

«ХП»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

Пащенко Сергій Олександрович (Пащенко Сергей Александрович, Pashchenko Serhii Oleksandrovych) – аспірант, НТУ «ХП»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: sergeypaschenkospu@gmail.com.

Успенський Валерій Борисович (Успенский Валерий Борисович, Uspensky Valerii Borysovich) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ «ХП»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: uspensky61@gmail.com.

УДК 539.3

DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.33.151220>

Д.В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, С.О. ПАЩЕНКО

ПОВЗУЧИСТЬ ТРИЙНИКОВОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ СПІЛЬНІЙ ДІЇ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВИХ ТА РАДІАЦІЙНИХ ПОЛІВ

У статті надано математичну постановку трьохвимірної задачі повзучості, що відбувається при дії температурно-силових та радіаційних полів. Для розв'язання задачі прийнято метод скінченних елементів, що використовується спільно з різницевою методом інтегрування за часом. Для чисельного аналізу застосовано розроблений програмний комплекс, що використовує восьмивузловий об'ємний скінченний елемент. Досліджено вплив повзучості та радіаційного розпухання на напружено-деформований стан фрагменту системи охолодження ядерного реактору. Встановлено, що отримані розв'язки для задач температурно-силової повзучості та радіаційного розпухання у районі стику труб є принципово відмінними від результатів комплексного розв'язку. Розрахунками виявлено, що вплив радіаційного розпухання істотно уповільнює релаксацію напружень при повзучості та підвищує їхній рівень у місці стику труб.

Ключові слова: повзучість, температура, радіаційне розпухання, рівняння стану, ядерний реактор, трійникове з'єднання трубопроводу, метод скінченних елементів.

Д.В. БРЕСЛАВСКИЙ, С.О. ПАЩЕНКО

ПОЛЗУЧЕСТЬ ТРОЙНИКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

В статье представлена математическая постановка трехмерной задачи ползучести, происходящей под действием температурно-силовых и радиационных полей. Для решения задачи принят метод конечных элементов, используемый совместно с разностным методом интегрирования по времени. Для численного анализа применен разработанный программный комплекс, использующий восьмиузловой объемный конечный элемент. Исследовано влияние ползучести и радиационного распухания на напряженно-деформированное состояние фрагмента системы охлаждения ядерного реактора. Установлено, что полученные решения для задач температурно-силовой ползучести и радиационного распухания в районе стыка труб принципиально отличаются от результатов комплексного решения. Расчетами установлено, что влияние радиационного распухания существенно замедляет релаксацию напряжений при ползучести и повышает их уровень в месте стыка труб.

Ключевые слова: ползучесть, температура, радиационное распухание, уравнение состояния, ядерный реактор, тройниковое соединение трубопровода, метод конечных элементов.

D.V. BRESLAVSKY, S.O. PASHCHENKO

CREEP OF T-JOINT OF PIPELINE UNDER JOINT ACTION OF TEMPERATURE-FORCE AND RADIATION FIELDS

The mathematical statement of three-dimensional problem of creep, which is running under the action of temperature, force and radiation fields, is presented in a paper. The total strain is considered as a sum of elastic, temperature, creep and swelling parts. The non-homogeneous temperature fields are considered for determining the strain distribution as well as for obtaining the value of the neutron fluence function. The case of long term deformation under the creep with isotropic properties was analyzed by use of Norton law. The Finite Element Method, which is used jointly with finite differences method for time integration, was accepted for the problem's solution. The volume finite element with eight nodes is used in numerical analysis. The approach uses the algorithm of parallel computing for the system of linear algebraic equations, which is solved by Choletski method. The program complex in C++ programming language was developed in order to realize the method and algorithms. It has been applied for numerical analysis. The influence of creep and radiation swelling on the stress-strain state of the cooling system fragment from nuclear reactor was investigated. The von Mises stress distributions are presented for different cases of nonlinearities both for tube's volume and for the place of stress concentration.

© Д.В. Бреславський, С.О. Пащенко, 2018

It was established that obtained solutions for the separate problems of creep under irregular temperature field and inner pressure as well as for problem of radiation swelling significantly differ from the solution of complex problem with consideration of both effects. It was found by numerical simulation that influence of radiation swelling significantly decreases the stress relaxation in creep conditions and increases the stress level in the place of tubes joint.

Key words: creep, temperature, radiation swelling, constitutive equations, nuclear reactor, t-joint of pipeline, finite element method.

Вступ. Застосування ядерних реакторів (ЯР) для отримання електричної енергії на борту космічного апарату у порівнянні з класичним підходами, що базуються на використанні сонячних панелей, має ряд переваг. По-перше, використання такого типу енергії надає можливість забезпечити автономність космічного апарату, що дозволяє йому ефективно функціонувати на віддалених орбітах, де інтенсивність сонячного потоку є незначною. По-друге, запасу ядерного палива вистачає на десятки років, а отже, стає можливим здійснення місій до віддаленого космосу [1, 2]. Найбільший недолік застосування ЯР у космічному просторі полягає у складності відведення теплової енергії, що утворилася внаслідок розпаду ядерного палива, та складності експлуатації установок такого типу. У зв'язку з тим, що теплообмін у космічному вакуумі відбувається, переважно, за рахунок променевого випромінювання [2], який є набагато менш ефективним у порівнянні з конвективним на один ват за одиницю часу, виникає гостра проблема розробки ефективної системи охолодження. На додаток, деградація матеріалу, що супроводжується опромінюванням за рахунок ядерного розпаду палива та дією сонячних та галактичних променів, характеризується процесами розпухання, що призводить до зміни розмірів виготовлених з них конструктивних елементів [3]. Комплексна дія температурно-силових та радіаційних полів призводить до виникнення процесів повзучості та розпухання, що значним чином скорочують строк експлуатації [4-5]. Дослідження та аналіз деформацій внаслідок повзучості та радіаційного разом з релаксацією напружень дозволяє провести оцінку режимів роботи ЯР та розробити рекомендації щодо покращення умов експлуатації та збільшення терміну довговічності.

Стаття містить математичну постановку задачі повзучості, що відбувається при дії температурно-силових та радіаційних полів. За допомогою розробленого авторами програмного комплексу [6] виконано розрахунки напружено-деформованого стану при повзучості трійникового з'єднання труб системи охолодження ЯР. Проаналізовано вплив температурних деформацій, внутрішнього тиску та радіаційного розпухання матеріалу ЯР на напружено-деформований стан з'єднання за період експлуатації.

Математична постановка задачі

Для опису процесів теплової повзучості та радіаційного розпухання, що мають місце у космічному просторі, задачу повзучості розглянуто у трьохвимірній постановці. Повна система рівнянь містить рівняння рівноваги, геометричні та фізичні співвідношення:

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dx_j} = \bar{X}_i, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\bar{\varphi}), \quad (1)$$

де $\bar{\varphi}$ – вектор переміщення; σ_{ij} – компоненти тензору напружень; \bar{X}_i – вектор об'ємних навантажень.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - e^{Creep}_{kl} - e^{Temp}_{kl} - e^{Swell}_{kl}),$$

де для компонентів тензорів введено позначення: ε_{ij} – повних деформацій; D_{ij} – пружних констант; e^{Creep}_{kl} – деформації повзучості; e^{Temp}_{kl} – температурної деформації; e^{Swell}_{kl} – деформації розпухання. Індексация $i, j = 1, 2, 3$ відповідає просторовим координатам x, y, z .

Тензор температурних деформацій описує залежність виникнення деформацій від температурного градієнту та має вигляд:

$$e^{Temp}_{ij} = \alpha_{Expn} \cdot \Delta T \cdot \delta_{ij}, \quad (3)$$

де α_{Expn} – коефіцієнт температурного розширення, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; ΔT – температурний градієнт, $^{\circ}\text{C}$; δ_{ij} – символ Кронекера. При $i = j$ символ приймає значення одиниці, при $i \neq j$ – нулю.

Тензор деформацій радіаційного розпухання описує залежність виникнення деформацій в залежності від таких чинників, як інтегральний потік заряджених часток, температура та час. Інтегральний потік визначається взаємодією заряджених часток з мікроструктурою матеріалу, що опромінюється, і залежить від ряду факторів: енергії заряджених часток, спектральної густини, густини потоку тощо. Функціональна залежність компонентів тензору швидкості деформації розпухання від швидкості функції інтегрального потоку має вигляд [5]:

$$\dot{e}^{Swell}_{ij} = \frac{1}{3} \dot{S}(\Phi, t, T) \cdot \delta_{ij}, \quad (4)$$

де \dot{S} – швидкість інтегрального потоку.

Для опису процесів повзучості застосовано рівняння стану за гіпотезою течіння Нортгона:

$$\dot{e}^{Creep}_{ij} = \frac{3}{2} \cdot B \sigma_i^{n-1} S_{ij}, \quad (5)$$

де B, n – константи, що визначаються експериментальним шляхом.

Вважається, що на деякій поверхні S_1 мають місце крайові умови Дирихле у вигляді заданого переміщення, що є функцією часу. На поверхні S_2 мають місце крайові умови Неймана, які описують дію розподілених сил:

$$\bar{\varphi}|_{S_1} = \bar{\varphi}_0; \quad \sigma_{ij} n_j |_{S_2} = h_j. \quad (6)$$

В початковий момент часу значення деформацій повзучості та деформації розпухання мають нульові значення.

$$e^{Creep}_{ij}(0) = 0; \quad e^{Swell}_{ij}(0) = 0. \quad (7)$$

Для задачі термпружності, яка розв'язується для моменту часу $t = 0$, має місце стаціонарний, нерівномірний за координатами розподіл температурного поля:

$$T(x, y, z) = \psi(x, y, z) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

Розв'язання задачі. Розглянемо елемент системи охолодження, що представляє собою ортогонально з'єднані дві товстостінні труби з внутрішнім радіусом $R_1 = 100$ мм, зовнішнім радіусом $R_2 = 200$ мм, довжиною опорної труби – $L = 350$ мм, висотою втулки – $H = 250$ мм. Фізико-механічні характеристики матеріалу трійникового з'єднання: модуль пружності $E = 1,55 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона – $\nu = 0,3$. Константи повзучості для рівняння стану (5) мають значення [5]: $B = 3,6 \cdot 10^{-19,9}$ МПа $^{-n} \cdot \text{год}^{-1}$; $n = 4,9$.

Вважається, що з'єднання труб рівномірно навантажене внутрішнім тиском $p_{in} = 70$ МПа, а температурне поле має усталений характер та представляє собою логарифмічний розподіл за радіальним напрямком опорної труби та втулки, де на зовнішньому та внутрішньому радіусах мають місце крайові умови Дирихле у вигляді заданої температури, що складає $T(R_2) = 740$ °К та $T(R_1) = 752$ °К відповідно. Швидкість функції інтегрального потоку представляється у вигляді наступної залежності [5]:

$$\dot{S}(t) = A_s \cdot \beta_s \cdot \left(\alpha_s \cdot \frac{d\Phi_s}{dt} \right)^{\beta_s} \cdot t^{(\beta_s-1)} \cdot e^{\left(0,0235T - \frac{8,35}{(T-630)} - \frac{1782}{(980-T)} \right)}, \quad (9)$$

де A_s , β_s , α_s – константи, що визначені для вищевказаного матеріалу для заданого діапазону температур: $A_s = 5,33 \cdot 10^{-9}$; $\beta_s = 0,19 + 1,63 \cdot 10^{-3} \cdot T$; $\alpha_s = 2,247 \cdot 10^{-22}$; Φ_s – швидкість нейтронного потоку, що визначає інтенсивність впливу радіаційного опромінювання, де $\dot{\Phi}_s = 15,012 \cdot 10^{22}$ нейтрон/м $^2 \cdot \text{г}$.

Для розв'язання задачі застосовано МСЕ разом з різницевиими методами інтегрування за часом. До розрахунків залучено програмний комплекс, опис якого надано у [6, 8]. Скінченно-елементну модель системи охолодження зображено на рис. 1, а, кількість елементів якої після дослідження на збіжність прийнято рівною 22956. Для розв'язання кінцевої СЛАР задач повзучості та радіаційного розпухання залучено блочний алгоритм Холецького [9].

У зв'язку з тим, що внутрішній тиск є рівномірно розподіленим за внутрішньою поверхнею, доцільно розглянути чверть моделі. Вважається, що на осьових торцях мають місце крайові умови Дирихле у вигляді часткового закріплення. На рис. 1, а зображено скінченно-елементну модель фрагменту системи охолодження, на рис. 1, б – поверхні крайових умов Дирихле, де для вузлів, що потрапляють до зони S_1 , дозволені переміщення вздовж напрямку X та Y , при чому останній відповідає радіальному переміщенню втулки. Для вузлів, що потрапляють до зони S_2 , дозволено переміщення вздовж напрямку Z та X , де останній відповідає радіальному переміщенню опорної труби. Для

вузлів, що потрапляють до зони S_3 , дозволено переміщення вздовж напрямків X та Z , де останній також відповідає за радіальне переміщення втулки. Вузлі, що потрапляють до зони S_4 , знаходяться на з'єднанні двох труб, тому переміщення дозволено за всіма напрямками, окрім Y . Для зони S_5 дозволено переміщення за напрямками X та Y .

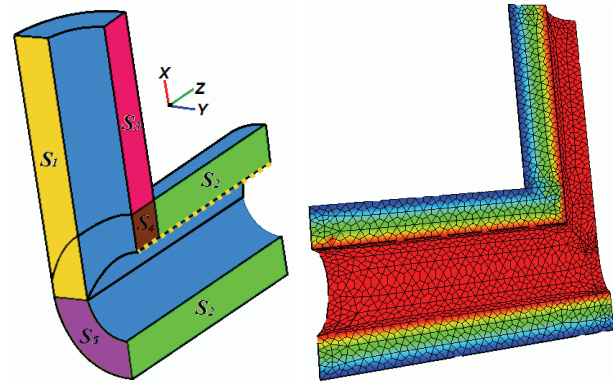


Рисунок 1 – Поверхні крайових умов (а), скінченно-елементна модель з температурним розподілом (б)

Для дослідження і аналізу відокремленого та сумісного впливу факторів повзучості та радіаційного розпухання на розподіл компонентів НДС розв'язано ряд відповідних задач:

1) задача повзучості при чисто механічному навантаженні (поверхні за внутрішнім радіусом опорної труби і втулки навантажені рівномірним тиском 70 МПа);

2) задача повзучості для логарифмічного розподілу температурного поля (зображено на рис. 1, б), що відповідає розв'язку задачі стаціонарної теплопровідності. Перепад температури за радіальним напрямком становить 12 градусів;

3) задача радіаційного розпухання. Закон для швидкості інтегрального потоку має вигляд (9). Прийнято радіальний розподіл температури, аналогічний заданому в задачі 2;

4) задача повзучості при дії внутрішнього тиску, неоднорідного розподілу температур та радіаційного розпухання.

Усі отримані розв'язки для задач теорії повзучості та радіаційного розпухання отримано для моменту часу 10000 годин.

На рис. 2 надано розподіл інтенсивності напружень вздовж внутрішньої частини опорної труби. Тут крива 3 відповідає розв'язку задачі при дії внутрішнього тиску при $t = 0$, крива 4 – розв'язку задачі повзучості з неоднорідним розподілом температури при $t = 10000$ г (незначні величини напружень), крива 5 – розв'язку задачі повзучості при $t = 10000$ г, крива 1 – розв'язку задачі радіаційного розпухання при $t = 10000$ г, крива 2 – сумісному розв'язку задачі 4 при $t = 10000$ г (спільна дія радіаційного розпухання, теплового поля та внутрішнього тиску). В околі стику труб знаходиться концентратор напружень. Криві інтенсивності напружень побудовано вздовж напрямку пунктирної лінії, що зображено на рис. 1, а.

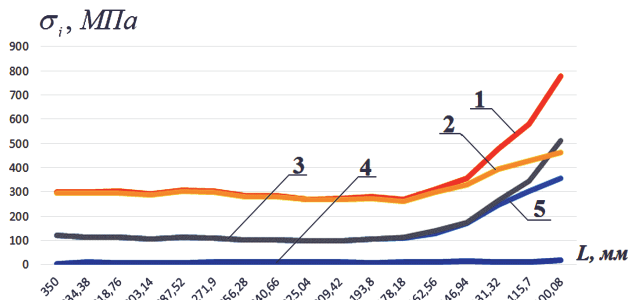


Рисунок 2 – Розподіл інтенсивності напружень вздовж осі труби

На рис. 3 надано залежність максимального значення інтенсивності напружень від часу, де крива 1 – розв’язок задачі повзучості, крива 2 – задачі радіаційного розпухання, крива 3 – комплексний розв’язок задачі повзучості та радіаційного розпухання.

На рис. 4 та 5 представлено карту інтенсивності напружень для розглянутих задач.

Аналіз результатів, наведених на рис. 4 – 5, показує, що має місце неоднорідний розподіл напружень за позовжнім напрямком опорної труби для всіх типів навантажень. Найбільш інтенсивно неоднорідність проявляється для задачі радіаційного розпухання 3 та сумісної задачі 4 – повзучості та радіаційного розпухання. Порівнюючи результати на рис. 5 та 4, б з пружним розв’язком (див. рис. 4, а), можна зробити висновок, що релаксація компонентів НДС за 10000 г є значною.

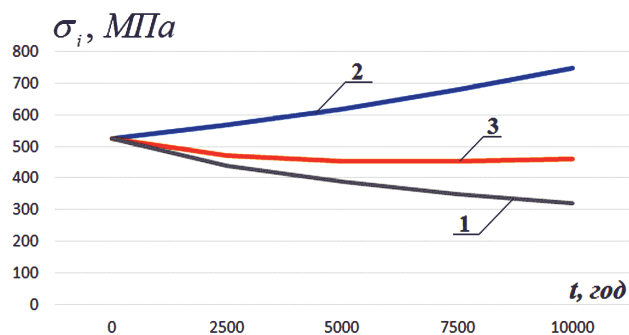


Рисунок 3 – Еволюція інтенсивності напружень у зоні концентратора напружень

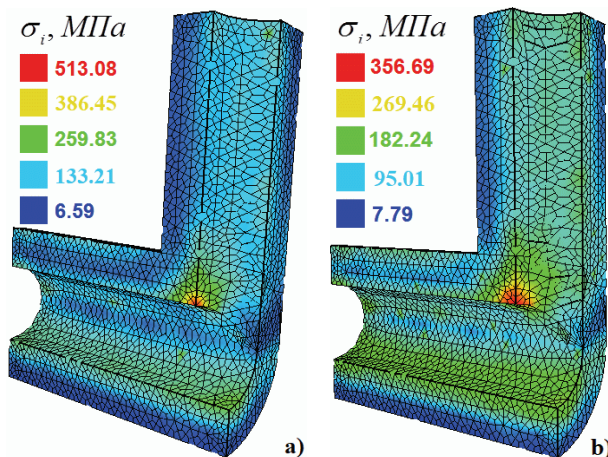


Рисунок 4 – Інтенсивність напружень: пружне деформування при $t=0$ (а), повзучість при $t=10000$ г (б)

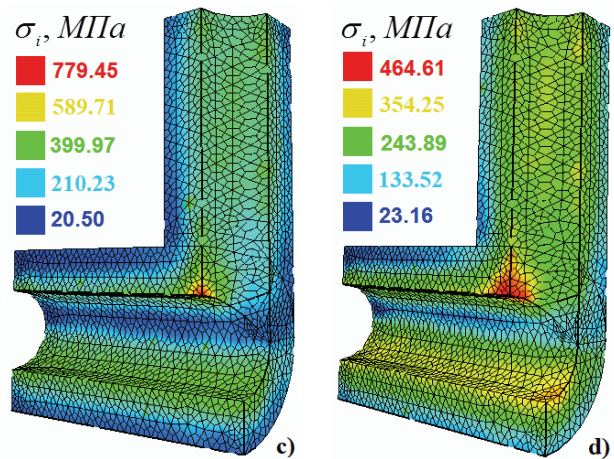


Рисунок 5 – Інтенсивність напружень $t=10000$ г: радіаційне розпухання (а); спільна дія повзучості та розпухання (б)

Варто зазначити, що відмінність розв’язків задач повзучості при дії тільки температурного поля та термопружності у концентраторі напружень не перевищує 0,7 %, а вдалі від концентратора – 0,048 %. У зв’язку з чим на рис. 2 надано тільки розв’язок для задачі повзучості [7]. Зазначимо, що внесок температурних напружень для даного випадку у загальну повзучість з’єднання є незначним.

Для задачі повзучості з’єднання, навантаженого тільки внутрішнім тиском (див. рис. 2, крива 5), релаксація напружень в зоні концентратора є значно більшою у порівнянні з релаксацією цих же компонентів вдалині від нього. На рис. 2 видно, що протягом 10000 годин значення інтенсивності напруження в зоні концентратора зменшилося, приблизно на 200 МПа у порівнянні з пружним розв’язком, в той час, коли для довжини від 350 мм до 165 мм відмінності практично не спостерігається. Цей же результат спостерігається й на рис. 3 (крива 1) Видно, що швидкість релаксації на кінцевий момент розрахунку є дещо меншою у порівнянні з початковим етапом.

Відмітимо, що розподіл компонентів НДС, отриманий шляхом розв’язання задачі за допомогою МСЕ, є близьким до аналітичного розв’язку задачі для товстостінної труби вдалині від концентратора на момент часу.

У порівнянні з результатами розв’язання задачі повзучості, результати, отримані при врахуванні радіаційного розпухання, свідчать, що воно вносить набагато більший внесок у процеси перерозподілу напружень, що призводить до збільшення загального рівня деформацій та може вважатись причиною зменшення довговічності системи охолодження та складових ЯР. Характер зміни інтенсивності напруження в цьому випадку є більш рівномірним за всією моделлю, ніж для задач повзучості. На момент часу кінця розрахунку значення інтенсивності напружень в зоні концентратора та вдалині від нього зросло приблизно, на 300 МПа, що зображено порівнянням кривих 1 та 3 на рис. 2. Характер релаксації тісно пов’язаний зі значенням температури та її градієнтом: для більш стрімких перепадів та високих значень температури інтенсивність радіаційного розпухання може значно зростати.

Співвідношення (9) характеризують найбільш інтенсивну зміну швидкості інтегрального потоку у перші години процесу. Надалі процес переходить до квазіусталеної фази та має практично постійну швидкість. На рис. 6 надано залежність зміни швидкості інтегрального потоку від часу для різних значень температури, що задавались з експлуатаційного інтервалу значень. З рис. 6 видно, що криві практично співпадають. Це говорить про майже ідентичний характер розпухання за всією моделлю. Починаючи з моменту часу приблизно 3000 годин, швидкість інтегрального потоку приймає квазіпостійний характер та мало змінюється за часом. Близькість кривих означає, що характер радіаційного розпухання за всією моделлю є майже ідентичним.

Розподіл інтенсивності напружень, що відповідає комплексному розв'язку задачі повзучості та радіаційного розпухання (крива 2 на рис. 2), характеризується, з одного боку, значною релаксацією у зоні концентратора напружень за рахунок процесів повзучості, а з іншого – значним підвищенням рівня інтенсивності напружень вдалині від концентратора за рахунок процесу радіаційного розпухання. Із порівняння кривих 1 та 2 на рис. 2 видно, що процес повзучості стримує стрімке зростання інтенсивності напружень у зоні концентратора та загалом зменшує її рівень у порівнянні з розв'язками задач теорії пружності та радіаційного розпухання, тобто процес повзучості позитивно впливає на релаксацію компонентів НДС, тим самим зменшуючи потенційно небезпечні рівні напружень у конструкції. Із аналізу кривої 3 на рис. 3 можна зробити висновок, що протягом приблизно 5500 годин, переважно має місце релаксація інтенсивності напружень за рахунок процесу повзучості, після 5500 годин спостерігається поступова компенсація та подальше зростання величини напружень за рахунок радіаційного розпухання.

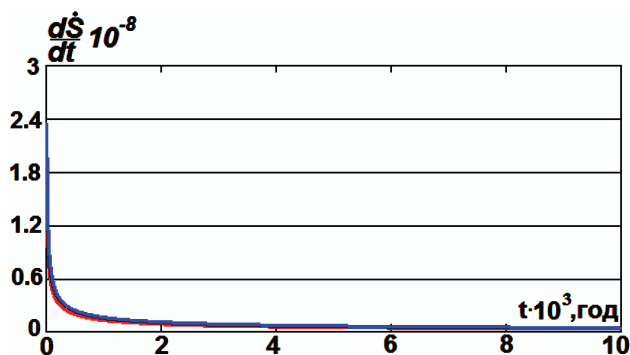


Рисунок 6 – Прискорення інтегрального потоку

Висновки. В статті надано опис прикладу чисельного моделювання процесів повзучості при дії температурно-силових та радіаційних полів у досить розповсюдженому конструктивному елементі – трійниковому з'єднанні труб системи охолодження ЯР. Шляхом аналізу задач з урахуванням тільки одного виду деформування показано їхню роль у загальному процесі. Обговорено результати розв'язання задачі з урахуванням всіх факторів, за яким можливо зробити ви-

сновок щодо існування тісного взаємного впливу процесів повзучості та радіаційного розпухання. Зазначимо, що у розглянутому випадку завдяки різноспрямованим впливам цих факторів спостерігається не таке значне змінювання напружень, ніж при дії кожного фактору окремо. Відомо, що при релаксації напружень у зонах їхньої концентрації з часом відбувається зростання пошкоджуваності. Часто такі процеси є взаємопов'язаними за їхньою швидкістю. Отже, задачі, що розглядаються, у подальшому мають бути доповненими, за умов наявності відповідних експериментальних даних, кінетичними рівняннями для параметру пошкоджуваності. Це дозволить проектувати найбільш безпечні режими роботи трубопроводів ЯР.

Також важливим для практичного використання може бути висновок щодо впливу неоднорідного температурного поля у подібних задачах, в яких враховано вплив деяких факторів. Температурний перепад по стінці труби у даному випадку є незначним та дорівнює 12 °С, тому температурні деформації та напруження не вносять великого внеску до загального напружено-деформованого стану при повзучості. Але перепад температур обумовлює істотне зростання деформацій радіаційного розпухання, яке й може лімітувати термін роботи трубопроводів.

Список літератури

1. Модель космоса: в 2.т. Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических станций / Ред. М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.
2. Санин Ф.П. Космос и технологии / Ф.П. Санин. – М.: Наука, 2003. – 637 с.
3. Frank A. G. Stress and Temperature Dependence of Irradiation Creep of Selected FCC and BCC Steels at Low Swelling / A.G. Frank, T. Mychailo // Journal of ASTM International. – 2004. – Paper ID JA11 1372.
4. Писаренко Г.С. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках / Г.С. Писаренко, В.Н. Киселевский. – К.: Наукова думка, 1979. – 284 с.
5. Бирюков О.В. Длительная прочность элементов касеты насыпного типа для быстрого газохлаждаемого реактора / О.В. Бирюков, А.А. Золочевский, А.Г. Лаврук, О.К. Морачковский, С.М. Школьный // Препринт ХФТИ АН УССР 85-37. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1985. – 39 с.
6. Бреславський Д.В. Програмний засіб для розв'язання трьохвимірних задач теорії повзучості методом скінченних елементів / Д.В. Бреславський, С.О. Пащенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези XXIII міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 травня 2015 р.: у 4 ч. – Ч. 1. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – С. 40.
7. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive equations / J.L. Chaboche // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24. – P. 1642–1693.
8. Бреславський Д.В. Проектування та розробка скінченноелементного програмного забезпечення / Д.В. Бреславський, Ю.М. Коритко, О.А. Татарінова. – Х.: «Підручник НТУ «ХПІ», 2017. – 232 с.
9. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином, 2015. – 636 с.

References (transliterated)

1. Model' kosmosa: v 2.t. T.2: Vozdeystviye kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovaniye kosmicheskikh [Space

model: in 2.v. V.2: The impact of the space environment on materials and equipment of space] Red. M.I. Panasyuk, L.S. Novikov. Moscow: KDU, 2007, 1144 p.

2. Sanin F.P. Kosmos i tekhnologii [Space and technology]. Moscow: Nauka, 2003, 637 p.

3. Frank A. G., Mychailo T. Stress and Temperature Dependence of Irradiation Creep of Selected FCC and BCC Steels at Low Swelling. Journal of ASTM International, 2004, Paper ID JA11 1372.

4. Pisarenko G.S., Kiselevskiy V.N. Prochnost' i plastichnost' materialov v radiatsionnykh potokakh [Strength and plasticity of materials in radiation fluxes]. Kiyev: Naukova dumka, 1979, 284 p.

5. Biryukov O.V., Zolochevskiy A.A., Lavruk A.G., Morachkovskiy O.K., Shkol'nyy S.M. Dlitel'naya prochnost' elementov kassety nasypnogo tipa dlya bystrogo gazokhlazhdayemogo reaktora [Long-term strength of elements of a bulk-type cassette for a fast gas-cooled reactor]. Preprint KHFTI AN USSR 85-37. Moscow: TSNIAtominform, 1985, 39 p.

6. Breslavs'ky D.V., Pashchenko S.O. Prohramnyy zasib dlya rozv'yazannya tr'okhvymirnykh zadach teorii povzuchosti metodom skinchennykh elementiv [Software tool for solving three-dimensional problems of the theory of creep by the finite element method]. Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: tezy XXIII mizhnar. nauk.-prakt. konf., 20-22 travnya 2015 r.: u 4 ch. Part 1. Kharkiv: NTU «KHPI», 2015, p. 40.

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

8. Breslavs'ky D.V., Korytko YU.M., Tatarinova O.A. Proektuvannya ta rozrobka skinchennoelementnoho prohramnoho zabezpechennya [Design and development of finite element software]. Kharkiv: «Pidruchnyk NTU «KHPI», 2017. 232 p.

9. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: Binom, 2015, 636 p.

Надійшла (received) 20.09.2018

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.

Пащенко Сергій Олександрович (Пащенко Сергей Александрович, Pashchenko Serhii Oleksandrovych) – аспірант, НТУ «ХПІ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: sergeypaschenkospu@gmail.com.

УДК 539.3

DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.33.151221>

Д.В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, О.А. ТАТАРИНОВА, Ю.М. КОРИТКО

ПОВЗУЧИТЬ ПАНЕЛЕЙ НАДЗВУКОВИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ПЕРІОДИЧНІЙ ДІЇ ТИСКУ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

Розглянуто незворотне деформування при аеродинамічному нагріванні та періодичній дії тиску повітряного потоку панелі надзвукowego літального апарату. Надано математичну постановку задачі повзучості тонких оболонок обертання, що навантажені нормальним тиском, який має постійну та складову, що періодично змінюється. Використано рівняння стану, що отримуються шляхом застосування асимптотичного розкладання невідомих з подальшим осередненням на періоді змінювання напружень. Наведено приклад чисельного розв'язання задачі деформування нагрітої циліндричної панелі, яка піддана періодичній дії навантаження від поривів повітряного потоку. З застосуванням програмного комплексу для розрахунків повзучості тонких оболонок обертання методом скінченних елементів визначено розподіли компонентів напружено-деформованого стану.

Ключові слова: панель літального апарату, повзучість, повітряний потік, періодичне навантаження, оболонка обертання, метод скінченних елементів.

Д.В. БРЕСЛАВСКИЙ, О.А. ТАТАРИНОВА, Ю.Н. КОРЫТКО

ПОЛЗУЧЕСТЬ ПАНЕЛЕЙ СВЕРХЗВУКОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Рассмотрено необратимое деформирование при аэродинамическом нагреве и периодическом действии давления воздушного потока панели сверхзвукового летательного аппарата. Приведена математическая постановка задачи ползучести тонких оболочек вращения, нагруженных нормальным давлением, имеющим постоянную и периодически изменяющуюся составляющие. Используются уравнения состояния, которые получаются путем применения асимптотического разложения неизвестных с последующим осреднением на периоде изменения напряжений. Приведен пример численного решения задачи деформирования нагретой цилиндрической панели, подверженной периодическому нагружению от порывов воздушного потока. С использованием программного комплекса для расчетов ползучести тонких оболочек вращения методом конечных

© Д.В. Бреславський, О.А. Татарінова, Ю.М. Коритко, 2018