

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Столяна Юрія Євгеновича «Математичне моделювання та методи розв'язання оптимізаційних задач упаковки довільних багатогранників», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми

Оптимізаційні задачі упаковки тривимірних об'єктів є предметом дослідження обчислювальної геометрії, а методи їх розв'язування – новим напрямом теорії оптимізації. Інтерес до ефективного розв'язування задач цього класу стрімко зростає. Останні п'ять років у зарубіжній літературі з'являються публікації, в яких розглядаються практичні задачі, що зводяться до оптимізаційних задач упаковки багатогранників, наприклад, у адитивних технологіях, матеріалознавстві, логістиці, космічному машинобудуванні, ортопедичній хірургії.

Оскільки оптимізаційні задачі упаковки довільних багатогранників є NP-складними, для їх розв'язування зазвичай використовують евристичні алгоритми. Деякі дослідники пропонують підходи, що гуртуються на математичному моделюванні та методах оптимізації. Однак, як правило, розглядаються орієнтовані багатогранники (або дозволяються лише дискретні повороти багатогранників), а в якості контейнера використовуються кубоїди. Крім того, існуючі математичні моделі не враховують важливі для практики обмеження на мінімально допустимі відстані між об'єктами та балансові обмеження.

Таким чином, актуальним є створення прикладних засобів математичного та комп'ютерного моделювання, нових математичних моделей та ефективних методів розв'язування задач оптимальної упаковки довільних багатогранників в опуклий контейнер з урахуванням геометричних та інших обмежень.

Зв'язок роботи з науковими програмами

Дисертаційна робота виконана в період з 2015 р. по 2019 р. у відділі математичного моделювання та оптимального проектування Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України відповідно до планів науково-технічних робіт з держбюджетних тем «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 компонування тривимірних об'єктів» (2017–2018 рр. № ДР 0117U000877), в яких здобувач був одним із співвиконавців.



Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та рекомендації, запропоновані в роботі, обґрунтовані коректним використанням математичного апарату, коректною постановкою задачі оптимальної упаковки довільних багатогранників, доведенням відповідних тверджень та успішною програмною реалізацією запропонованих моделей і методів. Достовірність одержаних в дисертації наукових результатів підтверджується порівнюваністю значень, отриманих за допомогою розроблених моделей, із результатами експериментальних досліджень, а також впровадженням у практичну діяльність.

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

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури з 210 найменувань та чотирьох додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, вказано об'єкт, предмет і методи досліджень, визначено наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, наведено відомості про публікації за темою дисертації та про апробацію результатів дослідження.

У **першому розділі** автор проводить достатньо розгорнутий огляд наукових праць, які присвячені задачам оптимальної упаковки тривимірних об'єктів, зокрема довільних багатогранників. В огляді охоплюється як застосування цього класу задач, так і підходи, що використовуються для їх розв'язування. Аналіз публікацій за темою дисертаційної роботи підтверджує актуальність обраного напрямку дослідження.

В **другому розділі** дисертації в межах теорії геометричного проектування формулюються основні положення, необхідні для побудови конструктивних засобів математичного моделювання відношень між об'єктами, що виникають в задачі оптимізаційної упаковки довільних багатогранників. Сформульована постановка базової задачі оптимальної упаковки довільних багатогранників (*OPP*) та сформульована постановка задачі оптимального кластерингу довільних багатогранників (*OPC*).

У **третьому розділі** розглядається задача оптимальної упаковки довільних багатогранників в різноманітних опуклих контейнерах. Наводяться псевдонормалізовані квазі *phi*-функції, що описують умови неперетину багатогранників та псевдонормалізовані *phi*-функції, що описують умови включення багатогранників в контейнер. Будуються математичні моделі задачі оптимальної упаковки довільних багатогранників та задачі оптимального кластерингу довільних багатогранників, а також досліджуються їх властивості.

У **четвертому розділі** розглядається стратегія розв'язування задачі упаковки довільних багатогранників, яка ґрунтується на методології мультистарту. За-

пропоновано метод побудови допустимих стартових точок для задачі оптимальної упаковки довільних багатогранників в різні опуклі контейнери. Наведено опис методу декомпозиції POLYDEC для пошуку наближених розв'язків, що дозволяє звести задачу *OPP*, яка має оцінку числа нерівностей і розмірності $O(n^2)$, до послідовності підзадач нелінійного програмування з оцінкою числа нелінійних нерівностей і розмірності $O(n)$, де n – кількість опуклих багатогранників, що формують неопуклі багатогранники.

У **п'ятому розділі** наведено результати обчислювальних експериментів, що здійснені під час тестування розроблених засобів математичного моделювання, побудованих математичних моделей і розроблених методів розв'язування задач *OPP*, *OPC*, які розглянуто у розділі 3. Наводяться порівняння отриманих результатів з кращими опублікованими результатами.

У **додатах** наводяться список публікацій здобувача; довідка про використання програмного модуля оптимізації упаковки довільних неорієнтованих багатогранників; лист підтримки від Дж. Фазано (Giorgio Fasano) – відомого вченого та спеціаліста в галузі математичного моделювання та оптимізації систем європейської компанії «Thales Alenia Space»; акт про впровадження запропонованих в роботі засобів, моделей, методів та програмних модулів в ІТ компанії ТОВ «Клауд Воркс»; акт про впровадження в навчальний процес; опис інтерфейсу і можливостей дослідницької програми «Concave Demo» для реалізації кластерінгу непуклих багатогранників в кулі, циліндрі і кубоїді мінімального обсягу; наближені розв'язки для прикладів, наведених в розділі 5.

Ознайомлення з дисертацією, авторефератом та копіями статей дозволяє зробити висновок про необхідну повноту опублікованих наукових результатів у регламентованих виданнях. Основні розділи дисертації висвітлені в статтях і виступах, що включають 20 найменувань, зокрема, 6 статей в наукових спеціалізованих виданнях, які входять до переліку ДАК МОН України, з них 2 входять в наукометричну базу SCOPUS та 2 наукові статті – у технічних виданнях України.

Нові наукові результати дисертаційної роботи

Серед основних положень наукової новизни, отриманих у роботі, важливо виділити такі:

- набув подальшого розвитку метод phi-функцій: вперше побудовані phi-функції, псевдонормалізовані phi-функції, квазі phi-функції та псевдонормалізовані квазі phi-функції як засоби математичного моделювання обмежень розміщення в задачі *OPP*. Це дозволяє описати в аналітичному вигляді неперетин довільних багатогранників, включення багатогранників в опуклий контейнер, мінімально допустимі відстані між довільними багатогранниками та між багатогранниками та межею контейнера;

- вперше побудована математична модель задачі *OPP* у вигляді задачі нелінійного програмування (що включає всі глобально оптимальні розв'язки) для непуклих багатогранників в опуклому контейнері, межа якого формується за допомогою сферичних, циліндричних, еліптичних поверхонь та площини з ура-

хуванням обмежень розміщення та обмежень балансу, що дозволяє використовувати сучасні *NLP*-солвери;

- вперше побудована математична модель задачі кластерінгу неопуклих багатогранників (*OPC*) в сферичній, кубоїдній та циліндричній областях мінімального об'єму, що дозволяє генерувати ефективні допустимі стартові точки для пошуку наближених розв'язків задачі *OPP*;

- набули подальшого розвитку методи розв'язування задач геометричного проектування. Запропонована стратегія розв'язування задачі *OPP* та розроблені ефективні методи для основних її реалізацій, які на відміну від існуючих підходів враховують одночасно неперервні трансляції та обертання об'єктів, мінімально допустимі відстані і обмеження балансу, дозволяють отримувати якісні розв'язки для задач *OPP*, що є кращими за значенням цільової функції порівняно з benchmark instances – відомими опублікованими результатами.

Апробація результатів дисертації

Основні результати роботи доповідалися на міжнародних конференціях і наукових семінарах: конференція молодих учених і фахівців «Сучасні проблеми машинобудування» ПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України (Харків, Україна, 2015, 2016, 2018 рр.); 5-а міжнародна наукова конференція «Математичне моделювання, оптимізація і інформаційні технології» (Кишинів, Молдова, 2016 р.); 5-а міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи і технології» (Коблево, Україна, 2016 р.); міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і комп'ютерне моделювання» (Івано-Франківськ – Яремча, Україна, 2016 р.); XIII міжнародна науково-практична конференція «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (Дніпропетровськ, Україна, 2016 р.); XIII міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і прикладні аспекти побудови програмних систем» (Київ, Україна, 2016 року); 7-а міжнародна конференція «Додаток інформаційних і комунікаційних технологій і статистики в економіці і освіті» (Софія, Болгарія, 2017 р.); міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (Харків, Україна, 2017 р.); XXX міжнародна конференція «Проблеми ухвалення рішень в умовах невизначеності» (Вільнюс, Литва, 2017 р.); 14-а міжнародна конференція «ESICUP meeting» (Льєж, Бельгія, 2017 р.); 15-а міжнародна конференція «ESICUP meeting» (Зотер-меер, Нідерланди, 2018 р.); семінар Харківської секції Наукової ради з проблеми «Кібернетика» (Харків, Україна, 2017, 2018 рр.); семінар відділу методів негладкої оптимізації, Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України (Київ, Україна, 2018 р.).

Практичне та теоретичне значення одержаних результатів

Дисертаційна робота продовжує дослідження в рамках знаної наукової школи члена-кореспондента НАН України Ю.Г. Стояна, що є одним із лідерів у світі в даній предметній області. Роботу можна охарактеризувати як фундамента-

льне наукове дослідження, що забезпечує розв'язування задач оптимальної упаковки довільних багатогранників, важливих як з наукової, так і з прикладної точок зору.

Створено нові математичні моделі, розроблено ефективні методи розв'язування задач оптимальної упаковки довільних багатогранників, що дає можливість застосувати для розв'язування розглянутого класу задач сучасні NLP-solvers.

Високий рівень створених засобів математичного моделювання підтверджений публікаціями в міжнародних журналах та апробацією на міжнародних конференціях. Ефективність запропонованих алгоритмів підтверджується низкою обчислювальних експериментів, у ході яких проведено порівняння отриманих результатів з аналогічними найкращими результатами зарубіжних дослідників.

Побудовані у дисертаційній роботі засоби математичного моделювання впроваджені в навчальний процес у Харківському національному університеті радіоелектроніки в курсах «Математичне та комп’ютерне моделювання в системах підтримки прийняття рішень» та «Моделювання геометричних об’єктів». Крім того, отримано довідки про використання результатів роботи в ІТ компанії у програмному забезпеченні, в дослідженнях Національного університету «Львівська політехніка», а також отримано листа підтримки від Дж. Фазано.

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.

Відповідність автореферату дисертації.

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

Зауваження по роботі.

1. При формулюванні задачі упаковки (с.53-54 роботи та с.7 автореферату) допущена неточність: елементи множини $\Omega(p)$ не належать простору R^3 , оскільки в них до трьох координат додається ще і вектор p .
2. Із тексту роботи неясно, чи задовольняють функції, використані в пропонованому підході до розв'язування задачі OPP (етапи 1-2 на с. 93) з використанням бібліотеки IPOPT тим умовам, які накладають реалізовані в бібліотеці алгоритми. Для адекватного розуміння бажано було б також указати, у якій топології чи системі околів визначається локальний оптимум. За відсутності таких відомостей тут варто було б говорити про наближений розв'язок.
3. Доречно навести оцінки обчислювальної складності, головне, кількості ітерацій методу POLYDEC хоча б для певних виділених типів задач упаковки, оскільки у випадку, коли ця величина буде порядку n , то трудомісткість всього обчислювального процесу не буде меншою за $O(n^2)$, до чого прагне автор.

4. У розділі 4 не наведено обґрунтування вибору параметру ε у методі декомпозиції.
 5. Невдалим, на наш погляд, є переклад часто вживаного терміну "equilibrium constraints" як "обмеження балансу", позаяк мова йде про обмеження розбалансу; більш доречним було б сказати "обмеження на рівновагу чи баланс".
 6. Смисл низки змінних не пояснений, тому його доводиться відтворювати із контексту; не допомагає і список позначень. Наприклад, мова йде про позначення n_{Ω} (с.53-54), n_1 , n_2 , m_i^1 , m_i^2 (с.67-68), m_A (с. 70), m_P (с. 79); аналогічно – в авторефераті.
 7. Для чисельних експериментів, розглянутих для задачі кластерінгу, корисним було б отримання оцінок відхилень від глобальних оптимумів (розділ 5), де це було б можливим.
- Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка присвячена актуальній темі і виконана на високому науковому рівні.

Висновки по дисертаційній роботі

На підставі аналізу сучасних публікацій можна зробити висновок про високий науковий рівень дисертаційної роботи.

Робота є завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові наукові фундаментальні та практичні результати в галузі математичного моделювання та обчислювальних методів у напрямі розробки математичних моделей та методів розв'язування задач оптимальної упаковки довільних багатогранників.

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 Стояна Ю.Є. «Математичне моделювання та методи розв'язання оптимізаційних задач упаковки довільних багатогранників» відповідає вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно з пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а її автор, Стоян Юрій Євгенович, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент

завідувач відділу методів комбінаторної оптимізації та інтелектуальних інформаційних технологій Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

20.03.2019



Л.Ф. Гуляницький