УДК 539.3
DOI: 10.32347/0131-579x.2025.109.81-95
д. ф. (Ph.D.), доцент **Кошевий О.О.**
a380982070137@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1903-2905
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

БАГАТОКРИТЕІАЛЬНА ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СТІЙКОСТІ ОБОЛОНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ НА КВАДРАТНОМУ ПЛАНІ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ

Оптимальне проєктування стійкості просторових конструкцій практично не вивчено в будівельній та прикладній механіки. Втрата стійкості оболонки характеризується за допомогою коефіцієнта λ та формами втрати стійкості, як правило, перша форма втрата стійкості є основною.

Із наукового напрямку оптимального проєктування відомо, що дослідження відбувається найчастіше при цільових функціях: вага, об'єм, напруження, вартість конструкції. Оптимальне проєктування стійкості просторових конструкцій є новим напрямком в зворотних задачах будівельної та прикладної механіки.

Поєднання задачі оптимізації ваги просторової конструкції та стійкості є досить цікавим з точки зору будівельних конструкцій.

Тип задач про оптимальне проєктування стійкості раніше не міг бути розвинутий, тільки в кінці XX століття з появою потужної комп'ютерної техніки, яка може вирішувати великі системи рівнянь призвела до можливості робити чисельні екскременти в будівельній механіки, які в свою чергу розкрили цей новий перспективний вид задач.

Навантаження можна використовувати різне: статичне, температурне, сейсмічне, динамічне, ударне, електромагнітне та інші. В даній науковій статті використовується термосилове навантаження, яке в себе вміщає комбінацію статичних впливів та температурне навантаження.

Важливим елементом є геометрична нелінійність. З геометричною нелінійностю тісно пов'язана проблема стійкості будівельних конструкцій в цілому. Тіло, яке деформується знаходиться в стійкому стані рівноваги, якщо відбувається мала зміна конфігурації геометрії.

У статі розкриті теоретичні відомості розрахунку стійкості тонких оболонок з урахуванням геометричної нелінійності.

Результати дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації стійкості оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі з урахуванням геометричної нелінійності. Вдалося виконати

зменшення цільової функції ваги оболонки мінімальної поверхні при цьому коефіцієнт λ=1, що відповідає мінімальному параметру стійкості.

У подальшому є можливість аналізувати результати оптимізації оболонки мінімальної поверхні на квадратному плані при різних цільових функціях та обрати по якому типу оптимізації проектувати конструкції згідно будівельних норма України.

Ключові слова: оболонка мінімальної поверхні; міцність оболонки; стійкість оболонки; геометрична нелінійність; термосилове навантаження; метод скінчених елементів; напруження по Мізесу; МСЕ; товщина оболонки мінімальної поверхні; метод градієнтного спуску; метод скінченних елементів.

Вступ. Оптимальне проєктування стійкості просторових конструкцій практично не вивчено в будівельній та прикладній механіки. Втрата стійкості оболонки характеризується за допомогою коефіцієнта λ та формами втрати стійкості, як правило, перша форма втрата стійкості є основною. Втрата стійкості відбувається коли коефіцієнт λ ≥1, чисельне дослідження показує, що цей коефіцієнт не відноситься до кожного скінченного елемента а розглядається для оболонок мінімальних поверхонь в цілому [1].

Із наукового напрямку оптимального проєктування відомо, що дослідження відбувається найчастіше при цільових функціях: вага, об'єм, напруження, вартість конструкції. Оптимальне проєктування стійкості просторових конструкцій є новим напрямком в зворотних задачах будівельної та прикладної механіки.

Поєднання задачі оптимізації ваги просторової конструкції та стійкості є досить цікавим з точки зору будівельних конструкцій. Для тонкостінних оболонок мінімальних поверхонь втрата стійкості може наступати раніше, ніж втрата міцності, при менших напружень по Мізесу. Це показує наступні результати, матеріал працює в пружному стані, розрахунковий опір сталі на розтяг на досягнуто, а форму оболонка мінімальної поверхні вже втратила, що призводить до неможливості її експлуатації та виконання своїх функцій. Згідно будівельних норм України розрахунок просторових тонкостінних оболонок мінімальних поверхонь виконується за II групами граничних станів. До I групи відноситься міцність та стійкість. У даному випадку чисельне дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації виконується з урахуванням цільових функцій стійкості та ваги оболонки мінімальної поверхні, що дає наступні цікаві висновки, як правило, для просторових тонкостінних оболонок в цілому можна обмежуватися оптимальним проектуванням стійкості та ваги конструкції, при цьому буде фактично завжди забезпечуватися багатокритеріальна параметрична оптимізація міцності та ваги конструкції [2].

Тип задач про оптимальне проєктування стійкості раніше не міг бути розвинутий, тільки в кінці XX століття з появою потужної комп'ютерної техніки, яка може вирішувати великі системи рівнянь призвела до можливості робити чисельні екскременти в будівельній механіки, які в свою чергу розкрили цей новий перспективний вид задач [3].

Аналогічний тип задач може бути доцільний для стержневих конструкцій, який працює на стиск зі згином, а саме всілякий вид колон та пілонів, а також промислових рам. Такий вид задач не може бути основний де конструкція працює на чистий стик або розтяг, бо там завжди буде відбуватися спочатку втрата міцності за матеріалом [4].

Навантаження можна використовувати різне: статичне, температурне, сейсмічне, динамічне, ударне, електромагнітне та інші. В даній науковій статті використовується термосилове навантаження, яке в себе вміщає комбінацію статичних впливів та температурне навантаження.

Вирішення систем рівнянь рівноваги, які описують стійкість тонких оболонок мінімальних поверхонь ускладнюють їх аналітичне дослідження, поставлені задачі слід вирішувати застосовуючи чисельні методи, а саме метод скінченних елементів. Доцільно використовувати для багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонок мінімальних поверхонь зв'язок між математичними методами – градієнтного спуску та методом скінченних елементів – для чисельного дослідження втрати стійкості та вирахування коефіцієнта λ, які дозволяють описувати загальну оптимізовану геометрію деформованої поверхні. Це дозволяє вибирати сітку скінченних елементів з урахуванням збіжності, її крок та зменшення чи збільшення кроку на певних ділянках [5].

При багатокритеріальній параметричній оптимізації тонких оболонок мінімальних поверхонь методом скінченних елементів диференціальні рівняння зводиться до системи алгебраїчних рівнянь, де значення функцій кожного скінченного елементу відомі, так як розбиті на прості прямокутники.

В загальному питання стійкості тонкостінних оболонок є досить перспективним напрямком для будівельної і прикладної механіки. Суть проблеми полягає у визначення коефіцієнта втрати стійкості в кожному скінченому елементі, при цьому можна в інший частині оболонки не мати втрати стійкості, що призводить до місцевої втрати стійкості [6].

Задачами стійкості займалися наступні українські вчені школи будівельної механіки: Баженов В.А., Гоцуляк Є.О., Лізунов П.П., Гуляєв В.І., Гайдайчук В.В., Пискунов С.О., Солодей І.І., Гуляр О.І., Іванченко Г.М., Чибіряков В.К., Лук'янченко О.О., Луговий П.З. та інші. Задачі стійкості мають дуже вагоме значення при розрахунку тонкостінних просторових конструкцій, так як будь який елемент конструкції повинен зводитися до стану стійкої рівноваги. З іншої сторони будь-яке руйнування тонкостінної просторової конструкції можна розглядати як місцеву або глобальну втрату стійкості, особливо цікаво це проявляється коли відбувається процес багатокритеріальної параметричної оптимізації стійкості та ваги. При поступовому зменшенні товщини скінченного елемента, це призводить до появи місцевої стійкості. Суть дослідження визначити оптимальну товщину оболонки мінімальної поверхні при якій товщині відбудеться межа втрати стійкості з урахуванням геометричної нелінійності при термосиловому навантаженню, яке задане згідно будівельних норм України. Такий підхід може слугувати в загальному дослідженню по методики розрахунку будівельних конструкцій з урахуванням оптимального проектування [7–9].

Важливим елементом є геометрична нелінійність. З геометричною нелінійностю тісно пов'язана проблема стійкості будівельних конструкцій в цілому. Тіло, яке деформується знаходиться в стійкому стані рівноваги, якщо відбувається мала зміна конфігурації геометрії. Цей показник є основний через зовнішнє навантаження і характер його використання впливає на конструкцію в цілому, що може супроводжувати після прогинів у вигляді втрати стійкості тонкостінних просторових конструкцій.

Навантаження при якій тонкостінна просторова конструкція втрачає стійкість називається критичним навантаженням, а геометрична форма, яку приймає тіло називається формую втрати стійкості [10].

Теоретичні відомості розрахунку стійкості тонких оболонок з урахуванням геометричної нелінійності. Важливе питання проблем будівельної і прикладної механіки становлять **задачі геометричної нелінійності**. Нілійнійність диференціальних рівнянь не допомагає застосовувати аналітичні підходи, що обумовлює необхідність використання чисельних методів таких як метод скінченних елементів (МСЕ). Для даних задач метод скінчених елементів досліджений в задачах ізотропних тіл [6].

Геометрично нелінійні задачі використовують в основному для формулювання задач стійкості конструкції. У більшості випадків проблему стійкості вдається вирішити, якщо звести її до лінійної постановки при власних коливаннях.

Геометрично нелінійні називають задачі теорії пружності в яких враховується нелінійність в залежності від деформацій і переміщень, в той час як напруження і деформації пов'язані лінійно. Врахування нелінійних складових деформацій необхідно для розрахунку гнучких тонкостінних конструкцій [7].

Деформації тіла представлені (1):

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}. \tag{1}$$

які пов'язані з переміщеннями наступним чином (2):

$$\bar{\varepsilon} = R\vec{u}, \quad \tilde{\gamma}_{ij} = 2\tilde{\varepsilon}_{ij}. \tag{2}$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\frac{\partial \overrightarrow{u^T}}{\partial x_i}\frac{\partial \overrightarrow{u}}{\partial x_j}. \tag{3}$$

При дії об'ємних сил $\vec{F}$ і розповсюджених по поверхні тіла S_2 зусиль $\overrightarrow{p^*}$ в тілі виникають напруження $\sigma^T = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}\}$, які пов'язані з деформаціями пружного тіла узагальненим законом Гука (4):

$$\sigma = D\varepsilon = D\bar{\varepsilon} + D\tilde{\varepsilon}. \tag{4}$$

Потенційне енергія тіла включає роботу зовнішніх сил і енергію деформації (5):

$$\Pi_L(\vec{u}) = \frac{1}{2}\int_V \sigma^T \varepsilon dV - \int_V \overrightarrow{u^T}\vec{F} dV - \int_{S_2} \vec{u}\overrightarrow{p^*} dS =$$

$$= \frac{1}{2}\int_V \sigma^T \bar{\varepsilon} dV + \frac{1}{2}\int_V \sigma^T \tilde{\varepsilon} dV - \int_V \overrightarrow{u^T}\vec{F} - \int_{S_2} \vec{u}\overrightarrow{p^*} dS. \tag{5}$$

Згідно варіаційного принципу Лагранжа серед всіх допустимих переміщень тіла, які реалізовані і які приводять потенційну енергію (5) до мінімального значення [8–9].

Розіб'ємо тіло на множену скінченних елементів і розглянемо один із них об'ємом V. Переміщення, деформації і напруження будемо апроксимувати наступним чином (6):

$$\vec{u} = N_1\overrightarrow{u_1} + \cdots + N_m\overrightarrow{u_m} = N\{u\},$$

$$\bar{\varepsilon} = R\vec{u} = B_1\overrightarrow{u_1} + \cdots + B_m\overrightarrow{u_m} = B\{u\},$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\{u\}^T \frac{\partial N^T}{\partial x_i}\frac{\partial N}{\partial x_j}\{u\} = \frac{1}{2}\{u\}^T G_{ij}\{u\},$$

$$\sigma = D(B_1 u_1 + \cdots + B_m u_m + \tilde{\varepsilon}) = D(B\{u\} + \tilde{\varepsilon}) \tag{6}$$

де N_j – Базисні функції скінченого елемента $\overrightarrow{u_\iota}$ – вектора вузлових переміщень і-го вузла N (3x3m), B (6x3m) – матриці базисних функцій і деформацій G_{ij} (3m x 3m) – матриці нелінійних деформацій, конкретні вирази для яких будуть приведені нижче. Після постановки останніх виразів функціонал (5) перетворюється у функцію вузлових переміщень, який має наступний вигляд [10]:

$$\Pi_L(\{u\}) = \frac{1}{2}\{u\}^T \int\limits_V B^T D B dV \{u\} + \{u\}^T \int\limits_V B^T D \tilde{\varepsilon} dV +$$

$$+\frac{1}{2}\int\limits_V \tilde{\varepsilon}^T D \tilde{\varepsilon} dV - \{u\}^T \int\limits_V N^T \vec{F}\, dV - \{u\}^T \int\limits_{S_S} N^T \overrightarrow{p^*}\, dS =$$

$$\frac{1}{2}\{u\}^T K \{u\} - \{u\}^T \{Q\} + \{u\}^T \int\limits_V B^T D \tilde{\varepsilon} dV + \frac{1}{2}\int\limits_V \tilde{\varepsilon}^T D \tilde{\varepsilon} dV. \qquad (7)$$

де K (3m x 3m) – матриця жорсткості скінченного елемента; $\{Q\}$ (3m x 1) – вектор вузлових навантажень. Вирішуючи рівняння для одного скінченного елемента визначається з умов мінімуму цієї функції, яке приводить до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (8):

$$\frac{\partial \Pi_L}{\partial \{u\}} = K\{u\} - \{Q\} + \left\{\tilde{Q}(\{u\})\right\} = 0. \qquad (8)$$

Вектор додаткових вузлових сил $\tilde{Q}$, обумовлений врахуванням нелінійних деформацій і нелійнійно залежних від вузлових переміщень, має наступний вигляд (9):

$$\left\{\tilde{Q}(\{u\})\right\} = \frac{\partial}{\partial \{u\}}\left(\{u\}^T \int\limits_V B^T D \tilde{\varepsilon} dV + \frac{1}{2}\int\limits_V \tilde{\varepsilon}^T D \tilde{\varepsilon} dV\right) =$$

$$= \int\limits_V B^T D \tilde{\varepsilon} dV + \int\limits_V \frac{\partial \tilde{\varepsilon}^T}{\partial \{u\}} D B dV \{u\} + \int\limits_V \frac{\partial \tilde{\varepsilon}^T}{\partial \{u\}} D \tilde{\varepsilon} dV. \qquad (9)$$

Об’єднання системи рівнянь (8) для множини скінченних елементів приводить до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь для повної скінчено-елементної моделі тіла (10):

$$[K][U] = [Q] - \left[\tilde{Q}([U])\right]. \qquad (10)$$

Для вирішення цієї нелінійної системи можна використати метод послідовного завантаження, який зводиться до наступного алгоритму [11–12].

Крок 1. Будується матриця жорсткості K і вектор вузлових сил Q. Враховуємо, що i=0, $\tilde{Q} = 0$ із вирішення лінійної системи знаходимо вузлові переміщення U_0.

Крок 2. i=i+1. На i-й ітерації використовуючи (10), вираховуємо $\tilde{Q}_i$ і його суму з Q: $P_i = \tilde{Q}_i + Q$.

Крок 3. Вирішується система лінійних рівнянь (11):

$$KU_i = P_i. \tag{11}$$

Крок 4. Перевірка умови збіжності ітераційного процесу де ε – мале число та U_i – максимальний по модулю вектор. Якщо збіжність не досягнута, то остання умова не виконується, то виконується перехід до *кроку 2*, в противному випадку до *кроку 5*.

Крок 5. Виконується обчислення деформацій і напружень кожного скінченного елемента на основі вектора U_i, який є наближеним вирішенням нелінійної системи (10).

В загальному підсумку, вирішення нелінійної системи зводиться до вирішенню послідовності лінійних систем. Відмітимо, що при послідовних ітераціях змінюється лише права частина системи рівнянь, що дозволяє факторизувати матрицю жорсткості тільки один раз [13–14].

Чисельне дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації стійкості оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі з урахуванням геометричної нелінійності. Дослідження з урахуванням геометричної нелінійності відбувається у програмному комплексі Femap with Nastran за рахунок ітераційного завантаження.

На рис. 1 зображена скінчено-елементна модель. Скінченні елементи **plate** – 7200 шт. Вузлів 3721 – штук. З'єднання з диском землі – жорстке защемлення. Матеріал сталь С275. Товщина оболонки 30 мм.

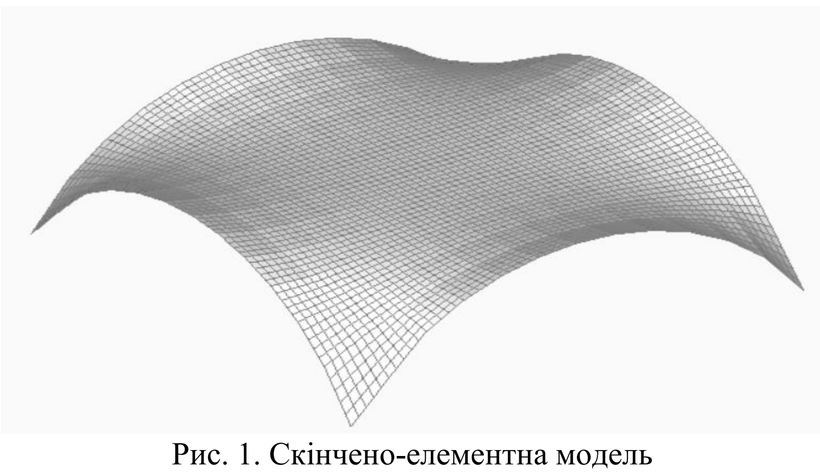

Рис. 1. Скінчено-елементна модель

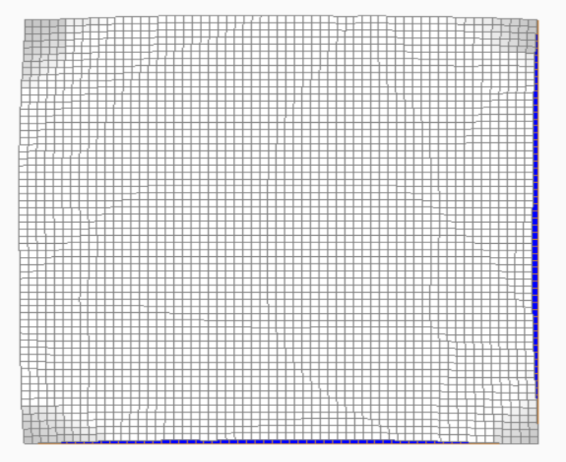

Рис. 2. Перша форма втрата стійкості.
Eigenvalue 1 -2,89

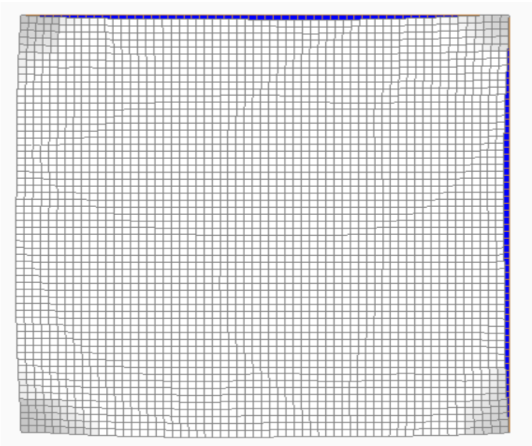

Рис. 3. Друга форма втрата стійкості.
Eigenvalue 2 -3.201

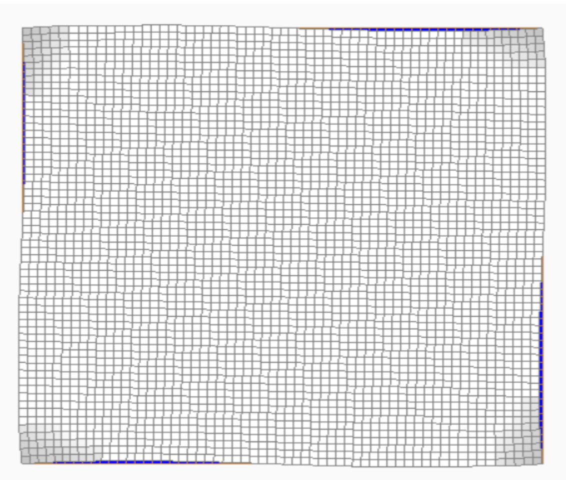

Рис. 4. Третя форма втрата стійкості.
Eigenvalue 3 -3.24

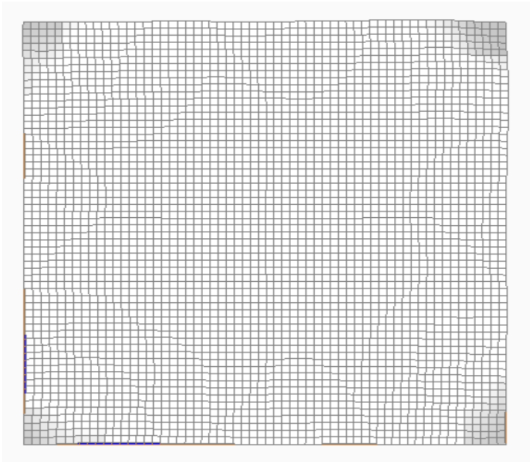

Рис. 7. Шоста форма втрата стійкості.
Eigenvalue 6 -4.36

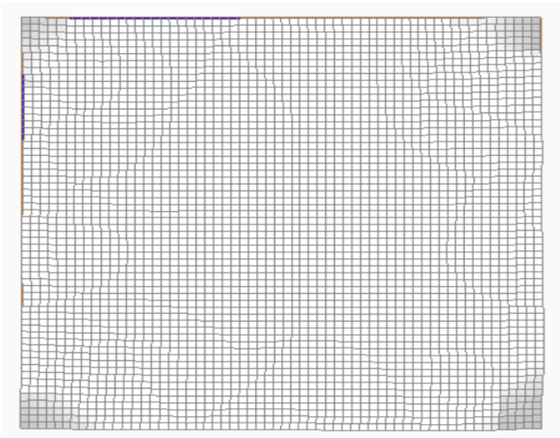

Рис. 8. Сьома форма втрата стійкості.
Eigenvalue 7 -4.74

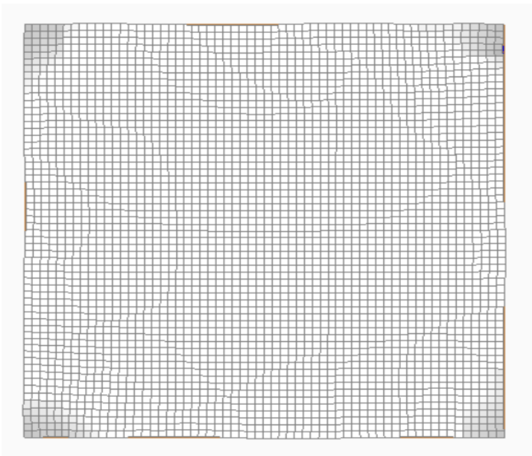

Рис. 9. Восьма форма втрата стійкості.
Eigenvalue 8 -5.15

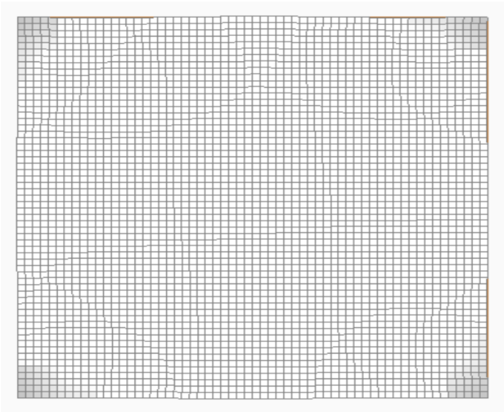

Рис. 5. Четверта форма втрата стійкості.
Eigenvalue 4 -3.87

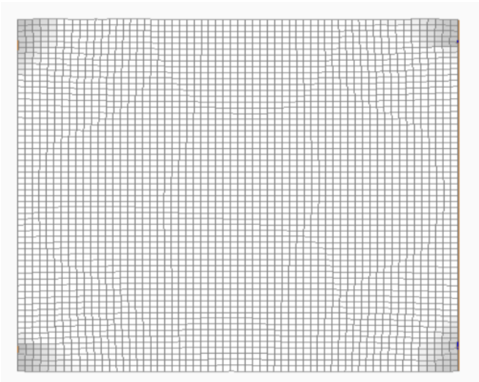

Рис. 6. П’ята форма втрата стійкості.
Eigenvalue 5 -4.18

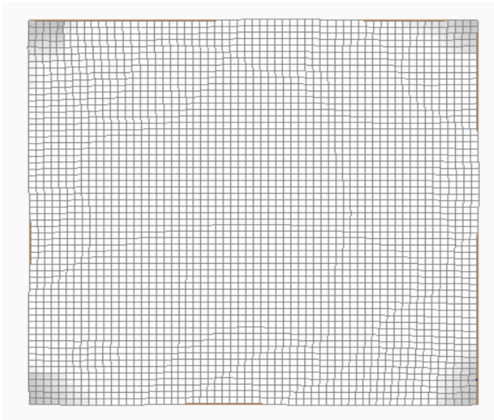

Рис. 10. Дев’ята форма втрата стійкості.
Eigenvalue 9 5.41

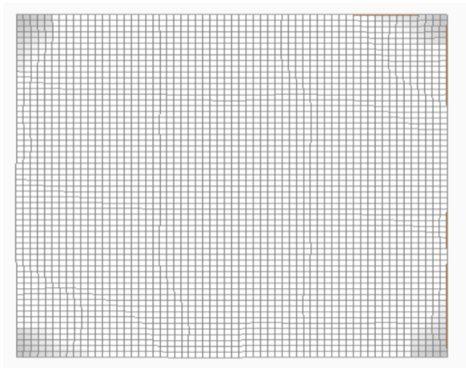

Рис. 11. Десята форма втрата стійкості.
Eigenvalue 10 5.63

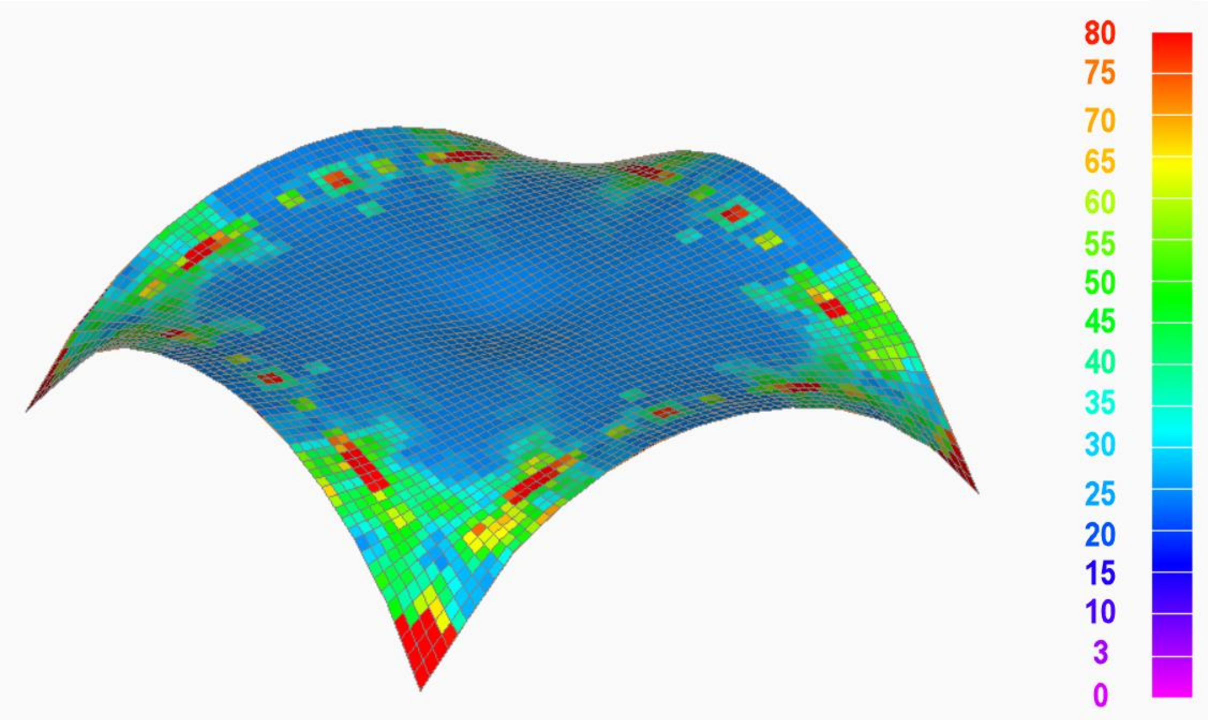

Рис. 12. Розподілення товщини після оптимізації від 80 до 3 мм

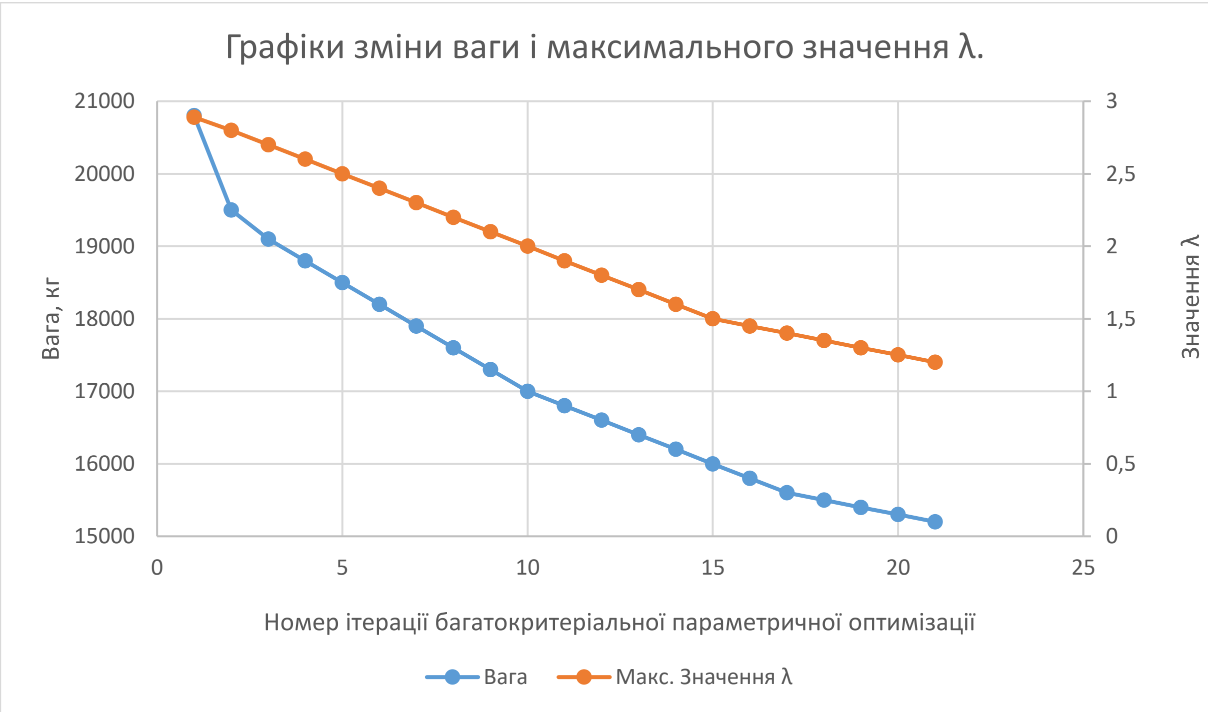

Рис. 13. Графік зміни цільових функцій вага конструкції і параметр стійкості λ по циклам оптимізації

Результати дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації стійкості оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі з урахуванням геометричної нелінійності. Було проведено чисельне дослідження багатокритеріальної параметричної оптимізації стійкості оболонки мінімальної поверхні з урахуванням геометричної нелінійності за допомогою методу скінченних елементів. Було знайдено 10 форм втрати стійкості рис. 2 – 11 на яких відображається енергія деформації **Eigenvalue** за значеннями від 2.89 до 5.63. При товщині оболонки мінімальної поверхні 25 мм стійкість достатня.

У чисельному дослідженні багатокритеріальної параметричної оптимізації стійкості за рахунок геометричної нелінійності вдалося зменшити товщину оболонки на 28,56% за рахунок врахування дійсних переміщень на кожному кроці перевірки стійкості. При цьому коефіцієнт стійкості λ=1, рис. 13. Після оптимізації розподілення товщини відбувається від 3 до 80 мм.

Зовнішнє навантаженням задавалося комбінацією термосиловими зусиллями з певними коефіцієнтами запасу згідно будівельних норм України. Це прикладне дослідження є важливо для будівельної і прикладної механіки, яке дозволяє зробити підґрунтя для подальших досліджень.

У подальшому є можливість аналізувати результати оптимізації оболонки мінімальної поверхні на квадратному плані при різних цільових функціях та обрати по якому типу оптимізації проектувати конструкції згідно будівельних норма України. Дане чисельне дослідження відображає параметри оболонки по мінімальній товщині, коли оболонка не втрачає стійкість.

Література

1. *Герасимов Е. Н., Почтман Ю. М., Скалозуб В. В.* Многокритериальная оптимизация конструкций. Киев ; Донецк : Вища шк., 1985. 134 с.
2. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация : пер. с англ. Москва : Мир, 1985. 509 с.
3. Ігнатишин М. І. Механіко-математичне моделювання елементів мостових конструкцій (опора, балка, плита) : монографія. Мукачево : РВВ МДУ, 2017. 172 с.
4. *Іванченко Г. М., Кошевий О. О.* Чисельне дослідження параметричної оптимізації вимушених частот коливань оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі при термосиловому навантаженні. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2022. Вип. 102. С. 67–83.
5. *Іванченко Г. М., Кошевий О. О., Жупаненко І. В.* Параметрична оптимізація вимушених частот коливання оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі при термосиловому навантаженні. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2022. № 50 (1). С. 22–34.
6. *Іванченко Г. М., Кошевий О. О., Кошевий О. П.* Чисельна реалізація багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної

поверхні на квадратному контурі при термосиловому навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. Вип. 109. С. 50–65.
7. *Іванченко Г. М., Кошевий О. О.* Параметрична оптимізація вимушених частот коливання двозв'язної конусної оболонки мінімальної поверхні при термосиловому навантаженні. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2022. Вип. 103. С. 67–81.
8. *Кошевий О. О.* Оптимальне проектування циліндричних резервуарів з жорсткими оболонками покриття. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2019. Вип. 103. С. 253–265.
9. *Кошевий О. О.* Оптимізація стального звареного резервуару при обмеженні: напружень, переміщень, власних частот коливання. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2018. Вип. 3. С. 34–50.
10. *Кошевий О.О., Кошева І.С.* Багатокритеріальна параметрична оптимізації в парі цільових функцій: вага і переміщення оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі при термосиловому навантажені. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2022. № 49 (1). С. 66–78.
11. *Кошевий О. П., Кошевий О. О.* Чисельне дослідження власних коливань розтягнутих оболонок, утворених мінімальними поверхнями. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. Вип. 55. С. 215–227.
12. *Кошевий О. П., Кошевий О. О*. Власні коливання оболонок мінімальних поверхонь на круглому та квадратному контурі. *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вип. 59. С. 234–244.
13. *Кошевий О. О., Кошевий О. П., Григор'єва Л. О.* Чисельна реалізація багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні на прямокутному контурі при термосиловому навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2022. Вип. 108. С. 309–324.
14. *Кривошапко С. В., Иванов В. Н., Халаби С. М*. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек. Москва : Наука, 2006. 544 с.

References

1. *Herasymov, E. N., Pochtman, Yu. M., & Skalozub, V. V.* (1985). *Mnohokryteryalnaia optymyzatsyia konstruktsyi* [Multicriteria optimization of structures]. Vyshcha Shkola.
2. *Gill, P. E., Murray, W., & Wright, M. H.* (1985). Prakticheskaya optimizatsiya [Practical optimization]. Mir.
3. *Ihnatyshyn, M. I.* (2017). Mekhaniko-matematychne modeliuvannia elementiv mostovykh konstruktsii (opora, balka, plyta) [Mechanical and mathematical modeling of bridge structure elements (support, beam, plate)] (Monograph). RVV MDU.
4. *Ivanchenko, H. M., & Koshevyi, O. O.* (2022). Chyselne doslidzhennia parametrychnoi optymizatsii vymushenykh chastot kolyvan obolonky

minimalnoi poverkhni na kvadratnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni [Numerical study of parametric optimization of forced vibration frequencies of a minimal surface shell on a square contour under thermal and force loading]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, (102), 67–83.
5. *Ivanchenko, H. M., Koshevyi, O. O., & Zhupanenko, I. V.* (2022). Parametrychna optymizatsiia vymushenykh chastot kolyvannia obolonky minimalnoi poverkhni na priamokutnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni [Parametric optimization of forced vibration frequencies of a minimal surface shell on a rectangular contour under thermal and force loading]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, *50*(1), 22–34.
6. *Ivanchenko, H. M., Koshevyi, O. O., & Koshevyi, O. P.* (2022). Chyselna realizatsiia bahatokryterialnoi parametrychnoi optymizatsii obolonky minimalnoi poverkhni na kvadratnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni [Numerical realization of multicriteria parametric optimization of a minimal surface shell on a square contour under thermal and force loading]. *Opir materialiv i teoriia sporud*, (109), 50–65.
7. *Ivanchenko, H. M., & Koshevyi, O. O.* (2022). Parametrychna optymizatsiia vymushenykh chastot kolyvannia dvozv'iaznoi konusnoi obolonky minimalnoi poverkhni pry termosylovomu navantazhenni [Parametric optimization of forced vibration frequencies of a doubly connected conical minimal surface shell under thermal and force loading]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, (103), 67–81.
8. *Koshevyi, O. O.* (2019). Optymalne proektuvannia tsylindrychnykh rezervuariv z zhorstkymy obolonkamy pokryttia [Optimal design of cylindrical tanks with rigid cover shells]. *Opir materialiv i teoriia sporud*, (103), 253–265.
9. *Koshevyi, O. O.* (2018). Optymizatsiia stalnoho zvarenoho rezervuaru pry obmezhenni: napruzhen, peremishchen, vlasnykh chastot kolyvannia [Optimization of a steel welded tank under constraints: stresses, displacements, natural vibration frequencies]. *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, (3), 34–50.
10. *Kosheviy O.O., Kosheva I.S.* (2022) Bahatokryterialna parametrychna optymizatsii v pari tsilovykh funktsii: vaha i peremishchennia obolonky minimalnoi poverkhni na priamokutnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni. (Multicriterial parametric optimization in a pair of target functions: weight and movement of the shell minimum surface on the straight). *Ways to increase the efficiency of construction in the conditions in the formation of market relations*. 2022 No. 49(1), 66–78.
11. *Koshevyi O.P. Koshevyi O.O.* (2015) Chysel′ne doslidzhennya vlasnykh kolyvan′ roztyahnutykh obolonok utvorenykh minimal′nymy poverkhnyamy. (Numerical study of natural oscillations of stretched shells formed by minimal surfaces). *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*. Kyyiv : KNUBA. Vyp. 55, 215–227.

12. *Koshevyi O.P. Koshevyi O.O.* (2016) Vlasni kolyvannya obolonok minimal′nykh poverkhon′ na kruhlomu ta kvadratnomu konturi. [Own oscillations of shells of minimal surfaces on a round and square contour]. *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*. Kyyiv : KNUBA. Vyp. 59, 234–244.
13. *Koshevyi, O. O., Koshevyi, O. P., & Hryhorieva, L. O.* (2021). Chyselna realizatsiia bahatokryterialnoi parametrychnoi optymizatsii obolonky minimalnoi poverkhni na priamokutnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni [Numerical implementation of multicriteria parametric optimization of a minimal surface shell on a rectangular contour under thermal and force loading]. *Opir materialiv i teoriia sporud*, (108), 309–324.14.
14. *Krivoshapko, S. V., Ivanov, V. N., & Khalabi, S. M.* (2006). *Analiticheskie poverkhnosti: materialy po geometrii 500 poverkhnostey i informatsiya k raschetu na prochnost tonkikh obolochek* [Analytical surfaces: materials on the geometry of 500 surfaces and information for the strength analysis of thin shells]. Nauka.

Ph.D., assistant Professor **Kosheviy O.O.,**
a380982070137@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1903-2905
Kyiv National University of Construction and Architecture» (KNUCA)

MULTICRITERIA PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE STABILITY OF THE MINIMUM SURFACE SHELL ON A SQUARE PLAN UNDER THERMOSTRESS LOADING, TAKING INTO ACCOUNT GEO METRIC NONLINEARITY

Optimal design of spatial structures' stability has hardly been studied in construction and applied mechanics. Loss of shell stability is characterized by the coefficient λ and forms of stability loss; as a rule, the first form of stability loss is the main one.

From the scientific field of optimal design, it is known that research is most often conducted on target functions: weight, volume, stress, and construction cost. Optimal design of the stability of spatial structures is a new direction in inverse problems in construction and applied mechanics.

The combination of optimizing the weight of a spatial structure and its stability is quite interesting from the point of view of building structures.

The type of tasks related to optimal stability design could not be developed earlier, but at the end of the 20th century, with the advent of powerful computer technology capable of solving large systems of equations, it became possible to perform numerical calculations in structural mechanics, which in turn revealed this new promising type of task.

Various types of loads can be used: static, thermal, seismic, dynamic, impact, electromagnetic, and others. This scientific article uses a thermo-mechanical load, which combines static influences and thermal load.

An important element is geometric nonlinearity. Closely related to geometric nonlinearity is the problem of stability of building structures as a whole. A deforming body is in a stable state of equilibrium if there is a small change in the configuration of the geometry.

The article reveals theoretical information on calculating the stability of thin shells, taking into account geometric nonlinearity.

The results of the study of multi-criteria parametric optimization of the stability of a minimal surface shell on a square contour, taking into account geometric nonlinearity. It was possible to reduce the target function of the weight of the minimal surface shell with a coefficient λ=1, which corresponds to the minimum stability parameter.

In the future, it will be possible to analyze the results of optimizing the minimum surface shell on a square plan for different objective functions and select the type of optimization for designing structures in accordance with Ukrainian building codes.

Keywords: minimal surface shell; shell strength; shell stability; geometric nonlinearity; thermo-mechanical loading; finite element method; Mises stress; MSE; minimal surface shell thickness; gradient descent method; finite element method.