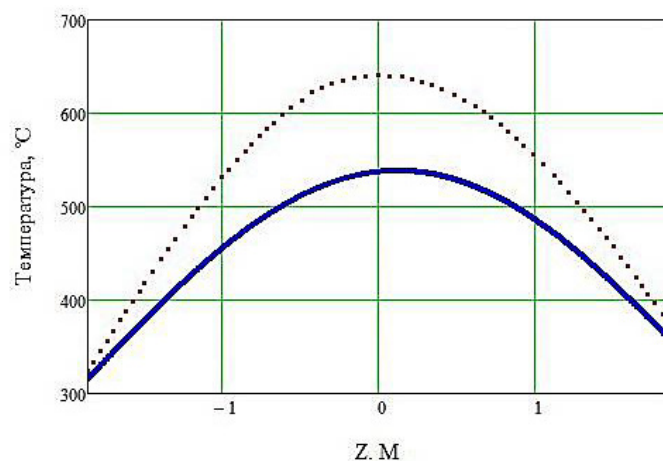


Рисунок 3 – Распределение температуры на поверхности топливной таблетки и температуры в центре топливной таблетки по высоте активной зоне [Distribution of temperature on the fuel pellet surface and temperature in the center of the fuel pellet over the height of the core]

Теплопроводность для толерантного топлива U-Zr увеличилась до $9,6 \text{ Вт} / \text{М} \cdot \text{К}$.

Максимальная температура на поверхности топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{пов}} = 570^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура в центре топливной таблетки в максимально напряженном канале: $T_{\text{топ}}^{\text{цен}} = 640^{\circ}\text{C}$.

Вывод

Толерантное топливо – ядерное топливо нового поколения безопасности с повышенной устойчивостью к авариям на АЭС с потерей теплоносителя в реакторе. По результатам расчетов показано распределение низких температур при использовании толерантного топлива. Водород начинает производиться при $500\text{-}700^{\circ}\text{C}$, но при достижении температуры 1200°C и выше оно становится опасным в реакторе. Толерантное топливо решает эту проблему. При остановке реактора толерантное топливо держит температуру оболочки в разрешенных пределах $500\text{-}700^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко, А. Толерантное топливо для реакторов типа ВВЭР / А. Савченко. – 01.02.2016. – URL : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6531&mode=thread&order=0&thold=0>.
2. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 / С. А. Андрушечко [и др.]. – Москва : Логос, 2010. – 604 с.
3. Zhou, W. Enhanced thermal conductivity accident tolerant fuels for improved reactor safety. A comprehensive review. *Annals of Nuclear Energy*. 2018. T. 119. P. 66-86.
4. Westinghouse «Accident-tolerant fuel», Cranberry Township, Pennsylvania 16066. – URL : <https://www.nrc.gov/docs/ML1826/ML18261A203.pdf>.
5. Jopek, H. and Strek, T. Optimization of the effective thermal conductivity of a composite. *Convection and Conduction Heat Transfer*, 2011, P. 197-214. – URL : [https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Strek,+T.+\(2011\).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Strek,+T.+(2011).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
6. Pietra, K., Wisniewski, Tomasz S. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials, *Journal of Power Technologies*, 95(1), 2015, P. 14-24. – URL : <http://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/viewFile/463/637>.
7. White, J. T., Nelson, A. T., Dunwoody J. T., Byler, D. D., Safarik, D. J., McClellan, K. J. *Journal of Nuclear Materials*, V. 464, September 2015, P. 275-280. – URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.04.031>.
8. Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., Klemens, P. G. *Thermophysical Properties of Matter*. IFI/Plenum, New York, 1970. – URL : [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992).
9. Алексеев, С. В., Зайцев, В. А., Толстоухов, С. С. Дисперсионное ядерное топливо / С. В. Алексеев, В. А. Зайцев, С. С. Толстоухов. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 248 с.
10. Savchenko, A. M., Konovalov, Y. V., Laushkin, A. V., Yuferov, O. I. Low-melting zirconium alloys. *Letters on Materials*, 2017, 7(3), P. 229-233.
11. Iwasaki, K., Matsui, T., Yanai, K., Yuda, R., Arita, Y., Nagasaki, T., Yokoyama, N., Tokura, I., Une, K., Harada, K. Effect of Gd₂O₃ Dispersion on the Thermal Conductivity of UO₂. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2009, P. 673-676.
12. Самойлов, О. Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынин, А. М. Бахметьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 278 с.

REFERENCES

- [1] Savchenko A. Tolerantnoe toplivo dlya reaktorov tipa VVE`R [Tolerant Fuel for WVER-Type Reactors]. 01.02.2016. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6531&mode=thread&order=0&thold=0> (in Russia).
- [2] Andrushechko S.A. [et al.]. AE`S s reaktorom tipa VVE`R-1000 [NPP with a WVER-1000 Type Reactor]. Moskva: Logos [Moscow: Logos], 2010. 604 p. (in Russia).
- [3] Zhou W. Enhanced Thermal Conductivity Accident Tolerant Fuels for Improved Reactor Safety. A Comprehensive Review. *Annals of Nuclear Energy*. 2018. T. 119. P. 66-86.
- [4] Westinghouse «Accident-tolerant fuel», Cranberry Township, Pennsylvania 16066. – URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1826/ML18261A203.pdf>.
- [5] Jopek, H. and Strek, T. Optimization of the Effective Thermal Conductivity of a Composite. *Convection and Conduction Heat Transfer*, 2011, P. 197-214. – URL: [https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Strek,+T.+\(2011\).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.jo/books?hl=en&lr=&id=XoqfDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA197&dq=5.%09Jopek,+H.,+%26+Strek,+T.+(2011).+Optimization+of+the+effective+thermal+conductivity+of+a+composite.+Convection+and+Conduction+Heat+Transfer,+&ots=2TzHH2xYij&sig=SLuLap70nQI2Os8NzU5p6iY0XvM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
- [6] Pietra, K., Wisniewski, Tomasz S. A Review of Models for Effective Thermal Conductivity of Composite Materials, *Journal of Power Technologies*, 95(1), 2015, P. 14-24. – URL: <http://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/viewFile/463/637>.
- [7] White, J. T., Nelson, A. T., Dunwoody J. T., Byler, D. D., Safarik, D. J., McClellan, K. J. *Journal of Nuclear Materials*, V. 464, September 2015, P. 275-280. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.04.031>.
- [8] Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., Klemens, P. G. *Thermophysical Properties of Matter*. IFI/Plenum, New York, 1970. – URL : [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1168992).

- [9] Alekseev S.V., Zaitsev V.A., Tolstoukhov S.S. Dispersionnoye yadernoye toplivo [Dispersive Nuclear Fuel]. Moskva : TEKHNOSEFERA [Moscow: TECHNOSPHERE]. 2015. P. 84-88 (in Russia).
- [10] Savchenko, A. M., Konovalov, Y. V., Laushkin, A. V., Yuferov, O. I. Low-Melting Zirconium Alloys. Letters on Materials, 2017, 7(3), P. 229-233.
- [11] Iwasaki, K., Matsui, T., Yanai, K., Yuda, R., Arita, Y., Nagasaki, T., Yokoyama, N., Tokura, I., Une, K., Harada, K. Effect of Gd₂O₃ Dispersion on the Thermal Conductivity of UO₂. Journal of Nuclear Science and Technology, 2009, P. 673-676.
- [12] Samoilov O.B., Usynin G. B., Bakhmetyev A. M. Bezopasnost' yadernykh energeticheskikh ustanovok [Safety of Nuclear Power Installations]. Moskva : Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1989. 278 p. (in Russia).

Tolerant Fuel for WWER-1200 Reactors with High Thermal Conductivity

A.Z. Alhmoud¹, V.B. Kruglov², H.A. Tanash³

National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹ORCID iD: 0000-0002-8213-1455

e-mail: ahmad_homoud@yahoo.com

²e-mail: vbkruglov@mephi.ru

³e-mail: tanash_hamza@yahoo.com

Abstract – The main factor of destruction of fuel rods in accidents with loss of coolant is associated with the vapor-zirconium reaction occurring between the fuel rod shell and the coolant (water). Improving the reliability of fuel cells can be obtained by modifying or replacing the fuel shell, materials that do not interact with the coolant during normal operation and in emergency situations. Increasing the reliability and economic characteristics of nuclear power plants is possible by replacing uranium dioxide with fissile compositions with a high content of fissile isotopes and with greater thermal conductivity. These two provisions form the concept of ATF (tolerant fuel). Variants of creation of tolerant fuel are considered., variants of modernization of shells and fissile compositions are studied for nuclear power plants with WWER reactors.

Keywords: tolerant fuel, thermal conductivity, high temperature, uranium dioxide, zirconium, accidents with loss of coolant associated with water reaction.