

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Мартинюка Івана Юрійовича**
**«Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах деформування,
континуального руйнування та формозмінення просторових тіл
неканонічної форми та складної структури»**, що подана на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.23.17 – будівельна механіка

Сучасний розвиток науки й техніки, в якості однієї з найбільш важливих, висуває проблему підвищення міцності та надійності інженерних конструкцій, забезпечення безпеки людей і навколишнього середовища. Відповідальні елементи конструкцій у вигляді просторових тіл неканонічної форми та складної структури, використовуються у різних сучасних технічних галузях. Під дією зовнішнього термосилового навантаження в них можуть накопичуватися пластичні деформації та деформації повзучості. Розвиток непружних деформацій супроводжується накопиченням пошкоджень у матеріалі, що може призвести до їх руйнування.

В теперішній час, задачі в'язко пружно-пластичного деформування та формозмінення тіл неканонічної форми та складної структури з урахуванням пошкоджуваності матеріалу недостатньо досліджені. Наявний досвід розв'язання задач повзучості свідчить, що навіть незначні похибки у визначенні напружень, пов'язані з їх некоректним урахуванням, призводять до суттєвих помилок у вирахуваннях величинах розрахункового та залишкового ресурсів. Тому, вдосконалення та розробка методів чисельного розв'язання задач в'язко пружно-пластичного деформування, формозмінення, континуального руйнування масивних і комбінованих тіл неканонічної форми та складної структури визначення на цій основі ресурсу і несучої здатності відповідальних об'єктів сучасної техніки, що знаходяться під впливом доволі розподілених в просторі та часі силових, кінематичних й температурних навантажень є **актуальною проблемою будівельної механіки.**

Дисертаційна робота здобувача Мартинюка Івана Юрійовича присвячена розв'язанню важливої науково-прикладної задачі щодо визначення напружено-деформованого стану (НДС) просторових тіл складної форми з урахуванням процесів в'язко пружно-пластичного деформування та континуального руйнування для оцінки ресурсу елементів конструкцій, які перебувають під впливом тривалого термосилового навантаження.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури в межах держбюджетних і відомчих науково-дослідних робіт, що виконувались в цьому закладі за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки «Нові комп'ютерні засоби та технології інформатизації суспільства».

Розглядувані в роботі об'єкти – масивні, тонкостінні та комбіновані тіла неканонічної форми та складної структури.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в створенні узагальненого чисельного підходу до розв'язання актуальних задач математичного моделювання процесів нелінійного деформування, формозмінення, континуального руйнування тонкостінних, масивних, комбінованих тіл неканонічної форми та складної структури, що знаходяться під впливом довільно розподілених в просторі й часі силових, кінематичних і температурних навантажень з метою оцінки напружено-деформованого стану та несучої здатності об'єктів сучасної техніки.

Достовірність наукових результатів дисертаційної роботи забезпечується коректним використанням основних положень механіки деформівного твердого тіла та застосуванням моментної схеми скінченних елементів (МССЕ), ретельною апробацією чисельних процедур, алгоритмів і програмного забезпечення, зокрема дослідженнями збіжності чисельних розв'язків шляхом згущення скінчено-елементної сітки, а при покроковій апроксимації тривалих процесів деформування – за силовими та часовими параметрами навантажень, узгодженням отриманих результатів з відомими експериментальними даними та розв'язками тестових задач.

Дисертація складається з вступу, семи розділів, списку використаних літературних джерел, висновків і додатку, який містить документи, що підтверджують впровадження результатів роботи.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими планами, сформульовані мета та задачі досліджень, визначені наукова новизна й практичне значення, обґрунтована достовірність і приведені дані про апробацію результатів дисертації й особистий внесок здобувача.

У першому розділі приведений детальний аналіз літературних джерел показав, що одним з напрямків розвитку методу скінчених елементів (МСЕ) є універсалізація його застосування для моделювання масивних і тонкостінних конструкцій. Зазначене, наприклад, може бути реалізоване шляхом зменшення обчислювальної складності при оптимізації числових алгоритмів розв'язання нелінійних рівнянь. Незважаючи на суттєві наукові досягнення чисельного моделювання, питання ефективного застосування МСЕ у формі напіваналітичного методу скінчених елементів (НМСЕ) до задач термопружно-пластичного аналізу, зокрема й щодо об'єктів із криволінійною геометрією та просторовою неоднорідністю матеріалу, залишаються недостатньо вивченими. Цим обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи та вибір автором методів дослідження.

У другому розділі представлені універсальні рівняння скінчених елементів, що спираються на вихідні співвідношення теорії пружності, пружнопластичності та повзучості з пошкодженнями, які спрощують розрахунки масивних і тонкостінних призматичних тіл складних форм під довільним навантаженням. Запропоновані модифікації для призматичних скінчених елементів значно підвищують здатність алгоритмів аналізувати НДС об'ємних тіл зі змінними та усередненими параметрами, забезпечуючи досягнення оптимальних результатів за мінімальною кількістю обчислень. Приведені підходи до обчислення коефіцієнтів матриці жорсткості та вузлових реакцій скінчених елементів підтверджують можливість розв'язання широкого спектру задач. Загалом, представлений підхід робить

вагомий внесок у створення надійної основи для розрахунку НДС просторових конструктивних елементів, підданих довільно розподіленим навантаженням.

У третьому розділі приведено алгоритм чисельного розв'язання систем лінійних і нелінійних алгебраїчних рівнянь. Також у ньому обґрунтовано вибір оптимальної системи координатних функцій, застосованої для поліноміального розкладу переміщень.

У четвертому розділі отримано розв'язувальні рівняння напіваналітичного методу скінченних елементів для геометрично нелінійних задач. Основні результати дослідження демонструють наукову новизну та практичну цінність, забезпечуючи підвищення точності та ефективності чисельного моделювання складних механічних систем. Розроблено нові скінченні елементи, які базуються на високоефективній моментній схемі скінченних елементів (МССЕ) з урахуванням формозмінення. Це забезпечило суттєве покращення точності визначення НДС призматичних тіл, зокрема зі змінними фізико-механічними властивостями. Розроблено універсальний скінченний елемент у вигляді криволінійної призми, який дозволяє моделювати об'єкти зі змінними геометричними та фізичними характеристиками. Використання білінійного закону розподілу переміщень і температур сприяло спрощенню обчислювальних алгоритмів та оптимізації аналізу.

У п'ятому розділі продемонстрована універсальність розробленого обчислювального комплексу, що забезпечується модульною організацією нових основних алгоритмів, можливістю використання різних методів дискретизації, а також представленням результатів. Програмний комплекс, адаптований до обчислювальних можливостей сучасних персональних комп'ютерів, призначений для моделювання та аналізу призматичних тіл складної форми та структури. Описано архітектуру обчислювального середовища, яка охоплює модулі введення, обробки та виведення даних, а також алгоритми розв'язання систем лінійних і нелінійних рівнянь. Результати, отримані під час моделювання задач, підтвердили ефективність

програмного комплексу для аналізу масивних і тонкостінних призматичних тіл, а також його здатність задовольняти сучасним вимогам до програмного забезпечення щодо розрахунків конструкцій на міцність.

У шостому розділі проведено дослідження ефективності використання напіваналітичного методу скінченних елементів при аналізі криволінійних призматичних об'єктів у межах пружної та пружно-пластичної постановки задач. Описано реалізацію зазначеного підходу з використанням сучасного програмного забезпечення. Розглянуто особливості чисельного аналізу збіжності напіваналітичного методу скінченних елементів. Здійснено комплексне порівняння ефективності скінченних елементів із урахуванням змінних та усереднених механічних і геометричних параметрів. Додатково проведено аналіз збіжності розкладів у ряди Фур'є, поліноміальних апроксимацій і методу скінченних елементів. Окремо досліджено збіжність класичного та напіваналітичного методів скінченних елементів для моделювання призматичних тіл зі змінними та усередненими характеристиками. Надано обґрунтування достовірності отриманих результатів при застосуванні напіваналітичного методу скінченних елементів.

Запропонований підхід і розроблений на цій основі програмний комплекс мають значний науковий та практичний потенціал, що дозволяє їх ефективно застосовувати для чисельного аналізу складних конструкцій із довільними граничними умовами.

У сьомому розділі представлено результати аналізу напружено-деформованого стану призматичних конструкцій, зокрема Т-подібного хвостовика лопатки ротора парової турбіни, демпфуючого елемента та елемента кріплення поворотного механізму. Проведено дослідження впливу товщини фланця на напружено-деформований стан корпусної деталі. Реалізовано чисельне моделювання процесу деформування та оцінювання ресурсу призматичних тіл в умовах термо пружно-пластичного навантаження. Здійснено моделювання деформування та прогнозування ресурсу хвостовика лопатки газової турбіни, а також моделювання процесів

деформації й оцінки терміну експлуатації самої лопатки. Проведені дослідження продемонстрували широкі можливості розробленого підходу при розв'язання в просторовій постановці нових, практично важливих задач пружного та пружно-пластичного деформування призматичних тіл складної форми. Отримані нові дані про закономірності поведінки відповідальних конструкцій в процесі навантаження, обумовлені врахуванням їхніх фізичних та геометричних параметрів.

У висновках сформульовані основні результати дисертації.

До виконаної дисертаційної роботи можна вказати на такі зауваження:

1. В задачах дослідження достовірності розроблених скінченних елементів при порівнянні з відомими розв'язками розглядаються приклади з навантаженнями розподіленими по всій поверхні конструкції. Однак, відсутні приклади розрахунків під дією локалізованих навантажень. Напевне, цікавими були б дослідження їх впливу на роботу загального просторового елемента;

2. При викладенні методики регуляризації матриць систем нелінійних рівнянь, на мій погляд, недостатньо чітко сформульовані границі зменшення величини модуля пружності;

3. Збіжність, розроблених методів, в основному визначалась шляхом порівняння отриманих результатів з іншими підходами або з аналітичними розв'язками. Напевне, таке обґрунтування не може гарантувати стовідсоткової впевненості в коректності отриманих результатів числових розрахунків;

4. У дисертаційній роботі, при порівнянні результатів розрахунків запропонованим підходом з відомими даними, досить часто використовується термін «добре узгодження». Проте, коректніше було б вказувати на відсоток не співпадіння отриманих числових значень у співставленні з відомими розв'язками.

Виказані зауваження, ні в якій мірі, не впливають на загальну позитивну оцінку, здобутих, автором у дисертаційної роботи, результатів.

Практичне значення результатів роботи і використання результатів досліджень.

Полягає у розробці ефективного підходу щодо розв'язання нових складних задач в'язко пружно-пластичного деформування, формозмінення, континуального руйнування просторових тіл неканонічної форми та складної структури, реалізованої у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення. Запропонований підхід, що може застосовуватись в наукових і проектно-конструкторських установах, характеризується високим ступенем універсальності та придатний для практичного використання, зокрема в галузях: будівництва, машинобудування тощо. Прикладна ефективність методики підтверджується результатами чисельного аналізу конкретних інженерних об'єктів, що засвідчує її практичну цінність та потенціал широкого впровадження.

Результати виконання дисертаційної роботи використані в науково-дослідних працях в НДІБМ КНУБА і в навчальному процесі на кафедрі будівельної механіки КНУБА.

Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на багатьох міжнародних наукових конференціях. Дисертаційна робота також доповідалась на семінарах провідних наукових установ і навчальних закладів України.

Викладення змісту роботи є послідовним і дозволяє скласти повне уявлення про процес і результати дослідження. Робота акуратно оформлена й добре проілюстрована відповідними рисунками.

Основні наукові результати достатньо повно викладено в наукових публікаціях автора. Зміст реферату відповідає основним положенням дисертаційної роботи.

Загальний висновок по дисертаційній роботі.

Дисертаційна робота здобувача Мартинюка І. Ю. присвячена вирішенню актуальних питань чисельних досліджень деформування, формозмінення з урахуванням континуального руйнування просторових тіл

складної форми та структури є **завершеною науково-дослідною роботою**, що виконана на високому науковому рівні.

За своїм теоретичним й практичним значенням представлений у дисертаційній роботі результати можна кваліфікувати як **вирішення важливої науково-технічної проблеми**, що полягає в розробці на основі напіваналітичного методу скінчених елементів ефективного чисельного підходу до розв'язання задач деформування, формозмінення та континуального руйнування просторових тіл і визначення на цій основі несучої здатності та ресурсу елементів конструкцій неканонічної форми та складної структури, що знаходяться під впливом термосилових навантажень.

Дисертаційна робота «Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах деформування, континуального руйнування та формозмінення просторових тіл неканонічної форми та складної структури» відповідає п. 7-9 Постанови Кабінету Міністрів України від 17. 11. 2021 р. за № 1197 “Про порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, а її автор Мартинюк Іван Юрійович **заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук** за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Офіційний опонент –

завідувач кафедри мостів і тунелів, опору
матеріалів і будівельної механіки

Національного університету водного
господарства та природокористування,
доктор технічних наук, професор



Володимир ТРАЧ

Підпис В. Треча засвідчую:

учений секретар Національного університету
водного господарства та природокористування,
кандидат сільськогосподарських наук, доцент



Зоя САСЮК