

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Інституту енергетичних машин та систем ім.
А.М. Підгорного
д.т.н., проф. Кирилу МАКСИМЕНКО-ШЕЙКО
вул. Комунальників, 2/10, м. Харків, 61063

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, провідного наукового співробітника відділу термогазодинаміки енергетичних машин, доктора технічних наук, професора Стрельнікової Олени Олександрівни на дисертаційну роботу Мелашенко Оксани Петрівни «Математична модель та метод розв'язання оптимізаційної задачі компонування геометричних об'єктів з урахуванням перетворення розтягування та стиснення» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика і статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика»

1. Обґрунтування вибору теми дослідження

Актуальність математичного моделювання пакування м'яких двовимірних і тривимірних об'єктів пояснюється як прикладними, так і теоретичними аспектами у математичній фізиці, обчислювальній геометрії, теорії оптимізації. Розв'язання задач пакування м'яких тіл вимагає точного опису деформацій, пружності, внутрішніх напружень. Це призводить до формулювання складних диференціальних рівнянь у частинних похідних, які описують рівновагу чи динаміку об'єктів. М'які тіла не просто стикаються - вони взаємодіють складним чином, з урахуванням тертя, адгезії, внутрішньої структури. Це відкриває шлях до нових задач у нелінійній механіці та теорії контактів.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 194 найменувань на 22 сторінках та 4 додатків на 33 сторінках, а також містить 57 рисунків та 55 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 234 сторінки, включаючи 138 сторінок основного тексту.

Вступ присвячено обґрунтуванню вибору теми дослідження, визначено мету і основні задачі, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, описано математичні моделі та методи, які були використані у дослідженнях, і описано особистий внесок здобувача.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан питання. Викладено ключові принципи геометричного проєктування, що лежать в основі побудови математичних та

комп'ютерних моделей для розв'язання нестандартних задач оптимального компоновання геометричних об'єктів з урахуванням їх еластичних деформацій. Надано поняття ϕ -функції, яка використовується для формалізації умов включення дво- та тривимірних об'єктів, а також квазі- ϕ -функції, що описує умови їх неперетину. Розкрито основні властивості цих функцій та сформульовано задачу оптимального розміщення м'яких тіл. Підкреслено наукову й прикладну значущість дослідження в обраному напрямі.

У другому розділі наведені дослідження задачі компоновання м'яких еліпсів і багатокутників у прямокутний контейнер із мінімальною висотою. Розглянуто два варіанти формулювання цієї задачі для м'яких багатокутників: перший відноситься до варіативного розташування вершин при фіксованих характеристиках еластичності, другий пов'язаний із можливістю змін як локації об'єктів, так і їх еластичних властивостей. Для задач, що стосуються м'яких еліпсів, передбачено фіксований діапазон зміни параметрів еластичності. Доведено, що запропоноване еластичне перетворення зберігає площу кожного об'єкта (еліпса або багатокутника).

Для формалізації обмежень компоновання побудовано ϕ -функції, які описують умови включення м'яких фігур у контейнер, та квазі ϕ -функції для моделювання умов їх неперетину. Проблеми подані у вигляді задач нелінійного програмування. Для знаходження оптимального компоновання застосовано метод мултистарту, а також розроблено алгоритм генерації припустимих початкових розміщень із використанням гомотетичних перетворень еліпсів і багатокутників. Для локального пошуку розв'язків запропоновано метод декомпозиції. Результати числових експериментів підтвердили ефективність запропонованого підходу для розв'язання задач оптимального компоновання м'яких об'єктів у прямокутний контейнер мінімальної висоти.

У третьому розділі розглянуто задачу оптимального розміщення м'яких прямокутних об'єктів, як орієнтованих, так і неорієнтованих, у контейнерах різної геометричної форми. Досліджено варіанти, в яких всередині контейнера наявні заборонені зони, уникаючи яких необхідно здійснити компоновання. Для аналітичного задання умов неперетину об'єктів та їх включення у допустимий простір було сформульовано відповідні ϕ -функції та квазі ϕ -функції. Залежно від геометрії контейнера (круглої, прямокутної або багатокутної) розглянуто різні типи цільових функцій. Задачу компоновання сформульовано в рамках нелінійного програмування, та доведено, що застосоване еластичне перетворення забезпечує збереження площі кожного м'якого прямокутника. Для знаходження розв'язків використано стратегію мултистарту, а також методику побудови допустимих початкових конфігурацій із подальшою локальною оптимізацією за допомогою методу декомпозиції. Подано результати числового моделювання задачі розміщення м'яких

прямокутників у різнотипні оптимізовані контейнери (круглі, прямокутні та опуклі багатокутні), що містять внутрішні зони заборони. Ці зони описано як об'єднання базових геометричних фігур : кіл, еліпсів, прямокутників і опуклих багатокутників.

У четвертому розділі розглянуто задачу розміщення довільних м'яких багатокутників (як опуклих, так і неопуклих), які можуть вільно переміщуватися та обертатися, у м'який опуклий полігональний контейнер із мінімальною площею або мінімальним периметром. Для математичного опису умов включення об'єктів у контейнер та запобігання їх перетину побудовано відповідні ϕ -функції та квазі ϕ -функції. Подано формалізацію умови опуклості контейнера та умови збереження площі кожного багатокутного об'єкта після деформації. Задачу сформульовано як проблему нелінійного програмування з урахуванням обмежень на перетин, включення, еластичні перетворення об'єктів і геометричні властивості контейнера. Подані результати числових експериментів, які ілюструють ефективність запропонованого підходу для компоновання різноманітних м'яких багатокутників у м'який опуклий контейнер з оптимальними геометричними характеристиками.

П'ятий розділ присвячено формалізації задачі компоновання наперед заданої множини м'яких опуклих багатогранників у контейнер опуклої форми з мінімальним об'ємом. Передбачено, що багатогранники можуть змінювати свою просторову форму в межах допустимих значень параметрів еластичності за умови збереження як їхнього об'єму, так і опуклості. Розглянуто два варіанти постановки задачі: перший стосується змінних вершин при фіксованих параметрах еластичності, другий описує змінні параметри як руху (переміщення та обертання), так і деформації. Для опису просторових обмежень розміщення застосовано ϕ -функції та квазі ϕ -функції, які моделюють умови включення об'єктів у контейнер та уникнення їх перетину. Показано, що використане еластичне перетворення зберігає об'єм кожного з багатогранників. Проблему сформульовано як задачу нелінійного програмування з відповідними геометричними обмеженнями. Розроблено методику розв'язання задачі, яка включає побудову допустимих початкових конфігурацій та застосування декомпозиційного підходу для локальної оптимізації. Проведено числові експерименти з пакування м'яких пірамід та кубоїдів у контейнери прямокутної, сферичної та циліндричної форми.

У висновках до дисертації узагальнено ключові наукові результати, отримані в ході дослідження.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертаційну роботу виконано в Інституті енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України відповідно до планів науково-технічних робіт з держбюджетної

теми КПКВК 6541030, керівник – член-кореспондент НАН України Ю.Г. Стоян, «Розробка математичних моделей та методів розв’язання задач геометричного проектування з урахуванням механічних та технологічних чинників» (2022–2026 рр.) та держбюджетної теми КПКВК 6541230, керівник – член-кореспондент НАН України О.В. Кравченко, «Підвищення ефективності процесу комплексного водневого термобарохімічного впливу на продуктивні горизонти шляхом математичного та фізичного моделювання» (2023 р.); спільних наукових досліджень з Державним університетом Нуево Леон (UANL), Мексика (Договір про програми академічного обміну з науки і техніки, 2021–2024 рр.); проекту Volkswagen Foundation, грант #97775, TU, Дрезден, Німеччина, спільно з відділом методів негладкої оптимізації ІК НАН України, керівник від України – член-кореспондент НАН України П.І. Стецюк, (2021–2024 рр.).

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено коректним використанням фундаментальних підходів і сучасних методів обчислювальної та математичної фізики, методів числового аналізу, методів нелінійного програмування, використання новітнього підходу, що стосується ρ - функцій, що використовується для формалізації умов включення дво- та тривимірних об’єктів, а також квазі ρ -функції, для опису умови їх неперетину.

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів забезпечується ефективністю розроблених методів розв’язання оптимізаційних задач з точки зору обчислювальної складності; узгодженістю обчислювальних результатів з експериментальними даними.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна

Основні наукові результати та висновки дисертації пройшли апробацію під час міжнародних наукових конференцій та знайшли відображення в публікаціях у міжнародних наукових виданнях. Основні наукові результати та висновки дисертації пройшли апробацію під час міжнародних наукових конференцій та знайшли відображення в публікаціях у міжнародних наукових виданнях. За темою дисертації надруковано 14 наукових праць, серед яких 6 статей (3 статті, що індексуються у науково-метричній базі SCOPUS, 3 статті у фахових вітчизняних виданнях категорії А і Б), 8 тез доповідей на міжнародних конференціях, серед них 5 – українські, 3 – закордонні (19th ESICUP, 2023, Bologna, Italy; 20th ESICUP, 2024, Portugal; EURO 2024, Denmark).

Нові наукові результати, отримані авторкою, полягають у такому.

- 1) Запропоновано нову постановку задачі геометричного проєктування, яка на відміну від традиційних підходів, враховує можливість зміни просторової форми геометричних об'єктів під впливом зовнішніх сил за умови збереження їх площі або об'єму, що характерно для м'яких деформівних тіл.
- 2) Метод ϕ -функцій отримав подальший розвиток: розроблено нові класи ϕ -функцій, які розширюють класичний підхід шляхом урахування еластичних деформацій об'єктів, зокрема:
 - квазі ϕ -функції для моделювання відношення неперетину двовимірних та тривимірних м'яких об'єктів;
 - ϕ -функції для моделювання відношення включення двовимірних та тривимірних м'яких об'єктів у контейнери різної форми;
- 3) Уперше розроблено узагальнену математичну модель задачі оптимального компонування м'яких об'єктів із збереженням їх площі або об'єму, яка формалізована у вигляді задачі нелінійного програмування. Модель адаптовано до різних умов залежно від просторової розмірності, геометричної форми об'єктів і контейнерів, типів цільових функцій та характеру еластичних деформацій. Для побудови математичного опису використано запропоновані ϕ -функції та квазі ϕ -функції.
- 4) Подальшого розвитку набули методи геометричного проєктування, які застосовуються до задач компонування об'єктів, здатних змінювати свою форму під час оптимізаційного процесу. Це розширило сферу використання геометричних методів у задачах, що враховують фізичні властивості матеріалів, а саме:
 - розроблено ефективний метод генерації допустимих розміщень для задачі компонування м'яких об'єктів;
 - розроблено метод декомпозиції для пошуку локальних екстремумів задачі компонування м'яких об'єктів, який дає змогу звести задачу великої розмірності до послідовності задач нелінійного програмування значно меншої розмірності.

6. Практичне значення одержаних результатів

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати становлять вагомий внесок у розвиток математичного моделювання та обчислювальних підходів у сфері геометричного проєктування. Запропоновано нові математичні моделі та ефективні методи розв'язання задач оптимального компонування м'яких дво- та тривимірних об'єктів. Зазначені підходи мають широкий потенціал застосування в актуальних і пріоритетних напрямках сучасної науки та техніки, зокрема в адитивному виробництві, нанотехнологіях, матеріалознавстві, логістиці, медицині та робототехніці.

Розроблені програмні модулі оптимізації компонування м'яких об'єктів застосовуються: на кафедрі «Матеріалознавство та інженерія матеріалів» Національного університету «Львівська політехніка» для комп'ютерного моделювання процесу заповнення заданого об'єму частинками несферичної форми та для вивчення структури зразків матеріалу, які отримані у результаті 3D друку; для оптимізації завантаження та транспортування вантажів (ТОВ Лактіонов С. І.); для вдосконалення процесу таблетування (аналіз властивостей порошкоподібних лікарських засобів при їх розміщенні у м'яких капсулах) у виробничій діяльності підприємства Біолік-Фарма; під час проєктування об'єктів аеродрому/аеропорту (будівель та споруд авіаційного та неавіаційного призначення, при регулюванні землекористування в околицях аеропорту/аеродрому) в ході виконання науково-дослідної роботи «Проектування аеродромів, вертодромів, аеропортів і об'єктів їх інфраструктури» (Науково-дослідний центр судової експертизи у сфері інформаційних технологій та інтелектуальної власності Міністерства юстиції України), про що свідчать відповідні довідки (Додаток Б).

7. Дотримання академічної доброчесності

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні

8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

1. Після формули (1.1) не надано пояснення щодо функції $\kappa(u)$.
2. Третє пояснення після формули (2.2): в правій частині цієї формули треба вжити μ_j замість μ_i .
3. Твердження на стор. 59 щодо $O(n)$ кількості пар еліпсів потребує додаткового пояснення.
4. Як обґрунтовується збіжність та точність запропонованих Алгоритмів 1 та 2?
5. Як можна пояснити результат, зображений на рис. 3.4г) (Крок 4)?
6. У роботі розглянуто геометричні об'єкти, здатні змінювати просторову форму під дією зовнішніх сил за умови збереження об'єму. Доцільним було б також врахувати пружні характеристики цих об'єктів, оскільки зміна просторової форми супроводжується виникненням напружень, що може призвести до втрати міцності або стійкості об'єкта.

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи

Вважаю, що дисертаційна робота Мелащенко Оксани Петрівни ««Математична модель та метод розв'язання оптимізаційної задачі компонування геометричних об'єктів з урахуванням перетворення розтягування та стиснення»», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за

спеціальністю 113 «Прикладна математика» є актуальною, завершеною науковою працею, що виконана на високому науково-теоретичному рівні з логічно та доступно викладеним матеріалом.

В дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну задачу, яка полягає в розробленні сучасного ефективного методу розв'язання задач оптимального компонування геометричних об'єктів, що мають змінну просторову форму, за допомогою розроблення конструктивних засобів математичного і комп'ютерного моделювання, нових математичних моделей та методів локальної оптимізації із застосуванням сучасних NLP-солверів. Ця робота гідно продовжує традиції наукової школи, створеної видатними математиками В.Л. Рвачовим і Ю.Г. Стояном.

Здобувачка Мелащенко Оксана Петрівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії з галузі знань з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113.

Рецензент,
доктор технічних наук,
професор, провідний науковий співробітник
Інституту енергетичних машин та систем
ім. А.Н. Пілгорного НАН України

Олена СТРЕЛЬНІКОВА