

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

на дисертаційну роботу Чугая А. М. "Математичне моделювання та методи розв'язання задач оптимальної упаковки тривимірних тіл", що подана на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Актуальність теми.** Широке коло прикладних задач, що виникають у різноманітних галузях промисловості та науки, починаючи від задач компонування устаткування і побудови генеральних планів промислових підприємств і до задач дослідження структури матеріалів у нанотехнологіях потребують проведення математичного моделювання процесу упаковки тривимірних тіл та розробки ефективних методів оптимізації за певним критерієм.

Слід зазначити, що проблема пошуку оптимальної упаковки певної множини тривимірних тіл у заданому контейнері за наявності технологічних обмежень у відповідності до критеріїв якості упаковки широко відома і для її розв'язання побудовані різні моделі та алгоритми, проте зазвичай вони базуються на використанні евристичних методів, що ґрунтуються на грубій апроксимації реальних форм тривимірних тіл, наприклад, многогранниками. В той же час, створення ефективних методів розв'язання оптимізаційних задач тривимірної упаковки потребує використання загальних принципів математичного моделювання.

Для адекватного моделювання реального розміщення тривимірних тіл актуальним залишається дослідження взаємовідношень між різними парами тривимірних тіл, що ґрунтуються на аналітичному описі теоретико-множинних відношень включення, перетину і дотику геометричних об'єктів. Єдиний шлях вирішення проблеми – це розробка конструктивних засобів математичного моделювання відношень між тривимірними тілами та побудова адекватних математичних моделей задач пошуку оптимальної упаковки тривимірних тіл, який відкриває теорія геометричного проектування.

На сьогоднішній день актуальною є проблема зниження обчислювальної складності алгоритмів розв'язання задач цього класу шляхом створення конструктивних засобів для побудови адекватних математичних моделей орієнтованих на застосування сучасні методів локальної оптимізації. Тому існує потреба у нових засобах математичного моделювання відношень між геометричними об'єктами.

Отже, методологія комп'ютерного моделювання та розв'язання оптимізаційних задач упаковки тривимірних тіл має розглядатися, як

невід'ємна частина теорії геометричного проектування. Дослідженю саме цієї теми присвячена дисертаційна робота Чугая А.М.

**2. Наукова новизна отриманих результатів.** Автором дисертації, що опонується, запропоновано нові засоби математичного та комп'ютерного моделювання, математичні моделі та методи для розв'язання задач пошуку оптимальної упаковки тривимірних тіл. Розроблені моделі та методи є розвитком теорії геометричного проектування, створеної членом-кореспондентом НАН України Ю.Г. Стояном.

Запропонована автором концепція побудови математичних моделей оптимізаційних задач упаковки тривимірних тіл ґрунтуються на методі Ф-функцій, та розвиває апарат формалізації умов упаковки у заданих контейнерах неорієнтованих тривимірних тіл. Розроблено нові засоби математичного моделювання відношень тривимірних тіл у вигляді класів спеціальних функцій, а саме: Ф-функцій, псевдонормалізованих Ф-функцій, квазі-Ф-функцій, що дозволило перевести на якісно новий рівень методи аналітичного опису області допустимих розв'язків задач у предметної області, що досліджується у роботі, і дозволив побудувати узагальнену математичну модель задач упаковки тривимірних тіл. Більш детально, в роботі

- *вперше* розроблено єдину методологію розв'язання задач оптимальної упаковки тривимірних тіл, що допускають одночасно неперервні повороти та трансляції, яка ґрунтуються на розроблених підходах до пошуку упаковки орієнтованих та неорієнтованих тривимірних тіл;
- *набули подальшого розвитку* методи розв'язання оптимізаційних задач розміщення, у тому числі: методи локальної та глобальної оптимізації;
- *удосконалено* методи побудови допустимих початкових точок для пошуку локальних екстремумів задач упаковки і методи пошуку наближень до глобального екстремуму задач упаковки тривимірних тіл.

На базі розроблених автором конструктивних засобів математичного та комп'ютерного моделювання, ефективних за складністю методів і алгоритмів створено програмне забезпечення, що дозволяє отримувати ефективні розв'язки оптимізаційних задач упаковки тривимірних тіл.

**3. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** дисертації підтверджено формально-аргументованим викладенням матеріалу, використанням коректних постановок розглянутих задач, адекватністю використаних математичних моделей, доведенням відповідних теорем, застосуванням сучасних програмних сервісів для розв'язання задач нелінійного програмування, тестовими розрахунками, порівнянням резуль-

татів, отриманих автором, з аналогічними даними, наведеними в літературних джерелах.

**4. Практична цінність роботи.** Сукупність розроблених математичних моделей, методів, алгоритмів та програмних комплексів може використовуватися у вигляді оптимізаційного ядра в системах автоматизованого проектування різних технічних систем та пристройів у машинобудуванні, при проведенні комп'ютерного моделювання структури різних матеріалів у матеріалознавстві, порошковій металургії, нанотехнологіях, при оптимізації процесу 3D-друку для SLS-технології адитивного виробництва, у інформаційно-логістичних системах, що забезпечують оптимізацію перевезення і зберігання різних вантажів.

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

Деякі отримані результати було впроваджено на етапі конструкторського проектування при розв'язанні задач компонувального синтезу для авіаційної промисловості та у логістичних задачах на державному підприємстві "Харківський машинобудівний завод "ФЕД", про що свідчить акт впровадження результатів досліджень.

**5. Загальна характеристика роботи.** Дисертація містить вступ, сім розділів, висновки за результатами роботи і додатки.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі дослідження, вказаний об'єкт, предмет і методи досліджень, визначена наукова новизна і практична значущість отриманих результатів, наведено відомості про публікації за темою дисертаційної роботи і апробацію результатів дослідження.

Перший розділ дисертації присвячений розгляду сфер практичного застосування задач оптимальної упаковки тривимірних тіл у різних галузях науки та техніки, огляду існуючих підходів до розв'язання задач за темою дисертації та визначеню напрямів дослідження.

В другому розділі дисертації сформульовані основні положення, необхідні для побудови конструктивних засобів математичного та комп'ютерного моделювання відношень між геометричними об'єктами, що виникають у задачах оптимальної упаковки тривимірних тіл. Побудований також клас Ф-функцій для орієнтованих тривимірних тіл, поверхня яких утворена циліндричними, конічними, сферичними поверхнями та площинами.

Третій розділ присвячений побудові класу Ф-функцій для неорієнтованих тривимірних тіл, поверхня яких утворена циліндричними, конічними,

сферичними поверхнями та площинами.

У четвертому розділі поставлена загальна задача оптимальної упаковки тривимірних тіл та, побудовано, спираючись на метод Ф-функцій, математичну модель загальної задачі оптимального упаковки тривимірних тіл, а також наведені її важливі особливі випадки. Досліджені також особливості побудованих математичних моделей.

На основі побудованих у попередніх розділах класах Ф-функцій в залежності від форми та особливостей характеристик тривимірних тіл, виду контейнеру, функції цілі та технологічних обмежень побудовано реалізації загальної математичної моделі для таких задач: упаковка максимальної кількості конгруентних циліндрів в область, що має біль ніж одну компоненту зв'язності; компоновка тривимірних тіл з урахуванням допустимих відстаней та зон заборони; упаковка неорієнтованих паралелепіпедів та куль; упаковка тіл, поверхня яких формується циліндричними, конічними та сферичними поверхнями; упаковка паралелепіпедів з урахуванням їх ортогональних поворотів; упаковки опуклих неорієнтованих гомотетичних многогранників тіл; упаковки неопуклих неорієнтованих багатогранників тіл.

У п'ятому розділі представлено єдину методологію розв'язання задач упаковки тривимірних тіл, що допускають одночасно неперервні повороти та трансляції. Розглянуто розроблені підходи та стратегії, на яких ґрунтуються запропонована методологія. Наявність загальної методології є наслідком використання автором математичної моделі для загальної задачі упаковки тривимірних тіл теорії математичного програмування, що дає можливість використовувати на всіх етапах розв'язання задач упаковки сучасні методи нелінійної оптимізації.

Кожна з конкретних, запропонованих автором стратегій базується на використанні послідовності таких методів: 1) методу побудови допустимих точок з області припустимих розв'язків; 2) методу локальної оптимізації; 3) методу глобальної оптимізації.

Для кожної з запропонованих стратегій було розроблено свій набір методів, що враховує особливості задач, які необхідно розв'язати.

У шостому розділі представлено опис розроблених методів побудови початкових точок, пошуку локальних екстремумів і наближення до глобального екстремуму задачі.

У сьомому розділі наведено опис програмної реалізації розроблених методів та застосування технології паралельних обчислень для розв'язання задач упаковки тривимірних тіл. Слід відзначити, що програмне забезпечення розроблено за принципом модульності і складається з таких модулів: модуль введення початкових даних; модуль обчислення Ф-функцій; модуль

формування підзадач; модуль формування початкових точок; модуль локальної оптимізації; модуль глобальної оптимізації. Модульність програмного забезпечення дозволила виконати декомпозицію алгоритму та застосувати технології паралельних обчислень, які забезпечили скорочення часу обчислень. Крім того в цьому розділі наведено результати обчислювальних експериментів, виконаних за допомогою створеного програмного забезпечення. Для ряду задач було виконано порівняння результатів даного дослідження та відомих світових аналогів. Розроблена в роботі методологія дозволила отримати кращі значення функції цілі та зменшити час розв'язання.

Додатки дисертації містять акти про впровадження результатів дослідження та свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

**6. Оцінка змісту дисертації і її завершеність в цілому.** Дисертація представляє собою завершену наукову роботу, яка має внутрішню єдність, сукупність наукових теоретичних положень і експериментальних результатів, що свідчать про індивідуальний внесок здобувача у науку.

Теоретичні положення та експериментальні результати є оригінальними, взаємопов'язаними, вони отримані на основі надійного методичного забезпечення. Висунуті у роботі задачі послідовно вирішено автором і, таким чином, досягнуто поставлену мету дослідження – ефективне розв'язання оптимізаційних задач упаковки тривимірних тіл шляхом побудови точних математичних моделей та розробки підходів, що базуються на застосуванні оптимізаційних методів нелінійного програмування та сучасних програмних сервісів розв'язання задач нелінійного програмування.

Текст автореферат повною мірою відображає зміст дисертації.

**7. Апробація та повнота викладення основних результатів роботи.** За темою дисертації опубліковані 64 наукових праці, у тому числі: 1 монографія (видавництво Springer Optimization and Its Applications, індексується науково-метричною базою Scopus), 32 статті у наукових фахових виданнях, що входять до переліку наукових спеціалізованих видань, серед яких 8 статей в міжнародних журналах, що індексуються науково-метричною базою Scopus, з них 3 – у високорейтингових зарубіжних (European Journal of Operational Research, Journal of the Operational Research Society, Advances in Decision Sciences), 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 30 тез та доповідей на міжнародних наукових конференціях (з них 3 – на міжнародних конференціях ESICUP, European Conference on Operational Research, Application of information and communication technology and statistics in economy and education).

Н-індекс цитування робіт дисертанта за науково-метричної міжнародною базою Scopus дорівнює 4 (11 робіт).

Загалом слід констатувати, що здобуток виконаних досліджень – це якісно новий рівень теоретичного обґрунтування і практичної реалізації методів розв'язання класу задач упаковки неорієнтованих тривимірних тіл.

**8. Зауваження по дисертації і автореферату** здебільшого є наслідком значного обсягу матеріалу самої роботи. Правда, у тексті чимало простих помилок і похибок, на які вказано дисертантові.

8.1. В роботі не наведений список скорочень, що породжує певні складності сприйняття, наприклад, автор використовує скорочення NLP, маючи на увазі «non-linear programming», хоча це скорочення зазвичай використовується для Natural Language Processing. Крім того, разом з NLP автор використовує скорочення НЛП.

8.2. Перший розділ дисертації, який включає огляд літератури по темі роботи, переобтяжений, як на мене зайвою, інформацією стосовно можливих сфер застосування задач упаковки.

8.2. При розгляді задачі компоновки варто було б ввести максимально припустимі відстані та розглянути цю задачу одночасно із задачею маршрутизації.

8.3. Цікаво було б розширити запропонований підхід до моделювання відносин між тривимірними тілами на клас множин, поверхня яких описується сплайнами з огляду на широке використання таких поверхонь як для деталей, що повинні мати аero- або гідродинамічну якість, так і для деталей з сучасним складним дизайном.

8.4. Пошук локального мінімуму задачі упаковки багатогранних тіл автор розбиває на два етапи: лінійний та нелінійний. Чи доречне таке розбиття, адже лінійна оптимізація може звузити можливості пошуку.

8.5. Можливо, що застосування паралельних обчислень було б ефективніше на базі багатоагентних технологій, а не технологій із загальною пам'яттю.

Вказані недоліки зумовлені як складністю предмету досліджень, так і великим обсягом роботи, частину з них можна розглядати як побажанням щодо наступних напрямків досліджень. Загалом наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

**9. Висновок.** Результати дисертаційної роботи оригінальними, достатньо обґрунтованими і викладені у авторських публікаціях у фахових виданнях. Дисертація є завершеною роботою, в якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності

можна охарактеризувати як значне досягнення у розв'язанні оптимізаційних задач упаковки тривимірних тіл із застосуванням нових засобів математичного та комп'ютерного моделювання і ефективних методів оптимізації. Ці результати можна застосовувати на практиці при дослідженні класів задач розміщення геометричних об'єктів у різноманітних галузях науки та промисловості. Об'єкт, предмет, мета і задачі дослідження, а також отримані нові наукові результати повністю відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Результати наукових досліджень кандидатської дисертації А.М. Чугая не виносяться на захист докторської дисертації. Автореферат у повному обсязі відбиває зміст дисертації.

З огляду на це, вважаю, що подана до захисту дисертаційна робота є завершеною науковою працею, виконаною на високому науковому рівні, відповідає вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, зокрема, вимогам п.п. 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою КМУ від 24.07.2013 № 567, а а її автор, Чугай Андрій Михайлович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора 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 імені В.Н. Каразін

Г. М. Жолткевич

Підпис професора Жолткевича Григорія Миколайовича засвідчує.

Начальник відділу кадрів Харківського  
національного університету імені В.Н. Каразін,  
професор

С. М. Куліш

