

## **ВІДГУК**

офіційного опонента кандидата фізико-математичних наук, доцента  
Астіоненка Ігоря Олександровича на дисертаційну роботу  
Козуба Владислава Юрійовича «Скінченно-елементний аналіз з  
використанням паралельних технологій», подану на здобуття наукового  
ступеня доктора філософії зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

### **Актуальність теми дослідження**

Створення новітніх зразків продукції машинобудування, будівельних споруд, транспортних систем неможливе без застосування сучасних інформаційних технологій. Побудова математичних моделей дозволяє істотно скоротити витрати часу та ресурсів на проектування складних інженерних систем. Одним з найбільш поширених на практиці методів, що використовуються для моделювання та дослідження властивостей конструкцій та їх відповідності вимогам замовника, є метод скінченних елементів. За допомогою цього методу можна чисельно розв'язувати диференціальні та інтегральні рівняння з достатньою точністю. Особливо це стосується тривимірних стаціонарних та нестаціонарних задач механіки.

Побудова розв'язувальних співвідношень, що враховують фізико-механічні властивості, особливості геометричних параметрів, прогнозовані умови експлуатації конструкцій потребують розробки ефективних алгоритмів розв'язання задач при використанні потужних обчислювальних систем.

Одним з найбільш перспективних підходів, що дозволяє найбільш повно використовувати можливості сучасних комп'ютерних систем, є паралелізація обчислювальних процесів. Значне поширення кількості та якості паралельних обчислювальних систем різних типів робить цю задачу ще більш актуальною.

Саме тому дисертаційне дослідження Козуба В.Ю., яке присвячено створенню нових підходів до розробки програмного забезпечення із

застосуванням паралельних обчислень, є актуальним, своєчасним і таким, що повністю відповідає спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

### **Структура роботи**

У вступі дисертаційної роботи представлено обґрунтування теми дослідження, визначено мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, висвітлено наукову новизну одержаних результатів. Наведено дані про апробацію та публікацію результатів дисертаційного дослідження.

У першому розділі міститься огляд публікацій, присвячених проблемам використання методу скінченних елементів для розв'язання задач в різних галузях науки, засобам підвищення ефективності методів скінченно-елементного дослідження фізико-механічних процесів, побудові нових розрахункових алгоритмів розв'язання нелінійних задач. Проведено аналіз методів паралельного програмування в рамках розв'язування складних задач фізики та механіки складних структур. Розглянуто особливості паралелізації скінченно-елементних розрахунків на всіх етапах розв'язування задачі за умови оптимізації використання потужності обчислювальних пристроїв.

Другий розділ присвячений розробці розв'язувальних рівнянь на основі моментної схеми скінченних елементів для задач пружності та термопружності. На основі представленої методики побудовано матриці жорсткості для слабо-стисливих ізотропних та анізотропних твердих тіл. На основі варіаційного рівняння теплопровідності побудовано матриці теплопровідності твердих тіл з урахуванням анізотропії теплофізичних властивостей. Представлені підходи дозволяють будувати тривимірні моделі конструкцій та уникнути використання гіпотез, що спрощують постановку задач. Крім того, запропонований підхід дозволяє формувати розв'язувальні рівняння для шаруватих тіл з урахуванням анізотропії теплофізичних та механічних властивостей шарів.

У третьому розділі представлено паралельні алгоритми формування матриць жорсткості та теплопровідності скінченного елемента на основі ППП «MIRELA+». Представлено метод використання паралельних обчислень у постпроцесорі при виведенні результатів розв'язку у вигляді параметрів напруженого стану для подальшого аналізу. Для розв'язку нелінійних задач розроблено паралельний алгоритм обчислення нелінійних добавок вузлових навантажень скінченного елемента за модифікованою схемою метода Ньютона-Канторовича. Розроблено підхід до розв'язання зв'язаної задачі термопружності. Розроблена програмна реалізація запропонованої методики розв'язання задач базується на використанні бібліотеки паралельного програмування в системах зі спільною пам'яттю OpenMP.

У четвертому розділі на основі використання розробленої методики одержані розв'язки практичних задач пружності та термопружності для шаруватих конструкцій з анізотропними шарами. Наведено розв'язок зв'язаної задачі термопружності для конструкції з анізотропними та ізотропними шарами. Отримано поля температур та напружень. Для оцінки збіжності розрахунків проаналізовано розв'язки для різних сіток скінченних елементів, а також досліджено вплив використання паралельних технологій на продуктивність розв'язування задач методом скінченних елементів.

У висновках підсумовано наукову новизну та практичну важливість роботи і надано рекомендації для подальшого розвитку в цьому науковому напрямку.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

У дисертаційній роботі вперше розроблено алгоритми паралельних обчислень матриць жорсткості скінченних елементів на основі моментної схеми скінченних елементів для задач пружності; вперше розроблено паралельні алгоритми обчислення матриць теплопровідності для розв'язання задач теплопровідності; отримали подальший розвиток алгоритми паралельних обчислень у застосуванні до розв'язування лінійних та

нелінійних задач; вперше розроблено застосунок з використанням алгоритмів паралельних обчислень в рамках пакету прикладних програм «МІРЕЛА+» для розв'язання задач термопружності конструкцій.

### **Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях**

За результатами досліджень опубліковано п'ять наукових робіт, що висвітлюють основний зміст дисертації, серед яких одну статтю опубліковано у міжнародному виданні. Чотири статті опубліковано у наукових виданнях України, що включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії; також опубліковано п'ять робіт апробаційного характеру.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Розроблена у роботі методика застосування паралельних обчислень в методі скінченних елементів та її програмна реалізація дозволять оптимізувати проєктні розрахунки конструкцій різноманітного призначення. Зокрема, запропонований підхід використано у пакеті прикладних програм «МІРЕЛА+», що призначений для визначення напружено-деформованого стану конструкцій з еластомерів та композитів.

### **Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації**

Проте окремі моменти представленої роботи мають дискусійний характер і потребують уточнень або додаткової аргументації.

1. У роботі не зазначено, як зростання потужності обчислювальних систем впливає на ефективність використання паралельних технологій.
2. Автор зазначає, що паралелізація обчислювальних процесів для вже існуючої архітектури програмного забезпечення є складною задачею. Однак, необхідно більш детально розглянути, які саме проблеми виникають при паралелізації і як їх можна вирішити.

3. У розділі 4 містяться розв'язки практичних задач пружності та термопружності, зокрема, для шаруватих конструкцій з анізотропними шарами. Проте не зазначено граничні умови на контактних поверхнях шарів конструкції для задач термопружності.

4. Було б доцільно більш детально розглянути алгоритми, що використані для розв'язку зв'язаної задачі термопружності шаруватої анізотропної конструкції, а також порівняти результати чисельних розв'язків з експериментальними даними або аналітичними розв'язками аналогів.

### **Загальна оцінка дисертації.**

В цілому зауваження та рекомендації не впливають на загальну позитивну оцінку представленої роботи. Дисертація Козуба Владислава Юрійовича «Скінченно-елементний аналіз з використанням паралельних технологій» є актуальною, завершеною самостійною науковою роботою, що має наукову новизну, цінність, теоретичну та практичну значимість, характеризується повнотою та аргументованістю викладення основного змісту як роботи, так і опублікованих праць. Дисертація відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. №44), а її автор, Козуб Владислав Юрійович, за результатами публічного захисту наукових досліджень у формі дисертації, на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

**ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:**

Кандидат фізико-математичних наук,  
доцент

Ігор АСТІОНЕНКО