

*А. В. ЕФИМОВ, Ю. В. РОМАШОВ, Д. А. ЧИБИСОВ*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ КЕРАМИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Обсуждаются возможности применения различных математических формулировок для моделирования осесимметрично теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива. Показано, что применение уравнения теплопроводности, записанного относительно температуры, может вносить погрешности, связанные с неопределенностью исходных данных о производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности, которая доступна исключительно в табулированной форме для значений температуры, разделенных достаточно большим шагом. Это обстоятельство является существенным для моделирования осесимметричной теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива, поскольку его теплопроводность существенно зависит от температуры, уменьшаясь в 2,5 раза при изменении температуры от 323 К до 1073 К. Показано, что для изучения осесимметричной теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива наибольший интерес представляет смешанная математическая формулировка задачи теплопроводности относительно полей температуры и вектора теплового потока, поскольку соответствующие дифференциальные уравнения не содержат производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности. При этом погрешности, вносимые аппроксимацией значений коэффициента теплопроводности по имеющимся табличным данным, будут ограничены погрешностью аппроксимации значений коэффициента теплопроводности, которая легко контролируется по имеющимся табличным данным о значениях коэффициента теплопроводности. Для решения задачи теплопроводности, сформулированной в смешанной форме относительно полей температуры и вектора теплового потока, предлагается использовать метод полу-дискретизации, который сводит рассматриваемую задачу к определению временных зависимостей искомых величин в отдельных точках исследуемой области компактного изделия керамического ядерного топлива. Для этого предлагается конечно-разностными формулами заменять производные только по пространственным координатам, что позволит получить обыкновенные дифференциальные уравнения с начальными условиями для определения узловых значений искомых величин.)

**Ключевые слова:** математическая модель, теплопроводность, теплофизические характеристики, керамическое ядерное топливо, коэффициент теплопроводности, метод полу-дискретизации.

*О. В. ЕФИМОВ, Ю. В. РОМАШОВ, Д. О. ЧИБИСОВ*

### **МОДЕЛЮВАННЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ В КОМПАКТНИХ ВИРОБАХ КЕРАМІЧНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Обговорюються можливості щодо застосування різних математичних формулювань для моделювання осесимметричної теплопровідності компактних виробів керамічного ядерного палива. Показано, що застосування рівняння теплопровідності, записаного відносно температури, може вносити похибки, пов'язані з невизначеністю вихідних даних про похідну температурної залежності коефіцієнта теплопровідності, яка доступна виключно в табличній формі відповідно окремим значенням температури, розділених досить великим кроком. Ця обставина є істотною для моделювання осесимметричної теплопровідності компактних виробів керамічного ядерного палива, оскільки їхня теплопровідність істотно залежить від температури, зменшуючись в 2,5 рази при зміні температури від 323 К до 1073 К. Показано, що для вивчення осесимметричної теплопровідності компактних виробів керамічного ядерного палива найбільший інтерес представляє змішана математична формулювання задачі теплопровідності щодо полів температури і вектора теплового потоку, оскільки відповідні такому формулюванню диференціальні рівняння не містять похідною температурної залежності коефіцієнта теплопровідності. При цьому похибки, що вносяться аппроксимацією значень коефіцієнта теплопровідності за наявними табличними даними, будуть обмежені похибкою аппроксимації значень коефіцієнта теплопровідності, яка легко контролюється за наявними табличними даними про значеннях коефіцієнта теплопровідності. Для вирішення задачі теплопровідності, сформульованої в змішаній формі щодо полів температури і вектора теплового потоку, пропонується використовувати метод напів-дискретизації, який зводить розглянуту задачу до визначення залежностей від часу шуканих величин в окремих точках досліджуваної області компактного виробу керамічного ядерного палива. Для цього пропонується за допомогою використання скінчених різностей замінювати похідні тільки по просторовим координатам, на не по часу, що дозволить отримати звичайні диференціальні рівняння з початковими умовами для визначення вузлових значень шуканих величин.

**Ключові слова:** математична модель, теплопровідність, теплофізичні характеристики, керамічне ядерне паливо, коефіцієнт теплопровідності, метод напів-дискретизації.

*O. V. YEFIMOV, YU. V. ROMASHOV, D. O. CHIBISOV*

### **MODELING OF AXISYMMETRIC HEAT CONDUCTION IN COMPACT PRODUCTS OF CERAMIC NUCLEAR FUEL WITH THE TEMPERATURE DEPENDENCIES OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS**

The possibilities of using of various mathematical formulations for modelling the axisymmetric heat conduction of compact products of ceramic nuclear fuel are discussed. It is shown that the application of the heat equation wrote with respect to temperature can introduce errors due to the uncertainty of the initial data on the derivative of the temperature dependence of the thermal conductivity, which is available exclusively in a tabulated form for temperature values separated by a sufficiently large step. This circumstance is essential for modelling the axisymmetric heat conduction of compact products of ceramic nuclear fuel, since its thermal conductivity depends significantly on temperature, decreasing by a factor of 2.5 with a temperature change from 323 K to 1073 K. It is shown that to study of the axisymmetric heat conduction of compact products of ceramic nuclear fuel, the most interesting is the mixed mathematical formulation of the heat conduction problem with respect to the temperature fields and the heat flux vector, since the corresponding differential equations do not contain the derivative of the temperature dependence of the thermal conductivity. In this case, the approximations of the values the thermal conductivity coefficient from the available tabular data will be limited by the error in approximating the values of the thermal conductivity, which is easily monitored from the available tabular data on the values of the thermal conductivity coefficient. To solve the heat conduction problem, formulated in mixed form with respect to the temperature fields and the heat flux vector, it is proposed to use the semi-discretisation method, which reduces the problem under consideration to determining the time dependences of the unknown quantities at individual points of the investigated region of a compact product of ceramic nuclear fuel. To this end, it is proposed to replace finite-difference

formulas by finite-difference formulas only in terms of spatial coordinates, which will allow us to obtain ordinary differential equations with initial conditions for determining the nodal values of the unknown quantities.

**Keywords:** mathematical model, heat conduction, thermo-physical characteristics, ceramic nuclear fuel, thermal conductivity coefficient, semi-sampling method.

**Введение.** Моделирование теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива, которые широко используется в современных ядерных энергетических реакторах, представляет значительный интерес для разработки новых и усовершенствования известных видов керамического ядерного топлива [1–5]. Такой интерес связан со специфическими свойствами, – низкой теплопроводностью и существенной температурной зависимостью теплофизических характеристик, – которые порождают особые закономерности процессов теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива, существенно ограничивающие его работоспособность в ядерных энергетических реакторах. Поэтому тема данной работы, в которой рассматривается специфика моделирования теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива с учетом температурных зависимостей его теплофизических характеристик, является актуальной.

**Уравнения, начальные и граничные условия теплопроводности.** Исследование температурного состояния компактных изделий керамического ядерного топлива сводится к решению задачи теплопроводности, которая достаточно хорошо разработана в настоящее время [6–8]. Компактные изделия керамического ядерного топлива для ядерных энергетических реакторов выполняют чаще всего в цилиндрической форме, как, например, в твелах ядерных реакторов ВВЭР-1000 (рис. 1), поэтому уравнения задачи осесимметричной нестационарной теплопроводности рассмотрим в цилиндрических координатах [6–9]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q}{\partial r} + \frac{q}{r}\right) + \frac{\Sigma_f}{\gamma} \Phi(r), \quad (1)$$

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (2)$$

где  $T = T(r, t)$  и  $q = q(r, t)$  – температура и радиальный тепловой поток;

$c$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности топлива;

$r$  и  $t$  – радиальная координата и время;

$\Sigma_f$  и  $\gamma$  – макроскопическое сечение деления и величина, обратная энергии, приходящейся на один акт деления;

$\Phi(r)$  – плотность нейтронного потока.

Ненулевая мощность внутренних источников тепла в уравнении (1) учитывает выделение энергии в единице объема топлива вследствие ядерной реакции деления, которое определяется плотностью нейтронного потока; предполагается, что плотность нейтронного потока найдена из физического расчета реактора [9]. Необходимость учитывать мощность внутренних

источников тепла является спецификой моделирования теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива, поскольку в большинстве других инженерных приложений уравнений теплопроводности мощность внутренних источников тепла обычно равна нулю.

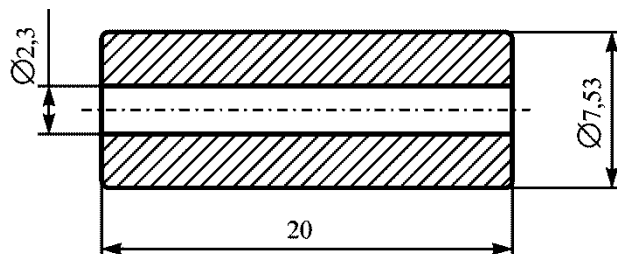


Рис. 1. Сечение и размеры (в мм) топливной таблетки из керамики  $UO_2$  для твэлов ядерного реактора ВВЭР-1000

Уравнения (1), (2) следует рассматривать с учетом начального условия, которое определяет поле температуры в начальный момент времени  $t = t_0$ :

$$T(r, t_0) = T_0(r), \quad (3)$$

где  $T_0(r)$  – заданное поле температуры в начальный момент времени.

Начальное поле температуры  $T_0(r)$  выбирается с учетом целей моделирования. Так, например, начальное поле температуры может отвечать состоянию в нормальных условиях эксплуатации, если необходимо рассмотреть изменение температуры вследствие каких-либо возмущений относительно нормальных условий эксплуатации.

Уравнения (1), (2) следует рассматривать с учетом граничных условий, которые определяют теплообмен на граничных поверхностях изделия. В настоящее время компактные цилиндрические изделия керамического ядерного топлива выполняют с центральным отверстием (рис. 1), поэтому далее рассматриваем граничные условия на внутренней  $r = a$  и наружной  $r = b$  поверхностях, где  $a$  – радиус отверстия и  $b$  – радиус изделия. При моделировании теплопроводности в изделиях керамического ядерного топлива в качестве таких условий приходится рассматривать условия теплообмена:

$$q(a, t) = \alpha_a(T_a - T(a, t)), \quad (4)$$

$$q(b, t) = \alpha_b(T(b, t) - T_b), \quad (5)$$

где  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$  – коэффициенты теплоотдачи на поверхностях  $r = a$  и  $r = b$ ;

$T_a$ , и  $T_b$  – температуры газового наполнителя (обычно – это гелий) в области отверстия и в зазоре между топливом и оболочкой.

Основные трудности моделирования процессов теплопроводности в компактных изделиях керами-

ческого ядерного топлива состоят в том, что величины  $T_a$  и  $T_b$  априори не известны и для их определения совместно с задачами (1)–(5) приходится рассматривать задачу теплопроводности газового наполнителя, а также задачу теплопроводности оболочки твэла с учетом ее теплообмена с движущимся теплоносителем.

**Выбор разрешающих уравнений.** При рассмотрении процессов теплопроводности вместо уравнений (1), (2) традиционно используют одно уравнение теплопроводности относительно температуры, которое можно легко получить, подставив закон Фурье (2) в уравнение баланса теплоты (1). В частном случае, когда теплофизические характеристики материала (теплоемкость, плотность и теплопроводность) характеризуются числовыми константами, уравнение теплопроводности будет линейным, что существенно упрощает решение задач теплопроводности как аналитически, так и численно [6–8]. В то же время, теплофизические характеристики керамического ядерного топлива существенно зависят от температуры, что для значения коэффициента теплопроводности распространенного в настоящее время керамического ядерного топлива  $UO_2$  показано на рис. 2, который построен по данным работы [10]. Для учета таких температурных зависимостей в качестве теплофизических характеристик материала можно использовать средние значения в некотором температурном интервале:

$$\bar{c} = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} c(T) dT, \quad (6)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \rho(T) dT, \quad (7)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \lambda(T) dT, \quad (8)$$

где  $\bar{c}$ ,  $\bar{\rho}$  и  $\bar{\lambda}$  – отвечающие интервалу  $[T_0, T_1]$  средние значения теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности;

$c(T)$ ,  $\rho(T)$  и  $\lambda(T)$  – температурные зависимости теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности.

При соответствующем выборе интервала  $[T_0, T_1]$  использование средних значений (3)–(5) в качестве теплофизических характеристик материала не будет вносить заметной погрешности в результаты расчетов при решении уравнений теплопроводности (1), (2), но при этом эти уравнения будут линейными, что существенно упрощает их решение. В качестве границ интервала  $[T_0, T_1]$  следует выбирать минимальную и максимальную температуры в исследуемой области, которые в некоторых случаях можно установить из формулировки задачи теплопроводности, например, в

случае, когда в точках граничных поверхностей  $r = a$  и  $r = b$  заданы температуры. В случае граничных условий вида (4), (5) определение интервала  $[T_0, T_1]$  для вычислений по формулам (3)–(5) оказывается затруднительным, и, поэтому, необходимо учитывать температурные зависимости для теплофизических характеристик и рассматривать нелинейные уравнения теплопроводности (1), (2).

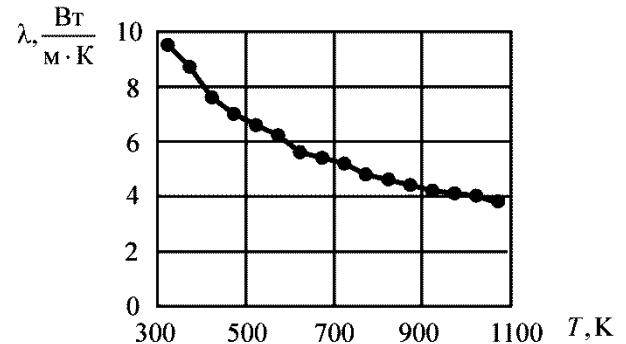


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности керамики  $UO_2$

Традиционное сведение уравнений (1), (2) к одному уравнению теплопроводности относительно температуры приводит к известному нелинейному дифференциальному уравнению [6–8]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \frac{d\lambda}{dT} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \frac{\Sigma_f}{\gamma} \Phi(r), \quad (9)$$

где  $\nabla^2 T = \partial^2 T / \partial r^2 + (\partial T / \partial r) / r$  – лапласиан.

Принципиальные трудности при применении уравнения (9) для моделирования теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива состоят в том, что функциональная зависимость  $\lambda(T)$  задана в табличной форме, т.е. известны значения коэффициента теплопроводности, отвечающие отдельным значениям температуры, расположенным с достаточно большим шагом. Так, например, маркеры на рис. 2 отвечают точкам из соответствующих табличных данных, а линия – это ломаная, соединяющая эти точки. С помощью таких табличных данных значения  $\lambda$  для произвольной температуры можно достаточно точно определять, например, путем линейной интерполяции, однако при этом, очевидно, не имеем возможностей точно определять и контролировать погрешность при приближенном определении значения производной  $d\lambda/dT$ , которая входит в уравнение (9). Таким образом, традиционный подход к проблеме теплопроводности, в котором задача сводится к одному дифференциальному уравнению относительно температуры, при моделировании теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива вследствие специфики исходных данных будет вносить в результаты расчетов неконтролируемую погрешность. В связи с этим следует отметить, что система уравнений (1), (2) не содержит слагаемого с множителем  $d\lambda/dT$ , который затруднительно определять по специфическим исходным данным о

теплопроводности керамического ядерного топлива. Таким образом, вместо традиционного подхода, сводящегося к одному уравнению (9) относительно температуры, для изучения теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива целесообразно использовать систему уравнений теплопроводности (1), (2) относительно температуры и вектора теплового потока.

**Метод численного интегрирования.** Решение нелинейных уравнений теплопроводности (1), (2), в которых учитываются температурные зависимости теплофизических характеристик, представляет значительные трудности и может быть в общем случае решено только при помощи численных методов. В работе [11] для решения линейного уравнения теплопроводности предлагается использовать метод полу-дискретизации с конечными разностями. Идея этого подхода состоит в том, чтобы свести начально-краевую задачу для дифференциальных уравнений (1), (2) к интегрированию дифференциальных уравнений с начальными условиями при помощи хорошо разработанных для этих целей численных методов [12]. Для этого используем конечные разности, которые применяем только для производных по координате  $r$ , что позволяет получить обыкновенные дифференциальные уравнения относительно функций времени для неизвестных задач в узлах сетки. Такой подход обладает преимуществом по сравнению с традиционным методом сеток по координатам и по времени [11]. Основные преимущества связаны с широкими возможностями выбора методов для численного интегрирования по времени, тогда как в классическом методе сеток интегрирование по времени осуществляется по существу при помощи простейшего метода – метода Эйлера. В работе [11] показано, что для решения задач теплопроводности при моделировании температурного состояния компактных изделий керамического ядерного топлива весьма перспективным является метод Мерсона с автоматическим выбором шага интегрирования, который позволяет согласовывать шаг интегрирования по времени с шагом сетки по координате.

**Выводы.** Представленные в работе результаты теоретических исследований позволяют сделать следующие выводы, которые предоставляют возможности сформулировать практические рекомендации по выполнению моделирования процессов теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива.

Применение уравнения теплопроводности, записанного относительно искомой температуры, может вносить погрешности в результаты расчетов, связанные с неопределенностью исходных данных о производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности, которая для керамического ядерного топлива доступна исключительно в табулированной форме для значений температуры, разделенных достаточно большим шагом. Это обстоятельство является существенным для моделирования процессов осесимметричной теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного

топлива, поскольку теплопроводность материала ядерного топлива существенно зависит от температуры, уменьшаясь в 2,5 раза при изменении температуры от 323 К до 1073К.

Для изучения процессов осесимметричной теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива наибольший интерес представляет математическая формулировка задачи теплопроводности в смешанной форме относительно полей температуры и вектора теплового потока, поскольку соответствующие дифференциальные уравнения не содержат производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности. При этом погрешности, вносимые аппроксимацией значения коэффициента теплопроводности по имеющимся табличным данным, будут ограничены погрешностью аппроксимации значений коэффициента теплопроводности, которая легко контролируется по имеющимся табличным данным о значениях коэффициента теплопроводности.

Для решения задачи теплопроводности, формулированной в смешанной форме относительно полей температуры и вектора теплового потока, предлагается использовать метод полу-дискретизации, который сводит рассматриваемую задачу к определению временных зависимостей искомых величин в отдельных точках исследуемой области компактного изделия керамического ядерного топлива. Для этого предлагается конечно-разностными формулами заменять производные только по пространственным координатам, что позволит получить обыкновенные дифференциальные уравнения с начальными условиями для определения узловых значений искомых величин.

#### Список литературы

1. Wang Y., Zhou X., Kou M. Peridynamic investigation on thermal fracturing behavior of ceramic nuclear fuel pellets under power cycles. *Ceramics International*. 2018. Vol. 4, issue 10. P. 11512–11542.
2. Saoudi M., Staicu D., Mouris J., Bergeron A., Hamilton H., Naji M., Freis D., Cologna M. Thermal diffusivity and conductivity of thorium-uranium mixed oxides. *Journal of Nuclear Materials*. 2018. Vol. 500. P. 381–388.
3. Zhou W., Liu R., Revankar S. T. Fabrication methods and thermal hydraulics analysis of enhanced thermal conductivity UO<sub>2</sub>-BeO fuel in light water reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 2015. Vol. 81. P. 240–248.
4. Kheradmand Saadi M., Bashiri B. Neutronic and thermal-hydraulic analysis of alternative ceramic fuels in the next-generation of light water reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2016. Vol. 87. P. 89–96.
5. Huang H., Spencer B., Hales J. Discrete element method for simulation of early-life thermal fracturing behavior in ceramic nuclear fuel pellets. *Nuclear Engineering and Design*. 2014. Vol. 278. P. 515–528.
6. Hahn D. W., Özışık M. N. *Heat Conduction*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 718 p.
7. Yener Y., Kakac S. *Heat Conduction*. New York – Abingdon: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. 455 p.
8. Jiji L. M. *Heat Conduction*. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 431 p.
9. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. *Теплообмен в ядерных энергетических установках* / ред. Б. С. Петухов. Москва: Атомиздат, 1974. 408 с.
10. Чиркин В. С. *Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник*. Москва: Атомиздат, 1968. 484 с.

11. Ефимов О. В., Ромашов Ю. В., Есипко Т. А., Чибисов Д. А. Численные методы решения задач теплопроводности для изучения температурного состояния керамического ядерного топлива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 13(1289). С. 33–36.
12. Hoffman J. D., Frankel S. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. New York – Basel: Marcel Dekker Inc., 2001. 823 p.
5. Huang H., Spencer B., Hales J. Discrete element method for simulation of early-life thermal fracturing behavior in ceramic nuclear fuel pellets. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 278, pp. 515–528.
6. Hahn D. W., Özişik M. N. *Heat Conduction*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 718 p.
7. Yener Y., Kakac S. *Heat Conduction*. New York – Abingdon: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. 455 p.
8. Jiji L. M. *Heat Conduction*. Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2009. 431 p.
9. Petukhov B. S., Genin L. G., Kovalev S. A. *Теплообмен в ядерных энергетических установках* [Heat transfer in nuclear power plants] / ed. B. S. Petukhov. Moscow: Atomizdat Publ., 1974. 408 p.
10. Chirkin V.S. *Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник* [Thermophysical properties of nuclear engineering materials: a reference book]. Moscow: Atomizdat Publ., 1968. 484 p.
11. Yefimov A., Romashov Yu., Yesypenko T., Chibisov D. *Numerical methods for heat conductivity problems solving to research the temperature state of ceramic nuclear fuel*. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment, Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 13 (1289), pp 33–36.
12. Hoffman J. D., Frankel S. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. New York–Basel, Marcel Dekker Inc., 2001. 823 p.

#### References (transliterated)

1. Wang Y., Zhou X., Kou M. Peridynamic investigation on thermal fracturing behavior of ceramic nuclear fuel pellets under power cycles. *Ceramics International*, 2018, vol. 4, issue 10, pp. 11512–11542.
2. Saoudi M., Staicu D., Mouris J., Bergeron A., Hamilton H., Naji M., Freis D., Cologna M. Thermal diffusivity and conductivity of thorium- uranium mixed oxides. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 500, pp. 381–388.
3. Zhou W., Liu R., Revankar S. T. Fabrication methods and thermal hydraulics analysis of enhanced thermal conductivity UO<sub>2</sub>–BeO fuel in light water reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 81, pp. 240–248.
4. Kheradmand Saadi M., Bashiri B. Neutronic and thermal-hydraulic analysis of alternative ceramic fuels in the next-generation of light water reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, vol. 87, pp. 89–96.

Поступила (received) 29.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Єфімов Олександр Вячеславович (Ефимов Александр Вячеславович, Yefimov Aleksander Viacheslavovych)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри парогенераторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3300-7447>; e-mail: [avefim@kpi.kharkov.ua](mailto:avefim@kpi.kharkov.ua)

**Ромашов Юрій Володимирович (Ромашов Юрий Владимирович, Romashov Yurii Volodymyrovych)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри парогенераторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8376-3510>; e-mail: [yu.v.romashov@gmail.com](mailto:yu.v.romashov@gmail.com)

**Чибісов Дмитро Олексійович (Чибисов Дмитрий Алексеевич, Chibisov Dmytro Oleksiiovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри парогенераторобудування; м. Харків, Україна; e-mail: [dimachibisov93@gmail.com](mailto:dimachibisov93@gmail.com)