

ВІДГУК ОФЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Хлуд Ольги Михайлівни «Задача оптимальної упаковки еліпсоїдів: математичні моделі та методи розв'язання», подану на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми. Актуальність робіт, що досліджують проблему оптимальної упаковки пов'язана не тільки із застосуваннями ідей, що виникли при розв'язанні цієї проблеми до цілої низки галузей промисловості та великою кількістю посилань на наукові роботи з цієї тематики. Про важливість цієї проблематики свідчить існування міжнародної наукової організації ESICUP, що координує зусилля науковців, які працюють за цією тематикою та наявність доступних веб-ресурсів, що відображають поточний стан світових досліджень з оптимізаційних задач розміщення та надають можливість ознайомитися з найкращими результатами у цій галузі.

Оптимізаційні задачі упаковки еліпсоїдів належать до класу NP-складних. Інтерес до ефективного розв'язання задач цього класу стрімко зростає, що пояснюється надзвичайною складністю побудови математичних моделей та широким спектром прикладних застосувань. Задачі упаковки еліпсоїдів виникають в сучасній біології, у медицині, в адитивних технологіях (3D друк, наприклад), у робототехніці та багатьох інших пріоритетних галузях науки і техніки.

Для розв'язання задач упаковки еліпсоїдів використовуються як евристичні алгоритми, так і метаевристики. Однак у публікаціях зазвичай розглядаються контейнери, які мають форму прямокутного паралелепіпеда, та не враховуються допустимі відстані між еліпсоїдами, що значно звужує клас практичних задач, які можуть бути успішно розв'язані з використанням сучасних комп'ютерних технологій. Деякі запропоновані математичні моделі, що представлені у вигляді задач нелінійного програмування, мають настільки велику розмірність, що сучасні програмні засоби локальної та глобальної оптимізації не здатні знайти навіть допустимі розв'язки за прийнятний час.

Отже, створення нових засобів математичного та комп'ютерного моделювання відношень еліпсоїдів, побудова математичних моделей у вигляді задач нелінійного програмування (NLP-problems), що враховують орієнтацію та особливості метричних характеристик еліпсоїдів, форму контейнера і обмеження на допустимі відстані, та розробка ефективних методів розв'язання задач оптимальної упаковки еліпсоїдів, які дозволять отримувати локально-оптимальні та допустимі розв'язки за прийнятний час із застосуванням сучасних вирішувачів задач нелінійного програмування (NLP-solvers), є актуальними.

Саме подальшому розвитку досліджень за вказаним напрямом присвячена ди-

сертаційна робота О.М. Хлуд і тому її актуальність не викликає сумніву.

Зв'язок з пріоритетними напрямками розвитку науки й техніки. Дисертаційна робота виконана в період з 2015 р. по 2018 р. у відділі математичного моделювання і оптимального проектування Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України відповідно до планів науково-технічних робіт за держбюджетними темами «Створення інтелектуальних інформаційних технологій розв'язання оптимізаційних задач розміщення об'єктів довільних просторових форм» (2012–2016 рр. № ДР 0112U002488), «Розробка математичних моделей та комп'ютерних технологій розв'язання оптимізаційних задач компоновання тривимірних об'єктів» (2017–2018 рр. № ДР 0117U000877).

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Достовірність положень, висновків і результатів, отриманих в дисертаційній роботі, підтверджується коректністю постановки задачі, доведенням відповідних тверджень, застосуванням конструктивних засобів математичного моделювання, надійних методів нелінійної і негладкої оптимізації та NLP-solvers, а також результатами обчислювальних експериментів для задач упаковки еліпсоїдів у різних опуклих контейнерах.

Характеристика змісту дисертації. Структурно дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, у яких матеріал роботи викладено у наступному порядку.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну і практичну значущість отриманих результатів та наведено інформацію про апробацію результатів дослідження і кількість публікацій за темою дисертаційної роботи.

У *першому розділі* дисертаційної роботи проведено огляд літератури за темою дисертації і вибору напрямів дослідження. Проведено досить вичерпний огляд публікацій із проблем математичного моделювання та розв'язання задач оптимальної упаковки еліпсоїдів, що належать до класу задач геометричного проектування. Обґрунтовано необхідність розвитку нових засобів математичного моделювання та ефективних методів оптимізації.

Другий розділ присвячено засобам математичного моделювання обмежень розміщення в задачі оптимальної упаковки еліпсоїдів з використанням методу ϕ -функцій, у тому числі наводяться визначення ϕ -функції, псевдонормалізованої ϕ -функції, квазі- ϕ -функції, псевдонормалізованої квазі ϕ -функції. Сформульовано базову задачу оптимальної упаковки еліпсоїдів (надалі 3DBEP). Залежно від виду цільової функції, форми контейнера, обмежень на

орієнтацію еліпсоїдів та мінімально допустимі відстані, особливостей метричних характеристик еліпсоїдів, виділено три реалізації базової задачі оптимальної упаковки еліпсоїдів: упаковка однаково орієнтованих гомотетичних сфероїдів у контейнер (прямокутний паралелепіпед, еліпсоїд) мінімальних розмірів (3DHEP), упаковка неорієнтованих еліпсоїдів обертання у контейнер (прямокутний паралелепіпед, циліндр) мінімальних розмірів (3DEP), упаковка неорієнтованих еліпсоїдів у довільній опуклій у контейнер мінімальних розмірів (3DAEP). Пропонується стратегія розв'язання задачі 3DBEP.

У *третьому розділі* формулюється задача оптимальної упаковки гомотетичних однаково орієнтованих еліпсоїдів (3DHEP). Визначається вигляд ϕ -функцій для аналітичного опису моделювання неперетину гомотетичних еліпсоїдів та включення еліпсоїдів в прямокутний паралелепіпед та еліпсоїд. Доводяться відповідні твердження. Будується математична модель задачі у вигляді задачі нелінійного програмування. Пропонується два методи для розв'язання задачі. В основі першого - метод мультистарту і оптимізаційна процедура, що включає пошук допустимих стартових точок і локальну оптимізацію. Метод локальної оптимізації включає оптимізаційну процедуру, яка дозволяє зменшити кількість квадратичних нерівностей. Другий алгоритм заснований на використанні γ -алгоритма Шора, завдяки якому з використанням негладких штрафів задача зводиться до задачі безумовної оптимізації. Пропонується алгоритм доупаковки, який дозволяє максимізувати коефіцієнт заповнення контейнеру.

У *четвертому розділі* формулюється задача оптимальної упаковки еліпсоїдів обертання (сфероїдів) (3DEP). Як контейнер розглядається прямокутний паралелепіпед або круговий циліндр. Визначається квазі ϕ -функція для моделювання відношень неперетину еліпсоїдів, та ϕ -функції і квазі ϕ -функції для моделювання відношень включення еліпсоїдів у відповідний контейнер. Будується математична модель у вигляді задачі нелінійного програмування. Пропонується ефективний метод пошуку стартових точок з області допустимих розв'язків. Для пошуку локально-оптимальних розв'язків задачі пропонується метод розв'язання, в основі якого лежить ітераційна оптимізаційна процедура. В ході цієї процедури реалізується перехід від задачі розмірності $O(N^2)$ з числом нерівностей $O(N^2)$ до послідовності задач розмірності $O(N)$ з числом нерівностей $O(N)$.

У *п'ятому розділі* формулюється задача оптимальної упаковки еліпсоїдів обертання (3DAEP) з урахуванням мінімально допустимих відстаней. Як контейнер розглядається опукла область, що формується сферичними, циліндричними, еліптичними поверхнями та площинами (зокрема, прямокутний паралелепіпед, циліндр, куля, еліпсоїд, опуклий багатогранник). Запропонова-

но два типи зовнішньої апроксимації еліпсоїдів: апроксимація заданою кількістю куль та апроксимація опуклими багатогранниками. Для моделювання відношень неперетину еліпсоїдів та включення в контейнер побудовано φ -функції та квазі φ -функції, для моделювання обмежень на мінімально допустимі відстані — псевдонормалізовані ρ -функції та псевдонормалізовані квазі ρ -функції для еліпсоїдів та апроксимуючих об'єктів. Будується математична модель у вигляді задачі нелінійного програмування. Пропонуються ефективні методи пошуку стартових точок з області допустимих розв'язків. Для пошуку допустимих розв'язків задачі пропонується метод декомпозиції 3DLOFRT, який дозволяє звести задачу 3DAEP до послідовності задач меншої розмірності та з меншою кількістю нелінійних нерівностей.

У шостому розділі наведено результати обчислювальних експериментів, отриманих за допомогою програмного забезпечення, побудованого на основі отриманих у роботі засобів моделювання, стратегій, методів та алгоритмів. Зокрема, наведено результати розв'язання різних реалізацій задачі 3DBEP для різних видів контейнера. Наводиться порівняльний аналіз результатів.

У додатках представлено акт про впровадження в навчальний процес ХНУРЕ, акт про використання результатів досліджень та програмного забезпечення в ІТ компанії Cloud Works, лист-рекомендація про використання результатів досліджень у дослідницьких програмах університету Nuevo Leon State University («Large Scale Optimization Problems in Logistics and Supply Chain Networks») та «National Research Network for Decision Support and Intelligent Optimization in Complex and Large Scale Systems»), опис дослідницької програми та вихідні дані для прикладів, наведених у шостому розділі. Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертації.

Нові наукові результати дисертаційної роботи є такими

- побудовано φ -функції, квазі φ -функції, псевдонормалізовані φ -функції і псевдонормалізовані квазі φ -функції для математичного моделювання обмежень розміщення в задачі 3DBEP (неперетин еліпсоїдів, мінімально допустимі відстані між еліпсоїдами, включення еліпсоїдів в контейнер, границя якого описується циліндричними, сферичними, еліптичними поверхнями та площинами);
- побудовано загальну математичну модель базової задачі оптимальної упаковки еліпсоїдів (3DBEP) у вигляді задачі нелінійного програмування. Залежно від виду контейнера (прямокутний паралелепіпед, опуклий багатогранник, куля, еліпсоїд, циліндр), особливостей метричних характеристик (гомотетичні, сфероїди, довільні) і вимог до орієнтації еліпсоїдів (однаково орієнтовані, допускаються неперервні обертання), обмежень на допустимі відстані між еліпсоїдами побудовано також матема-

- тичні моделі для основних реалізацій базової задачі (3DBEP);
- розроблено стратегію розв'язання задачі 3DBEP та на її основі розроблені ефективні методи розв'язання для основних її реалізацій з використанням методів побудови допустимих стартових точок, локальної оптимізації та сучасних NLP-solvers, які на відміну від існуючих підходів: враховують одночасно неперервні трансляції та обертання еліпсоїдів, мінімально допустимі відстані між ними; надають можливість отримувати допустимі та локально оптимальні розв'язки для задач 3DNEP, 3DEP, 3DAEP за прийнятний час та мають оцінку, яка є лінійною щодо кількості еліпсоїдів.

Повнота викладу наукових положень. Ознайомлення з дисертацією, авторефератом та копіями статей дозволяє зробити висновок стосовно необхідної повноти опублікованих наукових результатів у регламентованих виданнях. Основні розділи дисертації висвітлені в статтях і виступах, що включають 22 найменування, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку наукових спеціалізованих видань, серед яких 1 стаття у журналі, що індексується науково-метричною базою Scopus. У вступі до дисертації зазначено особистий внесок автора у наукові праці, написані у співавторстві.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і отримали схвалення на таких міжнародних конференціях і наукових семінарах: конференції молодих учених і фахівців «Сучасні проблеми машинобудування» ІПМаш НАН України (Харків, Україна, 2015, 2016, 2018pp.); міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті» (Харків, Україна, 2016-2018pp.); XXI всеукраїнській науковій конференції «Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики» (Львів, Україна, 2015р.); XIII міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпро, Україна, 2015р.); міжнародній науковій конференції «Математичне моделювання, оптимізація і інформаційні технології» (Кишинів, Молдова, 2016, 2018pp.); 5-й міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні системи і технології» (Коблеве, Україна, 2016 р.); 7-й міжнародній конференції «Застосування інформаційних і комунікаційних технологій та статистики в економіці і освіті» (Софія, Болгарія, 2017 р.); XXX міжнародній конференції «Проблеми ухвалення рішень в умовах невизначеності» (Вільнюс, Литва, 2017р.); 14-й міжнародній конференції «ESICUP» (Льєж, Бельгія, 2017р.); семінарі відділу методів негладкої оптимізації Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, (Київ, 2018р.).

Практичне та теоретичне значення одержаних результатів. Наукові результати дисертаційної роботи є подальшим розвитком методів математично-

го моделювання і обчислювальних методів у геометричному проектуванні в межах відомої наукової школи Ю. Г. Стояна, зокрема: створено нові засоби, побудовано математичні моделі та розроблено ефективні методи розв'язання задачі оптимізації упаковки еліпсоїдів в опуклих контейнерах, які дозволяють враховувати особливості метричних характеристик еліпсоїдів, обмеження на орієнтацію еліпсоїдів та мінімально допустимі відстані. Ці задачі мають широкий спектр застосувань в пріоритетних областях науки і техніки.

Світовий рівень створених засобів математичного моделювання, моделей та методів розв'язання підтверджується публікаціями в міжнародних журналах та фахових виданнях України і апробацією на міжнародних конференціях. Слід відмітити достойний особистий внесок автора та зацікавленість до результатів його досліджень, що підтверджується співпрацею з іноземними вченими.

Моделі, методи, алгоритми, відповідне програмне забезпечення, запропоновані в дисертаційній роботі, використані в наукових дослідженнях Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України під час виконання держбюджетних тем в період з 2015 р. по цей час.

Зауваження до дисертаційної роботи. Попри загальне позитивне враження щодо роботи слід зазначити, що є певні зауваження.

1. Вважаю за доцільне обґрунтувати вибір цільових функцій основних реалізацій математичної моделі базової задачі оптимальної упаковки еліпсоїдів (3DEP).
2. Роботу можна логічно розширити розв'язками базової задачі оптимальної упаковки еліпсоїдів з урахуванням обмежень на максимально допустимі відстані.
3. Вважаю, що для чисельних експериментів, розглянутих в розділі 6, було б корисно і доцільно отримати оцінки глобальних і локальних екстремумів.
4. Вважаю доцільним розширити змістовно висновки до розділів дисертаційної роботи.
5. У тексті є прості помилки та неточності, на які вказано дисертантові.

Вказані зауваження у більшості зумовлені широтою охоплення та складністю предмету досліджень і відносяться, в основному, до можливих перспективних напрямків досліджень і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновки за дисертаційною роботою. Робота «Задача оптимальної упаковки еліпсоїдів: математичні моделі та методи розв'язання» має високий науковий рівень, містить вагомі теоретичні та практичні результати. О.М. Хлуд здійснив розвиток теорії геометричного проектування в області математичного моделювання та обчислювальних методів.

Дисертація відповідає спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Автореферат і опубліковані роботи за темою дисертації повністю відповідають її змісту.


Вважаю, що подана до захисту дисертаційна робота Хлуд О.М. відповідає вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, зокрема вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 (зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015 та № 567 від 27.07.2016), а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент, доктор технічних наук,
професор, декан факультету математики і
інформатики, професор кафедри теоретичної
і прикладної інформатики Харківського
національного університету ім. В.Н. Каразіна


Г.М. Жолткевич

Підпис професора Жолткевича Григорія Миколайовича засвідчую.

Начальник служби управління персоналом,
доктор педагогічних наук, професор


С.М. Куліш

