

Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, О. А. ТАТАРИНОВА, К. Ф. ЧЕШКО

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗВАЖЕНИХ ВІДХИЛІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР ТА ДЕФОРМАЦІЙ РАДІАЦІЙНОЇ ПОВЗУЧОСТІ В ПЛАСТИНАХ

Статтю присвячено опису застосування методу зважених відхилів у формі методу Гальоркіна для розв'язання задач нестационарної теплопровідності та радіаційної повзучості у прямокутних пластинах. Розглянуто основні залежності, які застосовано до отримання розв'язків даних задач. Задачу нестационарної теплопровідності зведено до послідовного розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь для коефіцієнтів при розкладенні функції температур у ряд за базисними функціями для різних моментів часу. Для розв'язання задачі радіаційної повзучості попередньо розглядається визначення функції переміщення у задачі згину прямокутної пластини при заданому перепаді температур на її сторонах. Наведено приклади розв'язання у вигляді розподілів температур та деформацій радіаційної повзучості за координатами та у різні моменти часу.

Ключові слова: пластина, температура, нестационарна теплопровідність, радіаційна повзучість, метод зважених відхилів, метод Гальоркіна.

Статья посвящена описанию применения метода взвешенных невязок в форме метода Галеркина для решения задач нестационарной теплопроводности и радиационной ползучести в прямоугольных пластинах. Рассмотрены основные зависимости, использованные для получения решений данных задач. Задача нестационарной теплопроводности сведена к последовательному решению систем линейных алгебраических уравнений для коэффициентов в разложении функции температур в ряд по базисным функциям для различных моментов времени. Для решения задачи радиационной ползучести предварительно рассматривается определение функции перемещения в задаче изгиба прямоугольной пластины при заданном перепаде температур на ее сторонах. Приведены примеры решения в форме распределений температур и деформаций радиационной ползучести в зависимости от координат и в различные моменты времени.

Ключевые слова: пластина, температура, нестационарная теплопроводность, радиационная ползучесть, метод взвешенных невязок, метод Галеркина.

The paper is devoted to the description of the Weighted Residuals Method in Galerkin form for solution of the non-stationary heat transfer and irradiation creep problems in rectangular plates. The basic methods and dependencies were used for the solution of these problems are considered. The non-stationary heat problem is derived to sequential decisions of the systems of linear algebraic equations for the coefficients in expansions of temperature function in series on the basis functions for the different time moments. The problem of rectangular plate's bending with specified temperature drops in its sides is preliminary solved in order to obtain the solution of irradiation creep problem. The stress tensor components were found in the plate's points, are used in associated flow rule for the obtaining the components of creep irradiation strain tensor. The non-stationary heat transfer problem in quadratic area with boundary conditions of Newton and Diriclet types is considered as well as the calculated temperature distributions on co-ordinates in plane and time are presented. The irradiation creep of rectangular plate made from high resistant steel 15X1M1Ф is considered. Obtained distributions of irradiation creep strains for three regarded values of temperature drops allow us to evaluate the plate deformation and service ability at different time moments.

Key words: plate, temperature, non-stationary heat transfer, irradiation creep, method of weighted residuals, Galerkin method.

Вступ. Теперішній час характеризується переважанням застосування методу скінченних елементів (МСЕ) [1] для отримання розв'язків будь-яких задач математичної фізики, насамперед механіки та термодинаміки. Між іншим, його переваги повною мірою проявляються при розв'язанні завдань, що характеризується складною геометричною формою об'єктів та складними граничними умовами. При аналізі елементів канонічної форми, наприклад колової чи прямокутної, переваги МСЕ зникають. Навпаки, при цьому для досягнення необхідної точності розв'язків є необхідним застосування зайвих обсягів ресурсів ЕОМ, що призводить до недостатньо швидкого отримання результатів, а при замалому ступеню дискретизації є ризик отримання невірних результатів.

Альтернативний підхід полягає у залученні при- близних варіаційних методів розв'язання, серед яких виділяється метод зважених відхилів [1, 2]. Застосування цього методу в завданнях механіки твердого деформівного тіла та пов'язаних з нею напрямках [1, 3, 4] доводить його достатню точність та ефектив-

ність.

У даній статті представлено підхід до комплексного аналізу процесів перерозподілу температур та компонентів напружено-деформованого стану у тонких прямокутних пластинах, що піддані впливу нестационарних теплових та радіаційних полів, з застосуванням методу зважених відхилів у формі методу Гальоркіна [1, 2]. Такі конструктивні елементи, незважаючи на їхню просту геометричну форму, є достатньо поширеними у авіакосмічному та енергетичному машинобудуванні [5, 6]. Послідовно розглянуто дві задачі – нестационарної теплопровідності та радіаційної повзучості, при цьому у багатьох випадках розв'язок першої з них є необхідним для визначення початкового розподілу компонентів термопружного напружено-деформованого стану у другій.

Розв'язання задачі нестационарної теплопровідності у прямокутній пластині. Розглянемо розв'язок рівняння нестационарної теплопровідності [1], яке записано відносно функції розподілу темпера-

тур $\varphi(x, y, t)$ для прямокутної області:

$$\frac{k}{c\rho} \Delta\varphi + \frac{g}{c\rho} = \frac{\partial\varphi}{\partial t}, \Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}, \quad (1)$$

Розв'язок має задовольняти наступним граничним і початковим умовам:

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial\varphi}{\partial x} \Big|_x &= k_n \varphi(0, y, t) = k_n \varphi_{lco}; \\ k \frac{\partial\varphi}{\partial x} \Big|_x &= \bar{\alpha} + k_n \varphi(a, y, t) = k_n \varphi_{nco}; \\ -k \frac{\partial\varphi}{\partial y} \Big|_y &= k_H \varphi(x, 0, t) = k_H \varphi_{Hco}; \\ \varphi(x, b, t) &= \varphi_b, \quad \varphi(x, y, 0) = \varphi^0. \end{aligned}$$

Розв'язання задачі виконуємо за допомогою методу Гальоркіна [1, 7]:

$$\varphi_n(x, y, t) = v_0(x, y, t) + \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M H_k(t) \cdot N_{km}(x, y), \quad (2)$$

де $N_{km}(x, y)$ – базисні та вагові функції. Візьмемо їх у вигляді [2]:

$$N_{km}(x, y) = \frac{P_{k-1}(x) \cdot P_{m-1}(y)}{\|P_{k-1}\| \cdot \|P_{m-1}\|}, \quad k, m = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де

$$\|P_k\| = \sqrt{\int_0^{\pi} (P_k(x))^2 dx} = \left(\frac{\pi}{2k+1} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Для пошуку функцій H_i розв'язується система диференціальних рівнянь [7, 8]:

$$A \frac{dH^{-1}}{dt} = Cv + B. \quad (4)$$

Матриці $A = (a_{kj})_n$, $C = (c_{kj})_n$ і вектор $B = (b_k)_n$ знаходяться з рівнянь:

$$\sum_{j=1}^n a_{kj} \cdot \frac{dH_j}{dt} - \sum_{j=1}^n C_{kj} H_j = b_k, \quad k = \overline{1, n}; \quad (5)$$

$$a_{kj} = (L[v_j], N_k) = \iint_D L[v_j] \cdot N_k dx dy; \quad (6)$$

$$b_k = (f - L[v_0], N_k) = \iint_D (f - L[v_0]) \cdot N_k dx dy;$$

$$c_{kj} = \iint_D \left(K \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} \right) \cdot N_k dx dy.$$

Для розв'язання задачі (6) будується задача Коші. Отримаємо:

$$H(0) = A^{-1}D, \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} d_k &= (g_k(x, y) - V_0(x, y, 0), N_k(x, y)) = \\ &= \iint_D (g_k(x, y) - v_0(x, y, 0)) N_k(x, y) dx dy. \end{aligned} \quad (8)$$

Як приклад, розглянемо задачу щодо розповсюдження тепла у квадратній області зі стороною 0.6 м. Прийнято наступні крайові умови. Ліва границя області розсіює тепло зі сталим коефіцієнтом теплопередачі $k_L = 400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ до оточуючого середовища з

температурою $\varphi_{L.co} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, а права границя розсіює тепло зі сталим коефіцієнтом теплопередачі $k_H = 400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ до оточуючого середовища з тем-

пературою $\varphi_{H.co} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Нижня границя розсіює тепло зі сталим коефіцієнтом теплопередачі $k_H = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ до оточуючого середовища з тем-

пературою $\varphi_{П.co} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, а верхня поверхня підтримується при сталій температурі $\varphi_b = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнт теплової провідності матеріалу $k = 60 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$, а коефіцієнт теплоємності $c = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. В початковий момент область нагріто до однорідної температури $\varphi = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплова енергія генерується з питомою потужністю $g = 5,0 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$. Застосовано тригонометричні базисні функції.

На рис. 1 представлено розподіл ліній рівня температур для моменту $t = 10 \text{ с}$, а на рис. 2 наведено графік змінювання температури у серединному горизонтальному перерізі пластини для різних моментів часу. На рис. 2 крива 1 відповідає моменту $t = 10 \text{ с}$; крива 2 – $t = 20 \text{ с}$; крива 3 – $t = 30 \text{ с}$; крива 4 – $t = 40 \text{ с}$; крива 5 – $t = 50 \text{ с}$; крива 6 – $t = 100 \text{ с}$.

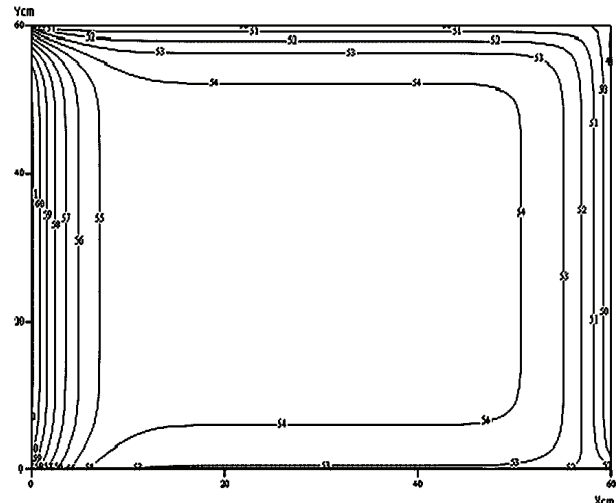


Рисунок 1 – Лінії рівня температур для моменту $t = 10 \text{ с}$

Як видно з наведених графіків, застосований метод надає ефективні можливості для встановлення розподілу температур у будь-якій точці та у будь-який момент часу для областей з різними типами крайових умов.

Розв'язання задачі радіаційної повзучості прямокутної пластини. Як відомо [5], найчастіше радіаційна повзучість визначається за фізичними рівняннями, що реалізують лінійний зв'язок між компонентами тензору швидкостей деформацій повзучості $\dot{\epsilon}_{ij}^r$ та девіатору напружень S_{ij} :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^r = \frac{3}{2} B \sigma_i S_{ij}, \quad (8)$$

де B – константа радіаційної повзучості, яку знаходять експериментально [5, 9].

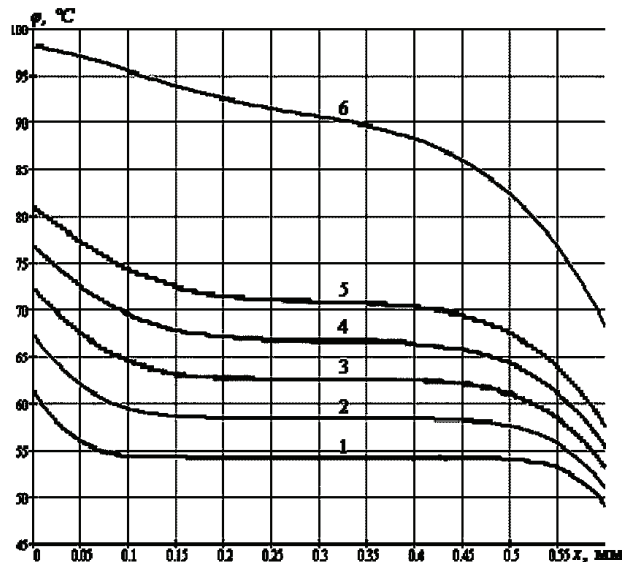


Рисунок 2 – Залежність температури від часу для середнього горизонтального перерізу пластини

Для визначення напружено-деформованого стану у пластині товщиною h , що за даними попереднього теплового розрахунку має стаціонарний розподіл температури, який характеризується різницею температур $T = \varphi_1 - \varphi_2$ між нагрітими поверхнями, розв'язується наступне диференціальне рівняння [10]:

$$\Delta w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \alpha T \frac{1+\nu}{h}, \quad (9)$$

де α – коефіцієнт теплового розширення; E та ν – модуль пружності й коефіцієнт Пуасону.

За знайденою функцією прогину w визначаються деформації у точках пластини з аплікатою z [10]:

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

та напруження:

$$\sigma_x = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right);$$

$$\sigma_y = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right);$$

$$\gamma_{xy} = -\frac{Ez}{1+\nu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.$$

За їхніми значеннями визначають компоненти девіатору S_{ij} та інтенсивності напружень Мізеса σ_i . Далі за проінтегрованим за часом співвідношенням (8) розраховують величини компонентів тензора деформацій радіаційної повзучості c_{ij}^r .

Таким чином, має бути знайденим приблизний розв'язок рівняння (9). Застосуємо для цього також метод зважених відхилів у формі Гальоркіна [1].

$$w(x, y) = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M a_{nm} N_{nm}(x, y). \quad (10)$$

Як базисні, оберемо тригонометричні функції. Розв'язок стаціонарної задачі отримуємо аналогічно, за співвідношеннями (3)–(8), записаними у незалежній

від часу формі. Розв'язання рівняння

$$\int_{\Omega} N_l R_{\Omega} d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{N}_l R_{\Gamma} d\Gamma = 0, \quad l = 1, \dots, M, \quad (11)$$

де \bar{N}_l – вагові функції на границях пластини, які методом Гальоркіна обираються такими, що дорівнюють базисним (можливо, з іншим знаком); R_{Ω} та R_{Γ} – відхили за область Ω та границею Γ , що обчислюються підстановкою розкладень (10) до рівняння (9) та рівнянь крайових умов, дозволяє отримати значення функції прогинів $w(x, y)$.

Як приклад, розглянемо розв'язок задачі радіаційної повзучості шарнірно опертої прямокутної пластини зі сторонами $0,1 \times 0,05$ м та товщиною $0,005$ м, виготовленої зі сталі 15X1M1Ф. Вважаємо, що за результатами теплового перерозподілу температури у площині є однаковими, а різниця температур між сторонами пластини T дорівнює 40 °C, 50 °C та 60 °C. Коефіцієнт $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5}$ (1/°C). Константу B до закону (8) за даними роботи [9] прийнято рівною $3,375 \cdot 10^{-13}$ (МПа⁻¹/с).

Наведемо результати розрахунку для $t = 100000$ г при $T = 40$ °C. На рис. 3 представлено розподіл лінійної деформації пластини ε_x вздовж більшої її сторони за середньою лінією, що поділяє меншу сторону.

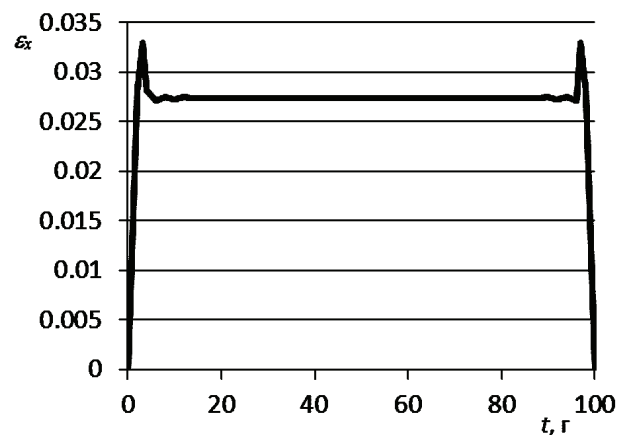


Рисунок 3 – Розподіл лінійної деформації вздовж сторони пластини, $t = 100000$ г

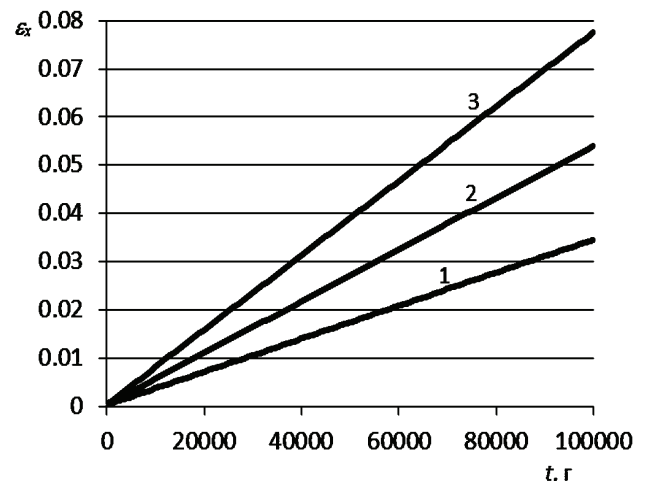


Рисунок 4 – Залежність максимальної лінійної деформації радіаційної повзучості від часу

Рис. 4 містить порівняльні криві зростання максимальних значень цієї ж компоненти для $T=40^{\circ}\text{C}$ (крива 1), $T=50^{\circ}\text{C}$ (крива 2) та $T=60^{\circ}\text{C}$ (крива 3).

За час радіаційного впливу максимальне значення деформації ε_x зростає більш ніж на два порядки: наприклад для $T=40^{\circ}\text{C}$ – від $3 \cdot 10^{-4}$ до $3,46 \cdot 10^{-2}$. Таке істотне формозмінення має, безперечно, враховуватись при оцінці стану елементів активної зони атомних реакторів.

Висновки. В статті міститься викладення основних залежностей методу зважених відхилів, що їх застосовано у формі Гальоркіна для задач нестационарної теплопровідності та теорії тонких пластин. Результати розв'язання, у вигляді розподілів за координатами у площині та часом температур й компонентів напружено-деформованого стану, можуть бути застосовані при оцінюванні деформування та довговічності тонкостінних конструктивних елементів, які знаходяться під спільним впливом температурних та радіаційних полів.

Список літератури:

1. *Зенкевич К.* Конечные элементы и аппроксимация / *К. Зенкевич, О. Морган.* – М.: Мир, 1986. – 309 с.
2. *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики / *Г. И. Марчук.* – М.: Наука, 1980. – 535 с.
3. *Morachkovskii O. K.* Solving initial-boundary-value creep problems / *O.K. Morachkovskii, Y.V. Romashov* // International Applied Mechanics. – 2009. – Vol. 45, № 10. – P. 1061-1070.
4. *Morachkovskii O. K.* Analysis of flexural-flexural-torsional nonlinear vibrations of twisted rotating beams with cross-sectional deplanation / *K.V. Avramov, O.S. Galas, O.K. Morachkovskii, C. Pierre* // Strength of Materials. – 2009. – Vol. 41, № 2. – P. 200-208.
5. *Ма Б. М.* Материалы ядерных энергетических установок / *Б. М. Ма.* – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 408 с.
6. *Гладкий В. Ф.* Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата / *В.Ф. Гладкий.* – М.: Наука, 1975. – 456 с.
7. *Флетчер К.* Численные методы на основе метода Галеркина / *К. Флетчер.* – М.: Мир, 1988. – 352 с.
8. *Патанкар С.В.* Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / *С.В. Патанкар.* – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.

9. Длительная прочность элементов кассеты насыпного типа для быстрого газоохлаждаемого реактора: Препринт ХФТИ 85-37 / *О.В. Бирюков, А.А. Золочевский, А.Г. Лаврук, О.К. Морачковский, С.М. Школьный.* – М.: ЦНИИатоминформ, 1985. – 39 с.

10. *Тимошенко С.П.* Пластинки и оболочки / *С.П. Тимошенко.* – М.: Гос.тех.теор.издат, 1948. – 460 с.

References (transliterated):

1. *Zenkevich K., Morgan O.* Konechnye elementy i approksimacija. [Finite Elements and Approximation]. Moscow: Mir Publ., 1986. 309 p.
2. *Marchuk G.I.* Metody vychislitel'noj matematiki. [Methods of Computational Mathematics]. Moscow: Nauka Publ., 1980. 535 p.
3. *Morachkovskii O.K., Romashov Y.V.* Solving initial-boundary-value creep problems. International Applied Mechanics. 2009. Vol. 45, no. 10. PP. 1061-1070.
4. *Avramov K.V., Galas O.S., Morachkovskii O.K., Pierre C.* Analysis of flexural-flexural-torsional nonlinear vibrations of twisted rotating beams with cross-sectional deplanation. Strength of Materials. 2009. Vol. 41, no. 2. PP. 200-208.
5. *Ma B.M.* Materialy jadernyh jenergeticheskikh ustanovok. [Materials of nuclear power plants]. Moscow: Jenergoatomizdat Publ., 1987. 408 p.
6. *Gladkij V.F.* Prochnost', vibracija i nadezhnost' konstrukcii letatel'nogo apparata. [Strength, vibration and reliability of aircraft design]. Moscow: Nauka Publ., 1980, 456 p.
7. *Fletcher K.* Chislennye metody na osnove metoda Galerkina. [Numerical methods based on the Galerkin method]. Moscow: Mir Publ., 1988. 352 p.
8. *Patankar S.V.* Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalah. [Numerical solution of the problems of heat conduction and convective heat transfer during flow in channels]. Moscow: MJEI Publ., 2003. 312 p.
9. *Birjukov O.V., Zolochevskij A.A., Lavruk A.G., Morachkovskij O.K., Shkol'nyj S.M.* Dlite'l'naja prochnost' jelementov kassety nasypnogo tipa dlja bystrogo gazooohlazhdaemogo reaktora: Preprint HFTI 85-37. [Continuous strength of bulk-type cassette elements for fast gas-cooled reactor: Preprint HFTI 85-37]. Moscow: CNIIatominform Publ., 1985. 39 p.
10. *Timoshenko S.P.* Plastinki i obolochki. [Plates and shells]. Moscow: Gos.teh.teor. Publ., 1948. 460 p.

Надійшла (received) 05.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Застосування методу зважених відхилів для визначення розподілу температур та деформацій радіаційної повзучості в пластинах / *Д. В. Бреславський, О. А. Татарінова, К. Ф. Чешко* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 40 (1262). – С. 15-19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9130.

Применение метода взвешенных невязок для определения распределения температур и деформаций радиационной ползучести в пластинах / *Д. В. Бреславский, О. А. Татарінова, К. Ф. Чешко* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 40 (1262). – С. 15-19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9130.

Application of the method of weighted residuals for determining the distribution of temperatures and radiation creep strains in plates / *D. V. Breslavsky, O. A. Tatarinova, K. F. Cheshko* // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 40 (1262). – P. 15-19. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бреславський Дмитро Васильович – 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.

Бреславський Дмитрій Васильович – 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.

Breslavsky Dmytro Vasylovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Department of Computer Modeling of Processes and Systems, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-64-54, e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

Татарінова Оксана Андріївна – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-64-54; e-mail: ok.tatarinova@gmail.com

Татарінова Оксана Андріївна – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», tel.: (057) 707-60-58; e-mail: ok.tatarinova@gmail.com

Tatarinova Oksana Andriivna – Candidate of Technical Sciences, Dozent, NTU "KhPI"; tel.: (057) 707-60-58; e-mail: ok.tatarinova@gmail.com

Чешко Ксенія Федорівна – аспірант, Інститут проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, тел.: (050) 254-66-35; e-mail: cheshko.ks@gmail.com

Чешко Ксенія Федоровна – аспірант, Институт проблем машиностроения имени А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков; тел.: (050) 254-66-35; e-mail: cheshko.ks@gmail.com

Cheshko Kseniya Fedorivna – PHD student, Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkiv; tel.: (050) 254-66-35; e-mail: cheshko.ks@gmail.com

УДК 539.3

DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2017.40.119709>**В.М.ГРИЩЕНКО**

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ТА АНАЛІЗ СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ МОДЕЛІ НОЖИЧНОГО ПІДЙОМНИКА НА РІЗНИХ СТАДІЯХ ПІДЙОМУ

Одним з найбільш популярних універсальних та доступних підйомних механізмів є ножичний підйомник (НП). Важливого значення набувають методи моделювання їх роботи, зокрема, розрахунки силового навантаження (розрахунки на міцність). В даній роботі на базі методу скінченних елементів (МСЕ) розглядається алгоритм визначення силового навантаження типової моделі ножичного підйомника та його аналіз на різних стадіях підйому, який можна використовувати для розрахунків подібних конструкцій. Як приклад, розглянуто навантаження зосередженою силою, прикладеною з ексцентриситетом, моделі ножичного підйомника, з двома парами ножиць.

В роботі приведені результати обчислень згідно наведеного алгоритму деформованого стану НП, розподілу силового навантаження при підйомі вантажу від 0,33 м до 2,03 м. Показана важлива роль структури конструкції на формування величин та характер розподілу максимальних зусиль по її ланкам. Приведена залежність тягового зусилля в гідроциліндрі від висоти підйому вантажу.

Ключові слова: ножичний підйомник, метод скінченних елементів, силове навантаження, алгоритм.

Одним из наиболее популярных универсальных и доступных подъемных механизмов есть ножничный подъемник (НП). Важное значение приобретают методы моделирования их работы, в частности, расчеты силового нагружения (расчеты на прочность). В данной работе на базе метода конечных элементов (МКЭ) рассматривается алгоритм определения силового нагружения типовой модели ножничного подъемника и его анализ на различных стадиях подъема, который можно использовать для расчета подобных конструкций. Как пример, рассмотрено нагружение сосредоточенной силой, приложенной с эксцентриситетом, модели ножничного подъемника, с двумя парами ножиц.

В работе приведены результаты вычислений в соответствии с приведенным алгоритмом деформированного состояния НП, распределения силового нагружения при подъеме груза от 0,33 м до 2,03 м. Показана важная роль структуры конструкции на формирование величин и характер распределения максимальных усилий по ее звеньям. Приведена зависимость тягового усилия в гидроцилиндре от высоты подъема груза.

Ключевые слова: ножничный подъемник, метод конечных элементов, силовое нагружение, алгоритм.

One of the most popular universal and accessible liftings mechanisms is a scissors-lift (NP). Important part acquire the methods of design of their work, in particular, calculations of power ladening (calculations on durability). In this work on the base of finite element method (FEM) the algorithm of determination of power ladening of typical model of scissors-lift and his analysis is examined on the different stages of getting up, which can be utilized for the calculation of similar constructions. As an example, the ladening of force with an excentricity is consider for models of scissors- lift, with two pair of scissors.

The results of calculations are in-process resulted in accordance with the resulted algorithm of the deformed state of NP, distributing of power ladening at getting up of load from a 0,33 m code to 2.03 m. The important role of structure of construction is rotined on forming of sizes and character of distributing of maximal powers on its links. Dependence of hauling effort is resulted in a hydro-cylinder from the height of getting up of load.

Keywords: scissors lift, finite element method, power ladening, algorithm.

1. Актуальність проблеми. Створення конструкцій, механізмів, машин представляє собою творчий процес проектування, конструювання та супроводжується неперервним моделюванням їх поведінки при різних умовах. Послідовне рішення задач аналізу дозволяє ще на стадії проектування вибрати для них

раціональні параметри. Одним з основних розрахунків є силовий. Визначення силового навантаження (розрахунки на міцність) з використанням розрахункових моделей різної ступені складності, врахування гнучкості ланок та реальних властивостей матеріалів дозволяє ціленаправлено модифікувати схеми механізмів з метою