

6. Типова навчальна програма нормативної дисципліни «Цивільний захист» для вищих навчальних закладів для всіх спеціальностей за освітньо-кваліфікаційними рівнями «спеціаліст», «магістр» [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://vzvo.gov.ua/navchalni-prohramy/208-a-typical-curriculum-regulatory-discipline-civil-protection-for-higher-education-for-all-professions-for-education-and-skill-levels-specialist-master> – Дата доступу: 17.04.2018 р.

УДК 539.3

**Мікуліч О.А., канд. техн. наук, доцент**  
**Шваб'юк В.І., докт. техн. наук, професор**  
Луцький національний технічний університет, shypra@ukr.net

### **МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩ ЗА НЕСТАЦІОНАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

У сучасному будівництві для реконструкції та ремонту будинків і споруд широко використовуються пористі піноматеріали. Перевагою застосування таких матеріалів є сприятливе поєднання фізичних і механічних характеристик, таких як висока жорсткість у поєднанні з дуже низькою густиною. Експериментальні дослідження підтверджують, що пористі піноматеріали володіють здатністю поглинати енергію удару та вібрацію, а також мають високий ступінь звукопоглинання. Окрім того, їх висока технологічність допускає можливість виготовляти з піноматеріалів об'ємні конструкції практично довільної форми.

Деформації, які виникають у пористих піноматеріалах за дії зовнішнього навантаження не можна коректно описати використовуючи апарат класичної теорії пружності. Це пов'язано з тим, що у класичній механіці використовується наближення, засноване на припущенні, що деформації, спричинені навантаженням, неперервно розподіляються по всьому тілу. Ця теорія дає можливість достатньо добре проводити аналіз поведінки матеріалів у макромасштабі, де можна нехтувати розміром мікроструктури.

Однак експерименти показують, що механічна поведінка матеріалів у малих масштабах відрізняється від їх поведінки на макрорівні. Будь-яка спроба відмовитися від припущення про неперервність у модифікованій теорії обов'язково призводить до ускладнення аналізу деформацій та напружень.

Тому для пористих матеріалів слід використовувати розмірно-залежну механіку, яка враховує вплив мікроструктуру матеріалів на розподіл деформацій у середовищі. Ця теорія повинна не тільки враховувати вплив розмірних ефектів, але і, звичайно, при зменшенні їх впливу отримувати результати, що відповідатимуть класичній теорії пружності.

У роботі для дослідження динамічного напруженого стану пінистих середовищ було використано апарат моментної теорії пружності зі стисненим обертанням – псевдоконтинуум Коссера [1]. У рамках цієї теорії на розподіл деформацій у середовищі впливають не тільки переміщення частинок матеріалу, а і можливі їх мікроповороти. При цьому вважається, що вектори мікро- та макроповороти співпадають.

Рівняння руху тіла у псевдоконтинуумі Коссера записується у вигляді [2]:

$$(\lambda + 2\mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} + \operatorname{rot} \operatorname{rot} \left( \frac{B}{4} \Delta \mathbf{u} - \mu \mathbf{u} \right) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа;

$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \{u_j(\mathbf{x}, t)\}$ ,  $j = 1, 2$  – вектор переміщень,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ ;

$\rho$  – густина;

$\mu, \lambda$  – сталі Ляме;

$B$  – стала, що відповідає мікроструктурі матеріалу.

Для розв'язання поставленої задачі розроблено метод, що ґрунтується на сумісному послідовному застосуванні перетворення Фур'є за часом, зважено-залишкового підходу та модифікації методу граничних інтегральних рівнянь для псевдоконтинууму Коссера.

Граничні умови задачі у області Фур'є-зображень записувалися у вигляді:

$$\hat{\sigma}_n|_L = \hat{\sigma}_n^*(\mathbf{x}, \omega), \quad \hat{\tau}_{sn}|_L = \hat{\tau}_{sn}^*(\mathbf{x}, \omega), \quad (2)$$

де  $\hat{\sigma}_n^*(\mathbf{x}, t)$ ,  $\hat{\tau}_{sn}^*(\mathbf{x}, t)$  – Фур'є-зображення відомих на границі функцій.

Застосовуючи зважено-залишковий підхід до рівняння (1) потенціального зображення для переміщень за відсутності масових сил у випадку першої основної задачі побудовано у вигляді:

$$\hat{u}_k(\mathbf{x}, \omega) = \int_L p_j(\mathbf{x}^0, \omega) \cdot U_{jk}^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0, \omega) dL(\mathbf{x}^0), \quad (3)$$

де  $p_j(\mathbf{x}^0, \omega)$  – невідомі функції,  $\mathbf{x}^0 = (x_1^0; x_2^0)$ ;

$U_{jk}^*$  – зображення фундаментальних функцій для переміщень, що побудовані у [3],  $k=1, 2$ .

Задовольняючи у області Фур'є-зображень граничні умови (2) з урахуванням потенціального зображення (3), інтегральні рівняння задачі запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(q)/2 + \mathbf{v.p.} \int_L (f_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + f_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta}) &= \hat{\sigma}_n^*; \\ \mathcal{G}_1 \operatorname{Im} q / 2 + \mathbf{v.p.} \int_L (g_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + g_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta}) &= \hat{\tau}_{sn}^*, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $p ds = -iq d\zeta$ ,  $p = p_1 + ip_2$  – невідома функція,  $\zeta = x_1^0 + ix_2^0$ ;

$c_\tau = \sqrt{\mu/\rho}$  – швидкість хвиль зсуву;

$\mathcal{G}_1 = 1 - (\omega \cdot l / c_\tau)^2$  – стала;

$l = \sqrt{(\gamma + \varepsilon) / (4\mu)}$  – розмірний фактор;

$f_j(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$ ,  $g_j(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$  – відомі функції [3].

Система інтегральних рівнянь (4) розв'язувалася чисельно на основі підходу, розвинутого у [4], що ґрунтується на використанні методу механічних квадратур. При цьому для інтегралів, що містять особливості типу Коші, використано квадратурні формули підвищеної точності.

Після визначення невідомих функцій з системи (4), розрахунок кільцевих напружень на границі порожнини проводився на основі формул:

$$\hat{\sigma}_\theta = \mathcal{G}_2 \operatorname{Re} q / 2 + \mathbf{v.p.} \int_L (h_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + h_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta}) + \hat{\sigma}_\theta^*, \quad (5)$$

де  $\mathcal{G}_2 = (1 - (c_\tau / c_l)^2)$  – стала;

$c_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$  – швидкість хвиль розширення;

$h_j(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$  – відомі функції [3];

$\hat{\sigma}_\theta^*$  – відомі функції, що визначаються на основі заданого на границі навантаження.

Для визначення оригіналів кільцевих напружень (5) використано обернене дискретне перетворення Фур'є, що за числових розрахунків реалізовувалося на основі алгоритму Кулі-Тьюкі.

Використовуючи розроблений метод у роботі досліджено динамічний напружений стан пінополіуретанів та спінених полікриламідів.

#### Список посилань

1. Hadjefandiari, A.R. Couple stress theory for solids / A.R. Hadjefandiari, G.F. Dargush // International Journal of Solids and Structures. – 2011. - № 48(18). – P. 2496-2510.
2. Savin, G.N. Dynamic plane problem of the moment theory of elasticity / G.N. Savin, N.A. Shulga // Applied mechanics. – 1967. – № 3(6). –P. 216-221.
3. Shvabyuk, V.I. Stress state of foam media with tunnel opening under non-stationary dynamic loads / V.V. Shvabyuk, O.A. Mikulich, V.V. Shvabjuk // Strenght of Materials. – 2017. – № 49 (6). – P. 818-828.
4. Mikulich, O.A. Dynamic stress concentration at incisions in the plates under the action of weak shock waves / O. Mikulich, O.A. V. Shvabyuk, H. Sulym // Acta Mechanica et Automatica. – 2017. – № 11 (3). – P. 217-221.

УДК 550-34

**Ігнатишин В.В., канд. фіз.-мат. наук, науковий співробітник**

Відділ сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім.С.І. Субботіна НАН України, [rgstrs@i.ua](mailto:rgstrs@i.ua)

### СУЧАСНІ ГОРИЗОНТАЛЬНІ РУХИ ЗЕМНОЇ КОРИ В ЗОНІ ОАШСЬКОГО ГЛИБИННОГО РОЗЛому ТА СЕЙСМІЧНІСТЬ ЗАКАРПАТСЬКОГО ВНУТРІШНЬОГО ПРОГІНУ

Актуальність дослідження характеру сучасних горизонтальних та вертикальних рухів верхніх шарів земної кори викликана необхідністю вивчення геомеханічних процесів в регіоні, дослідження будови земної кори, динамічних характеристик геофізичних полів та їх зв'язок із сейсмічним та екологічним станами регіону. Через територію Закарпаття пролягають продуктопроводи, нафтопроводи, газопроводи, лінії електропередач, ведуться будівельні роботи, тому результати досліджень важливі для вирішення екологічних проблем регіону.

На території Закарпаття проводиться геофізичний моніторинг навколишнього середовища на режимних геофізичних станціях, сейсмічних станціях та пунктах деформометричних спостережень Відділу сейсмічності Карпатського регіону та Карпатського відділення Інституту геофізики ім.С.І Субботіна НАН України. За результатами досліджень відмічено особливості сейсмотектонічних процесів в Закарпатському внутрішньому прогині, що проливають світло на характер варіацій параметрів геодинамічного стану та їх зв'язок із екологічно небезпечними геологічними процесами[1-10].

За період з 01.01.2017 року по 25.12.2017 року сейсмічними станціями розташованими в зоні Оашського глибинного розлomu зареєстровано 181 місцевий землетрус, як і в минулому 2016 році в регіоні не відбулося відчутних місцевих землетрусів, як це відмічено, наприклад, в період 2006-2015 рр. Сейсмотектонічні процеси в Закарпатському внутрішньому прогині характерні періодичністю. В 2017 році деформографічною станцією „Королево„ відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України зареєстровано стиснення порід величиною - 36.4 мкм, деформація величиною-1486 нстр( $-14.86 \times 10^{-7}$ ). Загальний характер сучасних горизонтальних рухів в зоні Оашського глибинного розлomu Закарпатського внутрішнього прогину є розширення порід, зокрема: 1999-2011 рр. - розширення порід, 2012 рік-стиснення порід, 2013 рік-розширення порід, 2014 рік-пріоритетного руху нема, 2015 рік-