

Голові спеціалізованої вченої ради Д. 26.255.01
При Інституті телекомунікацій і глобального
інформаційного простору НАН України
030186, м. Київ, Чоколівський бул., 13.

ВІДГУК
офіційного опонента

професора кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики
Національного університету водного господарства та природокористування
доктора технічних наук, професора Бомби Андрія Ярославовича
на дисертаційну роботу Остапенка Артема Олексійовича
«Моделювання в'язких течій методом ґраткових рівнянь Больцмана при
помірних та великих числах Рейнольдса»,
що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні
методи

Актуальність теми дисертаційної роботи

Довгі роки зусилля математиків та механіків були спрямовані на вивчення динаміки в'язкої рідини, що описується рівняннями Нав'є-Стокса. При цьому нелінійність рівнянь Нав'є-Стокса та малі параметри при старших похідних створюють серйозні труднощі, як при аналітичному дослідженні, так і при чисельному інтегруванні.

На сьогодні одним із важливих етапів проектування будь-яких систем є математичне та комп'ютерне моделювання. Зокрема, заміна натурних експериментів на комп'ютерні дозволяє менш затратно, з часом і більш ефективно досліджувати гідродинамічні процеси, стаціонарні та нестаціонарні течії рідини та газів. Комп'ютерне моделювання в гідромеханіці використовується при проектуванні автомобілів, літаків, дронів, мініатюрних систем охолодження тощо. Такий широкий клас задач, кожна з яких потребує врахування великої кількості різних специфічних

факторів, зумовив розвиток методів обчислювальної гідродинаміки та появу нових підходів у моделюванні.

Одним із таких сучасних підходів є метод ґраткових рівнянь Больцмана, що моделює динаміку в'язкої рідини кінетичним рівнянням Больцмана. Цей підхід має низку переваг у порівнянні з класичним розв'язком рівняння Нав'є-Стокса. Серед них: універсальність методу при моделюванні течій у довільних складних областях, використання явної схеми обчислення тиску та широкі можливості у застосуванні технологій паралельних обчислень.

Таким чином, розвиток нових підходів в обчислювальній гідродинаміці, зокрема методів, що базуються на розв'язку рівняння Больцмана, та створення на їх основі гнучких та ефективних інструментів для моделювання течій в'язкої рідини у широкому діапазоні чисел Рейнольдса є актуальною задачею. Саме цій актуальній темі і присвячено дисертаційну роботу Остапенка Артема Олексійовича.

Загальна оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури, що складається зі 162 найменувань та шести додатків. Загальний обсяг дисертації становить 183 аркуша, з яких основний зміст роботи розкрито на 127 аркушах.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми дисертації, чітко сформульовано мету, яка деталізується у задачах дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження. Конкретизовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено огляд наукової літератури за темою дослідження, розглянуті класичні підходи у моделюванні течії в'язкої рідини, описано гібридні методи обчислювальної гідродинаміки та етапи розвитку дискретних моделей рідини. Докладно розглянуто етапи розвитку методу ґраткових рівнянь Больцмана та його можливості. Сформульовано задачу дисертаційного дослідження: розвинути метод ґраткових рівнянь Больцмана для отримання стійких розв'язків за менший проміжок часу при моделюванні течій в'язкої рідини з помірними та великими числами Рейнольдса.

У **другому розділі** докладно описується чисельна модель методу ґраткових рівнянь Больцмана. Викладено основні принципи мезоскопічного рівня абстракції при описі рідини, етапи дискретизації рівняння Больцмана та модель зіткнення частинок Бхатнагара-Гросса-Крука. Описано проблеми стійкості методу. Особливу увагу приділено алгоритму та програмній

реалізації. Викладено модифікований алгоритм методу та вдосконалений метод обробки даних, що дозволяє пришвидшити розрахунки.

У **третьому розділі** дисертації описані методи задання початкових і граничних умов для прикладних задач. Показано використання сфери даних для задання циклічних граничних умов. Описано модифіковану схему для реалізації умови прилипання.

Четвертий розділ присвячено тестуванню комп'ютерної програми, розробленої на базі розвинутого методу. Проведено низку досліджень щодо можливостей модифікованих чисельних схем та меж застосування розвинутого алгоритму. Результати четвертого розділу показали розширення меж застосування методу та збільшення швидкості розрахунків, зберігаючи при цьому точність та фізичність отриманих розв'язків.

У **п'ятому розділі** дисертації описано розроблений метод регуляризації чисельних розв'язків рівняння Больцмана. Представлено результати тестування методу на класичній задачі про обтікання кругового циліндра при великих числах Рейнольдса. Представлені результати моделювання обтікання профілю Nasa 0012 течією в'язкої рідини із різними кутами атаки, а також моделювання течій у каналах довільних складних геометричних форм.

Результати п'ятого розділу показують розширення меж застосування методу на область великих чисел Рейнольдса, а також широкі можливості при моделюванні течій в областях довільних геометричних форм.

Зміст роботи відповідає поставленій меті та завданням дослідження, а також паспорту спеціальності 01.05.02 – «математичне моделювання та обчислювальні методи» з технічних наук.

Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих в дисертації

Отримані автором наукові результати у відповідності до поставлених задач дослідження є логічними, не суперечать фундаментальним фізичним і математичним закономірностям та підтверджуються достатньою апробацією основних положень і висновків на міжнародних науково-практичних конференціях та семінарах.

Достовірність отриманих в роботі положень і наукових результатів забезпечується відомими та перевіреними математичними моделями, коректністю постановок математичних задач та застосування математичного апарату, а також задовільними результатами тестування модифікованих чисельних схем та алгоритмів на низці задач у широкому діапазоні чисел Рейнольдса. Проведено детальне порівняння кінематичних та динамічних

характеристик течії із результатами натурних експериментів та інших чисельних розв'язків, отриманих за допомогою сучасних пакетів обчислювальної гідродинаміки.

Наукова новизна дисертаційної роботи

До основних нових наукових результатів, які отримані в дисертаційній роботі, належать:

1. Вдосконалено алгоритм методу граткових рівнянь Больцмана, в якому в'язкість рідини задається через змінну граткову швидкість частинок та параметр релаксації.

2. Оптимізовано алгоритм методу за рахунок використання нової структури даних на етапі переміщення частинок у гратковому просторі.

3. Вдосконалено чисельну модель, що описує взаємодію рідини із твердими тілами.

4. Вперше розроблено метод регуляризації чисельного розв'язку рівняння Больцмана при моделюванні в'язких течій із великими числами Рейнольдса.

5. Створено програмно-моделюючу систему для моделювання в'язких течій методом граткових рівнянь Больцмана із можливістю завантаження довільних складних геометрій.

Практичне значення одержаних автором наукових результатів

Результати роботи мають наукове значення для розвитку математичного моделювання течій в'язкої нестисливої рідини. Про це свідчать довідки про впровадження результатів дослідження у навчальні курси:

- «Аналітичні та чисельні методи гідродинаміки» для студентів спеціальності 113 – «Прикладна математика» кафедри вищої та прикладної математики ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».
- «Моделювання складних систем» для бакалаврів спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки» кафедри комп'ютерних наук та вищої математики Донецького державного університету управління.

Оцінка мови та стилю викладання дисертації та автореферату

Дисертація та автореферат написані грамотно, а стиль викладених в них матеріалів відповідає вимогам стандарту ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки та техніки» і, в цілому, забезпечує доступність їх сприйняття.

Зміст автореферату відображає основні результати роботи, які приведені в дисертації. Дисертація по тематиці і результатам відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – «математичне моделювання та обчислювальні методи» з технічних наук.

Повнота викладення наукових результатів дисертації в наукових роботах

За результатами проведених досліджень опубліковано 20 робіт, у яких відображений основний зміст дисертації та етапи її підготовки. Сім наукових праць опубліковані в фахових виданнях, серед яких 1 індексується наукометричною базою Scopus та 13 публікацій оприлюднені у збірниках матеріалів науково-практичних конференцій.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційного дослідження

Водночас, необхідно вказати на зауваження щодо дисертаційної роботи, що мають переважно дискусійний характер:

1. У п. 2.6 викладається зв'язок рівняння Больцмана із рівнянням Нав'є-Стокса із посиланнями на відповідну літературу, однак, варто було б приділити більше уваги розкладу Чепмена-Енського.

2. У п. 4.1 до рис. 4.6, 4.8, 4.10, що ілюструють поле швидкостей у квадратній каверні, варто було б додати картини ліній течії.

3. Хоча у п. 5.2 дисертантом проведено ретельне тестування методу регуляризації на основі порівняння різних характеристик течії у широкому діапазоні чисел Рейнольдса, слід було б побудувати графіки залежності коефіцієнтів лобового опору та підйомної сили від числа Рейнольдса.

4. Із автореферата та дисертації видно, що автор виступав на конференціях-семінарах типу «Метод дискретних особливостей в задачах математичної фізики», але чомусь в авторефераті немає порівняльних характеристик методів (при прогнозуванні процесів обтікання профілів, течії у каналах складної геометричної конфігурації тощо).

5. Хоча матеріал в принципі є зрозумілим для сприймання, але дещо дивною є в окремих місцях розстановка знаків, наприклад, укінці речення, що перед формулою (9), стоїть крапка і в кінці ж формули (9) також стоїть крапка (тобто має місце формула без слів), далі ідуть також формули (10) – (13) і відповідні словосполучення без розділових знаків.

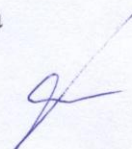
Зазначені недоліки не є визначальними. Вони суттєво не впливають на загальне позитивне враження від роботи, не зменшують її наукової та практичної значимості.

Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам та загальний висновок

Таким чином, дисертаційна робота Остапенка Артема Олексійовича за темою «Моделювання в'язких течій методом ґраткових рівнянь Больцмана при помірних та великих числах Рейнольдса» є завершеною, одноосібно написаною кваліфікаційною науковою працею. За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значимістю одержаних результатів відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – «математичне моделювання та обчислювальні методи» з технічних наук та вимогам п. п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», щодо кандидатських дисертацій. Тому її автор – Остапенко Артем Олексійович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – «математичне моделювання та обчислювальні методи».

Офіційний опонент:

професор кафедри комп'ютерних наук
та прикладної математики
Національного університету водного господарства
та природокористування
доктор технічних наук, професор



А. Я. Бомба

