

УДК 539.3

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ СТАТИЧНИХ ВПЛИВАХ

О.П. Кошевий,

канд. техн. наук, доцент

О.О. Кошевий,

д-р філософії (Ph.D.), доцент

М.О. Янсонс,

канд. техн. наук

М.М. Йовко,

аспірант

*Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ. 03680*

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.328-338

Оптимізація конструкцій у сучасному проектуванні є важливим етапом при конструюванні конструкцій, зокрема для тонкостінних циліндричних оболонок, які широко використовуються в машинобудуванні та будівництві. Оптимізація дозволяє знаходити ефективні конструктивні рішення, що забезпечують мінімізацію ваги конструкції при збереженні її міцності та жорсткості.

Основна мета дослідження полягає у проведенні параметричної оптимізації циліндричної оболонки для мінімізації ваги, яка використовується для зберігання рідин, з урахуванням експлуатаційних навантажень, таких як тиск рідини, власна вага та сила вітру. Для цього було використано метод скінченних елементів, який дозволяє моделювати поведінку конструкції під дією зовнішніх сил.

Результати дослідження показали, що параметрична оптимізація дозволяє знаходити компромісні рішення, які задовольняють вимогам до міцності та мінімізують вагу конструкції. Це робить оптимізацію не лише теоретичним інструментом, а й практичною необхідністю для покращення конкурентоспроможності інженерних рішень.

Ключові слова: стійкість оболонки, параметрична оптимізація, метод скінченних елементів, тонкостінна циліндрична оболонка, напруження по Мізесу, переміщення, міцність та переміщення в конструкціях, товщина циліндричної оболонки.

Вступ. Оптимізація конструкцій і прийняття ефективних конструктивних рішень є не лише одним із ключових етапів в сучасному проектуванні, а й необхідністю, ознакою доцільності та актуальності проектів в машинобудуванні та будівництві. Оптимізація конструкцій дає змогу вираховувати найефективніші з доступних рішень, які в свою чергу забезпечують зведення до мінімуму ваги конструкції, при збереженні в рамках норми її основних експлуатаційних характеристик - жорсткості та міцності.

Оптимізація стає вкрай корисним і необхідним інструментом для досягнення конкурентних рішень в умовах, коли вимоги до надійності та ефективності конструкції постійно зростають, а ресурси обмежені умовами суспільства та промисловості. Особливо необхідно відмітити важливість ролі оптимізації в проектуванні тонкостінних конструкцій, таких як циліндричні оболонки, які широко використовуються в багатьох галузях промисловості. Конструкції на базі тонкостінних циліндрів застосовуються в будівництві при створенні резервуарів для рідини, наприклад - палива, трубопроводів, елементів мостових споруд. В машинобудуванні з використанням циліндричних оболонок проектуються та виробляються корпуси ракет та літаків, морських суден та підводних човнів та інших складних інженерно-технічних систем. У всіх перелічених випадках вкрай важливо знизити до допустимого мінімуму вагу конструкції таким чином, щоб при цьому збереглась її здатність витримувати експлуатаційно зумовлені зовнішні навантаження.

Варто звернути увагу, що оптимізація є інструментом широкого функціоналу, яка дозволяє враховувати різні фактори, властиві складним, комплексним конструкціям. До таких факторів можна наприклад віднести термосилові навантаження, динамічні впливи та геометричну нелінійність.

Робота з геометричною нелінійністю є особливо важливою саме для тонкостінних конструкцій, таких як циліндричні оболонки. Нелінійність виникає через великі переміщення або деформації, які не можуть бути точно описані лінійними моделями. Відповідно коректне врахування цих ефектів дає змогу отримати більш точні результати та уникнути помилок при проектуванні.

Використання сучасних методів чисельного моделювання, дозволяє знайти оптимальні параметри конструкції, забезпечуючи таким чином ефективну роботу конструкції в реальних експлуатаційних умовах. Звідси можна зробити висновок, що оптимізація конструкції - це не лише потужний теоретичний інструмент, а й практична необхідність, яку варто використовувати та дотримуватись задля покращення конкурентоспроможності новітніх інженерно конструкторських рішень.

У залежності від поставленої мети, можуть бути використані різні підходи до оптимізації, найбільш поширеними серед яких є наступні.

Геометрична оптимізація, яка ґрунтується на зміні геометричних характеристик конструкції - форми, розміру або інженерної схеми. В основному метод використовується для урівноваження напружень у елементах конструкції або поліпшення аеродинамічності.

Підхід, який має основною метою визначення оптимального розподілу матеріалу називається топологічною оптимізацією. Вона дає змогу знаходити ефективну форму конструкції, з урахуванням обмежень по навантаженням і матеріальній складовій, яка часто зводиться до ваги матеріалу.

Серед підходів до проектування конструкцій потрібно відмітити саме параметричну оптимізацією, яка є однією з найефективніших, оскільки вона зосереджена на знаходженні оптимальних значень для конкретних ключових параметрів конструкції - товщина, діаметр, висота і т.д.

Теоретичні відомості параметричної оптимізації циліндричних оболонок [1]. Однією зі значущих переваг параметричного методу є його універсальність, так як метод здатен давати адекватний результат для задач з різними цільовими функціями (мінімальна вага, максимальна міцність і т.д.) а також цілим переліком обмежень (наприклад допустимі напруження в елементах, переміщення вузлів). Завдяки цій властивості можна знаходити компромісні конструкторські рішення, які будуть задовольняти конкретному переліку вимог до конструкції.

Ще однією перевагою обраного методу є можливість використання сучасних програмних комплексів чисельного моделювання, таких як ANSYS, Abaqus або Femap with NX Nastran. Ці інструменти дозволяють створювати моделі конструкцій, задавати необхідні зовнішні впливи та автоматизувати процес оптимізації, забезпечуючи високу точність результатів за порівняльно короткий час.

Параметрична оптимізація основоположно спирається на математичні моделі, завдяки яким процес визначення оптимальних параметрів конструкції можна чітко розділити на етапи. Перший етап - визначення факторів - варто розділити на два підпункти, адже до кожного з них принципово різний підхід та обґрунтування.

Цільова функція - властивість, яку необхідно мінімізувати або привести до допустимого максимуму. Розповсюджена практика - обирати цільовою функцією мінімізацію ваги при збереженні необхідної міцності

$$f(x) \rightarrow \min \text{ або } f(x) \rightarrow \max, \quad (1)$$

де $f(x)$ - цільова функція, а $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - вектор параметрів (товщина стінки, висота і т.п.).

Обмеження конструкції - це умови, які повинні бути дотримані, щоб знайдене рішення вважалось допустимим і адекватним. Поширеним прикладом накладених обмежень є максимальні допустимі напруження, переміщення або частота коливань.

$$g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

де $g_i(x)$ - функції обмежень.

Другий етап параметричної оптимізації - вибір і реалізація математичних методів. Для вирішення задач оптимізації можуть бути використані різні методи і правильний вибір і коректна реалізація підходу - критично важливі кроки до правильного вирішення задачі.

Одним з інструментів параметричної оптимізації є метод градієнтного спуску, який використовується для мінімізації цільової функції шляхом ітераційного покращення параметрів. Ідея методу полягає в тому, щоб рухатись в напрямку, протилежному до градієнту функції, так як цей градієнт відображає напрям найшвидшого зростання.

Градієнт цільової функції $\nabla f(x)$ обчислюється для поточних значень параметрів. Градієнт це вектор, який складається з частинних похідних функції за кожним параметром:

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right). \quad (3)$$

Параметри оновлюються за формулою:

$$x_{k+1} = x_k - \alpha \nabla f(x_k), \quad (4)$$

де x_k - поточні значення параметрів на k -й ітерації, α - крок оптимізації, $\nabla f(x_k)$ - градієнт цільової функції.

Процес повторюється до досягнення мінімуму цільової функції або виконання умови зупинки, наприклад досягнення заданої точності або максимальної кількості ітерацій.

До основних переваг такого методу варто віднести помірну простоту його реалізації, ефективність роботи при вирішенні задач з великою кількістю змінних та досить швидко дію для гладких функцій.

Серед недоліків же потрібно зазначити високу чутливість до вибору початкових параметрів, ймовірність потрапити у локальний мінімум та необхідність вибору доречного кроку, адже занадто маленький крок призведе до надто повільної збіжності, а надто великий - до розбіжності.

Методи генетичної (спадкової) оптимізації - еволюційні алгоритми, які імітують природний відбір і дозволяють знаходити рішення в задачах з багатьма локальними обмеженнями. З розвитком технологій штучного інтелекту в науці, метод отримав повторну увагу з боку вчених математиків, але наразі використання нових технологій у реалізації цих алгоритмів дуже обмежене і знаходиться на стадії прототипування.

Цей метод також оперує поняттям цільової функції, яка обчислюється для кожної особини і яка визначає її пристосованість. Цей перелік рішень проходить процес селекції - вибір найкращих особин для створення наступного покоління (турнірна селекція або за принципом рулетки), процес зхрещення, тобто обміну частин хромосом між двома рішеннями для створення нових рішень, та процесу мутації - випадкової зміни параметрів хромосоми для підтримки різноманітності популяції. Результатом цих процесів є нове покоління рішень, які використовуються в наступній ітерації методу.

Метод скінченних елементів - це метод, що дозволяє змоделювати поведінку конструкції під дією навантажень, шляхом розбиття її на скінченні елементи. Широко застосовується при аналізі напружень, деформацій та інших конструктивних характеристик.

При реалізації методу скінченних елементів, конструкція в першу чергу повинна бути дискретизована, тобто розбита на скінченні елементи. Для двовимірних моделей це можуть бути трикутники або чотирикутники, а для тривимірних - тетраедри або гексаедри. Кожен елемент описується набором вузлів, які з'єднані між собою.

Для кожного елемента формується матриця жорсткості K_e , яка описує його поведінку під дією навантажень і розраховується за формулою:

$$K_e = \int_{V_e} B^T D B dV, \quad (5)$$

де B - матриця, що пов'язує переміщення вузлів і деформацію, D - матриця пружних властивостей матеріалу, V_e - об'єм елемента.

Після цього матриці жорсткості всіх елементів об'єднуються в глобальну матрицю жорсткості K , яка описує поведінку всієї конструкції:

$$K = \sum_{e=1}^N K_e, \quad (6)$$

де N - кількість елементів.

Система рівнянь для знаходження переміщень u має вигляд:

$$Ku = F, \quad (7)$$

де K - глобальна матриця жорсткості, u - вектор переміщень вузлів, F - вектор зовнішніх сил.

Після знаходження переміщень, напруження і деформація обчислюються за формулами:

$$\varepsilon = Bu, \quad \sigma = D. \quad (8)$$

Метод скінченних елементів дає високу точність результатів, надає можливість аналізу складних геометрій та дозволяє враховувати різні типи навантажень. Незважаючи на те, що метод вимагає великих витрат обчислювальних ресурсів та ретельний вибір сітки елементів, він все ще може вважатись одним з ефективних.

Необхідно відмітити, що оптимізація, це ітеративний процес, тобто алгоритм розрахунку багаторазово повторюється таким чином, що вихідні дані попереднього циклу є вхідними даними для наступного, завдяки чому, збільшивши кількість ітерацій можна досягти задовільного наближення до встановленої цільової функції.

Об'єкт дослідження. Циліндричною оболонкою називають тонкостінну конструкцію у формі циліндра, яка активно використовується для побудови різноманітних інженерних систем. Основною її особливістю є її геометричні характеристики - така конструкція складається з циліндричної поверхні, яка обрамлена двома торцями плоскої або криволінійної форми. Така конструкція вважається тонкостінною, так як її радіус значно перевищує товщину її стінок, що має свої переваги, але й робить таку інженерну споруду чутливою до зовнішніх впливів, таких як температура, тиск, та інші механічні навантаження.

Конструкції такого типу використовуються в різних галузях промисловості і виробництва, так як вони наділені ефективною властивістю мати порівняно високу міцність, при цьому будучи нескладними у виробництві та експлуатації. Таким чином перспектива використання таких конструкцій дає змогу у цілому спектрі інженерних задач отримати задовільні фізико-технічні характеристики, використовуючи помірну кількість ресурсів.

В цьому дослідженні увагу зосереджено на оболонках, які слугують для зберігання рідин, які узагальнено називають резервуарами, які широко використовуються в будівництві та енергетиці для зберігання і транспортування палива, води, газу тощо.

Залежно від експлуатаційних умов і призначення, резервуари можна поділити на такі основні типи:

- Наземні резервуари, які використовуються на автозаправних станціях, промислових об'єктах (наприклад нафто переробних заводах), складах палива. Такі резервуари зручні в установці та обслуговуванні, але також вони потребують значних територій для встановлення і є більш чутливими до зовнішніх впливів.

- Підземні резервуари використовуються на об'єктах підвищеної безпеки, таких як військові бази, аеродроми, промислові об'єкти в сейсмоактивних зонах, або в регіонах, де наземне розміщення інфраструктурно ускладнене або неможливе. Перевагою відповідно буде підвищена захищеність таких резервуарів, а складність в обслуговуванні і висока вартість монтажу є основними недоліками.

- Мобільні резервуари (цистернові вагони потягів або причеми вантажівок) використовуються для транспортування рідини, що потребує особливої обережності, так як значна частина рідин промислового використання є легкозаймистими або небезпечними для довкілля у разі витоку. Об'єм таких резервуарів значно менший, що можна вважати недоліком, але також це найкращий з наявних способів перевезення рідини, який не потребує спеціальних інфраструктурних рішень.

Для проведення дослідження стійкості було обрано циліндричну оболонку з радіусом 5 м, висотою циліндра 6 м, товщиною стінки 10 мм. Матеріал конструкції - сталь марки С275, з властивостями - модуль пружності 240 МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3. Такі геометричні і фізичні параметри було обрано на основі реально існуючих конструкцій і з урахуванням експлуатаційних умов паливних резервуарів у промисловості.

Чисельне дослідження тонкостінної циліндричної оболонки під дією комбінації сил [9-11]. Розрахункова модель циліндричної оболонки була побудована з використанням методу скінченних елементів. Циліндрична оболонка була розбита на скінченні елементи розміром

25×25 см. Необхідно зазначити, що обраний розмір дещо обмежує точність аналізу характеристик моделі, але не є критично великим, завдяки чому похибка залишається в межах норми, а модель при цьому не перевантажена. Загальна кількість скінченних елементів типу **plate** - 3456 штук.

Загальна кількість вузлів у моделі - 3600 штук. Вузли є точками, у яких визначаються переміщення, напруження та інші параметри конструкції. Для побудови моделі був обраний квадратний тип сітки, який забезпечує рівномірний розподіл елементів по поверхні оболонки, завдяки чому виключається можливість некоректного прикладення навантажень, так як площа усіх скінченних елементів однакова. Для закріплення моделі було використане жорстке з'єднання нижнього контуру оболонки, що імітує її з'єднання з диском землі.

На модель було накладено наступні навантаження:

- Тиск рідини бул прикладено від центру моделі у напрямку стінок таким чином, що була врахована різниця у тиску на різній висоті. До кожного скінченного елемента, площею $0,0625 \text{ м}^2$, що знаходиться на відстані до дна моделі, було розраховано тиск 55 кПа, який зменшувався на 10 кожен 1 метр висоти моделі за методом сходинок, таким чином що верхні скінченні елементи знаходяться під дією тиску рідини 5 кПа.

- Власні навантаження величиною $9,81 \text{ м/с}^2$, вздовж осі Z у від'ємному напрямку.

- Сила вітру величиною 370 Па/м^2 , яку було рівномірно прикладено протилежно до осі X .

Комбінація цих сил, визначена формулою (1) відповідає умовам експлуатації паливного резервуару в умовах типового для м. Києва вітрового впливу та умови повної наповненості резервуару рідиною

$$\text{комбінація} = 1.05 * [\text{власна вага}] + 1 * [\text{тиск рідини}] + 1.14 * [\text{сила вітру}]. \quad (9)$$

Для побудови моделі було використано програмний комплекс FEMAP, а для чисельного дослідження стійкості моделі було використано рушій NX Nastran, які в інтеграції дозволяють реалізувати метод скінченних елементів з високою точністю.

Для проведення дослідження та оптимізації конструкції по міцності, цільовою функцією було обрано мінімізацію ваги конструкції, що за умови сталих радіусу та довжини оболонки зводиться до визначення єдиної змінної проектування - мінімізації товщини стінки. Було задане обмеження на кожен скінченний елемент по максимальним напруженням, які повинні бути в межах, допустимих для обраної марки сталі - 240 МПа.

За результатами статичного аналізу по міцності було визначено, що максимальні напруження в скінченному елементі доходять до 31,05 МПа, тобто конструкція має великий запас міцності і може бути оптимізована.

Після оптимізації, за результатом 10 ітерацій, як показано на графіку цільової функції, загальну вагу конструкції було зменшено з 13.75 т до 1.93 т. На рисунку 2 зображено максимальні напруження в скінченних елементах після оптимізації. Максимальні напруження дорівнюють 236 МПа, тобто в межах збереження міцності конструкції.

Для аналізу та оптимізації конструкції на власні коливання під дією комбінації сил цільовою функцією було обрано мінімізацію ваги, змінна проектування - товщина стінки, накладене обмеження - частота власних коливань першої форми для конструкції - 6 Гц.

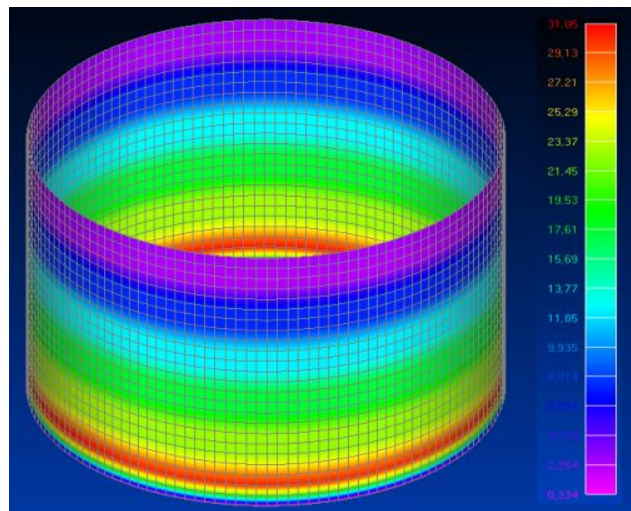


Рис. 1. Максимальні напруження по Мізесу при статичних впливах

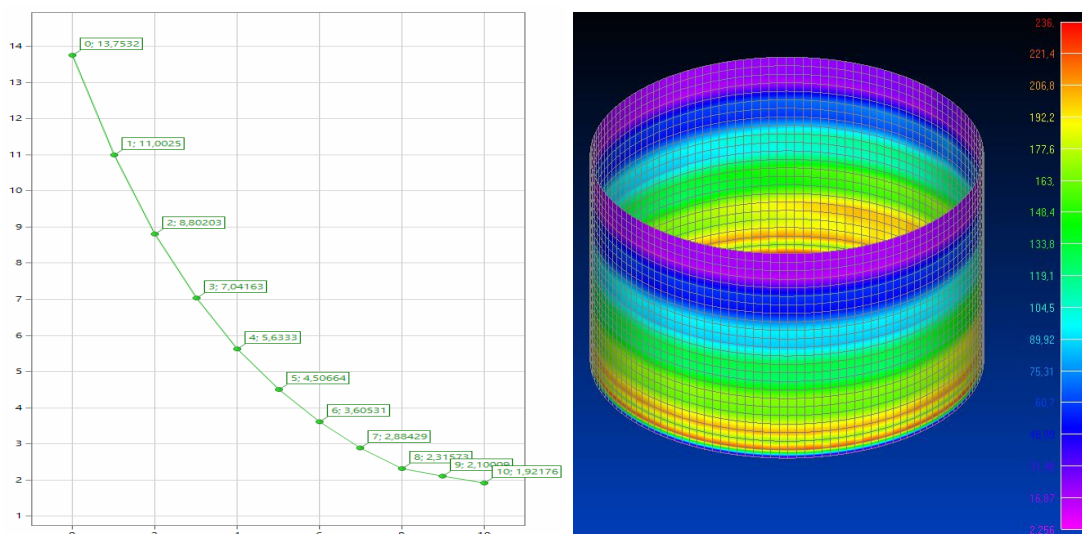


Рис. 2. Графік цільової функції оптимізації по вазі та максимальні напруження по Мізесу при стійкості після оптимізації

За результатом оптимізації було знайдено параметри конструкції, які під дією комбінації сил мають частоту власних коливань першої форми - 5.9 Гц, а вагу конструкції було зменшено з 14.8 т до 6.48 т.

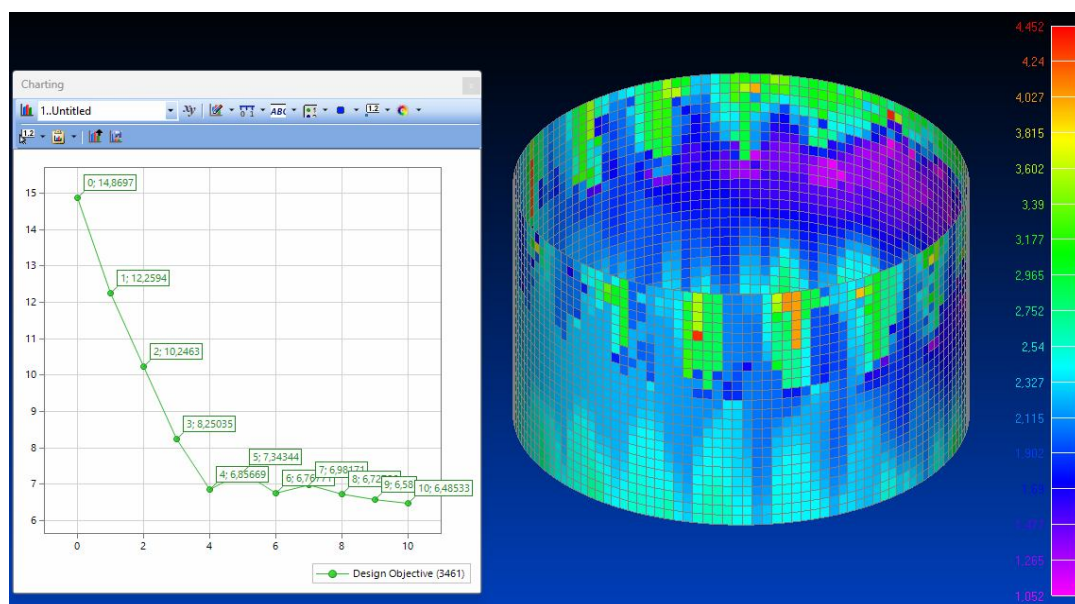


Рис. 3. Графік цільової функції параметричної оптимізації по власним коливанням і схема товщини стінок оптимізованої оболонки

Для оптимізації по переміщенням були задані наступні обмеження - переміщення скінченних елементів по осі X - 3 мм, переміщення по осі Y - 3 мм, переміщення по осі Z - 0,5; 0,5 мм. За результатами оптимізації було визначено схему конструкції в якій товщина скінченних елементів знаходиться в діапазоні 1.06 - 5 мм, вага конструкції була оптимізована з 14.8 т до 3.38 т, а переміщення скінченних елементів знаходяться в межах 2.67 мм.

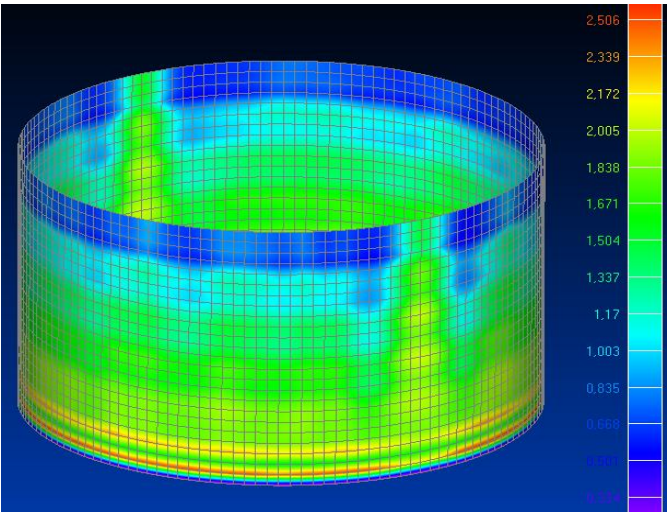


Рис. 4. Скінченно-елементна схема переміщень на моделі з урахуванням максимальних переміщень

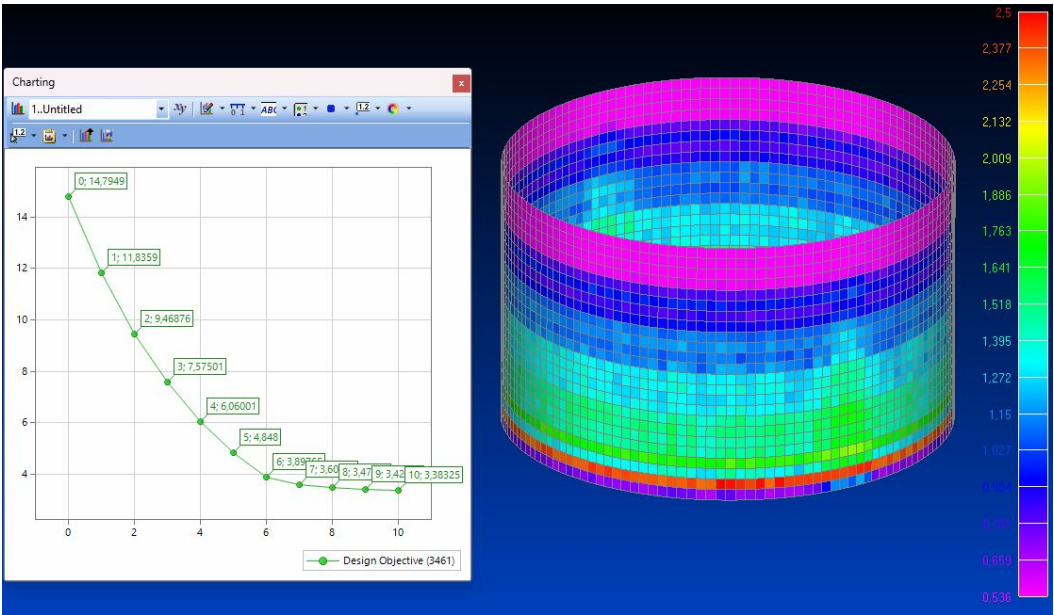


Рис. 5. Графік цільової функції та скінченно елементна схема товщин стінок оболонки після оптимізації по переміщенням

Висновки. Результати чисельного дослідження та параметричної оптимізації тонкостінної циліндричної оболонки при вирішенні різних інженерних задач наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Тип оптимізації	Вага, т	Максимальні напруження, МПа	Товщина стінок, мм
Вага і напруження	1,93	236	1,1-1,7
Вага і переміщення	3,38	115	1,1-5
Вага і частоти	6,48	2,87	2-9,1

Представлені результати чисельного дослідження показують, що параметрична оптимізація є потужним інструментом для вирішення задач оптимального проектування тонкостінних оболонок, яка дає задовільні результати, а знайдені схеми конструкції є оптимальними за вказаних обмежень і можуть бути використані в реальних експлуатаційних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 50-65.
2. Іванченко Г.М., Кошевий О.О., Кошевий О.П., Григор'єва Л.О. Чисельне дослідження параметричної оптимізації вимушених частот коливання оболонки мінімальної поверхні на трапецевидному контурі при термосиловому навантаженні // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 430-446.
3. Іванченко Г.М., Чевеєра П.П., Кушніренко М.Г., Козовенко А.М. Аналіз реакцій в елементах просторових схем при різних способах з'єднань // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2012. – Вип. 90. – С. 163-170.
4. Кошевий О.О. Оптимізація проектування циліндричних резервуарів з жорсткими оболонками покриття // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 103. – С. 253-265.
5. Кошевий О.О. Оптимізація сталюого звареного резервуару при обмеженні: напружень, переміщень, власних частот коливання. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: наук.-техн. збірник. К.: КНУБА, 2018. Вип.3. – С.34 – 50.
6. Гоцуляк Є.О., Кошевий О.П., Морсков Ю.А. Чисельне моделювання оболонок, утворених мінімальними поверхнями. // Прикладна геометрія та інженерна графіка: наук.-техн. збірник. К.: КНУБА, 2001. Вип. 69.- С.47-51.
7. Кошевий О.П. Кошевий О.О. Чисельне дослідження власних коливань розтягнутих оболонок утворених мінімальними поверхнями // Містобудування та територіальне планування, Вип. 55. – Київ, КНУБА, 2015. – с. 215-227.
8. Кошевий О.П. Кошевий О.О. Власні коливання оболонок мінімальних поверхонь на круглому та квадратному контурі // Містобудування та територіальне планування, Вип. 59. – Київ, КНУБА, 2016. – с. 234-244.
9. 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: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 108. – С. 309-324.
10. Кошевой А.П. Устойчивость пластин и оболочек сложной формы // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборник. – К.: КИСИ, 1991. – Вип. 59. – С. 65-71.
11. Кошевий О.О., Іванченко Г.М. Чисельне дослідження стійкості оболонки мінімальної поверхні на круглому плані з урахуванням геометричної нелінійності при термосиловому навантаженні // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2024. № 53. С. 39-48.
12. Кошевий О.О. Багатокритеріальна параметрична оптимізація переміщення і ваги оболонки мінімальної поверхні з прямокутним планом, яка складається з двох прямих ліній і двох півкіл при термосиловому навантаженні // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2023. № 52. С. 41-54.
13. Кошевий О.О. Багатокритеріальна параметрична оптимізація переміщення і ваги оболонки мінімальної поверхні на трапецевидному контурі при термосиловому навантаженні // Міжвідомчий науково-технічний збірник: “Прикладна геометрія і інженерна графіка”. 2023. №105. С. 134-150.
14. Кошевий О.О. Чисельне дослідження стійкості оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі при термосиловому навантаженні з урахуванням геометричної нелінійності // Міжвідомчий науково-технічний збірник: “Прикладна геометрія і інженерна графіка”. 2024. №106. С. 133-147.
15. Кошевий О.О., Іванченко Г.М., Затилюк Г.А. Багатокритеріальна параметрична оптимізація переміщення і ваги оболонки мінімальної поверхні на круглому контурі, що складається із двох похилих еліпсів при термосиловому навантаженні з урахуванням геометричної нелінійності // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 209-221.
16. Сахаров А.С., Кислоокий В.Н., Киричевский В.В., Альтенбах И., Габберт У., Данкерт Ю., Кенплер Х., Кочык З. Метод конечных элементов в механике твердых тел. // Издательство Вища школа. Головное издательство – Киев – 1982. – 480 с.
17. Bazenov V.A., Gaidachuk V.V., Koshevoy A.P. Stability of multiply connected ribbed shells and plates in a magnetic field. // Journal of Soviet Mathematics 66(6). –1993. – С. 2631-2636.
18. Cheung Y. K. The Finite Strip Method. Them. – Boca Raton. : CRC Press, 1997. – 416 p.
19. Guest J.K., Priest J., Belytschko T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions. // International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004. –61(2) – P.238–254.
20. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. — New York: John Wiley and Sons, 2011. - 772 p.
21. Lobo M.S., Vandenbeghe L., Boyd S. Applications of second-order cone programming. // Linear Algebra and its Applications. – 1998. – Vol. 284, no. 1. – P. 193–228.
22. Yonekura K., Kanno Y. Second-order cone programming with warm start for elastoplastic analysis with von mises yield criterion. // Optimization and Engineering. – 2012. – Vol. 13, no. 2. – P. 181–218.
23. Wasiutynski Z., Brandt A. The present state of knowledge in the field of. Optimum design of structures. // Appl. Mech. Rew. – 1963. Vol. 16 no. 5. – P. 341-350.

REFERENCES

1. *Ivanchenko H.M., Koshevyi O.O., Koshevyi O.P.* Chyselna realizatsiia bahatokryterialnoi parametrychnoi optymizatsii obolonky minimalnoi poverkhni na kvadratnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni (Numerical implementation of multicriteria parametric optimization of minimum surface shell on a square contour under thermoforce loading) // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 109. – P. 50-65.
2. *Ivanchenko H.M., Koshevyi O.O., Koshevyi O.P., Grigoryeva L.O.* Chyselne doslidzhennia parametrychnoi optymizatsii vymushenykh chastot kolyvannia obolonky minimalnoi poverkhni na trapetsevydnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni (Numerical study of the parametric optimization of the forced oscillation frequencies of the shell of a minimal surface on a trapezoidal contour under thermal and power loading) // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2023. – Issue 110. – P. 430-446.
3. *Ivanchenko H.M., Cheverda P.P., Kushnirenko M.H., Kozovenko A.M.* Analiz reaktsiy v elementakh prostorovykh skhem pry riznykh sposobakh z'yednan (Analysis of reactions in elements of spatial schemes with different methods of connections) // *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk*. – K.: KNUBA, 2012. – Vyp. 90. – P. 163-170.
4. *Koshevyi O.O.* Optymalne proektuvannya tsylindrychnykh rezervuariv z zhorstkymy obolonkami pokryttya. (Optimal design of cylindrical tanks with rigid coating shells) // *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk*. – K.: KNUBA, 2019. – № 103. – P. 253-265.
5. *Koshevyi O.O.* Optymizatsiya stalnoho zvarenoho rezervuaru pry obmezheni: napruzhen, peremishchen, vlasnykh chastot kolyvannia. (Optimization of steel welded tank with limitations: stresses, displacements, natural frequencies of oscillations). // *Budivelnitsi konstruktivni. Teoriya i praktyka: nauk.-tekhn. zbirnyk*. K.: KNUBA. 2018. №3. – P.34 – 50.
6. *Hotsulyak Ye.O., Koshevyi O.P., Morskov Yu.A.* Chyselne modelyuvannya obolonok, utvorenykh minimalnymy poverkhnyamy (Numerical modeling of shells formed by minimal surfaces). // *Prykladna heometriya ta inzhenerna hrafika: nauk.-tekhn. zbirnyk*. K.: KNUBA. 2001. № 69. – P.47-51.
7. *Koshevyi O.P., Koshevyi O.O.* Chyselne doslidzhennia vlasnykh kolyvan roztyahnutykh obolonok utvorenykh minimalnymy poverkhnyamy (Numerical study of natural oscillations of stretched shells formed by minimal surfaces) // *Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya*, № 55. – Kyiv, KNUBA, 2015. – P. 215-227.
8. *Koshevyi O.P., Koshevyi O.O.* Vlasni kolyvannia obolonok minimalnykh poverkhon na kruhlomu ta kvadratnomu konturi. (Own oscillations of shells of minimal surfaces on a round and square contour) // *Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya*, № 59. – Kyiv, KNUBA, 2016. – P. 234-244.
9. *Koshevyi O.O., Koshevyi O.P., Hryhoryeva L.O.* Chyselna realizatsiya bahatokryterialnoyi parametrychnoyi optymizatsiyi obolonky minimalnoyi poverkhni na pryamokutnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni (Numerical implementation of multi-criteria parametric optimization of minimum surface shell on a rectangular contour under thermoforce loading) // *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk*. – K.: KNUBA, 2021. – Vyp. 108. – S. 309-324.
10. *Koshevoy A.P.* Ustoychivost plastin i obolochek slozhnoy formi (Stability of plates and shells of complex shape) // *Soprotivleniye materialov i teoriya sooruzheniy: nauch.-tekhn. sbornik*. – K.: KISI, 1991. – Vip. 59. – P. 65-71.
11. *Ivanchenko, H., & Koshevyi, O. (2024).* Chyselne doslidzhennia stiihosti obolonky minimalnoi poverkhni na kruhlomu plani z urakhuvanniam heometrychnoi nelineinosti pry termosylovomu navantazhenni (Numerical study of the stability of the shell of a minimal surface on a circular plane taking into account geometric nonlinearity under thermal force loading) // *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*. 2024. № 53. S. 39-48.
12. *Koshevyi, O. (2023).* Bahatokryterialna parametrychna optymizatsiya peremishchennia i vahy obolonky minimalnoi poverkhni z priamokutnym planom, yaka skladaetsia z dvokh priamykh liniy i dvokh pivkil pry termosylovomu navantazhenni (Multi-criteria parametric optimization of the displacement and weight of a minimal surface shell with a rectangular plan consisting of two straight lines and two semicircles under thermal force loading) // *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*. 2023. № 52. S. 41-54.
13. *Kosheviy, O.* Bahatokryterialna parametrychna optymizatsiia peremishchennia i vahy obolonky minimalnoi poverkhni na trapetsevydnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni (Multi-criteria parametric optimization of the displacement and weight of the shell of a minimal surface on a trapezoidal contour under thermal force loading) // *Mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk: "Prykladna heometriia i inzhenerna hrafika"*. 2023. №105. S. 134-150.
14. *Kosheviy, O.* Chyselne doslidzhennia stiihosti obolonky minimalnoi poverkhni na kvadratnomu konturi pry termosylovomu navantazhenni z urakhuvanniam heometrychnoi nelineinosti (Numerical study of the stability of the shell of a minimal surface on a square contour under thermal force loading taking into account geometric nonlinearity) // *Mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk: "Prykladna heometriia i inzhenerna hrafika"*. 2024. №106. S. 133-147.
15. *Kosheviy, O., Ivanchenko, H., Zatyliuk, G.* Bahatokryterialna parametrychna optymizatsiia peremishchennia i vahy obolonky minimalnoi poverkhni na kruhlomu konturi, shcho skladaetsia iz dvokh pokhylykh elipsiv pry termosylovomu navantazhenni z urakhuvanniam heometrychnoi nelineinosti (Multi-criteria parametric optimization of the displacement and weight of the shell of a minimal surface on a circular contour consisting of two inclined ellipses under thermal force loading taking into account geometric nonlinearity) // *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk*. – K.: KNUBA, 2024. – Vyp. 112. – S. 209-221.
16. *Sakharov A.S., Kyslooky V.N., Kyrychevskyy V.V., Altenbakh Y., Habbert U., Dankert Yu., Keppler Kh., Kochyk Z.* Metod konechnykh elementov v mekhanike tverdykh tel. (Finite element method in solid mechanics) // *Vydavnytstvo Vyscha shkola. Holovnoe yzdatelstvo* – Kyev – 1982. – 480 p.
17. *Bazenov V.A., Gaidaichuk V.V., Koshevoy A.P.* Stability of multiply connected ribbed shells and plates in a magnetic field. // *Journal of Soviet Mathematics* 66(6). –1993. – C. 2631-2636.
18. *Cheung Y. K.* The Finite Strip Method. Them. – Boca Raton. : CRC Press, 1997. – 416 p.
19. *Guest J.K., Prievost J., Belytschko T.* Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004. –61(2) – P.238-254.
20. *Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I.* Handbook of Monte Carlo Methods. — New York: John Wiley and Sons, 2011. - 772 p.

21. Lobo M.S., Vandenbeghe L., Boyd S. Applications of second-order cone programming. // Linear Algebra and its Applications. – 1998. – Vol. 284, no. 1. – P. 193–228.
22. Yonekura K., Kanno Y. Second-order cone programming with warm start for elastoplastic analysis with von mises yield criterion. // Optimization and Engineering. – 2012. – Vol. 13, no. 2. – P. 181–218.
23. Wasiutyński Z., Brandt A. The present state of knowledge in the field of. Optimum design of structures. // Appl. Mech. Rew. – 1963. Vol. 16 no. 5. – P. 341–35.

Стаття надійшла 14.04.2025

Кошевий О.П., Кошевий О.О., Янсонс М.О., Йовко М.М.

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ СТАТИЧНИХ ВПЛИВАХ

Оптимізація конструкцій у сучасному проектуванні є важливим етапом при конструюванні конструкцій, зокрема для тонкостінних циліндричних оболонок, які широко використовуються в машинобудуванні та будівництві. Оптимізація дозволяє знаходити ефективні конструктивні рішення, що забезпечують мінімізацію ваги конструкції при збереженні її міцності та жорсткості.

Основна мета дослідження полягає у проведенні параметричної оптимізації циліндричної оболонки для мінімізації ваги, яка використовується для зберігання рідин, з урахуванням експлуатаційних навантажень, таких як тиск рідини, власна вага та сила вітру. Для цього було використано метод скінчених елементів, який дозволяє моделювати поведінку конструкції під дією зовнішніх сил.

Результати дослідження показали, що параметрична оптимізація дозволяє знаходити компромісні рішення, які задовольняють вимогам до міцності та мінімізують вагу конструкції. Це робить оптимізацію не лише теоретичним інструментом, а й практичною необхідністю для покращення конкурентоспроможності інженерних рішень.

Ключові слова: стійкість оболонки, параметрична оптимізація, метод скінчених елементів, тонкостінна циліндрична оболонка, напруження по Мізесу, переміщення, міцність та переміщення в конструкціях, товщина циліндричної оболонки.

Koshevyi O.P., Koshevyi O.O., Yansons M.O., Yovko M.M.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF A CYLINDRICAL SHELL UNDER STATIC LOADS

Optimization in modern structural design plays a crucial role, particularly for thin-walled cylindrical shells, which are widely used in mechanical engineering and construction. Optimization enables the development of efficient design solutions that minimize structural weight while maintaining strength and stiffness. The main objective of this study is to perform parametric optimization of a cylindrical shell used for liquid storage, aiming to minimize its weight while considering operational loads such as liquid pressure, self-weight, and wind load. The finite element method (FEM) was employed to simulate the structural behavior under these external forces. The results of the study demonstrate that parametric optimization enables the identification of balanced design solutions that meet strength requirements while minimizing weight. This makes optimization not only a theoretical tool but also a practical necessity for enhancing the competitiveness of engineering designs. Keywords: shell stability, parametric optimization, finite element method, thin-walled cylindrical shell, von Mises stress, displacement, strength and displacement in structures, cylindrical shell thickness.

Keywords: shell stability, parametric optimization, finite element method, thin-walled cylindrical shell, von Mises stress, displacement, strength and displacement in structures, cylindrical shell thickness.

УДК 539.3

Кошевий О.П., Кошевий О.О., Янсонс М.О., Йовко М.М. Параметрична оптимізація циліндричної оболонки при статичних впливах // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 114. – С. 328-338.

Таб. 1. Іл. 5. Бібліогр. 23 назв.

UDS 539.3

Koshevyi O.P., Koshevyi O.O., Yansons M.O., Yovko M.M. Parametric optimization of a cylindrical shell under static loads // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 114. – P. 328-338.

Tabl. 1. Figs. 5. Ref. 23.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри опору матеріалів КНУБА КОШЕВИЙ Олександр Петрович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра опору матеріалів, Кошевий Олександр Петрович

Робочий тел.: +38(044)-241-54-21

E-mail: koshevyi.op@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7796-0443>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор філософії (Ph.D.), доцент, доцент кафедри теоретичної механіки КОШЕВИЙ Олександр Олександрович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, КОШЕВУ Олександр Олександрович

Робочий тел.: +38(044) 241-55-36

E-mail: a380982070137@gmail.com.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1903-2905>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів КНУБА ЯНСОНС Марина Оскарівна

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра опору матеріалів, Янсонс Марина Оскарівна

Робочий тел.: +38(044)-241-54-21

E-mail: iansons.mo@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6174-0403>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): аспірант кафедри опору матеріалів КНУБА ЙОВКО Микола Михайлович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, КНУБА, кафедра опору матеріалів, Йовко Микола Михайлович

E-mail: yovko_mm@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-0582-4389>