

*О. І. ГУЛЯР*, д-р техн. наук, проф., КНУБА, Київ;  
*С. О. ПИСКУНОВ*, д-р техн. наук, проф., КНУБА, Київ;  
*В. П. АНДРІЄВСЬКИЙ*, канд. техн. наук, доц., КНУБА, Київ;  
*Ю. В. МАКСИМ'ЮК*, канд. техн. наук, доц., КНУБА, Київ

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ТІЛ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Проведено узагальнення методики моментної схеми скінченних елементів для розв'язання вісесиметричних задач теорії пружності при термосиловому навантаженні в нерівномірному температурному полі. Проведені чисельні дослідження для обґрунтування достовірності результатів і ефективності методики. На основі МССЕ розроблена ефективна методика розв'язання вісесиметричних задач при термосиловому навантаженні. Достовірність результатів доведена шляхом розв'язання значної кількості тестових прикладів

**Ключові слова:** дослідження, термосилове навантаження, моментна схема скінченних елементів, вісесиметричні тіла, достовірність

**Вступ.** В роботі [1] викладена методика розв'язку вісесиметричних задач теорії пружності при силовому навантаженні, в рамках якої отримані розв'язувальні співвідношення на основі моментної схеми скінченних елементів (МССЕ) [2]. Проведено чисельні дослідження для двох типів скінченних елементів, які дозволили зробити висновок, що при пружному деформуванні їх збіжність практично однакова, якщо для модифікованого варіанту використовувати фізичні компоненти тензора деформацій. Це дозволило в роботі [3] обмежитись визначенням температурних деформацій через їх фізичні компоненти в центрах скінченних елементів.

**Мета роботи.** Метою роботи є узагальнення методики МССЕ для розв'язку вісесиметричних задач теорії пружності при термосиловому навантаженні в нерівномірному температурному полі.

**Розрахункові співвідношення МССЕ при термопружному деформуванні.** В загальному випадку система лінійних алгебраїчних рівнянь методу скінченних елементів може бути подана у вигляді [4]:

$$[K]\{U\} = \{Q\} + \{R\}, \quad (1)$$

де  $[K]$  - матриця жорсткості системи,  $\{U\}$  - вектор невідомих вузлових переміщень,  $\{Q\}$  - вектор силових вузлових навантажень,  $\{R\}$  - вектор температурних силових навантажень.

Згідно з методикою МССЕ матриця жорсткості і вузлові реакції чотирикутного вісесиметричного скінченного елемента (рис. 1) з білінійним законом розподілення переміщень і температур [5]

$$u_{\alpha'} = \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} u_{\alpha'(S_1 S_2)} \left( \frac{1}{2} S_1 x^1 + \frac{1}{2} S_2 x^2 + S_1 S_2 x^1 x^2 + \frac{1}{4} \right), \quad (3)$$

$$T = \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} T_{(S_1 S_2)} \left( \frac{1}{2} S_1 x^1 + \frac{1}{2} S_2 x^2 + S_1 S_2 x^1 x^2 + \frac{1}{4} \right), \quad (4)$$

обчислюються за формулами [1]:

$$[k]_n = \left\{ \begin{bmatrix} \dot{B} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B} \end{bmatrix} + \frac{1}{12} \sum_{\alpha=1}^2 \left[ \begin{bmatrix} \dot{B}_1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{D}_{,\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{B}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{D}_{,\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_2 \end{bmatrix} \right] \sqrt{\dot{g}} \right\}, \quad (5)$$

$$\left\{ \tilde{r} \right\} = \left[ \begin{bmatrix} \dot{B} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\sigma} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \left( \begin{bmatrix} \dot{B}_1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{,\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{B}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{,\alpha} \end{bmatrix} \right) \right] \sqrt{\dot{g}} \quad (6)$$

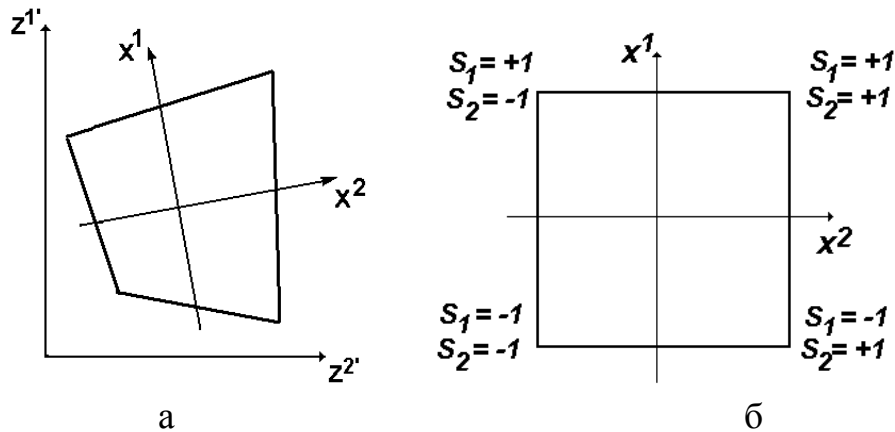


Рис. 1 – Вісесиметричний скінченний елемент: а – в базисній системі координат, б – в місцевій системі координат

При термосиловому навантаженні вектори напружень  $\left\{ \dot{\sigma} \right\}$ ,  $\left\{ \dot{\sigma}_{,\alpha} \right\}$ ,  $\left\{ \dot{\sigma}_{,\alpha} \right\}$  в формулі (6) визначаються через вектори пружних деформацій  $\left\{ \dot{\varepsilon}^e \right\}$ ,  $\left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^e \right\}$ ,  $\left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^e \right\}$  [6]:

$$\left\{ \dot{\sigma} \right\} = \begin{bmatrix} \dot{D} \end{bmatrix} \left\{ \dot{\varepsilon}^e \right\}; \quad \left\{ \dot{\sigma}_{,\alpha} \right\} = \begin{bmatrix} \dot{D}_{,\alpha} \end{bmatrix} \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^e \right\}; \quad \left\{ \dot{\sigma}_{,\alpha} \right\} = \begin{bmatrix} \dot{D}_{,\alpha} \end{bmatrix} \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^e \right\}, \quad (7)$$

де

$$\left\{ \dot{\varepsilon}^e \right\} = \left\{ \dot{\varepsilon} \right\} - \left\{ \dot{\varepsilon}^T \right\}; \quad \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^e \right\} = \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha} \right\} - \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^T \right\}; \quad \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^e \right\} = \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha} \right\} - \left\{ \dot{\varepsilon}_{,\alpha}^T \right\}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^{1111} & C^{1112} & C^{1122} & C^{1133} \\ C^{1211} & C^{1212} & C^{1222} & C^{1233} \\ C^{2211} & C^{2212} & C^{2222} & C^{2233} \\ C^{3311} & C^{3312} & C^{3322} & C^{3333} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \dot{D}_{,\alpha} \end{bmatrix} = \left[ \begin{bmatrix} C^{ij22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^{ij33} \end{bmatrix} \right], \quad \begin{bmatrix} \dot{D}_{,\alpha} \end{bmatrix} = \left[ \begin{bmatrix} C^{ij11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^{ij33} \end{bmatrix} \right]. \quad (9)$$

Компоненти матриці пружних сталей обчислюються із використанням компонент метричного тензора

$$C^{ijkl} = \lambda g^{ij} g^{kl} + \mu (g^{jl} g^{ik} + g^{il} g^{jk}), \quad (10)$$

де коефіцієнти Ляме  $\lambda$  та  $\mu$  визначаються через коефіцієнт Пуассона  $\nu = \nu(z^i, T)$  і модуль пружності матеріалу (модуль Юнга)  $E = E(z^i, T)$  [6]:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (11)$$

Повні деформації  $\{\varepsilon\}$ ,  $\{\varepsilon_{,1}\}$ ,  $\{\varepsilon_{,2}\}$  обчислюються через вектори вузлових переміщень скінченного елемента  $\{u\}$ :

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u_{(S_1, S_2)}\}; \quad \{\varepsilon_{,1}\} = [B_1] \{u_{(S_1, S_2)}\}; \quad \{\varepsilon_{,2}\} = [B_2] \{u_{(S_1, S_2)}\}, \quad (12)$$

де

$$\{u_{(S_1, S_2)}\} = \begin{Bmatrix} u'_{(S_1, S_2)} \\ u^{2'}_{(S_1, S_2)} \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

Для зручності представлення розділимо матриці  $[B]$ ,  $[B_1]$ ,  $[B_2]$  на блоки:

$$\begin{aligned} [B] &= \begin{bmatrix} [B]^{(-1;-1)} & [B]^{(1;-1)} & [B]^{(-1;1)} & [B]^{(1;1)} \end{bmatrix}; \\ [B_1] &= \begin{bmatrix} [B_1]^{(-1;-1)} & [B_1]^{(1;-1)} & [B_1]^{(-1;1)} & [B_1]^{(1;1)} \end{bmatrix}; \\ [B_2] &= \begin{bmatrix} [B_2]^{(-1;-1)} & [B_2]^{(1;-1)} & [B_2]^{(-1;1)} & [B_2]^{(1;1)} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (14)$$

де

$$\begin{aligned} [B]^{(S_1; S_2)} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} z'_{,1} S_1 & \frac{1}{2} z'^2_{,1} S_1 \\ \frac{1}{4} (z'_{,1} S_2 + z'_{,2} S_1) & \frac{1}{4} (z'^2_{,1} S_2 + z'^2_{,2} S_1) \\ \frac{1}{2} z'_{,2} S_2 & \frac{1}{2} z'^2_{,2} S_2 \\ 0 & \frac{1}{4} z'^2 \end{bmatrix}; \\ [B_1]^{(S_1; S_2)} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left( (z'_{,12} S_2 + 2 z'_{,2} S_1 S_2) - z'_{,2} S_2 h_{22,1} \right) & \frac{1}{2} \left( (z'^2_{,12} S_2 + 2 z'^2_{,2} S_1 S_2) - z'^2_{,2} S_2 h_{22,1} \right) \\ 0 & \frac{1}{4} (2 z'^2_{,1} S_1 + z'^2_{,1} + z'^2 h_{33,1}) \end{bmatrix}; \\ [B_2]^{(S_1; S_2)} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left( (z'_{,12} S_1 + 2 z'_{,1} S_1 S_2) - z'_{,1} S_1 h_{11,2} \right) & \frac{1}{2} \left( (z'^2_{,12} S_1 + 2 z'^2_{,2} S_1 S_2) - z'^2_{,1} S_2 h_{11,2} \right) \\ 0 & \frac{1}{4} (2 z'^2_{,2} S_2 + z'^2_{,2} + z'^2 h_{33,2}) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (15)$$

де  $h$ ,  $z^{\alpha'}$  визначаються згідно формул [1],  $z^{\alpha'} = \partial z^{\alpha'} / \partial x_{\beta}$ .

Температурні деформації  $\{\varepsilon^T\}$ ,  $\{\varepsilon^T_{,1}\}$ ,  $\{\varepsilon^T_{,2}\}$  обчислюються через вектори вузлових температур  $\{T\}$ :

$$\left\{ \overset{\circ}{\varepsilon}^T \right\} = \left[ \overset{\circ}{B}^T \right] \{T\}; \quad \left\{ \overset{\circ}{\varepsilon}_{,1}^T \right\} = \left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right] \{T\}; \quad \left\{ \overset{\circ}{\varepsilon}_{,2}^T \right\} = \left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right] \{T\}, \quad (16)$$

де  $\{T\}^T = \{T_{(-1;-1)} \quad T_{(1;-1)} \quad T_{(-1;1)} \quad T_{(1;1)}\}$ ;

$$\begin{aligned} \left\{ \overset{\circ}{\varepsilon}^T \right\} &= \left\{ \overset{\circ}{\varepsilon}_{11}^T \quad 2\overset{\circ}{\varepsilon}_{12}^T \quad \overset{\circ}{\varepsilon}_{22}^T \quad \overset{\circ}{\varepsilon}_{33}^T \right\}; \quad \left\{ \overset{\circ}{\varepsilon}_{,\alpha}^T \right\} = \left\{ \overset{\circ}{\varepsilon}_{(3-\alpha)(3-\alpha),\alpha}^T \quad \overset{\circ}{\varepsilon}_{33,\alpha}^T \right\}; \\ \left[ \overset{\circ}{B}^T \right] &= \left[ \left[ \overset{\circ}{B}^T \right]^{(-1;-1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}^T \right]^{(1;-1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}^T \right]^{(-1;1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}^T \right]^{(1;1)} \right]; \\ \left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right] &= \left[ \left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right]^{(-1;-1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right]^{(1;-1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right]^{(-1;1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right]^{(1;1)} \right]; \\ \left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right] &= \left[ \left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right]^{(-1;-1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right]^{(1;-1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right]^{(-1;1)} \quad \left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right]^{(1;1)} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Значення компонент підматриць  $\left[ \overset{\circ}{B}^T \right]^{(S_1, S_2)}$ ,  $\left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right]^{(S_1, S_2)}$ ,  $\left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right]^{(S_1, S_2)}$  у виразі (17)

для вісесиметричних тіл визначаються відповідно до формул [3] з урахуванням обчислених значень компонент метричного тензора для вісесиметричних тіл:

$$\begin{aligned} \left[ \overset{\circ}{B}^T \right]^{(S_1, S_2)} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \overset{\circ}{\alpha}_T \overset{\circ}{g}_{11} \\ \frac{1}{4} \overset{\circ}{\alpha}_T \overset{\circ}{g}_{12} \\ \frac{1}{4} \overset{\circ}{\alpha}_T \overset{\circ}{g}_{22} \\ \frac{1}{4} \overset{\circ}{\alpha}_T \overset{\circ}{g}_{33} \end{bmatrix}; \\ \left[ \overset{\circ}{B}_{,1}^T \right]^{(S_1, S_2)} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \overset{\circ}{\alpha}_T S_2 \overset{\circ}{g}_{11} \\ \frac{1}{2} \overset{\circ}{\alpha}_T S_1 \overset{\circ}{g}_{33} \end{bmatrix}; \quad \left[ \overset{\circ}{B}_{,2}^T \right]^{(S_1, S_2)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \overset{\circ}{\alpha}_T S_1 \overset{\circ}{g}_{22} \\ \frac{1}{2} \overset{\circ}{\alpha}_T S_2 \overset{\circ}{g}_{33} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (18)$$

**Достовірність результатів при дослідженні напружено-деформованого стану вісесиметричних тіл при термосиловому навантаженні.** В якості контрольного прикладу розглянемо розподіл температурних напружень в круглій пластині постійної товщини із центральним отвором [8]. Температурне поле пластини визначимо згідно формули:

$$T = T_2 - \frac{T_2 - T_1}{\ln \rho} \ln \rho$$

де  $T_1$  і  $T_2$  температура пластини на внутрішньому  $\rho = \rho_1$  та зовнішньому  $\rho = 1$  контурах. На рис. 2 показано порівняння результатів отриманих аналітично в роботі [8] (суцільна лінія) та розрахунком за МССЕ (штрихпунктирна лінія).

Порівняння кривих напружень показує, що вони добре узгоджуються між собою.

Так вже при чотирьох елементах взятих вздовж радіусу пластини, максимальна похибка не перевищує 4-5 %, а вісім елементів забезпечують точність до 1 %.

Значний інтерес становить порівняння чисельних результатів з експериментальними даними. З цією метою була розглянута задача про термопружний стан диску з отвором, який знаходиться під дією нерівномірного нагрівання.

Температурне поле змінюється вздовж радіуса диску у відповідності з графіком наведеним на рис. 3,а.

На рис. 3, б наведені криві напружень  $\sigma_r$  та  $\sigma_\theta$  отримані експериментально методом електротензометрії [9] (представлені у вигляді круглих позначок), результати чисельних розрахунків, отриманих в роботі [9] (представлені суцільними лініями) та результати розрахунку за МССЕ (представлені штриховими лініями).

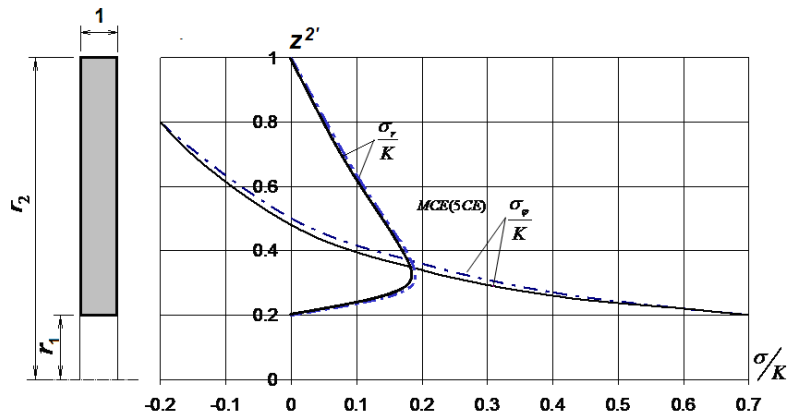


Рис. 2 – Розподілення напружень в круглій пластині ( $K = E\alpha_T(T_1 - T_2)$ )

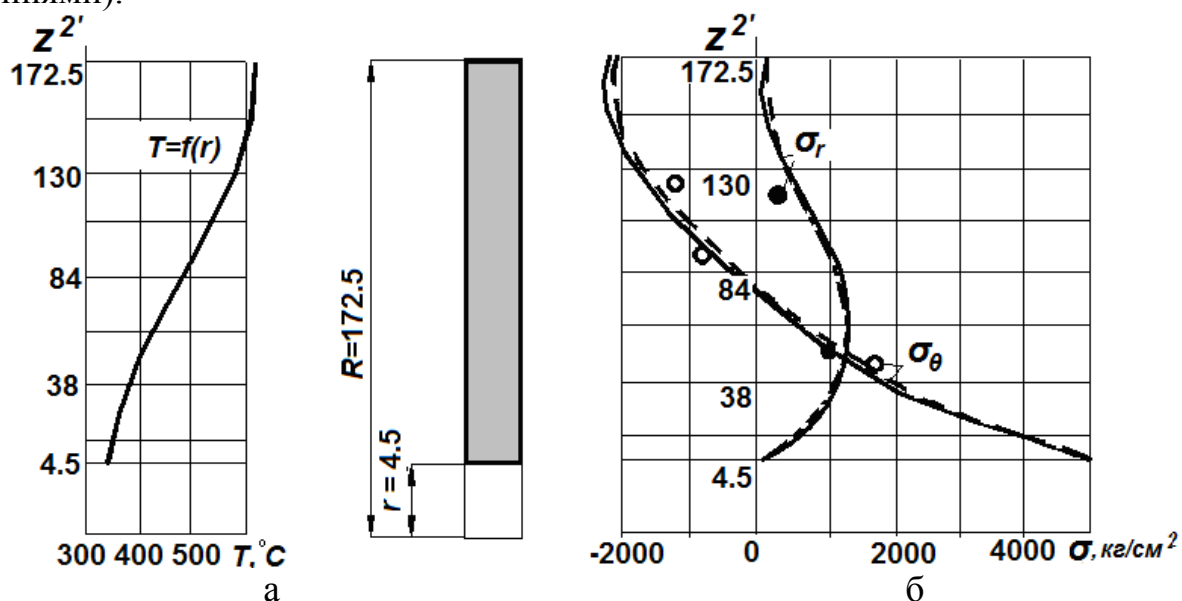


Рис. 3 –Диск з центральним отвором: а – розподілення температури, б – розподілення напружень

Порівняння результатів розрахунку за МССЕ та експериментальних даних показує, що вони задовільно узгоджуються між собою. Як можна побачити наближені результати МССЕ та результати чисельного розрахунку в роботі [9] краще узгоджуються між собою ніж з експериментом. Скоріш за все це можна пояснити великою похибкою експериментальних даних.

Таким чином наведені дослідження показують, що застосування розробленої методики визначення термонапруженого стану в дисках і пластинах дозволяє отримувати достовірні результати.

Розглянемо температурні напруження в суцільному диску, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  (1/сек). Нехай температурне поле змінюється лише вздовж радіуса, а по товщині диск нагрітий рівномірно. В роботі [10] наведений аналітичний розв'язок цієї задачі при умові незалежності модуля пружності  $E$  та коефіцієнта лінійного розширення  $\alpha_T$  від температури. В цьому випадку формули для обчислення напружень  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  мають наступний вигляд [10]:

$$\sigma_r = E\alpha_T \left( \frac{k_1(R)}{R^2} - \frac{k_1(r)}{r^2} \right) + \frac{3+\nu}{8} \rho\omega^2 (R^2 - r^2)$$

$$\sigma_\phi = E\alpha_T \left( \frac{k_1(R)}{R^2} - \frac{k_1(r)}{r^2} \right) + \frac{3+\nu}{8} \rho\omega^2 R^2 - \frac{1+\nu}{8} \rho\omega^2 r^2$$

де  $k_1(r) = \int_0^r rT(r)dr$ ,  $\rho = \frac{\gamma}{g}$  - щільність матеріалу,  $\gamma$  - питома вага матеріалу.

Для співставлення результатів розрахунку, отриманих за наведеними формулами і за розробленою методикою, розглянемо термопружний стан сталюого диска ( $\gamma = 0.00786$  кг/см<sup>3</sup>) при квадратичному розподілі температури  $T(r) = cr^2$ .

Для зручності представимо, що  $E$ ,  $\alpha_T$ ,  $c$  дорівнюють одиниці. Кутову швидкість приймемо рівною 3.14 1/сек. В табл. 1 наведено порівняння результатів точного та наближеного розв'язків при квадратичному законі розподілу температури вздовж радіуса диска.

Таблиця 1 – Порівняння результатів розрахунку

$\rho$	$\sigma_r$			$\sigma_\phi$		
	[10]	МССЕ	похибка	[10]	МССЕ	похибка
0.05	3.990	3.921	1.7	3.970	3.893	1.95
0.15	3.910	3.856	1.4	3.730	3.685	1.20
0.25	3.750	3.710	1.1	3.250	3.216	1.06
0.35	3.510	3.475	1	2.530	2.503	1.07
0.45	3.190	3.161	0.9	1.570	1.549	1.34
0.55	2.790	2.765	0.9	0.370	0.353	4.20
0.65	2.310	2.289	0.9	-1.069	-1.063	1.30
0.75	1.750	1.740	1.0	-2.749	-2.761	0.43
0.85	1.110	1.095	1.3	-4.669	-4.674	0.20
0.95	0.390	0.377	3.2	-6.289	-6.846	0.25
1.00	0.000	0.000	0.0	-8.000	-8.000	0.00

При порівнянні результатів виходить, що похибка в напруженнях  $\sigma_r$  за максимальними значеннями дорівнює 1.7%, а максимальні напруження  $\sigma_\phi$ , що отримані за наведеними формулами та по розробленій методиці співпали, що свідчить про високу точність запропонованого варіанту МСЕ.

Таким чином, наведені результати показують, що методика побудована на МССЕ, дозволяє з високою точністю описувати термопружний стан дисків при різних законах розподілу температури та зовнішнього навантаження.

В конструкціях та окремих деталях, що працюють під впливом об'ємних та поверхових сил при нерівномірному нагріві, фізико-механічні характеристики матеріалів можуть суттєво залежати від температури. Актуальним є апробація розробленої методики для розв'язання такого типу задач. Нижче наводяться результати розв'язання задачі про узагальнений деформований стан неоднорідного циліндра. Неоднорідність циліндра полягає в залежності модуля пружності  $E$  від радіуса циліндра і обумовлена впливом нерівномірного нагріву.

Результати розрахунку порівнювались із розв'язком, отриманим в роботі [10].

При розрахунках досліджувалась потрібна кількість елементів розбивки циліндра по товщині при якій досягається збіжність результатів. Як впливає із графіків, наведених на рис. 4; достатнім виявилось 5 СЕ для співпадіння кривих напружень  $\sigma_r$  і  $\sigma_\theta$ . При цьому похибка у визначенні максимальних напружень не перевищує 3%, що свідчить про високу точність розробленої методики стосовно задач із неперервною неоднорідністю.

Порівняння результатів проведено при наступних вихідних даних.

$$\nu = 0.3, \alpha_T = 1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{град}}, E = 10^3 e^{-0.04606T}, T = -71.66(\rho - 0.2).$$

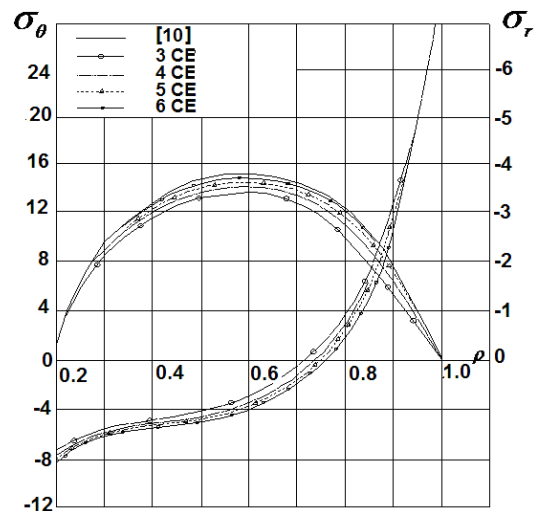


Рис. 4 – Розподілення напружень в неоднорідному суцільному циліндрі

**Висновки.** На основі МССЕ розроблена ефективна методика розв’язання вісесиметричних задач при термосиловому навантаженні. Достовірність результатів доведена шляхом розв’язання значної кількості тестових прикладів.

**Список літератури:** 1. Гуляр, О. І. Ефективність моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) в задачах згину та з концентраторами напружень [Текст] / О. І. Гуляр, І. І. Солодей, Ю. В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. - 2012. – Вип. 89. – С. 38-52. 2. Сахаров, А. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел [Текст] / А. С. Сахаров, В. Н. Кислокий, В. В. Киричевский. – К.: Вища шк., 1982. – 480 с. 3. Андрієвський, В. П. Методика розв’язання вісесиметричних задач стаціонарної теплопровідності та термопружності на основі МССЕ [Текст] / В. П. Андрієвський, Ю. В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. - 2014. – Вип. 93. – С. 64-72. 4. Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах руйнування просторових тіл : [Текст] Монографія / В. А. Баженов, О. І. Гуляр, С. О. Пискунов, О. С. Сахаров. – К.: КНУБА, 2005. – 298 с. 5. Полуаналитический метод конечных элементов в механике деформируемых тел [Текст] / В. А. Баженов, А. И. Гуляр, А. С. Сахаров, А. Г. Топор. – К.: НИИСМ, 1993. – 376 с. 6. Блох, В. И. Теория упругости [Текст] / В. И. Блох. – Х.: Изд. Харьковск. Гос. Университета, 1964. – 484 с. 7. Алгоритм розв’язання просторової задачі термов’язкопружно-пластичності призматичних тіл з урахуванням пошкодженості [Текст] / В. А. Баженов, О. І. Гуляр, С. О. Пискунов, В. П. Андрієвський // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2006. – Вип. 78. – С. 3–17. 8. Коваленко, А. Д. Основы термоупругости [Текст] / А. Д. Коваленко. – К.: Наук. думка, 1970. – 204 с. 9. Прочность рабочих колес турбомашин [Текст] / И. А. Козлов, В. Н. Городецкий, В. М. Лещенко, В. И. Фомичев; ред. Г. С. Писаренко; АН УССР, Ин-т проблем прочности. – К.: Наукова думка, 1972. – 215 с. 10. Расчет конструкций на тепловое воздействия [Текст] / В. Л. Бажанов, И. И. Гольденблат, Н. А. Николаенко, А. М. Синюков. – М.: Машиностроение, 1969. – 600 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gulyar, O. I., Solodej, I. I., Maksymiuk, Yu. V. (2012). Efektivnist' momentnoi skhemi skinchenih elementiv (MSSE) v zadachah zginu ta z koncentratorami napruzhen'. Opir materialiv i teoriya sporud, 89, 38-52. 2. Saharov, A. S. Kislookij, V. N., Kirichevskij, V. V. (1982). Metod konechnyh ehlementov v mekhanike tverdyh tel. Kiev: Vishcha shk., 480. 3. Andriievskiy, V. P. Maksymiuk, Yu. V. (2014). Metodika rozv'yazannya visesimetrichnih zadach stacionarnoї teploprovodnosti ta termopruzhnosti na osnovi MSSE. Opir materialiv i teoriya sporud, 93, 64-72. 4. Bazhenov, V. A., Gulyar, O. I., Piskunov, S. O., Saharov, O. S. (2005). Napivanalitichnij metod skinchennih elementiv v zadachah rujnuvannya prostоровih til. Kiev: KNUBA, 298. 5.

Bazhenov, V. A., Gulyar, O. I., Saharov, O. S., Topor, A. G. (1993). Poluanaliticheskiy metod konechnykh ehlementov v mekhanike deformiruemykh tel. Kiev: NIISM, 376. **6.** Bloh, V. I. (1964). Teoriya uprugosti. Kharkov: Izd. Kharkov. Gos. Universiteta, 484. **7.** Bazhenov, V. A., Gulyar, O. I., Piskunov, S. O., Andriievskiy, V. P. (2006). Algoritm rozv'yazannya prostorovoi zadachi termov'yazkopruzhnoplastichnosti prizmatichnih til z urahuvannyam poshkodzhenosti. Opir materialiv i teoriya sporud, 78, 3–17. **8.** Kovalenko, A. D. (1970). Osnovy termouprugosti. Kiev : Nauk. dumka, 204. **9.** Kozlov, I. A., Gorodeckij, V. N., Leshchenko, V. M., Fomichev, V. I. (1972). Prochnost' rabochih koles turbomashin. Kiev : Naukova dumka, 215. **10.** Bazhanov, V. L., Goldenblat, I. I., Nikolaenko, N. A., Sinyukov, A. M. (1969). Raschet konstrukcij na teplovoe vozdejstviya. Moscow : Mashinostroenie, 600.

Надійшла (received) 11.04.2015

УДК 62-663.7 (045)

**В. И. РЫНДЯЕВ**, канд. техн. наук, доц., УИПА, Харьков

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЫТАЛКИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА КОКСОВЫТАЛКИВАТЕЛЯ

Создание выталкивающего устройства, основные параметры и конструктивные решения которого обеспечивают повышенный уровень работоспособности за счет снижения нетехнологических нагрузок, является актуальной задачей. Исследовано выталкивающее устройство коксовыталкивателя. Изучено формирование величины эквивалентных нагрузок с учетом слеживаемости кокса. Проанализировано влияние конструктивных решений выталкивающего устройства на снижение уровня действующих нагрузок.

**Ключевые слова:** выталкивающее устройство, динамические нагрузки, конструкция.

**Введение.** Особенностью коксохимического производства является непрерывная работа технологического оборудования. Это приводит к высокой напряженности деталей и узлов коксовых машин.

Современному машиностроению удастся повышать уровень допустимых напряжений деталей при расчетах на выносливость, однако расход запчастей увеличивается и число отказов не уменьшается.

Одной из причин такого неблагоприятного положения является появление в машинах нетехнологических нагрузок, в 3-4 раза превосходящих установившиеся технологические. Особенно возросли динамические нагрузки.

Создание работоспособных машин для коксохимического производства в условиях интенсивно действующих нагрузок и увеличивающееся в них доли нетехнологических стало острой проблемой, от решения которой в значительной мере зависят технико-экономические показатели коксохимиков.

Анализ эксплуатационных условий, в которых работает коксовое оборудование, показывает, что наиболее напряженными в работе являются детали и узлы выталкивающего устройства коксовыталкивателя [1-6].

Поэтому создание выталкивающего устройства, основные параметры и конструктивные решения которого обеспечивают повышенный уровень работоспособности за счет снижения нетехнологических нагрузок, является актуальной задачей.

**Анализ причин отказов оборудования.** По данным ремонтных служб коксохимических заводов отказы деталей и узлов машин являются причиной более чем 50% внеплановых простоев оборудования. Основными видами этих отказов являются усталостные разрушения. Рабочие поверхности деталей практически