

## ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Чугая Андрія Михайловича**

**«Математичне моделювання та методи розв'язання задач  
оптимальної упаковки тривимірних тіл»,**

поданої на здобуття наукового ступеня

*доктора технічних наук*

за спеціальністю

*01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи*

**Актуальність теми дослідження.** Задачі упаковки тривимірних тіл активно досліджуються науковою спільнотою на протязі багатьох років. Такий інтерес пояснюється як великою їх складністю з теоретичної точки зору, так і широким спектром їх застосування при розв'язанні актуальних практичних задач. Так, у науці, техніці та промисловості повсюдно виникають питання, пов'язані з упаковкою твердих часток у різні типи контейнерів. Однією з найважливіших галузей застосування тривимірних задач упаковки є нанотехнології, де аналіз характеристик упаковок твердих часток відіграє велику роль при моделюванні, дослідженні та оптимізації просторових, структурних і макроскопічних властивостей конденсованих середовищ, рідин, склоподібних матеріалів; вивченні електропровідності, витрат рідини, розподілу напружень та інших механічних властивостей сипучих матеріалів; дослідженні таких процесів, як осадження, ущільнення і спікання.

Крім того, варто зазначити такі галузі застосування даного класу задач: порошкова металургія, медицина (планування радіохірургічного лікування), нафтовидобувна промисловість (дослідження пористої структури нафтоносних порід), логістика (розміщення і завантаження контейнерів для транспортування), розкрій різноманітних природних кристалів, компоновка приладів, будівель та ін.

На даний час створено досить широкий спектр методів для розв'язання оптимізаційних задач розміщення двовимірних геометричних об'єктів. Найменш вивченими з фундаментальної точки зору залишаються задачі оптимального розміщення неорієнтованих (тобто таких, що дозволяють неперервні трансляції та довільні повороти) тривимірних тіл.

У зв'язку з цим актуальною проблемою є створення єдиного підходу до математичного моделювання і розв'язання оптимізаційних задач упаковки тривимірних тіл на базі арсеналу засобів, розвинених в рамках теорії оптимізаційного геометричного проектування, що дозволить подивитись на дану проблему з єдиних позицій і залучити до розв'язання даного класу задач всю міць апарату сучасного математичного програмування.

Дисертаційна робота присвячена математичному і комп'ютерному моделюванню процесу оптимізації упаковки тривимірних геометричних об'єктів, що дозволяють неперервні трансляції і повороти, з урахуванням мінімально припустимих відстаней.

Отже, зважаючи на все вищезгадане, можна зробити висновок, що тема дисертаційної роботи є актуальною.

## **Обґрунтованість та достовірність**

Основні положення та висновки дисертаційної роботи Чугая А.М. можна вважати обґрунтованими. Робота базується на використанні методів аналітичної геометрії, геометричного проектування та нелінійної оптимізації. Достовірність отриманих у дисертації результатів забезпечено коректністю постановки задач, коректним застосуванням математичного апарату, застосуванням конструктивних апробованих засобів математичного моделювання, надійністю використаних методів нелінійної оптимізації, розв'язанням тестових задач та порівнянням результатів з наведеними в літературних джерелах чисельними розв'язками інших авторів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У роботі побудовано конструктивні засоби математичного моделювання взаємовідносин тривимірних геометричних об'єктів, що дозволяють неперервні трансляції і повороти, розроблена стратегія і методи розв'язання задачі упаковки цих об'єктів. Основні наукові результати дисертації:

1) набув подальшого розвитку метод  $\Phi$ -функції, що полягає в побудові таких нових класів функцій: класу  $\Phi$ -функцій для орієнтованих тривимірних тіл, поверхня яких утворена циліндричними, конічними, сферичними поверхнями та площинами; класу  $\Phi$ -функцій та квазі- $\Phi$ -функцій для неорієнтованих тривимірних тіл, поверхня яких утворена циліндричними, конічними та сферичними поверхнями;

2) вперше побудовано математичну модель загальної задачі оптимальної упаковки неорієнтованих тривимірних тіл, поверхня яких утворена циліндричними, конічними, сферичними поверхнями і площинами та різні її реалізації в залежності від: форми та особливостей характеристик тривимірних тіл (конгруентні, орієнтовані, неорієнтовані); виду контейнеру (прямий паралелепіпед, пряма призма, основа якої утворена дугами кіл та відрізками прямих, куля); функції цілі (мінімізація висоти контейнеру, мінімізація об'єму контейнеру, максимізація кількості упакованих тіл); технологічних обмежень (мінімально допустимі відстані, зони заборони);

3) вперше розроблено єдину методологію розв'язання задач оптимальної упаковки тривимірних тіл, що допускають одночасно неперервні повороти та трансляції, яка ґрунтується на підходах до пошуку упаковки орієнтованих та неорієнтованих тривимірних тіл;

4) розроблено нові стратегії розв'язання задач упаковки тривимірних тіл, що ґрунтуються на: послідовній статистичній оптимізації за допомогою методу околів, що звужуються; гомотетичних перетвореннях та пошуку перспективних початкових точок; багатоетапному методі мультістарту.

5) набули подальшого розвитку та удосконалення методи розв'язання оптимізаційних задач упаковки тривимірних тіл, які враховують неперервні повороти та трансляції: методи побудови допустимих початкових точок для пошуку локальних екстремумів (регулярних розміщень, гомотетичних перетворень об'єктів, кластеризації); методи локальної оптимізації, які ґрунтуються на використанні методу внутрішньої точки та методу можливих напрямів разом зі стратегіями активного набору, вибору підобластей та

декомпозиції задачі на задачі меншої розмірності й обчислювальної складності; методи пошуку наближень до глобального екстремуму задач упаковки (модифікації методу околів, що звужуються, та методу побудови перспективних розміщень і організації переходів до локальних екстремумів з кращими значеннями функції цілі).

**Практичні результати дисертації.** Можливі сфери практичного застосування задач оптимальної упаковки тривимірних тіл умовно можна класифікувати таким чином:

задачі оптимізації компоновочних рішень;

комп'ютерне моделювання у матеріалознавстві, порошковій металургії та нанотехнологіях;

оптимізація процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва;

інформаційно-логістичні системи, що забезпечують оптимізацію перевезення та зберігання вантажів.

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

**Повнота викладення наукових положень.** За темою дисертації опубліковані 64 наукових праці, у тому числі: 1 монографія, 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).

Дисертація містить вступ, сім розділів, висновки по роботі та додатки.

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 і про апробацію результатів дослідження, а також зазначено особистий внесок здобувача у наукові праці, написані у співавторстві.

*Перший розділ* присвячено огляду наукових праць за темою дисертації, у якому розглядається застосування задач упаковки і методи їх розв'язання, та вибору напряму дослідження.

У *другому розділі та третьому розділах* будуються конструктивні засоби математичного моделювання взаємодії тривимірних тіл. Побудовано нові класи Ф-функцій та квазі-Ф-функцій як для орієнтованих (другий розділ), так і

неорієнтованих тривимірних тіл (третьій розділ), поверхня яких сформована циліндричними, конічними, сферичними поверхнями та площинами. У другому розділі отримані аналітичні вирази умов неперетинання для двох сферо циліндрів; циліндра та сферо циліндра; сферичних сегментів; кулі, циліндра, сфероциліндра, паралелепіпеда з сферичним сегментом та умови включення циліндра у пряму призму, границя основи якої сформована відрізками прямих та дугами кіл. У третьому розділі отримані  $\Phi$ -функції для опуклих та неопуклих багатогранників; паралелепіпеда, багатогранника з кулею;  $\Phi$ -функції та квазі- $\Phi$ -функції, поверхня яких сформована циліндричними, конічними, сферичними поверхнями та площинами. Таким чином, запропоновані  $\Phi$ -функції та квазі- $\Phi$ -функції послужили основою для побудови точних математичних моделей упаковки тривимірних тіл.

У *четвертому розділі* побудовано математичну модель загальної задачі оптимальної упаковки неорієнтованих тривимірних тіл, поверхня яких сформована циліндричними, конічними, сферичними поверхнями і площинами. Основною перевагою побудованої математичної моделі є те, що вона представлена у вигляді задачі нелінійного програмування. Цей факт дозволяє розробити підходи до розв'язання задач упаковки тривимірних тіл з використанням сучасних NLP солверів. На основі побудованих класів  $\Phi$ -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: упаковки максимальної кількості конгруентних циліндрів у багатозв'язну область; компоновки тривимірних тіл з урахуванням допустимих відстаней та зон заборони; упаковки неорієнтованих паралелепіпедів та куль; упаковки тіл, поверхня яких формується циліндричними, конічними та сферичними поверхнями; упаковки паралелепіпедів з урахуванням їх ортогональних поворотів; упаковки опуклих неорієнтованих гомотетичних багатогранників; упаковки неопуклих неорієнтованих багатогранників.

Завдяки тому, що математична модель загальної задач упаковки тривимірних тіл побудована у вигляді задачі математичного програмування, в роботі була розроблена єдина методологія розв'язання задач упаковки, яка описана у *п'ятому розділі*. На всіх етапах розробленої методології застосовуються сучасні методи нелінійної оптимізації. Запропонована методологія використовує декілька підходів, принципова відмінність яких полягає в можливості зміни орієнтації тривимірних тіл під час пошуку розв'язку задач, адже довільні повороти об'єктів значно ускладнюють розв'язання задач та вимагають використання інших методів. Через це методологія використовує два основних підходи до розв'язання задач: упаковки орієнтованих тривимірних тіл та упаковки неорієнтованих тривимірних тіл.

У *шостому розділі* представлено розроблені методи побудови припустимих початкових точок, пошуку локальних екстремумів та наближення до глобальних екстремумів. Для застосування методів локальної оптимізації необхідно побудувати початкові точки, які належать області припустимих розв'язків. Однією з вимог до методів побудови початкових точок для задач упаковки тривимірних тіл є забезпечення генерації різноманіття точок та зменшення обчислювальних витрат з метою їх швидкої побудови. В роботі

були розроблені такі методи: для упаковки конгруентних тривимірних тіл – метод регулярних розміщень; для опуклих тіл, поверхня яких утворена конічними, циліндричними та сферичними поверхнями, – метод гомотетичних перетворень; для неопуклих багатогранних тіл – метод кластеризації.

Аналіз особливостей математичних моделей задач упаковки показав, що область припустимих розв'язків описується дуже великою кількістю нелінійних нерівностей. Цей факт потребує розробки методів, які дозволять ефективно розв'язати проблему великої розмірності задач. Основна ідея запропонованих методів локальної оптимізації ґрунтується на декомпозиції основної задачі на підзадачі зі значно меншою кількістю обмежень та меншою розмірністю. Для цього виконуються такі етапи: послідовна генерація підобластей області допустимих розв'язків, які містять початкову точку; визначення підсистеми  $\varepsilon$ -активних обмежень; пошук за допомогою сучасних НЛП солверів другого порядку локальних екстремумів на обраних підобластях; організація переходу до інших підобластей.

Однією з важливих властивостей задач упаковки є їх NP-складність. Через це здійснити повний перебір локальних екстремумів не можливо. Тому для пошуку розв'язку таких задач, в основному, використовується стохастичний пошук, який не гарантує знаходження оптимального розв'язку. В роботі запропоновано методи глобальної оптимізації, які дозволяють знаходити наближення до глобальних екстремумів, використовуючи такі методи: 1) послідовної статистичної оптимізації за допомогою методу околів, що звужуються; 2) побудови перспективних розміщень та організації переходів до локальних екстремумів з кращими значеннями функції цілі. У першому випадку використовувалась модифікація методу околів, що звужуються. Цей метод дозволяє здійснити спрямований випадковий перебір локальних екстремумів та орієнтований на оптимізацію функцій, які задано на множині переставлень. Метод заснований на властивостях ймовірнісного розподілу локальних екстремумів функції цілі. Для його реалізації введено метрику на просторі перестановок. Пошук кращих значень функції цілі здійснюється в околах, заданих на множині перестановок. На кожному кроці методу, виходячи з накопиченої в процесі роботи методу інформації, обираються центри й радіуси нових околів. Якщо при переході до чергового кроку методу значення функції цілі не покращується, то радіус околів зменшується.

У цьому розділі наведено опис програмної реалізації розроблених методів та застосування технології паралельних обчислень для розв'язання задач упаковки тривимірних тіл. Наведено результати обчислювальних експериментів, виконаних за допомогою створеного програмного забезпечення. Для деяких задач було виконано порівняння результатів даного дослідження та відомих світових аналогів. Результати порівняння показали, що розроблена в роботі методологія дозволила отримати як кращі значення функції цілі, так і значно зменшити час розв'язання.

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

**Зауваження до дисертаційної роботи** є насамперед наслідком великого обсягу викладеного матеріалу і складності галузі дослідження.

1. В авторефераті відсутні рекомендації відносно того, в яких випадках необхідно використовувати  $\Phi$ -функції, а в яких квазі- $\Phi$ -функції та не наведено жодного приклада побудови квазі- $\Phi$ -функції для наведеного класу тіл, що розглядаються в роботі .

2. В змістовній постановці загальної задачі упаковки тривимірних тіл у якості функції цілі розглядається оптимізація значень метричних характеристик контейнеру ( стор.15 автореферату). Не зрозуміло, як максимальна кількість упакованих тіл впливає на зміну метричних характеристик контейнеру.

3. В першому висновку по роботі декларується про розробку методів пошуку оптимальної упаковки неорієнтованих тривимірних тіл, хоча в роботі знаходяться локальні екстремуми та наближення до глобальних.

4. Не зовсім зрозуміло, чи призводить до втрати деяких локальних екстремумів кластеризація багатокутників, яка використовується на етапі побудови початкових точок.

5. Основна ідея запропонованих методів локальної оптимізації ґрунтується на декомпозиції основної задачі на підзадачі зі значною меншою кількістю обмежень та меншої розмірності. Як визначається компроміс між кількістю під задач та їх розмірністю?

6. В роботі не розглянуто питання скорочення обсягу надлишкової інформації, що з'являється в ході побудови  $\Phi$ -функції для складених об'єктів.

7. У авторефераті відсутні результати порівняння зі світовими аналогами, хоча в дисертації є переконливі приклади лідерства результатів автора роботи.

8. Цікаво було б дослідити питання врахування похибок вихідних даних для розроблення засобів моделювання відносин між тривимірними тілами.

Зроблені зауваження ніяким чином не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

**Висновки.** Результати дисертаційної роботи є новими, оригінальними, та викладені у публікаціях автора в наукових фахових виданнях. Дисертація є завершеною науковою роботою, у якій розроблено засоби математичного моделювання взаємовідносин цілого ряду тривимірних тіл, побудовано математичні моделі та отримані нові ефективні методи розв'язання задачі упаковки тривимірних тіл.

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 А.М. Чугай захистив кандидатську дисертацію, не виносяться на захист докторської дисертації.

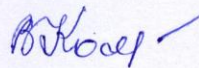


Зміст автореферату дисертації повністю відповідає основним положення самої дисертаційної роботи.

Вважаю, що дисертаційна робота Чугая А.М. «Математичне моделювання та методи розв'язання задач оптимальної упаковки тривимірних тіл» відповідає вимогам пунктів 9,10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013р. № 567, а її автор заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи

### Офіційний опонент

професор кафедри фізико-математичних  
дисциплін Національного університету  
цивільного захисту України  
доктор технічних наук, професор



Комяк В.М.

Підпис Комяк В.М.  
Зачиний секретар  
К.Механ.к., С.К.С.



А.Р. Подігоси