Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу Яськова Г.М.

"Оптимізаційні задачі розміщення гіперкуль: математичні моделі, методи розв'язання, застосування",

подану на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дослідження. Оптимізаційні задачі розкрою та упакування вивчаються в теорії дослідження операцій і пов'язані з дискретною та неперервною оптимізацією й обчислювальною геометрією. Задача розміщення гіперкуль у просторах довільної розмірності виникає в теорії кодування та системах передавання даних, які потрібні в багатьох сучасних телекомунікаційних засобах та Інтернет-технологіях. Оптимальні коди для цих форм передачі відповідають найбільш щільному упакуванню рівних гіперкуль. Ще більш складною вважається задача розміщення нерівних гіперкуль у контейнерах довільної просторової форми. Дво- та тривимірні задачі розміщення гіперкуль (тобто кругів та куль відповідно) виникають в матеріалознавстві, біології, медицині, хімії, ядерній енергетиці, промисловому виробництві та багатьох інших галузях.

Як відомо, задачі упакування є *NP*-складними, тому в більшості досліджень розглядаються регулярні ґратчасті упакування, або розробляються наближені методи їх розв'язування. Ґратчасті упакування дозволяють отримати найщільніші розміщення гіперкуль, але не завжди ефективні для розміщення в обмеженому контейнері довільної просторової форми. Наближені методи здебільшого використовують евристики й призводять до втрати точних розв'язків. Через багатоекстремальність виникає проблема перебору множини локальних екстремумів, яка потребує великих обчислювальних витрат.

Дисертаційна робота присвячена математичному моделюванню оптимального упакування гіперкуль в обмежених опуклих контейнерах, обмежених сферичними і циліндричними поверхнями та площинами, які можуть мати зони заборони, та розробці ефективних методів розв'язання, які використовують методи геометричного проектування та математичного програмування із застосуванням сучасних розв'язувачів задач лінійного та нелінійного програмування.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в період з 2000 р. по 2019 р. у відділі математичного моделювання й оптимального проектування Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України і є частиною досліджень, які проводяться під керівництвом члена-кореспондента НАН України

Стояна Ю.Г. відповідно до планів науково-дослідних робіт за такими держбюджетними темами: "Розробка методів та алгоритмів оптимізації для розв'язання задач розміщення тривимірних геометричних об'єктів" (2001-2006 рр., № ДР 0102U001480); "Розробка конструктивних засобів та обчислювальних методів для розв'язання оптимізаційних задач упаковки та покриття" (2007-2011 рр., № ДР 0107U003662); "Створення інтелектуальних інформаційних технологій розв'язання оптимізаційних задач розміщення тривимірних тіл довільних просторових форм" (2012-2016 рр., № ДР 0112U002488); "Розробка математичних моделей та комп'ютерних технологій розв'язання оптимізаційних задач компоновки тривимірних тіл" (2017-2019 рр. № ДР 0117U000877). Також робота виконувалась згідно з такими договорами та грантами: грант TE 207/7, 436 UKR 113/42/0, договір між Німецьким дослідним товариством (Deutsche Forschungsgemeinschaft) і НАН України; грант УНТЦ (проект 5710) "Комп'ютерні технології для задач розміщення і покриття: моделі, методи та програмне забезпечення", договір № 338-28/270/21-2008 від 11.02.2008 р. між Інститутом проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України та ВО "Знамена" (м. Полтава) "Розробка програми для імітаційного моделювання процесу властивостей сплаву в залежності від розміру гранул".

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, запропоновані в дисертаційній роботі, обґрунтовані коректністю використання математичного апарату, постановок задач, застосуванням відомих конструктивних засобів математичного моделювання, теоретичним доведенням ефективності розроблених методів, ефективним застосуванням методів нелінійного та дискретного програмування та успішною програмною реалізацією запропонованих моделей і методів. Достовірність одержаних в дисертації наукових результатів підтверджується обчислювальними експериментами, які демонструють конкурентні результати на тестових прикладах. Для деяких прикладів отримано кращі результати. Результати апробовані на міжнародних науково-практичних конференціях, а також впроваджені в практичну діяльність і навчальний процес.

Характеристика змісту дисертації, її відповідність встановленим вимогам, стиль та повнота викладу наукових положень в опублікованих працях

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку літератури з 299 найменувань та трьох додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, визначено наукову новизну

та практичну значущість отриманих результатів, наведено відомості про публікації за темою дисертації та про апробацію результатів дослідження.

У *першому розділі* наведено розгорнутий огляд задач упакування гіперкуль (кругів, куль і гіперкуль довільної вимірності), їх місце в міжнародній типології задач Cutting and Packing Problems. В огляді розглянуто як практичні застосування задач упакування гіперкуль різної вимірності, так і математичні підходи до розв'язування таких задач. Обрані напрями досліджень задач оптимального розміщення гіперкуль.

У *другому розділі* наведені способи подання інформації про геометричні об'єкти та визначення задач геометричного проектування. Сформульовано постановку та побудовано математичну модель основної задачі розміщення гіперкуль (HSOA) та математичні моделі її основних реалізацій: задачі із змінними метричними характеристиками контейнера (ODP) та задачі, сформульованої як задача про рюкзак (KP). Наведено phi-функції, які використовуються в роботі для опису умов ненакладання гіперкуль та розміщення гіперкуль в області розміщення.

У *третьому розділі* досліджуються властивості деяких реалізацій задачі HSOA залежно від вигляду функції цілі, вимірності простору, просторової форми контейнера, метричних характеристик розміщуваних гіперкуль та контейнера, зон заборони та обмежень на метричні характеристики гіперкуль. Кожна задача розглядається відповідно до міжнародної класифікації задач упакування та розкрою.

У *четвертому розділі* описується методологія розв'язання задач HSOA. Здійснюється аналіз основних чинників, які впливають на вибір стратегій розв'язання. Пропонується. шість основних стратегій розв'язання задач: три стратегії – для задач із змінними метричними характеристиками (ODP), одна стратегія – для розв'язання задач, сформульованих як задача про рюкзак (KP), та дві стратегії – для задач розміщення максимальної кількості рівних гіперкуль (IIPP), яка є окремим випадком задачі KP. Описуються методи побудови початкових точок, методи отримання локальних екстремумів, методи отримання наближень до локальних і глобальних екстремумів, які використовуються в дисертаційній роботі.

У *п'ятому розділі* описуються методи розв'язання задач розміщення гіперкуль різної вимірності, математичні моделі яких запропоновані в третьому розділі. Вибір методів локальної й глобальної оптимізації відбувається відповідно до стратегій, розглянутих у четвертому розділі. Теоретично обґрунтовується ефективність методу спрямованого перебору локальних екстремумів, в якому завдяки гомотетичним перетворенням гіперкуль здійснюється плавний перехід від одного локального екстремуму до іншого, з кращим значенням функції цілі. Для переходу від задачі KP до задачі ODP

введено контейнер із змінним коефіцієнтом гомотетії.

Шостий розділ містить опис програмного забезпечення, результати обчислювальних експериментів та практичні застосування задач розміщення гіперкуль. Для розв'язання задач лінійного та нелінійного програмування використовувалися розв'язувачі задач лінійного (HOPDM, BPMPD), та нелінійного програмування (IPOPT). Для перевірки ефективності роботи запропонованих методів використовується також пакет для пошуку глобальних розв'язків задач нелінійного програмування GAMS/BARON (General Algebraic Modeling System / Branch-and-Reduce Optimization Navigator) на платформі GAMS. Результати тестових прикладів порівнюються з кращими відомими розв'язками, представленими в роботах, які присвячені розміщенню гіперкуль різної вимірності, та доступними на спеціалізованих сайтах. Наведені графічні ілюстрації та таблиці за результатами розрахунків.

Розглянуті практичні застосування задач розміщення гіперкуль різної вимірності та можливість їх моделювання й розв'язання за допомогою запропонованих математичних моделей, стратегій, методів та алгоритмів.

Додатки дисертації містять свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, довідку про використання програмного забезпечення, акт впровадження в навчальний процес, лист підтримки від державного університету Мексики.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукові результати дисертаційної роботи є подальшим розвитком математичного моделювання й обчислювальних методів в геометричному проектуванні: створено нові математичні моделі, розроблено нові методи та сучасні інформаційні технології розв'язання оптимізаційних задач упакування.

Світовий рівень створених методів розв'язання задач упакування гіперкуль підтверджено публікаціями у високорейтингових міжнародних журналах, апробацією на міжнародних конференціях та симпозіумах, застосуванням програмного забезпечення для розв'язання практичних задач, свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір.

Основні наукові результати дисертації вказані в авторефераті і серед них можна звернути увагу на такі:

- вперше побудовано математичну модель задачі HSOA та математичні моделі її реалізацій залежно від функції цілі (ODP або KP), розмірності гіперкуль, особливостей метричних характеристик гіперкуль, просторової форми контейнера ($2D$, $3D$, nD, $n \geq 4$), додаткових обмежень (мінімально допустимі відстані, зони заборони, обмеження на метричні характеристики контейнера);

- запропоновано методи побудови допустимих початкових точок, зокрема, модифікацію методу ґратчастого розміщення, в якому, на відміну від

відомих методів, застосовуються трансляції ґраток відносно контейнера;

- запропоновано метод побудови наближень до локальних екстремумів, в якому використовується комбінація методу оптимізації за групами змінних, методу спуску та методу множників Лагранжа, що дозволяє розв'язувати задачі розміщення куль великої розмірності за прийнятний час;

- розроблено метод спрямованого перебору локальних екстремумів для отримання наближення до глобального екстремуму задачі ODP, який дозволяє отримувати якісні розв'язки.

- розроблено метод пошуку наближення до глобального екстремуму для задачі розміщення рівних гіперкуль (IIPP), який ґрунтується на гомотетичних перетвореннях гіперкуль і дозволяє отримувати розміщення для великої кількості гіперкуль;

- вперше розроблено метод пошуку наближення до глобального екстремуму задачі KP для нерівних гіперкуль, в якому для перебору гіперкуль використовується схема методу гілок і меж із урахуванням класів еквівалентності гіперкуль та запровадженням ефективних правил відтинання неперспективних гілок дерева розв'язків;

- вперше запропонований підхід, який дозволяє розв'язувати задачу KP як сукупність задач ODP із застосуванням гомотетичних перетворень контейнера, що дає можливість застосовувати ефективні методи розв'язання задач ODP для задач KP і підвищити якість розв'язків.

Таким чином, створено методологію розв'язання оптимізаційних задач розміщення гіперкуль (HSOA), яка включає в себе нові засоби математичного моделювання, математичні моделі та ефективні методи розв'язання

Практичне та теоретичне значення одержаних результатів

Дисертаційна робота є продовженням досліджень задач геометричного проектування, які виконуються під керівництвом члена-кореспондента НАН України Стояна Ю.Г. Робота є фундаментальним дослідженням задач розміщення гіперкуль, які є важливими як з наукової, так із прикладної точки зору.

Побудовано нові математичні моделі та запропоновано методологію розв'язання задач оптимального розміщення гіперкуль, орієнтовану на сучасні методи дискретного та нелінійного програмування.

Високий рівень отриманих результатів підтверджується обчислювальними експериментами, розв'язанням тестових прикладів, публікаціями в фахових міжнародних журналах та апробацією на спеціалізованих міжнародних конференціях.

Отримані результати були використані при виконанні Договору № 338-28/270/21-2008 від 11.02.2008 р. "Розробка програми для імітаційного

моделювання процесу властивостей сплаву в залежності від розмірів гранул" між Інститутом проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України та ВО "Знамена", м. Полтава; програмне забезпечення було застосовано на кафедрі прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів Національного університету «Львівська політехніка» для розв'язання задачі оптимального заповнення заданого об'єму частинками сферичної форми;

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальному процесі в Харківському національному університеті радіоелектроніки.

Повнота викладення наукових положень. За темою дисертації опубліковано 62 наукові праці, в тому числі: 1 монографія (видавництво Betriebswirtschaftlicher Verlag, Німеччина), 26 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку наукових спеціалізованих видань, серед яких 7 статей у міжнародних журналах, що індексуються науково-метричною базою Scopus, з них 6 – у високорейтингових зарубіжних журналах (European Journal of Operational Research, International Transactions in Operational Research, Journal of Global Optimization, International Journal of Computer Mathematics, Optimization Letters), 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 33 тези та доповіді на міжнародних наукових конференціях (з них 13 – за кордоном). Н-індекс цитування робіт за науково-метричними міжнародними базами даних: Scopus – 7, Web of Science – 6, Google Scholar – 10.

Наукові результати дисертаційної роботи достатньо повно викладено в опублікованих працях.

Автореферат за змістом, науковою новизною, практичним значенням отриманих результатів, висновками та рекомендаціями повністю відповідає рукопису дисертаційної роботи.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. В роботі для побудови допустимих початкових точок використовуються ґратчасті розміщення кругів та куль. Було б цікавим розповсюдити метод ґратчастих розміщень для гіперкуль вимірності n>3.
2. В математичній моделі задачі HSOA як додаткові обмеження можна було б урахувати обмеження, які забезпечують баланс системи. Також було б доцільним урахувати можливість оптимізації за декількома критеріями.
3. У 3D задачах зоною заборони є множина опуклих об'єктів, які обмежені сферичними, циліндричними поверхнями та площинами. Проте для 2D задач HSOA автор наводить результати тільки для зон заборони, які мають просторову форму круга.
4. Частина задач нелінійного програмування, розглянутих в роботі, описується за допомогою квадратичних функцій. Було б доцільно надати

оцінки глобального екстремуму для таких задач.

5. Не досліджена залежність ефективності отриманих розв'язків від вибору методу побудови допустимих стартових точок. Було б цікавим виконати порівняння результатів при використанні різних способів побудови початкових точок.

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновки. Результати дисертаційної роботи є новими, оригінальними та достатньо повно викладені у публікаціях автора в наукових фахових виданнях. Дисертація є завершеною науковою роботою, в якій побудовані конструктивні засоби математичного та комп'ютерного моделювання, ефективні методи пошуку розв'язків для оптимізаційних задач розміщення гіперкуль.

Зміст роботи та отримані в ній результати повністю відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Результати наукових досліджень, за якими Яськов Георгій Миколайович захистив кандидатську дисертацію, не виносяться на захист докторської дисертації.

Зміст автореферату дисертації повністю відповідає основним положення самої дисертаційної роботи.

Вважаю, що дисертаційна робота Яськова Г.М. "Оптимізаційні задачі розміщення гіперкуль: математичні моделі, методи розв'язання, застосування" задовольняє вимоги «Порядку присудження наукових ступенів та присвоєння вчених звань» ДАК МОН України, що висуваються до докторських дисертацій, а її автор заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

Завідувач відділу методів негладкої оптимізації
Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник Стецюк П. І.

Підпис Стецюка П.І.
ЗАСВІДЧУЮ
Зав. канц. С
ІК НАН України 02.01.20р.