

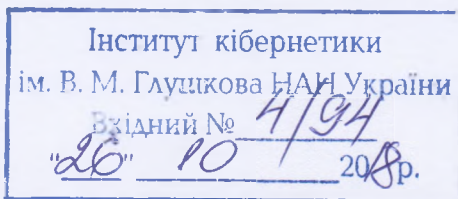
## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Чистякова Олексія Валерійовича  
“Гібридні алгоритми дослідження та розв’язування алгебраїчної проблеми власних значень для розріджених матриць”, подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Актуальність теми дисертації.** Розв’язання алгебраїчної проблеми власних значень є однією з фундаментальних задач чисельного моделювання в багатьох предметних областях. Математичні моделі великого числа інженерних задач описуються системами диференціальних рівнянь або різницевиими рівняннями, розв’язання яких полягає у визначенні власних значень і власних векторів матриць, що, як правило, мають розріджену структуру. Характерною їх особливістю є надвеликі порядки задач (до десятків мільйонів), а кількість ненульових елементів складає  $kn$ , де  $n \ll k$ , а  $n$  – порядок матриці. Тому проблема створення ефективних алгоритмів розв’язання алгебраїчної проблеми власних значень розріджених матриць на комп’ютерах гібридної архітектури – є справді актуальною.

Математичне моделювання процесів та явищ у різних предметних областях, розрахунок на комп’ютерах все більш повних моделей об’єктів і процесів вимагає безперервного зростання продуктивності комп’ютерів. Але підвищення продуктивності за рахунок зростання тактової частоти процесорів практично вже досягло своєї межі. Вимоги до високопродуктивних обчислень набагато випереджають можливості традиційних паралельних комп’ютерів, навіть не зважаючи на багатоядерність процесорів. І зараз ця проблема вирішується використанням потужних суперкомп’ютерів гібридної архітектури, наприклад комп’ютерів з багатоядерними CPU та графічними процесорами (GPU), які поєднують MIMD і SIMD-архітектури (гібридні комп’ютери). Про актуальність використання паралельних комп’ютерів із графічними процесорами для високопродуктивних обчислень свідчить хоча б той факт, що суперкомп’ютерні системи з такою архітектурою постійно присутні в першій десятці останнього рейтингу високопродуктивних суперкомп’ютерів у світі Top500. Однак якнайповніше використати потенціал високопродуктивних комп’ютерів можна лише за наявності ефективного алгоритмічно-програмного забезпечення, яке враховує як властивості задачі, так і особливості гібридної архітектури.

Ця проблема найчастіше вирішується використанням гібридних комп’ютерів, які поєднують MIMD- і SIMD-архітектури, тобто реалізуються обчислення на багатоядерних комп’ютерах (CPU) із прискоренням на графічних процесорах (GPU). Проте найповніше використати потенціал таких високопродуктивних гібридних



комп'ютерних систем можна лише за наявності відповідного математичного забезпечення.

Створення алгоритмічно-програмного забезпечення для комп'ютерів гібридної архітектури є значно складнішою справою навіть порівняно з програмним забезпеченням комп'ютерів MIMD-архітектури. По-перше, ускладнення архітектури гібридних комп'ютерів спричиняє істотне збільшення комунікаційних втрат і зниження їх ефективності. А крім того, проблеми достовірності комп'ютерних розв'язків із зростанням обсягів задач, що розв'язуються на таких комп'ютерах, також поглиблюються.

Актуальним проблемам створення ефективних гібридних алгоритмів для розв'язування проблеми власних значень із розрідженими матрицями та розробці програмного інструментарію для автоматизації процесу дослідження задач і їх розв'язування з оцінками достовірності комп'ютерних результатів на гібридному комп'ютері з багатоядерними і графічними процесорами і присвячена дисертаційна робота О.В. Чистякова.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота Олексія Чистякова виконувалася відповідно до планів наукових досліджень відділу чисельних методів та комп'ютерного моделювання Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України в рамках науково-дослідних тем: «Розробити методи та алгоритми паралельних і розподілених обчислень для дослідження математичних моделей з розрідженими структурами даних» (№ держреєстрації 0114U002091, 2014–2018); «Розробка апаратно-програмного комплексу на базі інтелектуального персонального суперкомп'ютера гібридної архітектури для математичного моделювання в оборонній галузі, галузях машинобудування та будівництві», (№ держреєстрації 0115U002908, 2015); «Розробити методологію створення інтелектуального програмного забезпечення для дослідження та розв'язання задач науки і інженерії на комп'ютерах гібридної архітектури», (№ держреєстрації 0115U000157, 2015–2017); «Розробка інтелектуального паралельного комп'ютера на процесорах нового покоління Intel Xeon Phi для задач науки та інженерії», (№ держреєстрації 0117U001345, 2017); «Розробити паралельні алгоритми розв'язання задач лінійної алгебри з розрідженими структурами даних на комп'ютерах з процесорами Intel Xeon Phi», (№ держреєстрації 0117U006182, 2017–2018).

**Об'єм, структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та списку використаних джерел.

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел, пов'язаних з тематикою дисертації та обґрунтуванню вибору напрямку досліджень. Наведено необхідні відомості з теорії розріджених матриць. Проведено огляд форматів зберігання розріджених матриць, а також алгоритмів оптимізації структури заповнення матриці

У другому розділі розроблено гібридні алгоритми ітераційних методів варіаційного типу для розв'язування часткової узагальненої алгебраїчної проблеми власних значень з розрідженими симетричними матрицями на основі їх зведення до блочно-діагонального виду з обрамленням, а саме: гібридний однокроковий алгоритм поперемінно-трикутного методу та гібридний алгоритм узагальненого методу спряжених градієнтів. Виконано дослідження ефективності та прискорення.

Третій розділ присвячено розробці та дослідженню гібридного алгоритму методу ітерацій на підпросторі для розв'язування часткової узагальненої алгебраїчної проблеми власних значень (знахлдження лише декількох мінімальних власних значень) зі стрічковими симетричними додатно визначеними матрицями. Розглянуто реалізацію гібридного алгоритму методу ітерацій на підпросторі, запропоновано ефективні способи розподілу даних між процесами CPU та подано результати експериментального дослідження алгоритму на комп'ютерах гібридної архітектури. Проведено дослідження ефективності та прискорення запропонованого алгоритму.

У четвертому розділі запропоновано програмне забезпечення для розв'язування часткової узагальненої проблеми власних значень розріджених додатно визначених матриць на багатоядерних комп'ютерах з графічними процесорами, а також на паралельних комп'ютерах з новітніми хостпроцесорами Intel Xeon Phi. Комп'ютерні програми реалізують нові гібридні алгоритми на основі поперемінно-трикутного методу та узагальненого методу спряжених градієнтів для розріджених матриць, а також гібридний алгоритм методу ітерацій на підпросторі для стрічкових матриць. Основними методологічними принципами створення програмного забезпечення є: попереднє перевпорядкування структури вихідної розрідженої матриці до регулярної структури; автоматичне виконання етапів розпаралелювання – побудова топології з обчислювальних пристроїв гібридного комп'ютера (вузлів, процесорів і ядер CPU, процесорів GPU) та ефективний розподіл даних задачі між цими пристроями; забезпечення синхронізації обчислень і обмінів; аналіз достовірності отриманих комп'ютерних результатів. Розроблене алгоритмічно-програмне забезпечення – складова частина штатного прикладного програмного забезпечення паралельних інтелектуальних комп'ютерів сімейства Інпарком: гібридної робочої станції Інпарком\_g, персонального гібридного комп'ютера Інпарком\_pg та персонального комп'ютера Інпарком\_xr з новітнім хост-процесором Intel Xeon Phi.

У розділі також розглянуто математичне моделювання задачі стійкості композитних матеріалів із застосуванням тривимірної моделі «волокон кінцевих розмірів». Задача зводиться до розв'язування часткової узагальненої АПВЗ для стрічкових симетричних додатно визначених матриць гібридним алгоритмом методу ітерацій на підпросторі. Обчислені мінімальні власні значення дають можливість визначити величини критичних параметрів стійкості шарувато-композитного матеріалу при стисненні поверхневим навантаженням. Експериментальне дослідження здійснювалось на паралельних комп'ютерах різної архітектури для

різних вихідних даних задач, зокрема для матриць з такими параметрами: порядок матриць – 12282; напівширина стрічки матриці А – 6212 та матриці В – 71; обсяг пам'яті – 2 Gb. В результаті розв'язання задачі гібридним алгоритмом отримано такі прискорення у порівнянні з послідовною версією алгоритму: на MIMD-комп'ютері Інпарком\_256, використовуючи 4 вузли (8 процесорів по 4 ядра), – в 7 раз; на гібридному комп'ютері Інпарком\_g – в 18 і 33 разів, використовуючи один і два GPU відповідно. За паралельним алгоритмом на Інпарком\_hr з новітнім хост-процесором Intel Xeon Phi. Тут також розглянуто математичне моделювання задачі стійкості композитних матеріалів із застосуванням тривимірної моделі «волокон кінцевих розмірів».

**Основні результати, отримані в роботі, які визначають її наукову новизну та практичну значимість.** В роботі отримано нові результати, які виносяться на захист:

– розроблено та досліджено гібридний алгоритм поперемінно-трикутного методу для дослідження та розв'язування часткової (мінімальне власне значення) узагальненої АПВЗ розріджених симетричних додатно визначених матриць;

– побудовано та обґрунтовано гібридний алгоритм методу спряжених градієнтів для дослідження та розв'язування часткової (мінімальне власне значення) узагальненої АПВЗ розріджених симетричних додатно визначених матриць;

– створено та досліджено гібридний алгоритм методу ітерацій на підпросторі для дослідження та розв'язування часткової узагальненої АПВЗ (декілька мінімальних власних значень) розріджених симетричних додатно визначених матриць;

– отримано оцінки коефіцієнтів прискорення розроблених гібридних алгоритмів;  
– розроблено програмне забезпечення для дослідження і розв'язання часткової АПВЗ розріджених матриць на гібридних комп'ютерах та паралельних комп'ютерах з новітніми хост-процесорами Intel Xeon Phi;

– проведено апробацію розробленого алгоритмічного та програмного забезпечення при математичному моделюванні задачі стійкості конструкцій.

#### **Ступінь обґрунтованості наукових положень**

Автором створено нові оригінальні гібридні алгоритми для дослідження та розв'язування алгебраїчної проблеми власних значень із розрідженими матрицями. Основні наукові результати дисертаційної роботи повністю обґрунтовані. Достовірність отриманих в дисертації положень та висновків забезпечується доведеними в роботі теоремами та результатами чисельних обчислювальних експериментів. Новизна їх підтверджується детальним аналізом результатів попередніх досліджень по тематиці дисертаційної роботи, публікаціями основних результатів у фахових виданнях.

**Практичне значення дисертаційної роботи** полягає розробці алгоритмічно-програмне забезпечення з дослідження та розв'язання часткової узагальненої АПВЗ

для розріджених матриць входить до складу бібліотеки інтелектуальних програм з обчислювальної математики Inparlib\_G, що є штатним програмним забезпеченням інтелектуальних комп'ютерів гібридної архітектури – робочої станції Інпарком\_g з графічними процесорами та гібридного персонального комп'ютера Інпарком\_pg, а також апробовано на суперкомп'ютері СКІТ-4 в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. Алгоритмічно-програмне забезпечення використано в Інституті механіки імені С.П. Тимошенка НАН України при моделюванні задачі стійкості композитного матеріалу. Може використовуватися при чисельному моделюванні явищ та процесів, де розв'язування АПВЗ є одним з етапів математичного моделювання, а також у навчальних спецкурсах з методів паралельних обчислень.

На створені комп'ютерні програми отримані Свідоцтва про авторські права.

#### **Повнота викладення результатів**

Основні результати дисертації О.В.Чистякова достатньо повно викладено у фахових виданнях.

Особистий внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, відображено у дисертації та авторефераті. Основні наукові результати отримано дисертантом особисто.

Із більшістю результатів опонент вже був ознайомлений попередньо на міжнародній науковій конференції «Питання оптимізації обчислень», в якій Олексій Чистяков приймав активну участь 2017 року.

Дисертаційна робота прекрасно написана і зі смаком оформлена, що свідчить про математичну культуру і високий кваліфікаційний рівень О.В.Чистякова.

Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на семінарах, вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. Автореферат правильно і досить повно передає зміст дисертації. Дисертацію оформлено згідно вимог ДАК України.

#### **Зауваження до дисертації**

- теоретичне дослідження ефективності гібридних алгоритмів отримано відносно архітектури паралельного комп'ютера MIMD у якого CPU з'єднані у гіперкуб з приєднанням графічних прискорювачів, однак доцільно було б провести і теоретичні порівняння з іншими архітектурами обчислювальних систем ;
- в роботі детально досліджено обчислювальну складність запропонованих гібридних алгоритмів, але бажано було б дати і апріорний аналіз точності алгоритмів на основі зворотнього аналізу похибок.
- хотілося б мати і спрощені асимптотичні оцінки коефіцієнта прискорення в теоремах 2.1 та 2.2 придатні для широкого кола користувачів

В тексті зустрічаються орфографічні помилки, описки і неточності, але їх кількість невелика.

На стр. 30 «Крім того, не враховуються архітектурні особливості паралельних комп'ютерів, при врахуванні яких можна значно підвищити швидкість розв'язування задач.»

Стр 31 «... масивно-паралельні прискорювачі обчислень...»

А на стр.59 у теоремі 2.1. є блоки з (24), а однак сама формула (24) не виписана.

На стр 70 Теорема 2.3 також посилається на згадані блоки з (24).

Наведені зауваження не впливають на загальну високу позитивну оцінку роботи.

**Висновки.** В цілому дисертація О.В.Чистякова є завершеною науковою працею. В роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, що є суттєвими для розвитку теорії чисельних методів та програмного забезпечення гібридних обчислювальних систем.

За актуальністю теми, обсягом проведених досліджень, новизною отриманих наукових результатів та їх практичною значимістю подана дисертація повністю відповідає вимогам до кандидатських дисертацій та пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор – Олексій Валерійович Чистяков заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.05.02 – «математичне моделювання та обчислювальні методи» і ступеня доктора філософії.

Офіційний опонент  
Університет Казимира Великого,  
м. Бидгощ, Польща, Інститут механіки і  
прикладної інформатики  
доктор фіз.-мат. наук, професор

Недашковський М.О.

UNIWERSYTET KAZIMIERZA WIELKIEGO  
Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki  
INSTYTUT MECHANIKI I INFORMATYKI STOSOWANEJ  
ul. Kopernika 1, 85-074 Bydgoszcz  
tel. 52 3257611, 3257612  
fax: 52 325 76 44

DYREKTOR  
Instytutu Mechaniki i Informatyki Stosowanej  
  
Prof. dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek