

*Д.В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, А.В. СЕНЬКО*

### ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ТА РУЙНУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТВЕЛІВ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

Стаття містить опис методу та алгоритмів розрахунку двовимірних задач повзучості, яка супроводжується накопиченням прихованої пошкоджуваності, та руйнування, процес якого обумовлено зародженням та поширенням макроскопічного дефекту. В основі методу розв'язання задачі є комбінація методу скінченних елементів та методу прогнозу-корекції третього порядку для інтегрування за часом. В розрахунках застосовується скінченноелементний комплекс FEM Creep та комп'ютерна програма FEM Creepdamagefracture, яка реалізує процес змінювання сіток та граничних умов задачі згідно з перебігом процесу руйнування. Розглянуто модель твєлу ядерного реактору атомних електричних станцій, яка включає паливо та оболонку, виконано моделювання накопичення пошкоджуваності та подальшого руйнування. Чисельними розрахунками встановлено час закінчення прихованого та повного руйнування, для різних моментів часу визначено форму дефекту.

**Ключові слова:** повзучість, пошкоджуваність, руйнування, рівняння стану, ядерний реактор, твєл, метод скінченних елементів.

*Д.В. БРЕСЛАВСКИЙ, А.В. СЕНЬКО*

### ПОВРЕЖДЕННОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТВЭЛОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Статья содержит описание метода и алгоритмов расчета двумерных задач ползучести, сопровождающейся накоплением скрытой поврежденности, и разрушения, процесс которого обусловлен зарождением и распространением макроскопического дефекта. Основой метода решения задачи является комбинация метода конечных элементов и метода прогноза-коррекции третьего порядка для интегрирования по времени. В расчетах применяются конечноэлементный комплекс FEM Creep и компьютерная программа FEM Creepdamagefracture, реализующая процесс изменения сеток и граничных условий задачи согласованно с течением процесса разрушения. Рассмотрена модель твэла ядерного реактора атомных электростанций, включающая топливо и оболочку, выполнено моделирование накопления поврежденности и дальнейшего разрушения. Численными расчетами установлено время окончания скрытого и полного разрушения, для различных моментов определена форма дефекта.

**Ключевые слова:** ползучесть, повреждаемость, разрушение, уравнения состояния, ядерный реактор, твэл, метод конечных элементов.

*D. V. BRESLAVSKY, A. V. SENKO*

### DAMAGE AND FRACTURE OF FUEL RODS OF NUCLEAR REACTORS

The paper contains the description of method and calculation algorithms for two-dimensional problems of creep-damage and fracture caused by development the macroscopic defect. The method of problem solution is based on combination of Finite Element and time integration third order predictor-corrector methods. The finite element software FEM creep and computer code FEM Creep damage fracture for modification of grids and boundary conditions, which are gone with fracture process behavior, are used in calculations. The resulting system of differential equations, which includes right part caused by traction and additional forces caused by creep strains, is presented. The plane triangular finite element is used in numerical analysis. The model of fuel rod cross section was regarded. It includes uranium fuel and metal cladding. The constitutive equations for fuel were built by use of Norton and Kachanov-Rabotnov laws for cases of varying temperatures. The constants which are included in creep-damage constitutive equations for fuel were processed by use of experimental curves at different temperatures. The comparison between experimental and calculated data is presented. The fracture algorithm was built by use the idea of grid modification due to exception of 'failed' elements. The calculations with modified grids and, if necessary, the boundary conditions, are continued until the moment of achieving the critical dimensions of macroscopic defect. The numerical simulation of creep-damage process and macroscopic defect's growth was carried out and damage distribution in fuel rod's cross section as well its current geometry were determined by way of finite elements exclusion.

**Key words:** creep, damage, fracture, constitutive equations, nuclear reactor, fuel rod, finite element method.

**Вступ.** Питанням забезпечення надійної довготривалої роботи тепловиділяючих елементів (твєлів) атомних електростанцій приділяється велика увага [1, 2]. Одним з найбільш небезпечних випадків втрати працездатності твєлу є руйнування його оболонки, яке може відбуватись спільно з виникненням макродефектів (тріщин) у ядерному паливі. Для різних умов та конструктивних особливостей попереднє руйнування може відбуватись як в оболонці, так й у паливі [2-4], при цьому тріщина, що виникла, обумовлює швидку

втрату працездатності в обох елементах.

При оцінюванні ймовірного остаточного ресурсу твєлу та при проектуванні нових є необхідним проведення розрахунків міцності. На попередніх етапах розвитку методів моделювання напружено-деформованого стану вони проводились у спрощеній, аналітичній постановці з застосуванням стрижневих чи аналітичних моделей [5], але на теперішній час суворе математичне формулювання задачі та вимоги до точного опису геометрії та крайових умов потребує викорис-

тання чисельних методів, насамперед методу скінчених елементів (МСЕ) [6]. Його застосування дозволяє розв'язувати фізично нелінійні задачі, в яких враховуються деформації пластичності, повзучості, накопичення прихованих пошкоджень тощо за достатньо складними рівняннями стану [7], які, до того ж, є можливість формулювати їх для різних матеріалів, з яких складається конструктивний елемент [6].

Як відомо [8], завершення накопичення прихованих пошкоджень, наприклад внаслідок повзучості матеріалу, призводять до виникнення макроскопічних дефектів (тріщин). В останній час розроблено необхідні алгоритми та отримано можливість моделювання умов зародження тріщин чи аналізу їхньої еволюції у часі за допомогою МСЕ. Відмітимо метод, що у GYFM (механіці руйнування, побудованій для пластичних та в'язкопластичних середовищ) визначає швидкість звільнення енергії за допомогою J та C інтегралів для задач теорії пластичності та повзучості відповідно [9]. Альтернативним, більш адекватним підходом є застосування МСЕ для наскрізного опису процесу – від прихованого руйнування за допомогою використання континуальної механіки пошкоджуваності [8] до виникнення, розповсюдження макродефекту до розділення конструкції на частини. В задачах теорії повзучості останній підхід був запропонований у роботах Дж. Вебстера і К. Нікбіна [10], Дж. Хейхерста зі співавторами [11] та інших. Огляд робіт, виконаних за цим напрямом в останні роки, міститься у роботі [12].

В цій роботі запропоновано оновлений підхід до моделювання взаємно пов'язаних процесів накопичення пошкоджень та зростання макродефектів, який завдяки перебудові матриці жорсткості конструкції враховує зміну її жорсткості при виключенні з моделі «зруйнованих» елементів. Така ж методологія та створене скінченноелементне програмне забезпечення використовуються й у даній роботі для моделювання процесів накопичення пошкоджуваності та руйнування циліндричних твєлів ядерних реакторів АЕС.

**Метод та алгоритм розрахунку.** Процедуру розрахунку побудовано на базі використання двох основних методів, які у сукупності надають можливість розв'язання початково-крайових задач теорії повзучості: для крайових на кожному кроці за часом використовується МСЕ, початкові інтегруються різницевою методом прогнозу-корекції.

В статті розглянемо двовимірні задачі теорії повзучості. Завдяки тому, що розглядається процеси деформування та руйнування металевих елементів конструкцій, перебіг яких характеризуються малими деформаціями, використаємо підхід Лагранжу. Скінченноелементне формулювання задачі розрахунку повзучості з урахуванням накопичення пошкоджуваності при циклічному навантаженні отримуємо у наступному вигляді [6, 13]:

$$[K]\{\dot{U}\} = \{\dot{F}\} + \{\dot{F}^c\}; \quad (1)$$

$$\{\dot{F}\} = \sum_{N_\beta} \int_{S_3^e} [N^p]^T \{\dot{p}\} dS \Big|_{t=0} + \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [N^p]^T \{\dot{P}\} dV \Big|_{t=0};$$

$$\{\dot{F}^c\} = \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [\bar{B}]^T \cdot [C] \cdot \{\dot{\epsilon}\} dV;$$

$$\{\dot{\epsilon}\} = \frac{3}{2} B \frac{\sigma_i^{n-1}}{(1-\omega)^k} \exp\left(-\frac{Q_c}{T}\right) [\hat{C}]\{\sigma\}; \quad Q_c = \frac{U_c}{R}; \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = D \frac{\sigma_e^m}{(1-\omega)^k} \exp\left(-\frac{Q_d}{T}\right); \quad Q_d = \frac{U_d}{R};$$

$$\omega(0) = \omega_0; \quad \omega(t_*) = \omega_* \quad (3)$$

Тут  $K$  – матриця жорсткості;  $u$  – глобальний вектор вузлових переміщень;  $F$  – вектор вузлових навантажень, обумовлених поверхневими й об'ємними силами;  $F^c$  – вузлові навантаження, обумовлені деформаціями повзучості;  $\bar{B}$  – матриця деформування;  $C$  – матриця пружних констант;  $N$  – матриця форм;  $p$  і  $P$  – поверхневі й об'ємні навантаження відповідно;  $c$  – незворотні деформації повзучості;  $\beta$  – номер скінченого елемента;  $V_\beta$  – об'єм скінченого елемента;  $\sum_{N_\beta}$  – підсумовування за всіма скінченими елементами;  $S$  – площа поверхні скінченого елемента, який знаходиться під дією розподіленого навантаження;

Як рівняння стану, до векторно-матричного формулювання задачі включено рівняння теорії повзучості інкрементального типу з конкретизацією зв'язку між швидкістю інтенсивності деформацій повзучості та інтенсивність напружень  $\sigma_i$  за законом Бейлі-Нортон [8].  $\omega$  – скалярний параметр пошкоджуваності, що визначається за кінетичним рівнянням Работнова-Качанова [8], до якого входить еквівалентне напруження  $\sigma_e$ ,  $t_*$  – час до завершення прихованого руйнування,  $\omega_*$  – критичне значення параметру пошкоджуваності. Рівняння стану (2) та (3) містять множник, що враховує залежність швидкості деформацій повзучості від температури. Тут  $T$  – температура,  $U_c$  та  $U_d$  – значення енергій активації повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості відповідно,  $R$  – константа Больцмана [8].

Покрокове розв'язання системи (1)-(3) надає можливість визначення на кожному часовому інтервалі компонентів напружено-деформованого стану та параметру пошкоджуваності в кожному вузлі чи елементі скінченноелементної моделі. За розвитком процесу повзучості, що супроводжується пошкоджуваністю, у певній точці конструктивного елемента у момент часу  $t_*$  відбувається зародження макроскопічного дефекту, що у багатьох випадках є зародком тріщини [9].

Далі для пояснення отриманих чисельних результатів стисло наведемо опис методу скінченноелементного моделювання процесу руйнування при повзучості. Виникнення макродефекту у певній точці конструктивного елемента в загальній логіці скінченноелементного моделювання означає виключення з розрахункової моделі відповідного скінченного елемента. При цьому геометрія саме моделі, а у багатьох випадках й крайових умов, змінюється. Це означає зміну її жорсткості, яка враховується отриманням нової матриці жорсткості конструкції, в якій виключено «зруйновані» елементи (тобто ті, в яких на поточний момент досягнуто критичне значення параметру пошкоджуваності  $\omega_*$ ). У багатьох випадках нова

геометрія моделі характеризується присутністю концентратора напружень. Це призводить до необхідності планування заздалегідь відповідної кількості скінченних елементів у місцях, де передбачаються руйнування, чи навіть до перебудови сітки.

Після отримання нової скінченноелементної моделі з проведеною перенумерацією вузлів та елементів, що в ній залишилися, проводяться операції перезапису до відповідних елементів набутих на той момент значень компонентів напружено-деформованого стану та параметрів пошкоджуваності. Розрахунок продовжується далі, до чергового випадку досягнення критичного значення параметру пошкоджуваності в інших елементах. Після цього повторюється алгоритм перебудови сітки та перезапису, що описаний вище. Повний опис методу наведено у роботі [12].

### Чисельне моделювання руйнування твела.

Розглянемо результати чисельного моделювання модельної задачі повзучості та руйнування циліндричного твела. Задачу розв'язуємо за схемою плоскої деформації, будемо скінченноелементну модель перерізу твела (рис. 1). Твел складається з уранового палива 1, яке знаходиться у металевій оболонці 2. Розглянемо постійне поверхнєве навантаження  $p = 25$  МПа за частиною поверхні оболонки.

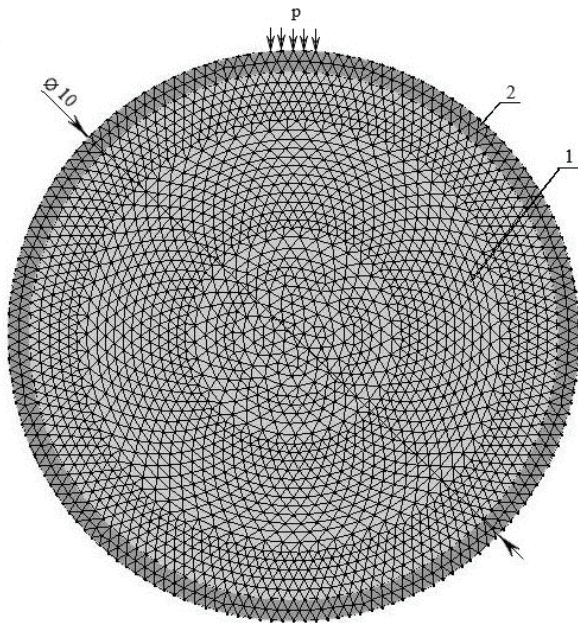


Рисунок 1 – Модель перерізу твела зі скінченноелементною сіткою

Для розрахунків повзучості матеріалів, з яких складається твел, та пов'язаного з нею руйнування конкретизуємо його матеріальний склад. Прийmemo, що оболонку твела виготовлено зі сплаву IN100. Дані щодо констант до законів повзучості та пошкоджуваності цього матеріалу наведено у [8]. Після приведення до форми рівнянь (2)-(3) для  $T = 1273$  К вони мають наступний вигляд:  $B = 3,43 \cdot 10^{-29}$  (МПа) $^{-n}$ /год;  $n = 9,7$ ;  $D = 7,5 \cdot 10^{-15}$  (МПа) $^{-m}$ /год;  $m = 5,2$ ;  $k = 15$ ;  $Q_d = Q_c = 0$ .

З використанням даних робіт [2-4] щодо кривих

деформування урану на етапі усталеної повзучості та кривих повзучості, отриманих до моменту руйнування, визначено значення констант, що входять до рівнянь стану (2)-(3). Наприклад, при температурі 623 К вони дорівнюють:  $B = 1,25 \cdot 10^{-7}$  (МПа) $^{-n}$ /час;  $n = 3$ ;  $k = 3$ ;  $Q_c = 5114$  К;  $D = 3,125 \cdot 10^{-7}$  (МПа) $^{-m}$ /час;  $m = 3$ ;  $Q_d = 4083$  К.

Отримані значення констант було використано для перевірки правильності опису повзучості з пошкоджуваністю (всі ділянки повзучості) та повзучості на усталеній (другій) ділянці при різних температурах. Рис. 2 а, б містить деякі криві, що побудовані за результатами дослідження достовірності моделювання перебігу у часі кривих повзучості. Точками позначено експериментальні дані робіт [2, 3]. На рис. 2, а наведено дані для усталеної ділянки повзучості. Тут крива 1 відповідає деформуванню при  $T = 1273$  К з напруженням 12 МПа, крива 2 – 10 МПа, крива 3 – 8 МПа при  $T = 1773$  К. На рис. 2, б крива 1 є кривою до руйнування з напруженням 50 МПа, криву 2 побудовано для значення 30 МПа. Температура 623 К.

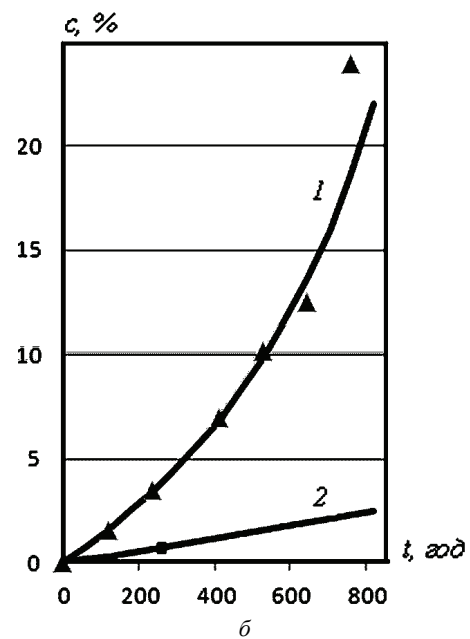
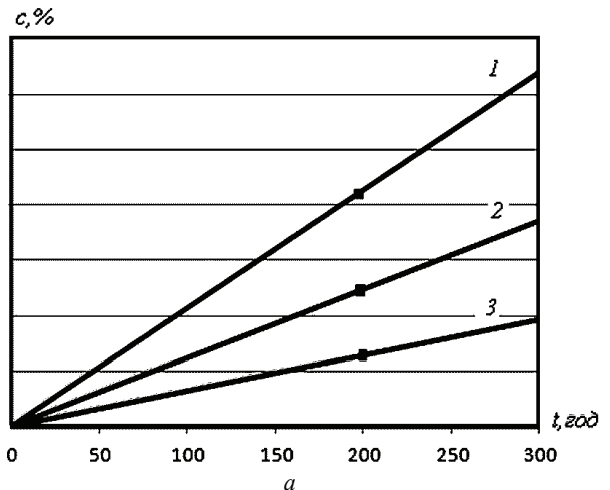


Рисунок 2 – Криві повзучості уранового палива



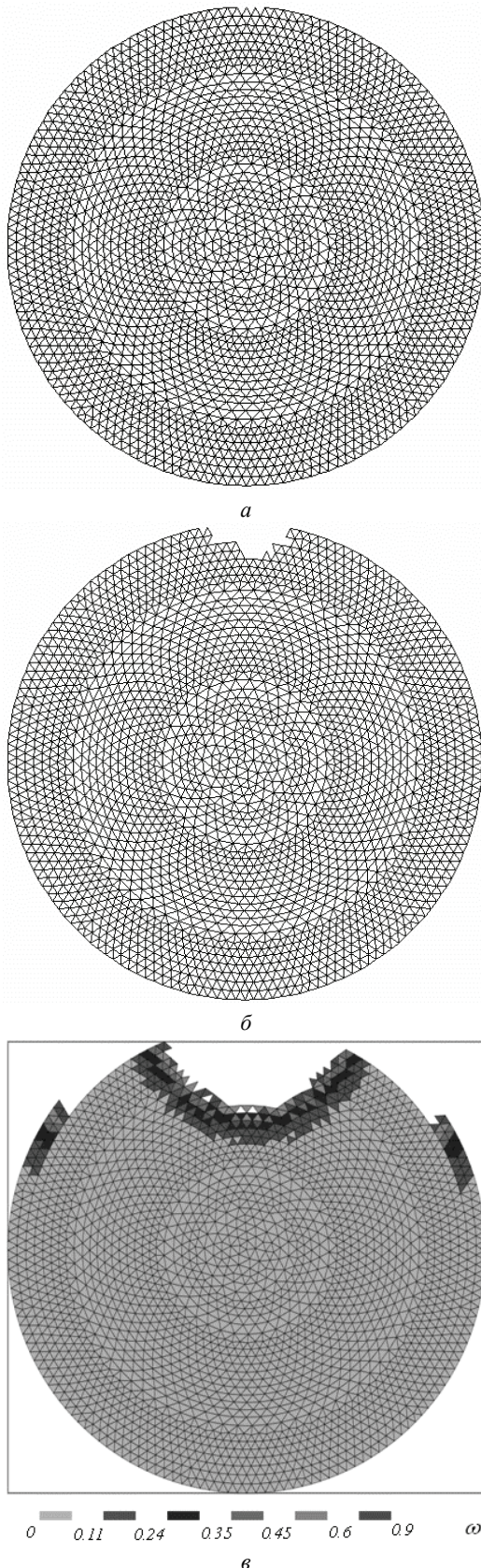


Рисунок 3 – Зміювання у часі форми перерізу твелу при руйнуванні: *a* –  $t = 400$  год; *b* –  $t = 419$  год; *v* –  $t = 420$  год

Далі отримані та перевірені рівняння повзучості з пошкоджуваністю застосуюемо для чисельного моделювання. В розрахунках застосовано декілька моделей

– з двома та чотирма шарами скінченних елементів при моделюванні металеві оболонки. Досліджено збіжність результатів, встановлено відмінності у значеннях часу переходу на нові форми макродефекту, що відрізняються не більш, ніж на 15 %. При більшому числі елементів кут, що утворює макродефект, є незначно меншим. Розглянемо розрахункові дані, для наявності зображення на рисунках застосуюемо відображення з сіткою з двома шарами. Перевірю процесу навантаження призводить до розвитку пошкоджуваності внаслідок повзучості. При  $t = 390$  год відбувається зародження макродефекту, що зростає з часом. У момент 421 год спостерігається прискорене руйнування. Процес руйнування ілюструється чисельними результатами, які представлені на рис. 3, *a-v* формами зруйнованого перерізу для різних моментів часу. «Зруйновані» елементи виключено зі скінченноелементної моделі. Рис. 3, *v* також містить розподіл параметру пошкоджуваності у момент 420 год, з якого видно істотну локалізацію пошкоджуваності в околі макродефекту.

Як видно з рис. 3, розроблений метод чисельного моделювання процесів повзучості, що супроводжується пошкоджуваністю, та пов'язаного з ними руйнування якісно вірно відображає картини розвитку макродефектів у твелах, які описано у роботах [2-3].

**Висновки.** В статті надано опис методу математичного моделювання процесу розвитку макродефектів при руйнуванні твелів, які містять паливо для ядерних реакторів атомних електростанцій. Руйнування відбувається внаслідок попереднього тривалого деформування в умовах високотемпературної повзучості, що супроводжується прихованою пошкоджуваністю, як палива, так й оболонки твелу. На прикладі модельної задачі про руйнування перерізу твелу з урановим паливом продемонстровано можливість моделювання процесів в елементах конструкцій, виготовлених з різних матеріалів. Показано, як завдяки застосуванню методу скінченних елементів (МСЕ) та розроблених алгоритмів змінювання сітки на кожному кроці за часом створюється можливість відстеження поточної геометрії перерізу, що деформується та руйнується одночасно.

#### Список літератури

1. Неклюдов И.М. Состояние и проблемы материалов атомных реакторов Украины. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (81). 2002. С. 3-10.
2. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 408 с.
3. Brucklacher D., Dienst W. Creep behavior of ceramic nuclear fuels under neutron irradiation. Journal of nuclear materials. 1972. № 42. P. 285-296.
4. Lee Van Duyn Evaluation of the mechanical behavior of a metal-matrix dispersion fuel for plutonium burning. Ph.D Theses, Georgia Institute of Technology November 2003. 135 p.
5. Лухачев Ю.И., Пупко В.Я., Попов В.В. Методы расчета на прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 88 с.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Wood D.D. The Finite

Element Method for Solid and Structural Mechanics. Butterworth-Heinemann. 2014.

7. *Chaboche J.L.* A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive equations. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1642-1693.

8. *Lemaitre J., Chaboche J.-L.* Mechanics of solid materials. Cambridge: University press, 1994. 556 p.

9. *Penny R.K., Marriott D.L.* Design for creep. London: Chapman and Hall, 1995. 430 p.

10. *Webster G.A., Nikbin K.M.* History of Loading Effects on Creep Crack Growth in 1/2% Cr, 1/2% Mo, 1/4% V Steel. Creep in Structures», 3rd Symposium, Leicester, UK, September 8-12. 1980. P. 576-591.

11. *Hayhurst D.R., Horrison C.J., Brown P.R.* Creep Crack Growth. Creep in Structures», 3rd Symposium, Leicester, UK, September 8-12. 1980. P. 564-575.

12. *Breslavsky D., Kozlyuk A., Tatarinova O.* Numerical simulation of two-dimensional problems of creep crack growth with material damage consideration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied mechanics*. 2018. Vol. 7 (92). P.27-33.

13. *Бреславський Д.В., Коритко Ю.М., Татарінова О.А.* Проектування та розробка скінченноелементного програмного забезпечення. Харків: Підручник НТУ «ХПІ», 2017. 232 с.

#### References (transliterated)

1. *Nekljudov I.M.* Sostojanie i problemy materialov atomnyh reaktorov Ukrainy. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science (81). 2002. P. 3-10.

2. *Ma B.M.* Materialy jadernyh jenergeticheskikh ustanovok. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 408 p.

3. *Brucklacher D., Dienst W.* Creep behavior of ceramic

nuclear fuels under neutron irradiation. *Journal of nuclear materials*. 1972. № 42. P. 285-296.

4. *Lee Van Duyn* Evaluation of the mechanical behavior of a metal-matrix dispersion fuel for plutonium burning. Ph.D Theses, Georgia Institute of Technology November 2003. 135 p.

5. *Lihachev Ju.I., Pupko V.Ja., Popov V.V.* Metody rascheta na prochnost' teplovydeljajushhih elementov jadernyh reaktorov. Moscow: Energoatomizdat, 1982. 88 p.

6. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Wood D.D.* The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. Butterworth-Heinemann. 2014.

7. *Chaboche J.L.* A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive equations. *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. P. 1642-1693.

8. *Lemaitre J., Chaboche J.L.* Mechanics of solid materials. Cambridge: University press, 1994. 556 p.

9. *Penny R.K., Marriott D.L.* Design for creep. London: Chapman and Hall, 1995. 430 p.

10. *Webster G.A., Nikbin K.M.* History of Loading Effects on Creep Crack Growth in 1/2% Cr, 1/2% Mo, 1/4 % V Steel. Creep in Structures. 3rd Symposium. Leicester, UK, September 8-12, 1980. P. 576-591.

11. *Hayhurst D.R., Horrison C.J., Brown P.R.* Creep Crack Growth. Creep in Structures. 3rd Symposium. Leicester, UK, September 8-12, 1980. P. 564-575.

12. *Breslavsky D., Kozlyuk A., Tatarinova A.* Numerical simulation of two-dimensional problems of creep crack growth with material damage consideration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied mechanics*. 2018. Vol. 7 (92). P. 27-33.

13. *Breslavsky D.V., Korytko Yu.M., Tatarinova O.A.* Proektuvannya ta rozrobka skinchennoelementnogo programnogo zabezpechennya. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. 232 p.

*Надійшла (received) 01.11.2019*

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

**Бреславський Дмитро Васильович (Бреславский Дмитрий Васильевич, Breslavsky Dmytro Vasylovych)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

**Сенько Альона Володимирівна (Сенько Алена Владимировна, Senko Alyona Volodymyrivna)** – аспірантка. НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: alyonassenko@gmail.com